

桥梁检测

Qiaoliang Jiance

张俊平 主编

姚玲森 主审

人民交通出版社



Qiaoliang Jiance

责任编辑 / 张征宇
封面设计 / 彭小秋

ISBN 7-114-04432-1



9 787114 044328 >

ISBN 7-114-04432-1

U · 03271

定价: 26.00 元



桥梁检测

Qiaoliang Jiance

— 张俊平 主编 姚玲森 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系高等学校本科教材,内容包括:绪论;桥梁结构试验的量测技术;桥梁静载试验;桥梁动载试验;混凝土无损检测技术;桥梁施工控制与长期监测;误差分析与数据处理;并附“回弹法测区混凝土强度换算表”和“超声-回弹综合法测区混凝土强度换算表”。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁检测/张俊平主编. -北京:人民交通出版社,
2002.9
ISBN 7-114-04432-1

I. 桥… II. 张… III. 桥-检测-高等学校-教材 IV. U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 065700 号

桥 梁 检 测

张俊平 主编

姚玲森 主审

正文设计:彭小秋 责任校对:戴瑞萍 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:290 千

2002 年 10 月 第 1 版

2002 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—4000 册 定价:26.00 元

ISBN 7-114-04432-1

U·03271

前 言

近 20 年来,随着桥梁建设事业的飞速发展,新结构、新材料、新工艺不断涌现;同时,桥梁结构的使用荷载日益增大,大批既有桥梁结构也进入了老化期,为了确保桥梁结构的安全运营,对桥梁检测工作提出了更高的要求,桥梁检测工作亦由此愈发显得重要。另一方面,随着自动化技术的发展以及计算机的普及应用,测试技术、分析手段也取得了长足的进展。基于此,编者根据多年教学体会和工程实践的经验,汲取较为先进成熟的测试技术成果,参阅借鉴国内外有关教材和参考书,力求编写出一本既适合本科教学、又适用于生产实践需要的桥梁检测教材。

本书由张俊平主编,具体分工如下:第一、三章,张俊平;第二章,蔡卡宏;第四章,张俊平、杨哲群;第五章,李永河;第六、七章,姜海波,全书由张俊平统稿。著名桥梁专家、同济大学姚玲森教授欣然应邀担任了本书的主审,提出了许多宝贵的意见和建议,在此,诚致深深的谢意。

限于编者水平和时间,谨请使用本书的师生与读者批评指正,使得本书在教学实践与生产实践中日臻完善。

编 者

2002 年 4 月于广州大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 桥梁试验的意义与分类	1
第二节 桥梁检测的工作内容	2
第二章 桥梁结构试验的量测技术	5
第一节 概述	5
第二节 应变电测技术	7
第三节 常用机测仪表的构造及使用方法	25
第四节 振动测量的传感器	32
第三章 桥梁静载试验	41
第一节 静载试验的方法与程序	41
第二节 桥梁结构静载试验的方案设计	43
第三节 试验现场组织	49
第四节 桥梁桩基础静载试验	51
第五节 静载试验数据整理分析	57
第六节 静载试验实例	65
第四章 桥梁动载试验	77
第一节 动载试验的方法与程序	77
第二节 桥梁结构动力响应的测试	79
第三节 动测数据分析与评价	87
第五章 混凝土无损检测技术	93
第一节 概述	93
第二节 回弹法测混凝土强度	96
第三节 混凝土超声检测技术基础	103
第四节 超声-回弹综合法检测混凝土强度	106
第五节 超声法检测混凝土缺陷	109
第六节 混凝土钻孔灌注桩完整性检测	118
第七节 局部破损检测方法简介	127
第八节 无损检测实例	131
第六章 桥梁施工控制与长期监测	138
第一节 桥梁施工控制的基本概念	138
第二节 桥梁施工控制的工作内容	140
第三节 桥梁施工控制的理论与方法简介	142
第四节 桥梁结构长期监测与健康诊断技术	150
第七章 误差分析与数据处理	154

第一节	测定值的误差	154
第二节	测定结果的误差估计	156
第三节	试验曲线与经验公式	161
第四节	回归分析方法	163
附表 1	回弹法测区混凝土强度换算表	168
附表 2	超声 - 回弹综合法测区混凝土强度换算表	174
主要参考书目		181

第一节 桥梁试验的意义与分类

在科学技术的发展过程中,科学试验起着非常重要的作用。从土木工程设计计算理论的演变历史来看,每一种理论体系的建立和发展,一般都和大量的科学试验、生产实践密切联系。试验研究对于推动和发展结构设计计算理论、解决生产实践中出现的疑难问题往往起到了重要的作用。

在桥梁工程的发展中,桥梁试验也起到了同样重要的作用。大量的试验研究,成为促进桥梁结构设计计算理论、设计方法不断发展的重要因素之一。桥梁试验是对桥梁原型结构或桥梁模型结构直接进行的科学试验工作,包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等内容的一系列工作。桥梁原型试验也称之为桥梁检测,其目的是通过试验,掌握桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态,判定桥梁结构的承载能力和使用条件,检验设计与施工质量;桥梁模型试验的目的是研究结构的受力行为,探索结构应力、应变的内在规律,为设计施工服务。随着交通事业的蓬勃发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,桥梁工程的试验技术日益受到人们的重视,并不断得到发展和提高。桥梁试验的任务主要包括以下几个方面。

1. 确定新建桥梁结构的承载能力和使用条件。对于重要的桥梁结构在建成竣工后,通过桥梁试验考察该桥的施工质量与结构性能,判定桥梁结构的实际承载能力,为竣工验收、投入运营提供科学的依据。对于新型或复杂的桥梁结构,通过系统的桥梁试验,可以掌握结构在荷载作用下的实际受力状态,探索结构受力行为的一般规律,为充实和发展桥梁结构的设计计算理论积累科学的资料。

2. 评估既有桥梁的使用性能与承载能力。对于既有桥梁结构在运营期间,因受水害、地震等自然灾害而损伤,或因设计施工不当而产生严重缺陷,或因使用荷载大幅度增长而严重超过设计荷载等级,通常通过桥梁试验来评估既有桥梁的使用性能与承载能力,为既有桥梁养护、加固、改建或限载对策提供科学的依据。这对于缺乏完整技术资料的既有桥梁更为必要。

3. 研究结构(构件)的受力行为,总结结构受力行为的一般规律。随着桥梁工程的不断发展,新结构、新材料、新工艺的推广应用,原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为了修改、完善既有的规范、规程,指导设计与施工工作,就需要进行大量的研究性试验。

在实际工作中,桥梁试验的种类很多,按照试验的目的与要求分类,可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。研究性试验的目的是为了建立或验证结构设计计算理论和经验公式,

或验证某一结构理论体系中的科学假设判断的可靠性。研究性试验一般把对结构或构件的主要影响因素作为试验参数,试验结构的设计与数量均应按照具体研究目的的需要确定。根据实际情况,试验可在原型结构上进行,也可在模型结构上进行。研究性试验一般多采用模型结构,在专门的试验室内进行,利用特定的加载装置,以消除或减少外界因素的干扰影响,同时突出所要研究的主要因素。通过系统的模型试验,对测试资料数据加以分析论证,从而揭示出具有普遍意义的规律。生产鉴定性试验具有直接服务于生产实践的意义,一般以原型结构作为试验对象,在现场进行试验,根据一定的规范、标准的要求,按照有关设计文件,通过试验来确定结构的实际承载能力、使用性能和使用条件,检验设计施工质量,提出桥梁养护、加固、改建、限载对策,有效地保证桥梁结构的安全使用。生产鉴定性试验也称之为桥梁检测,包括静载试验、动载试验、无损检测与长期监控测试四个方面。在桥梁试验中,原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利的影响因素,如对一些大型桥梁进行多因素的研究性试验,有时是难以实现的。因此,结合原型桥梁进行模型试验往往成为科技工作者的一种有效手段,可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系,探索结构行为的普遍规律,推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。

根据试验荷载作用的性质,桥梁试验可分为静荷载试验和动荷载试验。桥梁静载试验是将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置而测试结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量的试验项目,从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是利用某种激振方法激起桥梁结构的振动,测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、行车响应等参量的试验项目,从而判断桥梁结构的整体刚度、行车性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同,是两种性质的试验,但对于全面分析掌握桥梁结构的工作性能是同等重要的。

就试验对结构产生的后果来说,桥梁试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。一般情况下,鉴定性试验多为非破坏性试验。但在某些情况下为了达到预定的试验目的,往往需要进行破坏性试验,以掌握试验结构由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时的结构行为、破坏形态等试验资料。实际上,原型结构的破坏试验,不论在费用上还是在方法上都存在一些具体的问题,特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此,破坏试验一般均以模型结构为对象,在实验室内进行,以便能够较为方便可行地进行加载、控制、量测、分析,从而总结出具有普遍意义的规律,推广应用于原型结构。

按试验持续时间的长短,可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法,只有那些必须进行长期观测的现象,如混凝土结构的收缩和徐变性能、桥梁基础的沉降等,才采用长期试验方法。此外,对于大型桥梁结构或新型桥梁结构常常采用长期观测或组织定期的检测,以积累这些结构长期使用性能的资料。

总之,结合具体的试验目的及要求,可选用一种或几种试验方法。在选择时应讲求经济成本,一般能用模型代替的,就不搞大规模的原型试验,通过非破坏性试验可以达到试验目的的,就不做破坏性试验。

第二节 桥梁检测的工作内容

桥梁检测的工作内容比较多,涉及到很多方面。从方法上来讲,分为静载试验、动载试验和无损检测;从时间上来看,分为短期试验和长期试验;从进行时期来看,分为成桥试验和施工

阶段监测控制。一般情况下,桥梁现场检测可分为三个阶段,即准备规划阶段、加载与观测阶段和分析总结阶段。

准备规划阶段是桥梁检测顺利进行的必要条件。该阶段工作包括桥梁设计文件、施工记录、监理记录、原试验资料、桥梁养护与维修记录等桥梁技术资料的收集;桥梁现状如桥面系、承重结构构件、支座、基础等部位的表观检查;设计内力计算、加载方案制定、量测方案制定、仪器仪表选用等方面;也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说,检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上,按照预定的试验方案与试验程序,利用适宜的加载设备进行加载,运用各种测试仪器,观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等,并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时,为了使某一加载、观测方案更为完善,可先进行试探性试验,以便更完满地达到原定的试验目的。需要强调的是,对于静载试验,应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较,以判断受力后结构行为是否正常,是否可以进行下一级加载,以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全,这对于存在病害的既有桥梁结构进行试验时尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料,受各种因素的影响,一般显得缺乏条理性与规律性,未必能深刻揭示试验结构的内在行为规律。因此,应对它们进行科学的分析处理,去伪存真、去粗取精,综合分析比较,从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号,有时还需按照数理统计的方法进行分析,或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理,或按照有关规程的方法进行计算。这一阶段的工作,直接反映整个检测工作的质量。测试数据经分析处理后,按照相关规范、规程以及检测的目的要求,对检测对象做出科学的判断与评价。全部检测工作体现在最后提交的试验研究报告中。

混凝土无损检测技术是桥梁检测技术中一项重要的内容。所谓混凝土无损检测技术,是在不破坏混凝土内部结构和使用性能的情况下,利用声、光、热、电、磁和射线等方法,测定有关混凝土性能的物理量,推定混凝土的强度、缺陷等的测试技术。混凝土无损检测技术与破坏试验方法相比,具有不破坏结构的构件、不影响其使用性能、可以探测结构内部的缺陷、可以连续测试和重复测试等特点。应用混凝土无损检测技术,可以检测混凝土的强度、弹性模量、裂缝的深度和宽度,可以检查钢筋的直径、位置和保护层厚度,并可以探知混凝土的碳化程度、钢筋的锈蚀程度和混凝土构件的尺寸等参数。混凝土无损检测技术,对于进行施工质量检查与管理,进行既有结构的养护维修管理,评定既有混凝土结构的强度、耐久性及损伤程度是非常重要的。

对于大跨度桥梁,由于施工周期长,外界因素变化较大,为了确保施工能够较准确地实现设计意图,避免一些随机因素如温度、湿度、材料参数、施工误差对桥梁施工过程和成桥后状态造成过大的影响,就需要在施工过程中对每一施工阶段桥梁的线形、应力、内力等参数进行实时在线监测控制,逐阶段与设计目标值进行比较,并预测下一施工阶段这些参量的变化态势,以便必要时修正设计计算参数,采取控制调整措施,以逼近设计目标值,这就是施工控制。施工控制对于大跨度桥梁的建造具有非常重要的意义。

混凝土桥梁的一些时效因素如收缩、徐变、基础沉降、温度变化,往往使桥梁结构产生附加

内力,可能造成桥面线形不平顺,严重时危及桥梁结构的安全运营。为了能够及时准确地掌握这些时效因素对结构的影响程度,了解这些时效因素对结构影响的变化趋势,就需要在一个相对较长的时期内定期测量桥梁结构的线形、应变、内力、裂缝等参量,并对这些参量进行综合分析,以判断桥梁结构的实际状态,这类测试我们称之为长期监控测试。除此之外,对于一些重要桥梁或新型桥梁结构也常常采用定期检测的方法来积累这些结构长期使用性能的资料,以使规范更臻完善。

综上所述,桥梁检测是一门直接服务于工程实践的技术学科,涉及到桥梁的设计计算理论、试验测试技术、仪器仪表性能、数理统计分析、现场试验组织等方面,具有较强的综合性、应用性和复杂性。近 20 年来,随着桥梁工程的飞速发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,桥梁荷载的不断趋于增大,以及大批既有桥梁结构进入老化期,因此桥梁检测工作就愈显重要,并对其提出了更高、更全面的要求;同时,随着自动化技术的不断发展及计算机的普及应用,使得测试技术、分析手段也取得了长足的进步。完全可以相信,桥梁检测将进一步地推动桥梁建设事业的发展,为确保桥梁安全运营、进行科学养护起到更加重要的作用。

第二章

桥梁结构试验的量测技术

QIAOLIANGJIEGOU SHIYAN DE LIANGCE JISHU

第一节 概 述

量测技术、仪器设备、测试元件是桥梁结构试验的重要技术保障,量测技术的科学性、准确性直接关系到桥梁结构试验能否达到预期的目的。在桥梁静载、动载试验中,测试的内容一般包括以下几个方面。

1. 作用力的大小,包括试验荷载的大小、一些构件的内力、支座反力、推力等的大小。
2. 结构截面上各种应力的分布状态及其大小。
3. 结构的各种静态变形,包括水平位移、竖向挠度、相对滑移、转角等。
4. 结构局部的损坏现象如裂缝的分布及其宽度、深度等。
5. 在动荷载作用下,要测定结构的动应力,或测定结构的自振特性、动挠度、加速度、衰减特性等。

为了测定上述的各项数据,在进行桥梁结构试验时需要使用相应的检测仪器,并要掌握量测仪器的基本性能和测量方法。

一、检测仪器的分类

检测仪器的分类方法很多,较为常用的分类方法有以下几种。

1. 按仪器的工作原理:分为机械式测试仪器、电测仪器、光学仪器、声学仪器、复合式仪器、伺服式仪器等。
2. 按仪器的用途:分为测力计、应变计、位移计、倾角仪、测振仪等。
3. 按测定的方法:分为平衡式和非平衡式。
4. 按结果的显示与记录方式:分为直读式、自动记录式、模拟式、数字式。
5. 按照仪器与结构的相对关系:分为附着式、接触式、手持式、遥测式等。

一般地,桥梁结构检测常用的仪器有电测仪器、光学仪器和机械式测试仪器。光学仪器如精密水准仪、全站仪等在测量学里已经详细地介绍了,本章主要介绍电测仪器和机械式测试仪器。

二、仪器的性能指标

仪器的性能指标一般包括以下几个方面。

1. 量程(测量范围):仪器的最大测量范围叫做量程。如百分表的量程一般有 5cm 和 10cm,千分表的量程有 3mm 和 5mm。

2. 最小分度值(最小刻度):仪器指示装置的每一最小刻度所代表的数值叫做最小刻度。百分表的最小刻度为 0.01mm,千分表的最小刻度为 0.001mm。

3. 灵敏度:被测结构的单位变化所引起仪器指示装置的变化数值叫做灵敏度。灵敏度与最小刻度互为倒数。

4. 准确度(精度):仪器指示的数值与被测对象的真实值相符合的程度叫做准确度。

5. 误差:仪器指示的数值与被测值之差叫做仪器的绝对误差。仪器的误差与仪器的准确度恰好相反。

6. 滞后:在恒定的条件和量程下,对同一输入值给出不同输出值的特性。

三、桥梁检测对仪器的要求

桥梁检测对仪器的要求包括以下几个方面。

1. 仪器的量程、准确度、灵敏度要根据检测的要求合理选用,仪器工作性能要稳定,抗干扰能力良好,在野外检测时这一点显得尤为重要。

2. 仪器使用方便,安装快捷,适应性强。

3. 仪器结构简单,经久耐用,无论是外包装还是仪器本身结构,都应具有良好的防护装置,便于运输,不易损坏。

4. 仪器轻巧,自重轻、体积小,便于野外桥梁检测时携带。

5. 仪器的多用途,所使用的仪器应具有多种用途。如应变仪,既可单点测量,也可多点测量,既可测应变也可测位移。

6. 使用安全。包括仪器本身不易损坏,不会危及操作人员的人身安全。

量测仪器的某些性能之间经常是互相矛盾的,如精度高的仪器,其量程较小;灵敏度高的,其适应性较差。因此在选用仪器时,应避繁就简,根据试验的要求来选用合适的仪器,灵活运用。目前应用于结构试验中的仪器,以电测类仪器较多,机械式仪器仪表已不能满足多点量测和数据自动采集的要求,从发展的角度看,数字化和集成化量测仪器的应用日益广泛,给量测和数据处理带来了方便。

四、仪器的计量标定

为了保证检测的数据准确性,在检测过程中使用的仪器设备必须对其进行计量标定。标定是统一量值确保计量器具准确的重要措施;是进行标准传递的重要形式;是为生产、科研、生活等提供计量保证的重要条件;也是实行国家监督的一种手段。通过计量标定,对仪器的性能进行评定,确定其是否合格,从而保证所用于量测的计量标准、检测仪表的量值在规定的误差范围内与国家计量基准的量值保持一致,达到统一量值的目的。仪器的标定可以分为强制标定和非强制标定两类。强制标定的仪器仪表实行定点、定期标定,非强制标定的仪器仪表可由使用单位依法自选定期标定。计量标定具有以下特点。

1. 标定的目的是确保量值的统一,主要是评定量测仪器的计量性能,确定仪器的误差大小、准确程度、使用寿命、安全性能等。

2. 标定的结论是要确定仪器是否合格,是否可以继续正常使用,是否达到国家计量标准。

3. 标定具有法制性,标定证书在社会上具有法律效力,标定的本身是国家对量测的一种监

督,标定结果具有法律地位和效力。

在桥梁检测中,以下常用仪器仪表应定期进行标定。

机械仪器的标定:如百分表、千分表、测力计的标定,回弹仪的率定。

电子仪器的标定:超声波仪超声时间的标定,应变仪、应变计(应变片)的标定,荷载传感器的标定。

光学仪器的标定:如精密水准仪、测距仪、激光挠度仪、倾角仪、读数显微镜等。

第二节 应变电测技术

结构在外力的作用下,内部会产生应力,而直接测定结构截面的应力比较困难,目前还没有较好的方法,一般的方法是测定应变,通过应力与应变的关系 $\sigma = E\varepsilon$ 间接测定应力。在应变测量中,应用最广泛的是应变电测技术。应变电测技术是凭借安装在试件上的应变片将力学量(如应变、位移等)转换成电阻变化,并用专门的仪器使其转换为电压、电流或功率输出,从而获得应变读数的测试方法,通常简称为电测技术或电测法。其转换过程如图 2-1 所示。

与其他测试方法比较,应变电测技术具有以下优点。

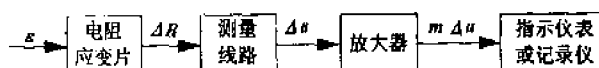


图 2-1 用电阻应变片测量应变的过程

(1)灵敏度高,测量速度快,测量结果精确、可靠。目前常用的应变仪和应变片可测得 1×10^{-6} 应变,有的甚至可精确到 0.5×10^{-6} 应变。

(2)易于实现测试过程中的全自动化数据采集、多点同步测量、远距离测量和遥控检测。

(3)应变片标距小、粘贴方便。测试时可不改变结构的原有应力状态,可以测量其他仪表(如机械式应变计)无法安装的部位处的应变或结构某个局部的应力。制成大标距时可以测量混凝土结构的应变。

(4)质量轻。可在动态应力分析方面发挥作用,能用于模型实验,也能直接用于运行中的机械和实体结构各部位的静、动态和瞬态应变量测,可测频带宽。

(5)适用范围广。可在高温($100 \sim 800^{\circ}\text{C}$)、低温($-100 \sim -70^{\circ}\text{C}$)、高压、高速、旋转和具有核辐射干扰等特殊条件下成功量测。

(6)使用广泛。根据应变原理可以制成不同形式的传感器,用于各种物理、力学参数的量测,易于实现整个测试系统的自动化和电气化。

(7)操作方便,测试方法易于掌握。

应变的电测方法虽然有很多优点,但也存在不足之处,如贴片工作量大,使用的导线多,易受温度和电磁场等的影响,特别是野外测量时对仪器的抗干扰性能要求高,应变片不能重复使用等。

一、电阻应变片

电阻应变片简称应变片或应变计。是电阻应变测试中,将应变转换为电阻变化的传感元件。它借助具有一定特性的粘结剂胶粘成型,并安装到所需测试的材料或结构上用以测量应变。电阻应变片除用于测量应变、温度、压力、裂纹等外,还大量用于制造各种用途的传感器。

1. 电阻应变片的工作原理

应变片测量应变的工作原理是基于金属丝的电阻随其机械变形而变化的一种物理特性。

如图 2-2 所示。取长度为 L , 直径为 D , 截面积为 A , 电阻率为 ρ 的金属丝, 则其电阻 R 为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

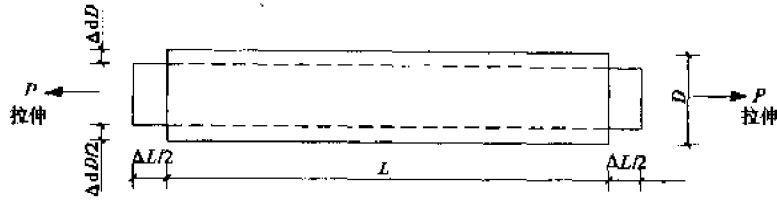


图 2-2 金属丝的应变原理

当金属丝受拉而伸长 ΔL , 则电阻的变化率为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2-2)$$

而

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 - \frac{\pi}{4} (D - \Delta D)^2}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

略去 ΔD^2 项, 则

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{\Delta D}{D} = 2\epsilon' = -2\mu\epsilon \quad (2-3)$$

式中: ϵ' ——电阻丝的横向应变。

由材料力学可知, 在一定范围内 $\epsilon' = -\mu\epsilon$, 将式(2-3)代入式(2-2), 得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon + 2\mu\epsilon = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon$$

令

$$K_0 = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)$$

则

$$\frac{dR}{R} = K_0\epsilon \quad (2-4)$$

式中: μ ——电阻丝材料的泊松比;

K_0 ——单电阻丝的灵敏系数。

K_0 与两个因数有关, 一个是电阻丝材料的泊松比, 由电阻丝几何尺寸改变引起, 当选定材料后, 泊松比为常数; 另一个是由电阻丝发生单位应变引起的电阻率的改变, 对大多数电阻丝而言也是一个常量。因此可以认为 K_0 是一个常数, 通常式(2-4)可写为

$$\frac{dR}{R} = K\epsilon \quad (2-5)$$

由此可见, 应变片的电阻变化率与应变值成线性关系。 K 通常由一批产品中抽样检验确定, 作为该批产品的灵敏系数。一般取 $K=2.0$ 左右。

2. 应变片的构造

应变片的种类繁多, 形式各种各样, 不过其基本结构则大同小异。图 2-3 所示是丝绕式电阻应变片的构造, 由敏感栅、粘合剂、基底、覆盖层和引出线几个主要部分组成。

(1)敏感栅: 是将应变变换成电阻变化量的敏感元件, 一般由金属或半导体材料如康铜、镍铬合金制成的单丝或栅状体。敏感栅的形状和尺寸直接应影响应变片的性能。栅长 L 和栅宽 B 即代表应变片的规格。

(2)基底和覆盖层: 主要起到定位和保护电阻丝的作用, 同时使电阻丝与被测试件之间绝

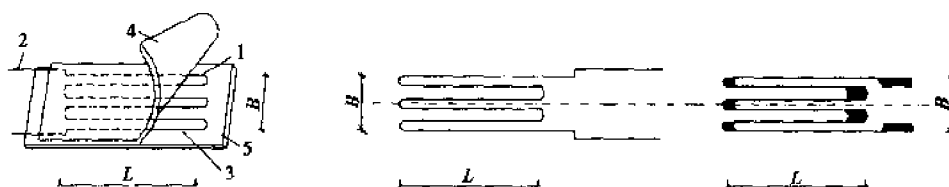


图 2-3 电阻应变片的构造

1-敏感栅;2-引出线;3-粘合剂;4-覆盖层;5-基底

缘。纸基常用厚度 0.015 ~ 0.02mm 高强度、绝缘性能良好的纸张制作,胶基用性能稳定、绝缘度高、耐腐蚀的聚合胶制作。

(3)粘合剂:它是一种具有一定绝缘性能的粘结材料,用于固定敏感栅在基底上或将应变片粘贴在试件上。

(4)引出线:一般采用镀银、镀锡或镀合金的软铜线制成,在制作应变片时与电阻丝焊接在一起。引出线通过测量导线接入应变仪。

3. 应变片的技术指标

(1)几何尺寸:栅长 L (mm) 是应变片电阻丝在其轴线方向的长度,栅宽 B 是应变片垂直于轴线方向的电阻丝栅外侧间的距离。

(2)电阻值 R :是指在室温条件下不受外力作用时测得应变片的电阻值,单位为欧姆(Ω)。应变片阻值应与测量电路相适应,一般取 120 Ω 。

(3)灵敏系数 K :是指应变片安装于被测试件表面,在其轴线方向的单向应力作用下,应变片的电阻相对变化与试件表面上安装应变片区的轴向应变之间的比值。

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2-6)$$

式中: K ——应变片灵敏系数;

$\Delta L/L$ ——试件上应变片安装区的轴向应变;

$\Delta R/R$ ——由 $\Delta L/L$ 所引起的应变片的电阻相对变化。

应变片包装上标出的灵敏系数是该批产品由抽样标定测得的平均值。

(4)应变极限 ϵ_j :一般是指温度一定时,在特定材料上指示应变和真实应变的相对误差不超过 10% 的应变数值。

(5)绝缘电阻 R_m :是指应变片引线与安装应变片的试件材料之间的电阻,单位为兆欧($M\Omega$)。

它是衡量应变片粘贴质量、粘贴剂性能及其固化程度的重要标志。一般情况下,绝缘电阻在 200 $M\Omega$ 以上才能保证应变测量的正常进行以及量测的精度。

(6)最大允许电流 I_{max} :允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流。一般静态测量时为 25mA,动态时为 75 ~ 100mA。

(7)温度效应:是指温度变化而引起的应变片阻值改变的现象。测试过程中,环境温度的变化,敏感栅通电发热,都能使应变片温度发生变化。消除温度效应的方法是用温度补偿法。

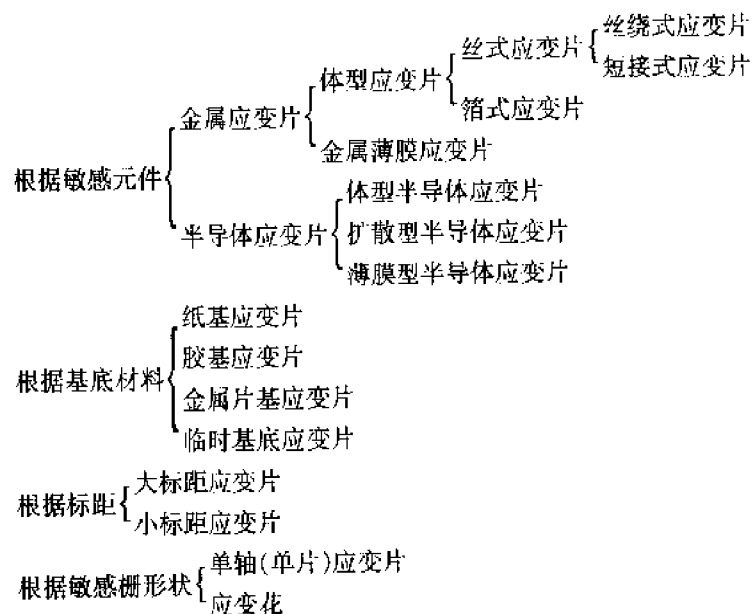
(8)零点漂移和蠕变:零点漂移又简称为零漂,是指已粘贴好的应变片,在温度不变而又无机械应变的条件下,指示应变随时间而变化,用 $\mu\epsilon/h$ 表示。引起的原因可能是粘结剂固化程度不良或环境气候变化引起绝缘电阻变化,或者是安装应变片的松弛等。蠕变是指已安装好

的应变片,在温度一定并承受一定的机械应变时,指示应变随时间而变化。

(9)疲劳寿命:是指已安装好的应变片,在一定的机械应变,一定的温度下,可以连续工作而不会产生疲劳损坏的循环次数。

4. 应变片的分类

应变片的种类繁多,分类方法有如下几种。



下面介绍几种常用的应变片。

(1) 丝绕式应变片

丝绕式应变片是把敏感栅丝直接绕在各种绝缘基底上制成,是较为常用的一种应变片,如图 2-4 所示。由于采用较薄的基底材料,因此粘贴性能好,能保证有效地传递变形,稳定性好。敏感栅丝的材料一般用康铜、镍铬合金和铂铱合金等。这种应变片的制造设备和技术都较为简单,价格也较低廉。

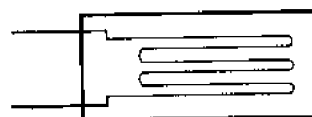


图 2-4 丝绕式应变片

(2) 箔式应变片

箔式应变片是利用照相制版或光刻腐蚀技术,将箔材料在绝缘基底上制成所需形状的应变片。它粘贴性能好,传递变形的性能较丝绕式应变片为好,容易制成各种形状的应变片或应变花,具有良好的散热能力,允许增大工作电压,蠕变小、疲劳寿命高,但制作工艺复杂。图 2-5 是几种常见箔式应变片的构造形式。

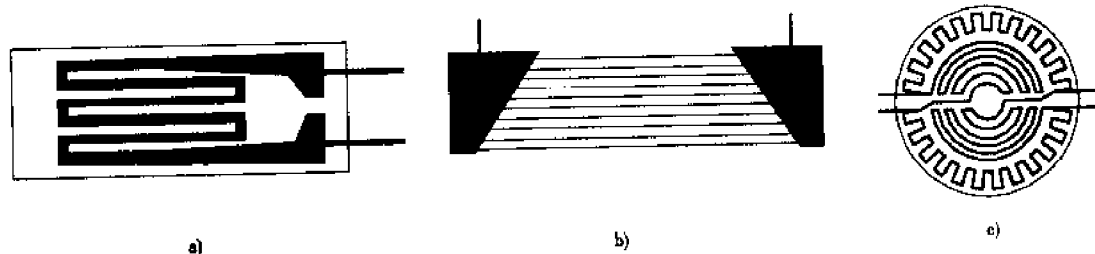


图 2-5 箔式应变片

(3) 半导体应变片

当半导体材料沿某一轴向受力产生变形时,电阻率会发生变化,这种电阻随应变变化的现

象称为压阻效应。根据这个原理制造出半导体应变片,图 2-6 是其构造图。半导体应变片的特点是尺寸小、灵敏系数大、频率响应好,但温度系数大,测量精度低。

(4)应变花

在平面应力场中,需要测出两个或三个方向的应变才可以求出该点的主应力大小及方向,这就要使用粘贴在一个公共基底上、按一定方向布置的 2~4 个敏感栅组成的应变花。有互为 45° 、 60° 、 90° 和 120° 等基本形式的应变花,如图 2-7 所示。

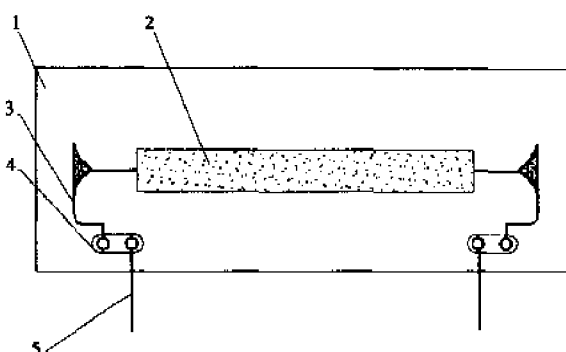


图 2-6 半导体应变片

1-胶膜衬底;2-P-Si 片;3-内部引线;4-内部接线端子;5-外引线

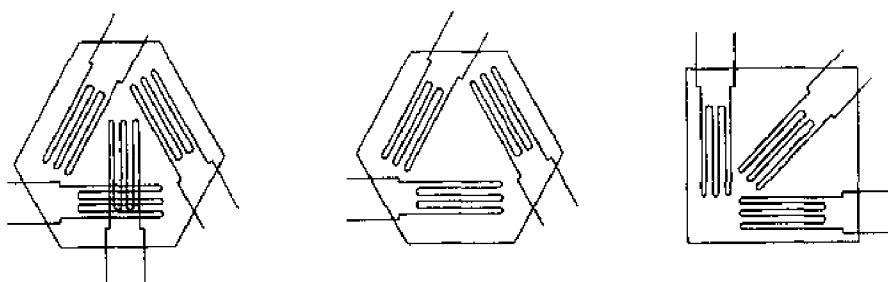


图 2-7 应变花的构造

5.应变片的选用

应变片的品种规格很多,选用时应根据被测试件所处的环境条件,如温度、湿度、被测材料、结构特点、检测的性质和应变的范围等来确定并应在尽可能节省开支的同时满足测试要求。以下从七个方面介绍应变片的选用方法。

(1)标距:根据结构特点和材料,在应变场变化大及用于传感器上时,应选用小标距应变片,如钢材常用 $5 \sim 20\text{mm}$ 。在不均匀材料上选用大标距应变片,如混凝土常用 $80 \sim 150\text{mm}$ 。

(2)应变片电阻:目前大部分应变仪按 120Ω 应变片设计,选用时应注意与应变仪相一致,否则要按仪器的使用说明书予以修正。

(3)灵敏系数:常用的应变片灵敏系数在 $K = 2.0$ 左右,使用时必须调整应变仪的灵敏系数功能键,使之与应变片的灵敏系数一致,否则应对结果予以修正。

(4)基底种类:较为常用的有纸基和胶基两种。常温下的一般测试可用纸基应变片。对于野外试验及长期稳定性要求高的试验,宜用胶基应变片。

(5)敏感栅材料:康铜丝材的温度稳定性较好,适用于大应变测量。

(6)特殊环境或有特殊要求的,选用特种应变片,如低温应变片、高温应变片、裂纹扩展片、疲劳寿命片等。

6.应变片的粘贴工艺

应变片的粘贴工艺包括粘结剂的选用、粘贴工艺与防护措施三方面。

粘结剂其主要的作用是传递变形。应变片的制作、传感器的生产、测试中应变片的粘贴等,都要使用不同性能的粘结剂。其性能将直接影晌应变片的质量、传感器的精度和现场测试的成败。粘结剂一般采用快干胶或环氧树脂。501 快干胶和 502 快干胶是借助空气中微量水

分的催化作用而迅速聚合固化产生粘结强度的。该类胶的粘结强度能满足桥梁应变测试要求,但应注意胶水的生产日期和保存条件,避免使用过期或失效的胶水。环氧树脂胶是靠分子聚合反映而固化产生粘结强度的。它有较强的剪切强度和防水性能,电绝缘性能好。它的主要成分是环氧树脂,按一定的比例加入固化剂并充分搅拌,使环氧树脂变成浅乳白色后再使用。

一般地,应变片的粘贴工艺可归纳如表 2-1 所示。

应变片的粘贴工艺

表 2-1

工作顺序	工作内容		操作方法	要 求
1	检查 分选	外观检查	借助放大镜肉眼检查	无气泡、霉点、锈点,外观平直
		阻值检查	用 1% Ω 精度万用表检查	无短路、断路,同一测区应变片阻值相差不大于 0.5 Ω
2	测点 检查	初步定位	确定测点的大致范围	比应变片周边宽 3~5cm 的测区
		测点检查	检查测点处的表面状况	平整、无缺陷、无裂缝
		打 磨	磨光机或 1 号砂纸打磨	平整、无锈、无浮浆
		清 洗	脱脂棉、纱布蘸丙酮或无水乙醇清洗	干燥时无污染
		准确定位	准确画出测点的纵横中心线	纵线应与主应变方向一致
3	粘贴	上胶	用合适的小灰刀在测点均匀涂上预先调制好的一层薄胶	应变片的定位标志应与十字中心线对准
		挤压	将应变片放在定位线上,盖上塑料薄膜,用手指沿一个方向挤压,挤出多余的胶	胶层应尽可能薄,挤压时注意保持应变片不滑移
		加压	根据粘胶特性,在应变片上稳压一段时间	应达到粘胶的初凝时间
		粘贴端子	接线端子靠近应变片引出线用贴片胶粘贴	胶达到强度后无松动、脱落
4	固化 处理	自然干燥	根据自然条件和粘胶特性确定时间	粘胶强度达到要求
		人工固化	粘胶达到初凝时间后用红外线灯照射或电吹风吹热风	加热温度不超过 50℃,受热均匀
5	粘贴 质量 检查	外观检查	借助放大镜肉眼检查	位置准确、无气泡、粘贴牢固
		阻值检查	用万用表检查	无短路、断路
		绝缘检查	用万用表 200M Ω 档检查	应达到 50 M Ω 以上

续上表

工作顺序	工作内容		操作方法	要 求
6	导线连接	引出线绝缘	应变片引出线底下涂粘贴胶或贴胶布	引出线不能短路
		导线焊接	用电烙铁、焊锡把应变片引出线和测量导线焊接在接线端子	焊点应圆滑、无虚焊
		固定导线	用粘胶或胶布固定测量导线	轻微抖动导线不影响焊点
7	防潮防护	焊接完成,用万用表检查测量导线连接应变仪的一端,应略大于应变片阻值(含导线电阻)后,在应变片和接线端子涂上防潮胶。		涂胶面积应大于应变片周边宽约 1cm。特殊环境还应增加防机械损伤的缓冲层

在完成应变片的粘贴后,把应变片的引线和导线焊接在接线端子上,然后应立即涂上防护层,以防止应变片受潮和机械损伤。因为应变片受潮后会影响其正常工作,而且受潮的程度不易直接测量,所以防护技术是应变测量中的重要环节。通常用应变片和结构表面的绝缘电阻值来判断。高的绝缘电阻值可保证测量的精度,但要求过高会加大工作量和增加防护工作的难度。所以一般要求静态测量绝缘电阻大于 $200\text{M}\Omega$,动态测量可以稍小于 $200\text{M}\Omega$,对于长期检测和要求精度高的检测,绝缘电阻应大于 $500\text{M}\Omega$ 。图 2-8 给出了几种常用的防护措施;图 2-8a)、b)适用于一般潮湿条件,图 2-8c)适用于水中或极湿条件;图 2-8d)适用于水中或混凝土浇筑场所。

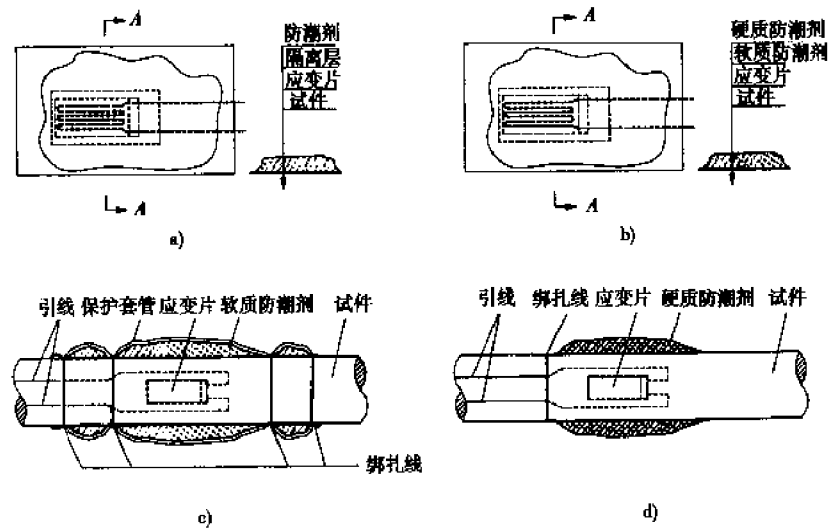


图 2-8 应变片防护示意图

二、电阻应变仪

前面已介绍过,结构的应变是由电阻转换为电阻变化率进行测量。而结构在弹性范围内的应变是很小的,如钢材料 $E = 2 \times 10^5 \text{MPa}$,测量时要求能分辨出 20MPa ,当应变片阻值为 120Ω , $K = 2.0$ 时, $\Delta R = RK\sigma / E = 0.024\Omega$ 。由此可见,测量电阻用的仪器必须能够分辨出 120Ω 和 120.024Ω 的电阻,这是一般常用测量电阻的仪表达不到的,必须借助专门的电子仪器进行测量和鉴别,这就是电阻应变仪(简称应变仪)。

电阻应变仪根据测量应变的工作频率,可分为静态电阻应变仪、动态电阻应变仪和静动态

电阻应变仪。静态电阻应变仪用于测量静态应变,要求仪器的放大器具有良好的稳定性,尽可能减少零点漂移。配备平衡箱时可进行多点应变测量。动态电阻应变仪用于测量 500Hz 以下的动态应变,除要求其稳定性好以外,还需要有高的灵敏度和足够的功率输出,以及小的非线性失真,低的噪声和一定的频宽特性,以便对测量信号的各种频率或非正弦波信号均能如实放大。动态电阻应变仪一般做成多通道,同时采集多个动态信号。

应变仪可直接用于应变测量,如配用相应的电阻应变式传感器,也可测量力、压力、扭矩、位移、振幅、速度、加速度等物理量的变化过程,是实验应力分析中常用的仪器。

电阻应变仪主要由供电电源、振荡器、测量桥路、放大器、相敏检波器、滤波器和指示记录器组成。图 2-9 是应变仪组成方框图。

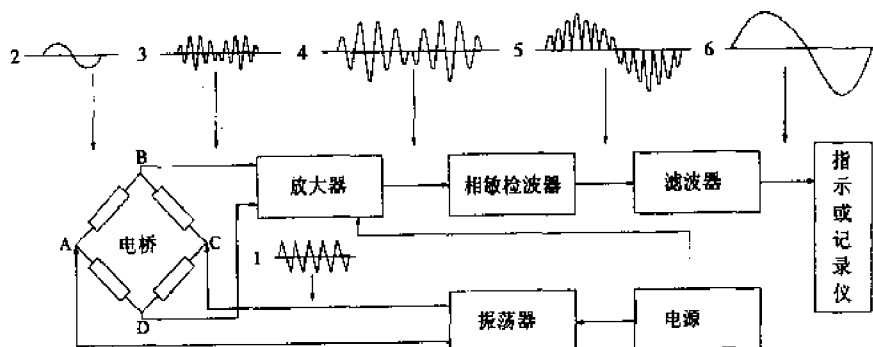


图 2-9 应变仪组成方框图

1-供桥电源波形(载波);2-被测信号波形(调制波);3-电桥输出波形(已调制波);4-放大后波形;5-检波解调后波形;6-滤波后波形

1. 电桥原理

应变仪测量电路一般采用惠斯登电桥。如图 2-10 所示, A、B、C、D 四点称为电桥的顶点, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 称为电桥的臂, AC 之间接电源 U , BD 之间接负载 U_{BD} 。由于电桥线性好,灵敏度高,测量范围宽,易于实现温度补偿,因此在电阻应变仪中得到广泛应用。电桥按供电性质可分为交流电桥和直流电桥。直流电桥的特点在于信号不受各元件和导线间分布电容及电感的影响,抗干扰能力强,必要时可用蓄电池或干电池供电,便于现场测试。为了便于讨论,以直流电桥为例作分析。若将 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 看成四个应变片,组成全桥接法,根据基尔霍夫定律可知, U_{BC} 、 U_{DC} 与 U 的关系有

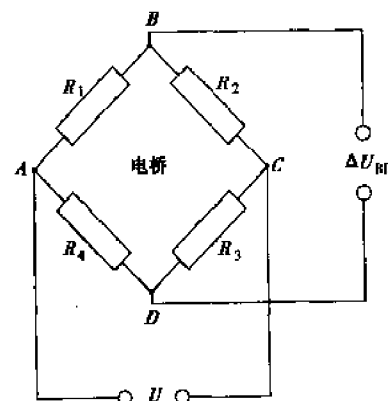


图 2-10 惠斯登电桥

$$U_{BC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (2-7)$$

$$U_{DC} = -\frac{R_3}{R_3 + R_4} U \quad (2-8)$$

BD 间输出的电压为 $U_{BD} = U_{BC} + U_{DC}$, 即

$$U_{BD} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U = \frac{R_2 R_4 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (2-9)$$

当输出电压为零时,电桥处于平衡状态,则

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2-10)$$

当电桥接成 1/4 电桥时,即 R_1 受到应变后,阻值有微小增量 ΔR_1 ,这时电桥输出电压也有增量 ΔU_{BD}

$$\Delta U_{BD} = U \frac{R_2 R_4 - (R_1 + \Delta R_1) R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2-11)$$

当电桥接成全电桥时,即 R_1, R_2, R_3, R_4 受到应变后,阻值都有微小增量 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$,这时电桥输出电压也有增量 ΔU_{BD}

$$\Delta U_{BD} = U \left(\frac{R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-12)$$

在全等臂电桥情况下,即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 且应变片的灵敏系数 $K = K_1 = K_2 = K_3 = K_4$,并利用式(2-5)得到

$$\Delta U_{BD} = \frac{1}{4} UK(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (2-13)$$

由上式可知,电桥输出电压的增量 ΔU_{BD} 与桥臂电阻变化率 $\Delta R/R$ 或应变 ϵ 成正比例。输出电压与四个桥臂应变的代数和成线性关系,相邻桥臂的应变符号相反,相对桥臂的应变符号相同。利用这一特性,可以提高测量的灵敏度和解决温度补偿问题。

2. 平衡电桥原理

在实际测量中,应变片的阻值总是有偏差,接触电阻和导线的电阻也有差异,使电桥产生不平衡。为了满足实际测量的需求,应变仪都改用了平衡电桥。图 2-11 是平衡电桥原理图。在 R_3, R_4 之间加入滑线电阻 r ,触点 D 平分 r 。 R_1 为工作片, R_2 为贴在非受力构件的温度补偿片,且使桥路 $R_1 = R_2 = R'$, $R_3 = R_4 = R''$ 。根据惠斯登电桥,桥路处于平衡时有 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

当构件受力变形后, R_1 有微小变量 ΔR_1 ,此时桥路失去平衡,调整触点 D 使桥路重新恢复平衡。新的平衡条件为

$$(R_1 + \Delta R_1)(R_3 - \Delta r) = R_2(R_4 + \Delta r) \quad (2-14)$$

$$R_1 R'' + \Delta R_1 R'' - R_1 \Delta r - R_1 \Delta r = R_1 R'' + R_1 \Delta r$$

整理得

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{3\Delta r}{R''}$$

即

$$\epsilon = \frac{3\Delta r}{KR''} \quad (2-15)$$

由此可见,滑线电阻的变化量可用以度量工作电阻的应变变量,此法称为零位测定法。

3. 温度补偿技术

用电阻应变片测量应变时,应变片除感受试件应变外,环境温度的变化同样通过应变片的感受引起应变仪示值的变化,这种变化称为温度效应。产生温度效应的原因有两个:一是电阻丝温度改变 Δt ,电阻值将随之改变;二是电阻丝与试件材料的膨胀系数不相等,而两者粘合在

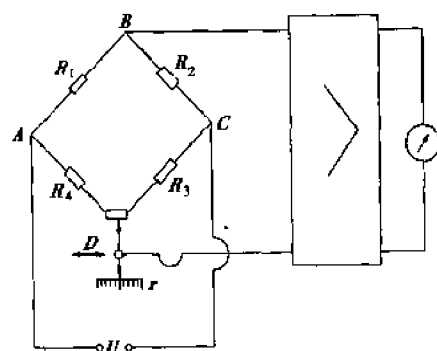


图 2-11 平衡电桥原理图

一起,当温度改变 Δt 时,引起一个附加电阻变化 ΔR_{t1} ,总的应变效应为两者之和。根据桥路原理有

$$\Delta U_{BD} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R} = \frac{U}{4} K \epsilon_1 \quad (2-16)$$

式中: ϵ_1 ——称为视值应变。

温度补偿的方法是在电桥的 BC 臂上接一个与测量片 R_1 完全一样的温度补偿应变片 R_2 。 R_1 贴在受力构件上,既受应变作用又受温度作用,电阻变化为 $\Delta R_1 + \Delta R_{t1}$;温度补偿片 R_2 贴在与试件材料相同并放置在与测试对象完全相同的环境中,感受相同的温度变化,但不受外力的影响,则其只有纯 ΔR_{t1} 的变化,如图 2-12 所示。由式(2-11)得

$$\Delta U_{BD} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1 + \Delta R_{t1} - \Delta R_{t1}}{R} = \frac{U}{4} K \epsilon_1 \quad (2-17)$$

由此可见,测量结果仅为测试对象受力后产生的应变值,不受温度的影响,达到了温度补偿的目的。

4. 动态电阻应变仪

动态应变测量中,应变值的变化速度比较快,一般采用直读式电桥。其构造与静态应变仪的测量桥路基本一致。不同之处主要有以下几点。

①动态应变仪多采用立式电桥,以提高抗干扰能力。

②对预调平衡要求高,由于动态应变仪的供桥电压频率较高,应变片和引线的分布电容对桥路平衡影响很大,所以测量时除对电阻调平衡外,还要调节电容平衡。进行多点测量时,各通道的平衡应大体一致,使显示尽可能指示“0”或靠近“0”位。

③动态应变仪未设读数桥,而是在桥路中附设了一套电标定电路,以便对被测应变进行计量。

所谓“电标定”即是在工作桥臂上并联电阻,使应变仪上产生一已知的模拟标准应变,并把它记录下来,然后再把被测物体的应变记录下来相对比,以标准应变为准尺,从而获得被测应变的大小。图 2-13 是动态电阻应变仪的电桥和标定线路。

当灵敏系数取 $K = 2.0$,桥臂电阻取 120Ω 时,由图可知,假设标定电阻 r_1 通过开关 K_1 并联在 R_2 上为正应变,并联在 R_3 上为负应变,正负应变通过开关 K_2 切换。 $r_1 \sim r_6$ 采用精密金属膜电阻,则其阻值由所产生的标准应变的大小确定。

5. 应变测量防干扰措施

- ①在半桥测量中采用三心屏蔽导线,全桥测量采用四心屏蔽导线。
- ②尽量使测量导线和应变仪远离干扰源。
- ③尽量缩短测量导线的长度,根据测量距离,合理选用导线面积。
- ④屏蔽网接在应变仪外壳接地点,接地点应良好接地,对地的绝缘电阻应尽可能小,这样可以有效抑制电磁波和静电干扰。
- ⑤应变片与被测构件的绝缘电阻应符合要求。

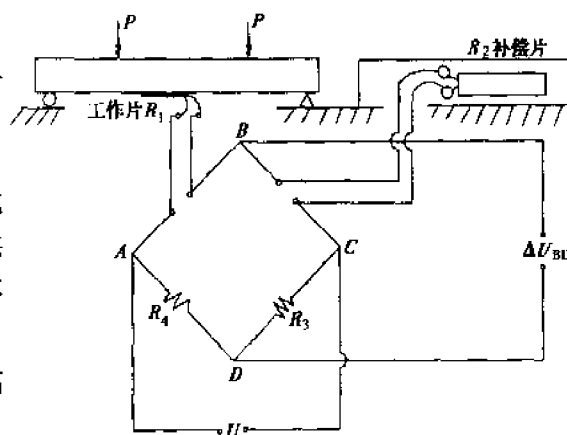


图 2-12 温度补偿原理

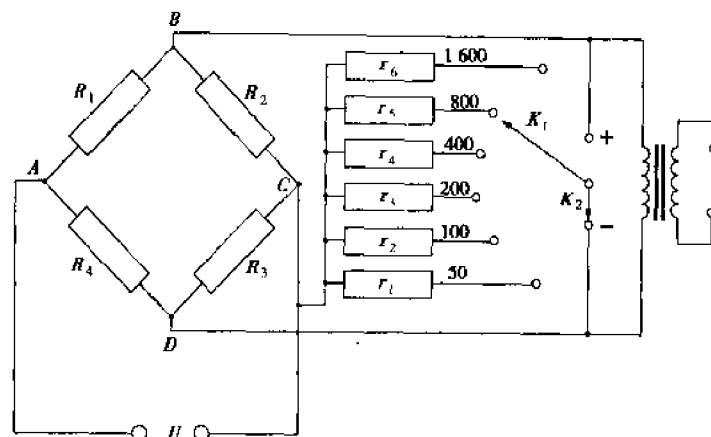


图 2-13 动态电阻应变仪电桥原理

三、应变测试方法

由于构件常处于复杂的应力状态,如受拉(压)的杆件很可能同时受到弯曲或扭转的作用。但实际测试中,有时又希望只测其中某一成分所产生的应力。为了达到此目的,在一些特定条件下,可借助电桥的特性,采用不同的接桥方法,以消除不需要测试的应力对测试应力的影响。

1. 测轴向应力

单向拉伸(或压缩)可分别采用如图 2-14a)、b)、c)所示的三种贴片和接桥方式。图 2-14a)、b)两种贴片和接桥方式分别适用于轴向拉伸(或压缩)和被测材料的泊松比 μ 已知的情况。实际上杆件往往由于偏心受力而产生不同程度的弯曲,为了消除弯矩的影响,采用图 2-14c)所示的贴片和接桥方式为宜。

当 $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 且 $\Delta R_{\Delta 11} = \Delta R_{\Delta 22}$ 时,所采用贴片和接桥方式不同,应变仪读数 ϵ_m 与杆件真实应变 ϵ 之间的比例关系将随之发生变化。

对于图 2-14a)所采用贴片和接桥方式,可得

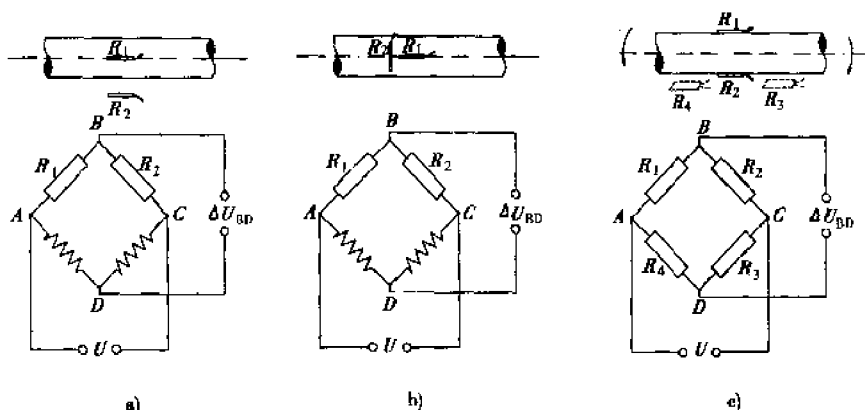


图 2-14 测轴力的贴片和接桥示意图

$$\Delta R = R_1 K \epsilon_m = \Delta R_1 - \Delta R_2 = KR_1(\epsilon_1 + \epsilon_{\Delta 11}) - KR_2 \epsilon_{\Delta 22} = KR \epsilon$$

故

$$\epsilon_m = \epsilon_1 \quad (2-18)$$

对于图 2-14b)所采用贴片和接桥方式,可得

$$\Delta R = R_1 K \epsilon_m = \Delta R_1 - \Delta R_2 = KR_1(\epsilon_1 + \epsilon_{\Delta 11}) - KR_2(-\mu \epsilon_1 + \epsilon_{\Delta 22}) = KR \epsilon_1(1 + \mu)$$

故

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_m}{1 + \mu} \quad (2-19)$$

对于图 2-14c) 所采用贴片和接桥方式, 可得

$$\Delta R = KR_1 \epsilon_m = KR_1(\epsilon + \epsilon_{\Delta 1} + \epsilon_m) + KR_4(\epsilon + \epsilon_{\Delta 2} - \epsilon_m) - KR_2 \epsilon_{\Delta 2} - KR_3 \epsilon_{\Delta 3} = 2KR\epsilon$$

故

$$\epsilon = \frac{\epsilon_m}{2} \quad (2-20)$$

2. 测弯曲应力

当测量受弯或受弯同时受有轴向力作用的杆件应力时, 均可采用图 2-15a)、b) 所示的贴片和接桥方法。

对于图 2-15a) 所采用贴片和接桥方式, 可得

$$\Delta R = KR\epsilon_m = KR_1(\epsilon + \epsilon_{\Delta 1} + \epsilon_m) - KR_2(-\epsilon + \epsilon_{\Delta 2} + \epsilon_m) = 2KR\epsilon$$

故

$$\epsilon = \frac{\epsilon_m}{2} \quad (2-21)$$

对于图 2-15b), 同理可得

$$\epsilon = \frac{\epsilon_m}{4} \quad (2-22)$$

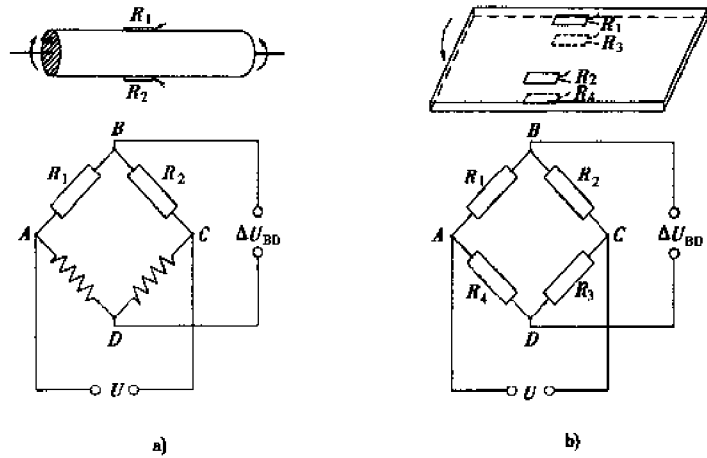


图 2-15 测弯曲应力的贴片和接桥示意图

3. 测剪应力

悬臂梁承受横向力 P , 如图 2-16a) 所示时, 梁的中性层处于纯剪应力状态, 剪应力为 τ , 见图 2-16b)。由应力分析可知: 在与轴线成 45° 方向的面上只有正应力 σ_1 或 σ_3 , 并且有

$$\sigma_1 = \tau \quad \sigma_3 = -\tau$$

如果沿着与轴线成 45° 方向贴片, 则每个应变片的应变为

$$\epsilon_1 = \epsilon + \epsilon_\tau \quad \epsilon_2 = -\epsilon + \epsilon_\tau$$

按图 2-16c) 接成半桥线路, 由式(2-13)求得读数应变为

$$\epsilon_\tau = \epsilon_1 - \epsilon_2 = 2\epsilon$$

45° 方向由于外载引起的线应变为

$$\epsilon = \frac{1}{2} \epsilon_\tau \quad (2-23)$$

根据广义胡克定律可知

$$\epsilon = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_3) = \frac{1 + \mu}{E} \tau$$

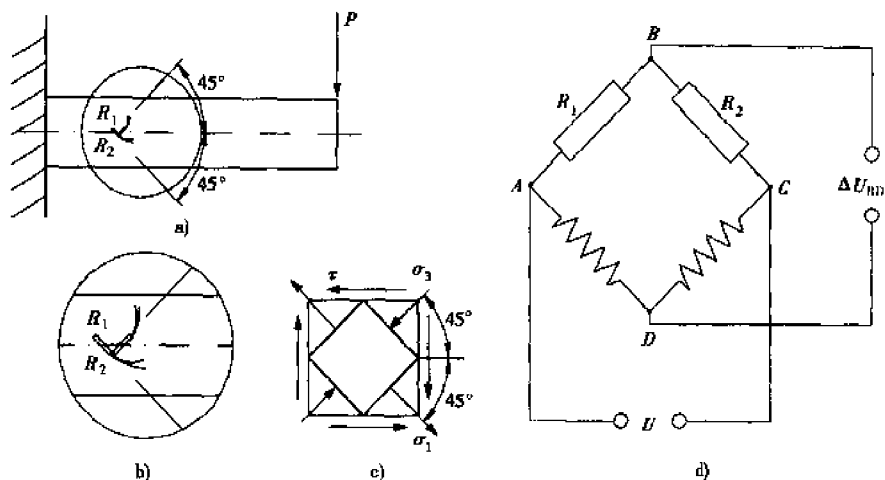


图 2-16 测剪应力的贴片和接桥示意图

将上式中的 E 、 μ 改用剪切弹性模量 G 表示,根据

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

得出剪应力为

$$\tau = 2G\varepsilon \quad (2-24)$$

将式(2-23)代入式(2-24)即可求得剪应力为

$$\tau = G\varepsilon_r \quad (2-25)$$

常见构件的贴片和接桥方法见表 2-2。

四、电阻应变测试技术的推广应用

1. 位移传感器

结构在荷载作用下的静位移如挠度、侧移、转角、支座偏移等参数,也可以利用电阻应变测试技术进行量测。一般常用的有电阻式位移传感器、应变式位移传感器和差动变压器式位移传感器。

(1) 电阻式位移传感器

电阻式位移传感器是一种位移测量计,它只能检测试件的位移,而本身不能显示其数值,必须依靠二次仪器进行显示或指示。以常用的滑线电阻式位移传感器为例,它由测杆、滑线电阻和触头等组成,图 2-17 是其原理图。滑线电阻固定在表盘内,触点将电阻分成 R_1 和 R_2 。工作时将电阻 R_1 和 R_2 分别接入电桥桥臂,预调平衡后输出等于零。当滑杆向下移动一个位移 δ 时, R_1 增大 ΔR_1 , R_2 减少 ΔR_1 。由相邻两臂电阻增量相减的输出特性得知

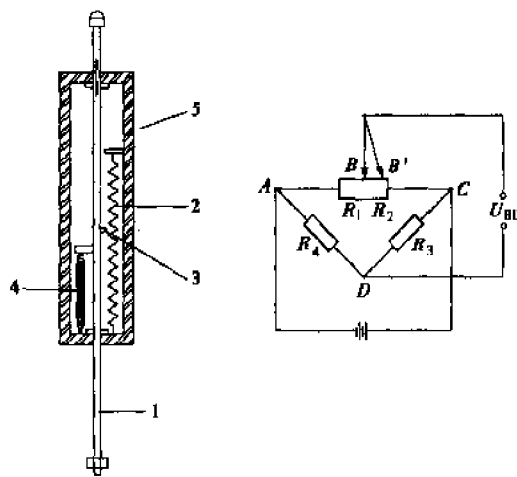


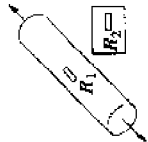
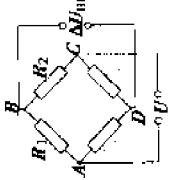
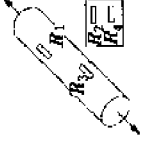
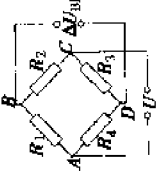
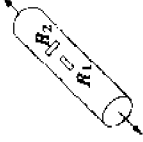
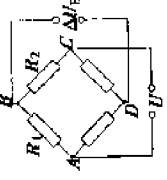
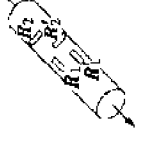
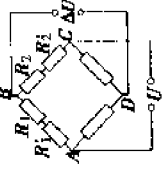
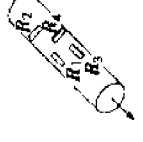
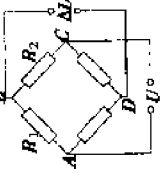
图 2-17 滑线电阻式位移传感器

1-测杆;2-滑丝电阻;3-触头;4-弹簧;5-壳体

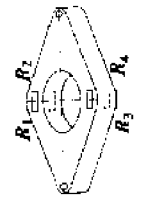
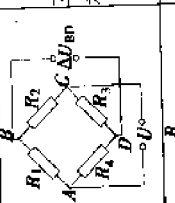
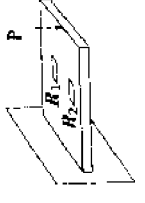
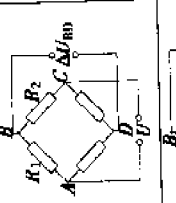
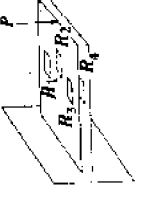
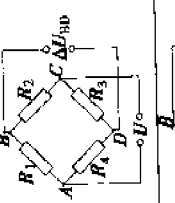
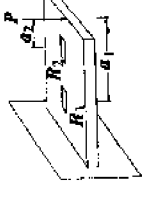
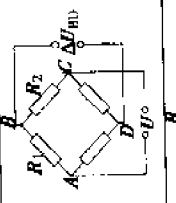
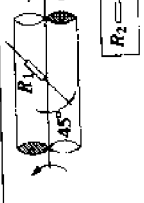
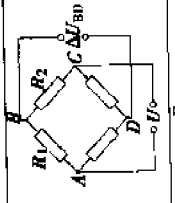
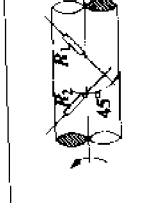
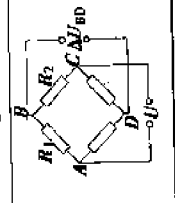
$$U_{BD} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1 - (-\Delta R_1)}{R} = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_2}{R} 2 = \frac{U}{2} K\varepsilon \quad (2-26)$$

表 2-2

应变片的布片和接桥方法

序号	受力状态及其简图	工作片数	电桥形式	电桥线路	温度补偿	测量电桥输出	测量项目及应变值	特点
1	轴向拉 (压) 	1	半桥		另设补偿片	$U_{BD} = \frac{1}{4} UK\epsilon$	拉(压)应变 $\epsilon_t = \epsilon$	不易消除偏心作用引起的弯曲影响
2	轴向拉 (压) 	2	全桥		另设补偿片	$U_{BD} = \frac{1}{2} UK\epsilon$	拉(压)应变 $\epsilon_t = 2\epsilon$	输出电压提高到1倍,可消除弯曲影响
3	轴向拉 (压) 	2	半桥		互为补偿	$U_{BD} = \frac{1}{4} UK\epsilon(1 + \mu)$	拉(压)应变 $\epsilon_t = (1 + \mu)\epsilon$	输出电压提高到 $(1 + \mu)$ 倍,不能消除弯曲影响
4	轴向拉 (压) 	4	半桥		互为补偿	$U_{BD} = \frac{1}{4} UK\epsilon(1 + \mu)$	拉(压)应变 $\epsilon_t = (1 + \mu)\epsilon$	输出电压提高到 $(1 + \mu)$ 倍,能消除弯曲影响且可提高供桥电压
5	轴向拉 (压) 	4	全桥		互为补偿	$U_{BD} = \frac{1}{2} UK\epsilon(1 + \mu)$	拉(压)应变 $\epsilon_t = 2(1 + \mu)\epsilon$	输出电压提高到 $2(1 + \mu)$ 倍,且能消除弯曲影响

续上表

序号	受力状态及其简图	工作片数	电桥形式	电桥线路	温度补偿	测量电桥输出	测量项目及应变值	特点
6		4	全桥		互为补偿	$U_{BD} = UK\varepsilon$	拉(压)应变 $\varepsilon_r = 4\varepsilon$	输出电压提高到4倍
7		2	半桥		互为补偿	$U_{BD} = \frac{1}{2} UK\varepsilon$	弯曲应变 $\varepsilon_r = 2\varepsilon$	输出电压提高1倍,且能消除轴向拉(压)影响
		4	全桥		互为补偿	$U_{BD} = UK\varepsilon$	弯曲应变 $\varepsilon_r = 4\varepsilon$	输出电压提高4倍,且能消除轴向拉(压)影响
9		2	半桥		互为补偿	$U_{BD} = \frac{1}{4} UK \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$	两处弯曲应变之差 $\varepsilon_r = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$	可测出横向剪力V值 $V = \frac{EW}{\alpha_1 - \alpha_2} \varepsilon_r$
10		1	半桥		另设补偿片	$U_{BD} = \frac{1}{4} UK\varepsilon$	扭转应变 $\varepsilon_r = \varepsilon$	可测出扭矩M _t 值 $M_t = W_t \frac{E}{1 + \mu} \varepsilon_r$
11		2	全桥		互为补偿	$U_{BD} = \frac{1}{2} UK\varepsilon$	扭转应变 $\varepsilon_r = 2\varepsilon$	输出电压提高1倍,可测剪应变 $\gamma = \varepsilon_r$

采用这样的半桥接线,其输出量与电阻增量成正比,即与位移成正比。一般量程可达 $10 \sim 100\text{mm}$ 以上。

(2) 应变梁式位移传感器

应变梁式位移传感器主要由测杆、悬臂梁、应变片和弹簧组成,如图 2-18 所示。悬臂弹簧片是由一块弹性好、强度高的铍青铜制成,固定在仪器外壳上。在簧片固定端粘贴 4 片应变片组成全桥或半桥测量线路,簧片的另一端装有拉簧,拉簧与指针固结。当测杆移动时,传力弹簧使簧片产生挠曲,即簧片固定端产生应变,通过电阻应变仪即可测得应变与位移的关系。

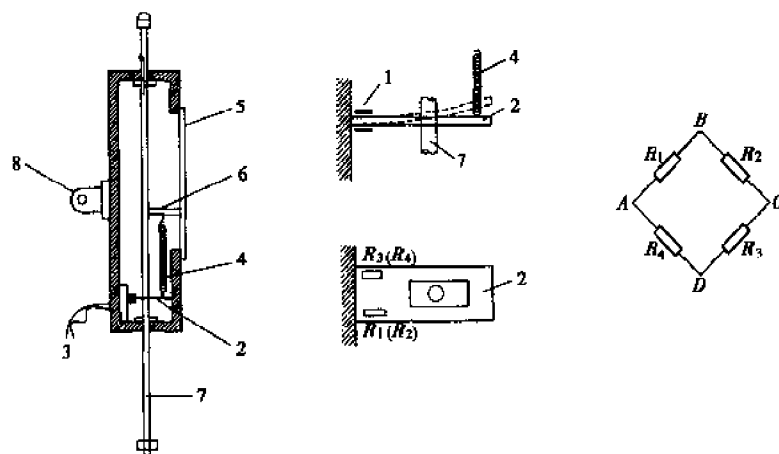


图 2-18 应变式位移传感器

1-应变片;2-悬臂梁;3-引线;4-弹簧;5-标尺;6-指针;7-测杆;8-固定环

这种传感器的量程有 $30 \sim 150\text{mm}$,读数分辨率可达 0.01mm 。但测量精度和稳定性受应变片粘贴质量的影响。

(3) 差动变压器式位移传感器

由图 2-19 可以看出,差动变压器式位移传感器由一个初级线圈和两个次级线圈分内外两层同绕在一个圆筒上,圆筒内放一个能自由地上下移动的铁芯。对初级线圈加入激磁电压时,通过互感作用使次级线圈产生感应电势。当铁芯居中,感应电势 $e_{s1} - e_{s2} = 0$,此时无输出信号。当铁芯向上移动 δ ,这时 $e_{s1} \neq e_{s2}$,输出为 $\Delta E = e_{s1} - e_{s2}$ 。铁芯向上移动的位移越大, ΔE

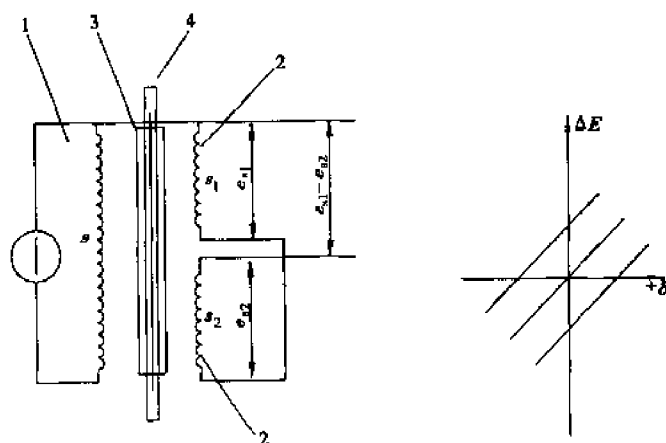


图 2-19 差动变压器式位移传感器

1-初级线圈;2-次级线圈;3-圆形筒;4-铁心

也越大。反之,当铁芯向上移动时, e_{s1} 减小而 e_{s2} 增大, $e_{s1} - e_{s2} = -\Delta E$ 。由于电势的输出量与位移成正比,可以通过率定来事先确定电势输出量与位移的标定曲线,从而测量位移。这种传感器的量程可达500mm。

2. 荷载传感器

在试验中,荷载的大小也可以利用应变测试技术来量测,通常称之为力传感器或荷载传感器。荷载传感器可以量测荷载、反力以及其他各种外力。根据荷载性质不同,荷载传感器的形式有拉伸型、压缩型和通用型三种。各种荷载传感器的外形基本相同,其核心部件是一个厚壁筒,如图2-20a)所示。壁筒的横断面大小取决于材料的允许应力。在壁筒上贴有电阻应变片以便将机械变形转换为电量。为避免在储存、运输或试验过程中损坏应变片,设有外罩加以保护。为便于设备或试件联接,在筒壁两端加工有螺纹。荷载传感器的负荷能力一般设计为0~1000kN或更高。

荷载传感器采用圆筒形弹性元件承受轴向压力,采用粘贴在元件上面的应变片感受其应变。测量出应变后,即可根据弹性元件的材料特性求出荷载的大小。为了提高测量的灵敏度和实现温度补偿,可以在弹性元件的圆周上8等分,粘贴8片应变片,纵向为测量片,横向为补偿片,根据不同的桥路连接,应变仪的读数 ϵ_m 与弹性元件的机械应变之间的关系如下

$$\text{半桥连接 } \epsilon_m = (1 + \mu)\epsilon \quad (2-27)$$

$$\text{全桥连接 } \epsilon_m = 2(1 + \mu)\epsilon \quad (2-28)$$

这样,不仅提高了灵敏度,同时还能消除由于弹性元件因偏心荷载而产生的附加弯曲影响。

对于图2-20b)所示的桥路接法,在筒壁的轴向和横向布片,并按全桥接入应变仪电桥,根据桥路输出特性可求得

$$U_{BD} = \frac{U}{2} K\epsilon (1 + \mu) \quad (2-29)$$

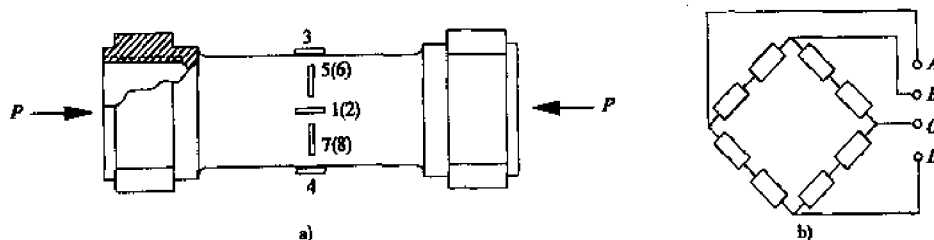


图 2-20 应变式测力传感器构造及桥路原理

可见电桥输出放大 $2(1 + \mu)$,可以提高其量测灵敏度。

荷载传感器的构造简单,用户可根据实际需要自行设计和制作。但应注意,必须选用力学性能稳定的材料作筒壁,选择稳定性好的应变片及粘合剂。传感器投入使用后,应当定期标定以检查其荷载应变的线性性能和标定常数。

3. 结构内应力测定

在检测中,有时需要测定结构内部混凝土或钢筋的应力,这种情况下可采用埋入式测应变计。图2-21为埋入式应力栓,它由两片电阻应变片和混凝土或砂浆按一定工艺制成。埋入试

件后便置换了一小块混凝土。应力栓和混凝土的应力应变关系借助胡克定律知

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= E_c \epsilon_c \\ \sigma_m &= E_m \epsilon_m \end{aligned} \right\} \quad (2-30)$$

由此可得 $\sigma_m = \sigma_c(1 + C_s); \epsilon_m = \epsilon_c(1 + C_e)$ (2-31)

式中: C_s, C_e ——应力栓的应力集中系数和应变增大系数。

对于特定的应力栓, C_s, C_e 为常数, 但由于混凝土和应力栓的物理性能不完全匹配, 增大系数基本上属于在测量结果中所引入的误差, 例如弹性模量、泊松比和热膨胀系数的差异所产生的误差。通过适当的标定方法和尽可能减少不匹配因素, 可使误差降低至最小。试验证明, 最小的误差可控制在 0.5% 以下, 室温下, 一年内的漂移量很小, 可以忽略不计。

图 2-22 为埋入式差动电阻应变计。它主要用于测定各种水工结构大型混凝土结构的应变、裂缝或钢筋应力等。使用时直接将其埋入混凝土内, 两端凸缘与混凝土或钢筋相联。试件受力后, 两端的凸缘随之发生相对移动, 使电阻 R_1 和 R_2 分别产生大小相等方向相反的电阻增量, 将其接入应变电桥便可测得应变值。

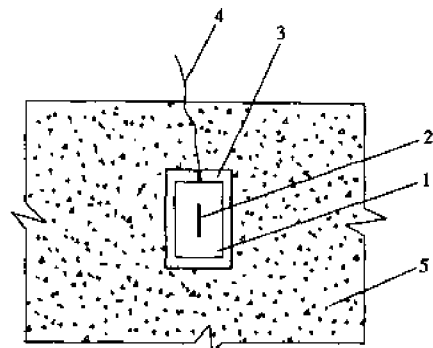


图 2-21 埋入式应力栓

1-与试件同材料的应力栓; 2-应变片; 3-防水层; 4-引线; 5-试件

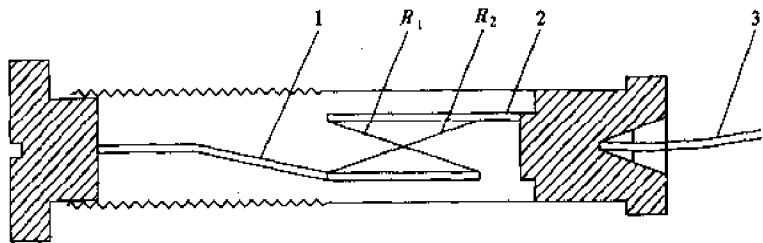


图 2-22 为埋入式差动电阻应变计

1、2-刚性支架; 3-引线

图 2-23 为振动丝式应变计。它依靠改变受拉钢弦的固有频率进行工作。钢弦密封在金属管内, 在钢弦中部用激励装置拨动钢弦, 再用同样的装置接受钢弦产生的振动信号, 并将其

传送至显示或记录仪表。当应变计上的圆形端板与混凝土浇为一体时, 混凝土发生的任何应变都将引起端板的相对移动, 从而导致钢弦的原始张力或振动频率发生变化, 由此可换算求得结构内部的有效应变值。这种振动丝式应变计, 常用于测量预应力混凝土原子反应堆容器的内部应力。它的工作稳定性好, 分辨率高达 $0.1 \mu\epsilon$, 室温下年漂移量为 $1 \mu\epsilon$ 。

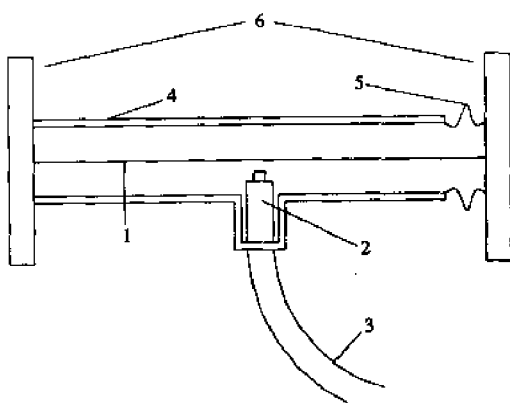


图 2-23 振动丝式应变计

1-钢弦; 2-激振线圈; 3-引线; 4-管体; 5-波纹管; 6-端板

对于钢筋混凝土结构钢筋应力的测定, 可以直接在钢筋上贴片来测定钢筋应变, 也可以采用钢筋计来测定钢筋应变。钢筋计是预先在钢筋上完成贴片、防护等一系列工序的成品测试元件, 在

使用时直接焊接在结构钢筋上,其基本结构如图 2-24 所示。钢筋计使用简单方便,因此得到了广泛的应用。

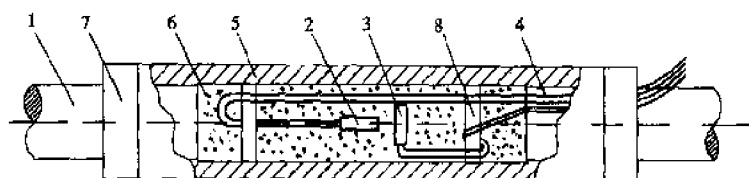


图 2-24 钢筋应变计构造

1-被测钢筋;2-测量应变片;3-补偿应变片;4-引线;5-防水层;6-隔离层;7-封头;8-引线固定夹

第三节 常用机测仪表的构造及使用方法

由于机测仪表具有安装便捷、读数方便、经久耐用、可重复使用等优点,所以在许多检测试验中还经常使用。机测仪表就是通过机械传动系统和指示机构来测定结构所受荷载大小、应变及各种变形(包括挠度、相对位移、转角、倾角、裂缝等)。

机测仪表的特点是准确度高,对环境的适应能力强,有一定的灵敏度,安装和使用方便,工作可靠,其性能在许多方面能满足桥梁结构试验的要求。其主要缺点是灵敏度不高,放大能力有限,需要安装仪表的支架,一般适用于静态测量,使用时试验人员较多,数据不便于自动记录和远程自动监测。从目前仪器发展的情况来看,在结构试验中使用的量测仪器多为电测类,机测仪表属于替代性产品。

机械仪表由传感机构、转换机构、指示机构、机体及保护等四部分组成,主要零件有杠杆、齿轮、轴、弹簧、指针和度盘等。

一、结构位移量测

百分表和千分表是结构位移量测中最为常用的仪器之一。使用与其配套的附属装置后可以量测位移、应变、力、倾角等。

1. 百分表的构造

最小刻度值为 0.01mm 的叫百分表,通常的量程有 5mm 和 10mm,也有大量程的 30 ~ 50mm,允许误差 0.01mm。最小刻度值为 0.001mm 的叫千分表,通常的量程有 1mm 和 3mm,允许误差 0.001mm。千分表和百分表的结构相似,只增加了一对放大齿轮,灵敏度提高了 10 倍。

百分表是利用齿条—齿轮传动机构将线位移转变为角位移,并通过齿轮传动比进行放大的精密量具。图 2-25 是百分表的构造图。齿轮 6、7、8 将感受到的变形加以放大或变换方向,扇形齿轮和螺旋弹簧 5 的作用是使齿轮 6、7、8 相互之间只有单面接触,以消除齿隙间的无效行程。测杆 4 穿过百分表机体,其功能是感受试件的变形,当测杆上下运动时带动齿轮转动,再通过齿轮传递到长短针,使指针沿刻度盘旋转,指针移动的距离就可以在刻度盘上读出,该数值表示出测杆相对于百分表机体的位移。机体上的轴颈可供安装百分表使用,有些百分表的外壳背面设有耳环,以便于安装。

2. 磁性表座的构造与安装

磁性表座是百分表、千分表安装的配套的附属装置,也叫万能表架,用以夹持百分表或千

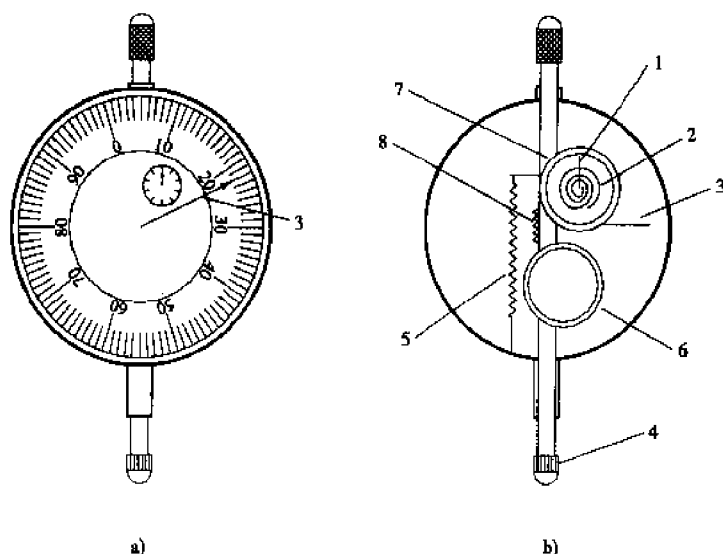


图 2-25 百分表的构造图

1-短针齿轮;2-齿轮弹簧;3-长针;4-测杆;5-测杆弹簧;6,7,8-齿轮

分表,可吸附在光滑的导磁平面或圆柱面上。图 2-26 是磁性表座的构造图。一般磁性表座在被吸附平面垂直方向上的拉力不低于 588N,剩磁拉力小于 3N,微调机构的微调量为 0~3mm,夹直径孔为 8mm。

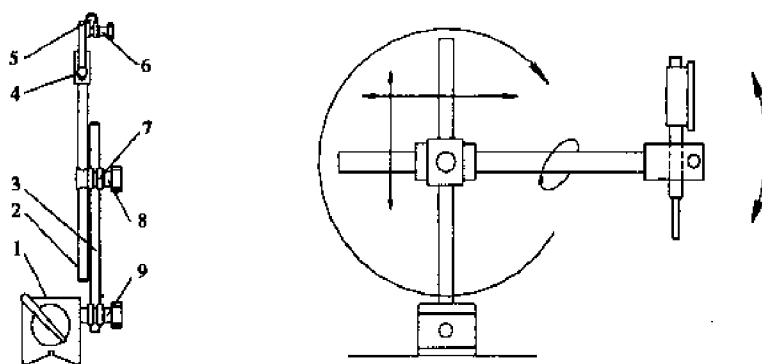


图 2-26 磁性表座的构造图

1-磁体开关;2,3-连接杆;4-微调螺栓;5-颈箍;6,8,9-紧固螺栓;7-连接件

磁性表座使用时,表座安装在临时搭设的支架上,支架应具有足够的刚度,避免支架本身的变形,并且与被测构件分离。磁性表座的安装可按以下步骤进行。

- (1)将百分表轴颈插于表架横杆上的颈箍 5 相应孔中,并旋紧螺栓 6;
- (2)接通磁路:顺时针旋转磁体开关 1 至限位处,磁性表座即与被吸附面吸牢;
- (3)调节:旋松螺栓 8 或螺栓 9,并移动连接杆 2 或 3,可将表调节到需要的位置;
- (4)微调:旋转微调螺栓 4 即能达到微调;
- (5)切断磁路:逆时针旋转磁体开关 1 至限位处,磁性表座即可由吸附面上取下。

磁性表座应经常保持清洁,移动时小心轻放,不使用时切断磁路,不要任意拆卸零件,长期不使用时应涂上油防锈,存放在干燥的地方。

3. 使用注意事项

- (1)使用百分表或千分表时,只能拿取外壳,不得随意用力推拉测杆,避免大力撞击,以免

造成齿轮系统损伤而影响精度。

(2)磁性表座上的各个螺栓要拧紧,颈箍夹住百分表轴颈时,不可夹得太紧,否则会影响测杆的正常移动。

(3)安装时,应将测杆顶住测点,使测杆与测面保持垂直。注意位移的大小和方向,调节测杆,使百分表的初读数在适当的范围,防止当变形达到最大值时量程不够。

(4)安装好百分表或千分表后,可用笔头轻轻敲击刻度盘玻璃,观察指针摆动情况。如果长指针轻微震动或在某一固定值小范围内摆动,说明百分表安装正常。

(5)百分表或千分表用于测挠度与变位时,应注意位移的相对性,测杆移动的方向与量测的位移方向完全一致。测点表面要进行磨平和硬化处理,以减少误差。

(6)百分表或千分表经过一段时间的使用或拆洗上油后,必须对其进行重新标定。

二、结构应变量测

1. 简易千分表应变计

应变,就是构件上某区域长度的相对变化 $\epsilon = \Delta L/L$ 。用特制的夹具把千分表安装在测点上即构成千分表应变计。这种应变计具有结构轻巧、携带方便、可单独使用和量程大的特点,特别适用于应变值较大的测试。

图 2-27 是简易千分表应变计装置。固定千分表和顶杆的夹具,可用钢、铜或铝合金等材料加工而成。夹具的底座根据粘贴或预埋的方式进行加工,一般做成平面,采用胶粘剂粘贴。在混凝土构件上粘贴夹具时,应先用金刚砂磨片将混凝土表面打磨平整,用毛刷和手持气筒把表面的灰尘清走,再用丙酮或乙醇擦洗干净。待表面干燥后即可用胶粘剂将夹具按预先选定的标距粘贴上,当胶粘剂完全固化后,才可安装千分表进行量测。如果必要,也可以采用螺栓固接。

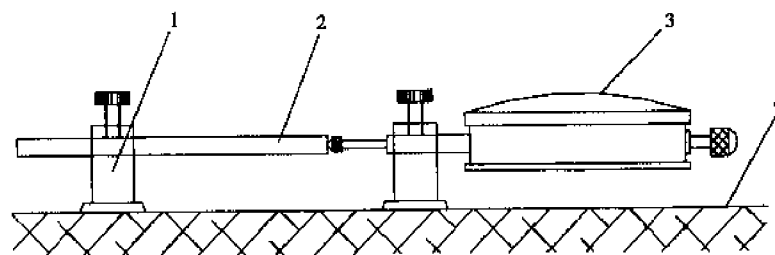


图 2-27 简易千分表应变计装置
1-金属夹具;2-顶杆;3-位移计;4-试件

2. 手持式应变仪

手持式应变仪的主要结构部分是百分表或千分表。手持式应变仪操作简单、可重复使用,比较适合于现场长期连续观测结构的应变。其构造原理见图 2-28。使用时,将千分表 6 固定在一根刚性骨架 1 上,其测杆则自由地顶在另一根刚性骨架的突出部分 3 上,两骨架之间用两片富有弹性的薄钢片 5 连接,因而能平行地相对运动每根骨架的一端带有一个尖形插轴 2,两插轴间的距离 L 即仪器的标距。使用时将仪器插轴插在构件上预先埋设的锥形小孔中,加载前后两次读数之差即为构件在 L 区段内的变形 ΔL ,除以 L 即得应变值。

由于手持式应变仪不是长期固定在测试结构上,而是每次读数时才安上去。因此,为了保证仪器工作平稳可靠,标距两端的小孔必须做得与仪器的插轴钢尖完全吻合。如果测孔做得

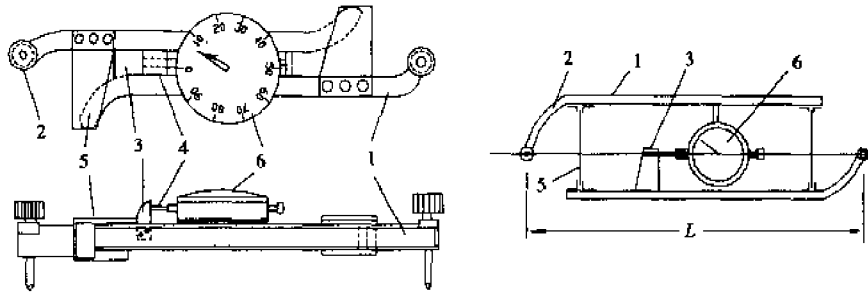


图 2-28 手持应变仪构造原理

1-刚性骨架;2-锥形插轴;3-骨架外凸缘;4-千分表插杆;5-薄钢片;6-千分表

不够标准,将使钢尖和测孔的接触不稳定,就会增大读数误差,甚至无法读取稳定的读数。为克服这一缺点,对于钢结构可在杆件上直接钻孔;对于圬工或木质构件应粘贴特制的钢脚标。钢脚标一般构造如图 2-29 所示,孔眼应按图 2-30 制作。此外,手持式应变仪测量的精度会随操作人员和每次操作方式的改变而有所改变。因此,在量测的过程中,一般不宜更换仪器操作者。

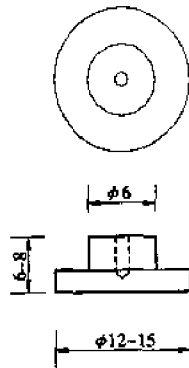


图 2-29 脚标

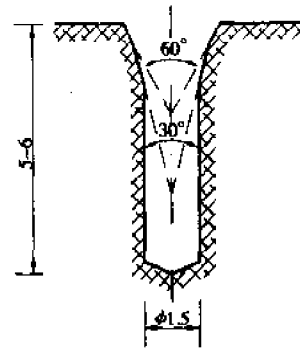


图 2-30 孔眼

使用手持式应变仪,还有一个温度影响的问题。即在长时间的量测过程中不可能在同一温度条件下读取初读数和加载读数,因此在量测读数中不仅包含了受载应变 ϵ ,还包含了温度引起的应变 ϵ_t 。为了从读数中扣除温度部分的影响,在量测过程中应进行温度补偿。一般较为常用的温度补偿方法是采用横向温度补偿法。在布设测点时,在垂直应变的方向布置温度补偿测点,如图 2-31 所示。

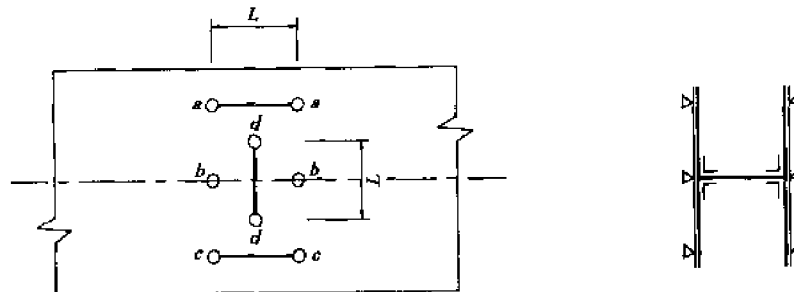


图 2-31 应变横向温度补偿

测点 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 等分别为构件的应变测点。 $d-d$ 为温度补偿测点,位于杆件中

部并垂直于应变测点。当对 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 测点读数时,同时对 $d-d$ 测点读数。则

$$\epsilon'_a = \epsilon_a + \epsilon_t, \epsilon'_b = \epsilon_b + \epsilon_t, \epsilon'_c = \epsilon_c + \epsilon_t, \epsilon'_d = \epsilon_t + \mu\epsilon_b \quad (2-32)$$

式中: μ ——材料泊松比;

ϵ_t ——温度应变;

$\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ ——测点 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 的荷载应变;

$\epsilon'_a, \epsilon'_b, \epsilon'_c$ ——测点 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 的综合荷载应变。

解式(2-32),可得

$$\epsilon_t = \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon_b}{1 + \mu} \quad (2-33)$$

$$\epsilon_a = \epsilon'_a - \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon'_d}{1 + \mu} \quad (2-34)$$

$$\epsilon_b = \epsilon'_b - \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon'_d}{1 + \mu} = \frac{\epsilon'_b - \epsilon'_d}{1 + \mu} \quad (2-35)$$

$$\epsilon_c = \epsilon'_c - \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon'_d}{1 + \mu} \quad (2-36)$$

三、结构转动变形量测

在桥梁试验时,结构的节点、截面或支座都有可能发生转动。测角器、倾角仪就是专门用来量测这种变形的仪器。

1. 杠杆式测角器

如图 2-32,在待测断面 2 上安装一支刚性金属杆 1,当结构发生变形引起金属杆转动一个角度 α ,用位移计测出 3、4 两点间的距离 L 和水平位移 δ_3, δ_4 ,即可算出转角 α

$$\alpha = \arctg \frac{\delta_4 - \delta_3}{L} \quad (2-37)$$

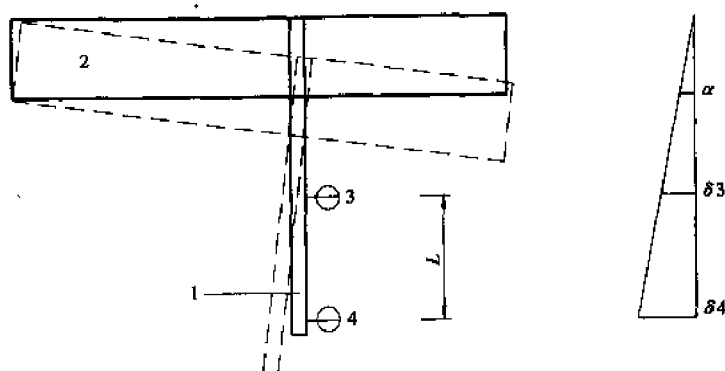


图 2-32 杠杆式测角器

1-刚性杆;2-试件;3、4-位移计

这种装置的优点是构造简单、灵敏度高,受温度的影响小,但是保证位移计固定不动是比较困难的,因此使用受到局限。

2. 水准管式倾角仪

水准管式倾角仪是利用零位法测定结构节点、截面或支座倾角,其构造如图 2-33 所示。高灵敏度的水准管被安放在弹簧片上,一端铰接在基座,另一端被弹簧片顶升,同时被测微计

的微调螺丝压住。使用时,将倾角仪的夹具装在测点上,利用微调螺丝调平,使水准泡居中,读取度盘读数 δ_1 。结构受力变形后水准泡偏移,再使水准泡重新居中,读取度盘读数 δ_2 ,然后按式(2-37)即可计算出转角 α 。这种倾角仪的精度可达 $1 \sim 2''$,量程可达 3° ,使用较为简便。但受温度的影响较大,使用时应防止水准管受阳光直接曝晒,以免水准管爆裂。

3. 电子倾角仪

电子倾角仪实际上是传感器的一种,其构造原理如图 2-34 所示。密封的玻璃器皿里盛有高稳定性的导电液体,三根电极 A 、 B 、 C 由器皿上平面等距离垂直插入到液体底部并加以固定。当传感器处于水平状态时,导电液体的液面保持水平,三根电极浸入液体内的长度相等,因此有 A 、 B 间的电阻 R_{AB} 等于 B 、 C 间的电阻 R_{BC} 。

当倾角仪发生微小转动时,导电液始终保持水平,使三根电极浸入液体内的长度发生变化,从而使 $R_{AB} \neq R_{BC}$ 。将 R_{AB} 、 R_{BC} 作为惠斯登电桥的两个桥臂,就建立了电阻变量 ΔR 与转角 α 的关系,这样就可以用电测原理测量和换算出倾角 α , $\Delta R \approx K\alpha$ 。

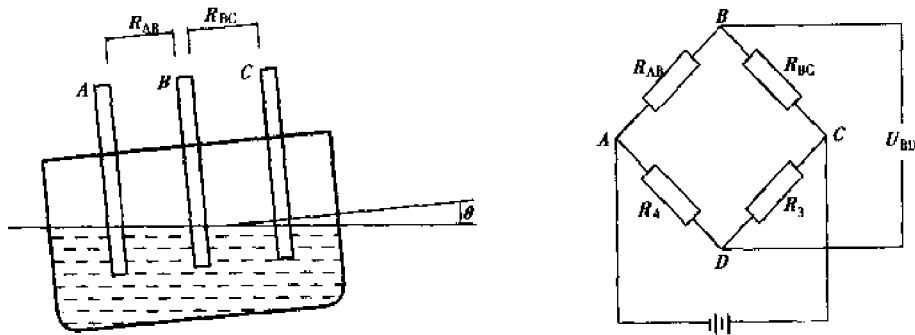


图 2-34 电子倾角仪

此外,结构转动变形量测也可以采用测量学方法,当转动量较大时,只要准确测出两点之间的距离和相对变形,就可以按照式(2-37)计算出转角。

4. 张线式位移计

张线式位移计是桥梁结构试验中测量较大位移的仪器。它是通过一根钢丝使仪器与结构测点相连,利用钢丝传递位移。张线式位移计可分为简易挠度计(利用杠杆放大的挠度计)、静载挠度计(利用摩擦轮放大的挠度计)和齿轮传动的挠度计,较为常用的是摩擦轮放大的挠度计。图 2-35 为简易挠度计原理图。张线式位移计使用时应注意两个问题,一是质量块不宜太轻,否则钢丝会在风力作用下产生较大的摆动,直接影响测量结果的准确性;二是钢丝宜采用低松弛材料,以减小测量过程中钢丝自身变形对测量结果的影响。

四、力的测量

在结构试验中,测定拉力和压力的仪器有各种的测力计。测力计的基本原理是利用钢制

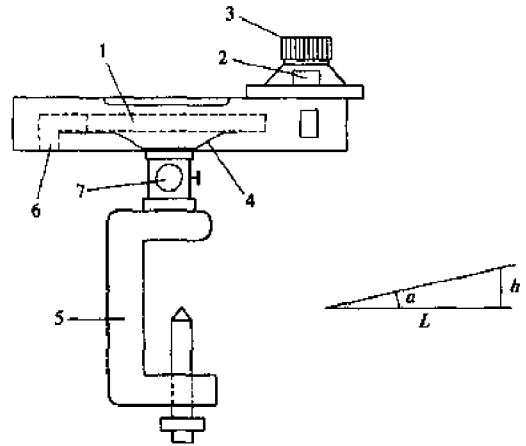


图 2-33 水准管式倾角仪

1-水准管;2-刻度盘;3-微调螺丝;4-弹簧片;5-夹具;6-基座;7-活动铰

弹簧、环箍或簧片在受力后产生弹性形变,再通过机械放大后用指针刻度盘来表示或位移计来反映读数。图 2-36 是用于测量张拉钢丝或钢丝绳拉力的环箍式拉力计。由两片弓形钢板组成一个环箍。在拉力的作用下,环箍产生变形,通过一套机械传动放大系统带动指针转动,指针在刻度盘上的示值即为拉力值。

图 2-37 是另一种环箍式拉、压测力计。它用钢环作“弹簧”,在拉、压力作用下的变形,经过杠杆放大后推动位移计工作。位移计示值与环箍变形关系应预先标定。

五、裂缝宽度量测

对于钢筋混凝土结构,裂缝的产生和发展,是结构反应的重要特征。确定结构的开裂荷载,对研究结构的破坏过程与结构的抗裂及变形性能均有十分重要的价值。

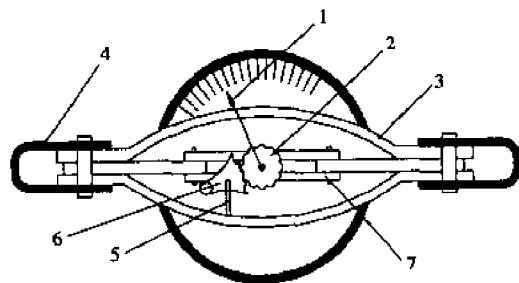


图 2-36 环箍式拉力计
1-指针;2-中央齿轮;3-弓形弹簧;4-耳环;5-连杆;6-扇形齿轮;7-可动接板

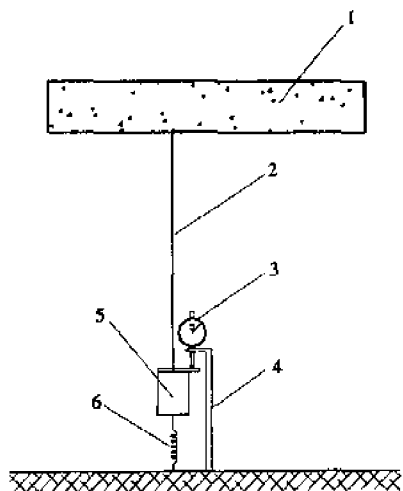


图 2-35 张线式位移计的原理
1-被测构件;2-钢丝;3-百分表;4-表架;5-质量块;6-弹簧

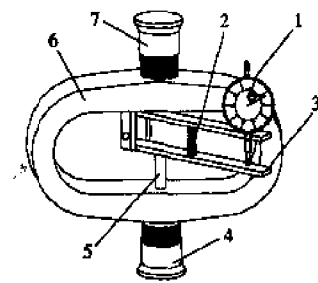


图 2-37 环箍式拉、压测力计
1-位移计;2-弹簧;3-杠杆;4、7-上下压头;5-立柱;6-钢环

一般地,检查裂缝出现的方法是借助于放大镜用肉眼观察,裂缝出现后,裂缝宽度可采用读数显微镜量测。读数显微镜是由光学透镜与游标刻度玻片等组成的复合仪器,如图 2-38 所

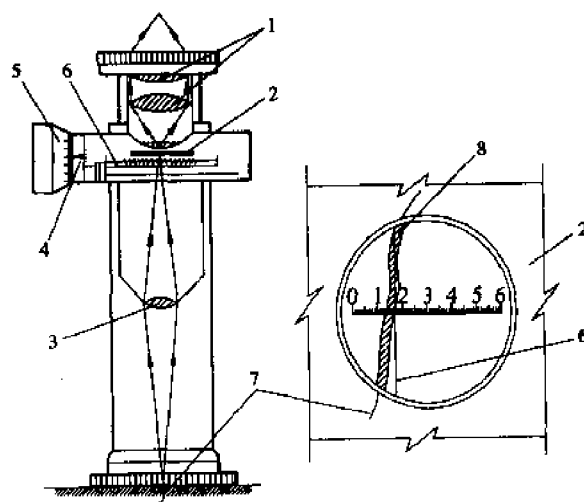


图 2-38 读数显微镜构造
1-目镜、场镜;2-上分划板;3-物镜;4-读数指针;5-读数轮鼓;6-下分划板;7-放大前裂缝;8-放大后裂缝

示。其最小刻度值要求不大于 0.05mm。其次,也有用印刷有不同宽度线条的裂缝标准宽度板(裂缝卡)与裂缝对比量测;或用一组具有不同标准厚度的塞尺进行试插对比,刚好插入裂缝的塞尺厚度,即裂缝宽度。后两种方法比较粗略,但能满足一般测试要求。

第四节 振动测量的传感器

桥梁结构的动载试验中,常有大量的物理量如应力(应变)、位移、速度、加速度等,需要进行量测、记录和分析。由于结构的动应变与静应变的测量元件、测量方法基本相同,不同之处在于需要采用动态应变仪进行量测。振动参量可用不同类型的传感器予以感受拾起,并从被测量对象中引出,形成测量信号,将能量通过测量线路发送出去,再通过仪器仪表将振动过程中的物理量进行测量并记录下来。传感器是振动测试系统中的一个重要组成部分,它具有独立的结构形式。按照被测物理量来分类,传感器可以分为位移传感器、速度传感器和加速度传感器;按照工作原理来分类,传感器可以分为机械惯性式传感器和电测传感器(包括磁电式、压电式、电感式、应变式)两大类。在本节中,主要介绍各类振动参量测试的传感器的原理与构造。

一、惯性式传感器

惯性式传感器有位移、速度及加速度传感器三种。它的特点是直接对机械量(位移、速度、加速度)进行测量,故输入、输出均为机械量。常用的惯性式位移传感器有:机械式测振仪、地震仪、盖格尔测振仪等。惯性式传感器的工作原理及其特性曲线在振动传感器中最具有代表性,其它类型传感器大都是在此基础上发展而得到的。

在惯性式传感器中,质量弹簧系统将振动参数转换成了质量块相对于仪器壳体的位移,使传感器可以正确反映振动体的位移、速度和加速度。但由于测试工作的需要,传感器除应正确反映振动体的振动外,还应不失真地将位移、速度和加速度等振动参量转换为电量,以使用电量进行量测。

惯性式传感器由质量块—弹簧组成,如图 2-39 所示。设 m 、 k 和 c 分别为它的质量、刚度和阻尼系数, u 为振动体位移, δ 为质量块与壳体间的相对位移,则可按达朗伯原理建立如下运动微分方程

$$-m \frac{d^2(\delta + u)}{dt^2} - c \frac{d\delta}{dt} - k\delta = 0 \quad (2-38)$$

将上式移项后得

$$m \frac{d^2}{dt^2} \delta + c \frac{d}{dt} \delta + k\delta = -m \frac{d^2}{dt^2} u \quad (2-39)$$

这是一个强迫振动方程,右端为被测对象产生的激发,如果被测物体作简谐振动,则激发为

$$u = u_0 \cos \omega t \quad (2-40)$$

在该简谐激发的作用下,方程的稳定解具有下列形式

$$\delta = \delta_0 \cos(\omega t + \theta) \quad (2-41)$$

将式(2-41)代入式(2-39),可求得传感器的频率特性如下:

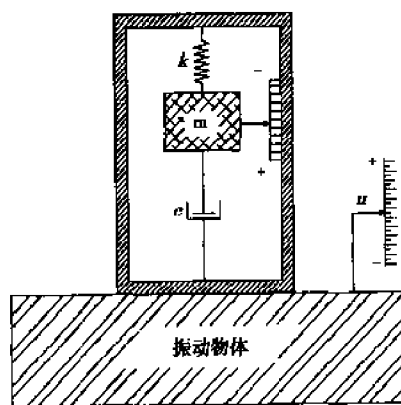


图 2-39 惯性式传感器的构造

$$\frac{\delta_0}{u_0} = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{\omega c}{m}\right)^2}} \quad (2-42)$$

$$\theta = \arctg \frac{\frac{\omega c}{m}}{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)} \quad (2-43)$$

式中: $\omega_n = \sqrt{k/m}$, 称为传感器固有频率;

$c_0 = 2\sqrt{km}$, 称为传感器临界阻尼系数;

$\zeta = c/c_0 = c/(2\sqrt{km})$, 称为相对阻尼系数(衰减系数)。

将 ω_n 、 c_0 、 ζ 代入式(2-42)和式(2-43)得

$$\frac{\delta_0}{u_0} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right]^2}} \quad (2-44)$$

$$\theta = \arctg \frac{\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2-45)$$

式(2-44)表达了惯性式传感器的幅频特性, 式(2-45)揭示了惯性式传感器的相频特性。

根据速度与位移的关系式: $\dot{u}_0 = u_0\omega$, 有

$$\frac{\delta_0}{\dot{u}_0} = \frac{\delta_0}{u_0\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2-46)$$

由加速度与位移的关系: $\ddot{u} = u_0\omega^2$, 有

$$\frac{\delta_0}{\ddot{u}_0} = \frac{1}{\omega^2} \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2-47)$$

根据上述原理, 当被测对象振动频率与惯性式传感器的固有频率之比变化时, 可以测量不同的振动参量。

(1) 当频比 $\omega/\omega_n \gg 1$ (即被测频率远大于传感器的固有频率) 时, 有

$$\frac{\delta_0}{u_0} \approx 1 \quad \text{即 } \delta_0 \approx u_0 \quad (2-48)$$

此时, 测得的壳体位移接近于物体的位移。若选用较大的阻尼系数, δ_0 更接近于物体位移, 此时惯性式传感器可用于动位移的测量, 故称为位移传感器。可见, 位移传感器应具有较低的固有频率和较大的阻尼系数, 如地震仪的固有频率低于 1Hz, 盖格尔扭振仪和 DVL 扭振仪的固有频率也在 1Hz 左右。这类扭振仪有较好的相频特性。图 2-40 为惯性式位移传感器的幅频特性曲线、相频特性曲线。

一般地, 桥梁结构、厂房、民用建筑的一阶自振频率在零点几到十几赫兹之间, 这就要求传感器具有很低的自振频率。为降低 ω_n , 必须加大质量块 m 。因此一般惯性式位移传感器的体

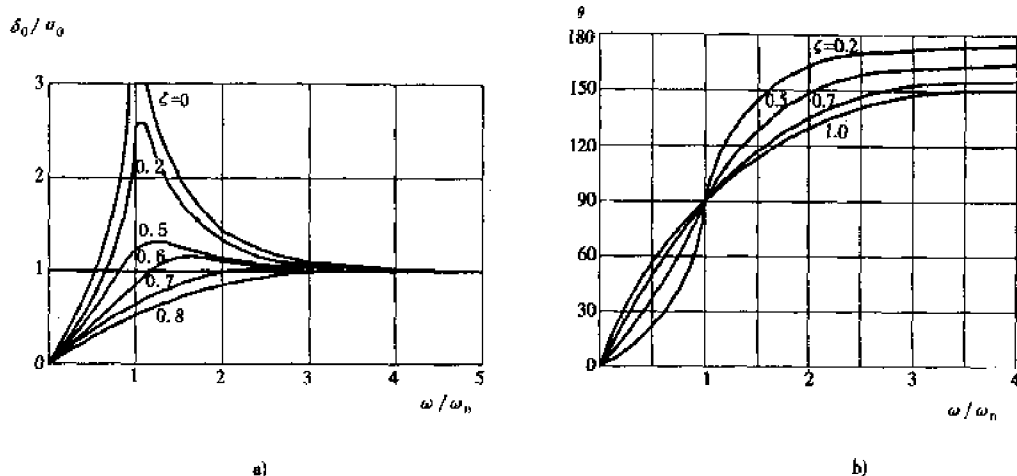


图 2-40 惯性式位移传感器的幅频特性曲线和相频特性曲线

a) 幅频特性曲线; b) 相频特性曲线

积较大也较重,使用时对被测系统有一定影响,特别对于一些质量较小的振动体就不太适用。

(2) 当 $\omega/\omega_n \rightarrow 1$ 时,有

$$\delta_0 = \frac{1}{2\zeta\omega_n} u_0 \quad (2-49)$$

此时测得的相对位 δ_0 与振动速度成正比,可以将惯性式传感器用于速度测量。但是,要保持频比在 1 附近是不容易实现的,同时传感器的有用频率范围非常狭窄,测试失真也较大,故一般很少在工程中使用。

(3) 当 $\omega/\omega_n \ll 1$ 时,有

$$\delta_0 \approx \frac{u_0}{\omega^2} \quad (2-50)$$

此时测得的相对位移与振动加速度成正比,当 $\zeta \approx 0.6 \sim 0.7$ 之间时,相频曲线接近直线,所以相频与频率成正比,波形不会出现畸变,可以将惯性式传感器用于加速度测量。

可以看出,惯性式传感器的适用性是比较差的,一般多用于动位移的测量,而速度和加速度的测量不宜采用惯性式传感器。

二、电测传感器

振动电测传感器的输入量是机械量,而输出量是电量,所以它是将机械量转换成电量的一种传感器,这是与机械惯性式传感器的不同之处。根据输出量的不同,分为发电式(振动量—电量)和参数式(振动量—电阻、电容、电感等电参数)两大类。还有一种最为常用的是压电晶体式传感器。

发电式传感器的特点是灵敏度高、性能稳定、输出阻抗低、频率响应范围较大,通过对质量弹簧系统参数的不同设计,可以使传感器既能测量非常微弱的振动,也能测量较强的振动,是工程振动量测中最为常用的拾振仪器。

压电式传感器具有动态范围大,频率范围宽等优点,被广泛用于振动量测的各个领域,尤其适用于宽带随机振动和瞬态冲击等场合。

1. 发电式传感器

发电式传感器由永久磁体、磁路(包括气隙)和运动线圈组成,如图 2-41 所示。根据电磁

感应定律,感应电势为

$$e = -BL\dot{\sigma}10^{-8} \quad (\text{V}) \quad (2-51)$$

式中: B ——磁通密度(高斯)(Gs);

L ——磁场内导线的有效长度(cm);

$\dot{\sigma}$ ——线圈运动速度(cm/s)。

令 $k = -BL10^{-8}$

则有

$$e = k\dot{\sigma} \quad (2-52)$$

由于电势与速度成正比,故为速度传感器,常用于结构振动速度的测量。

2. 参数式电测传感器

参数式传感器比较多,有电感式、电阻式、电容式等。常用的是电感传感器,即先将振动量转换成电感量,然后再变换为电量输出。电感传感器有四种类型:变间隙型、变面积型、螺管插铁型和齿型等。这类传感器性能稳定,常用来测量结构振动的速度。

(1) 变间隙型电感传感器

变间隙传感器由线圈、铁心、气隙和衔铁组成,工作原理如图 2-42 所示。测量时一般是将衔铁固定在振动体上。气隙 δ 随振动量而变化,从而引起磁通的变化,在线圈的输出端产生感应电势 e 。即

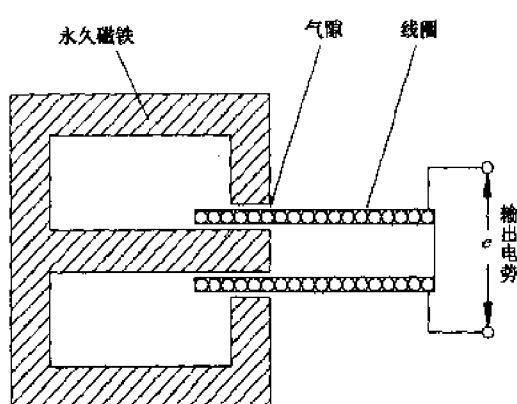


图 2-41 发电式传感器工作原理

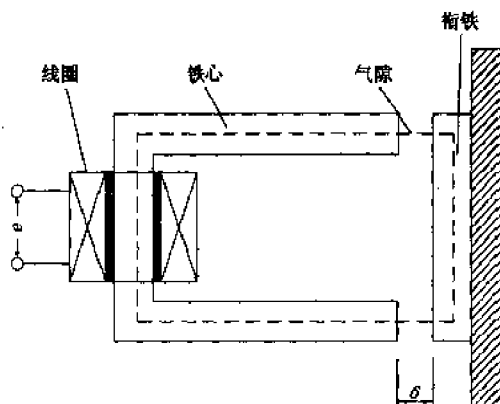


图 2-42 变间隙传感器的工作原理

$$e = -n \frac{d\phi}{dt} = -n \frac{d\phi}{d\delta} \frac{d\delta}{dt} 10^{-8} \quad (\text{V}) \quad (2-53)$$

式中: e ——感应电势(V);

n ——线圈匝数;

ϕ ——磁通量(WB)。

由上式可知,输出电势 e 与磁通量的变化率成正比,而磁通量的变化率与振动速度有关,即输出电势的变化量 Δe 与被测对象的振动速度成正比,所以利用该传感器可以测量结构振动的速度。

(2) 变面积型电感传感器

变面积型电感传感器的工作原理同变气隙型类似,不同之处是,该传感器的气隙保持不变,而是改变铁心与衔铁间的覆盖面积。所以衔铁的运动方向与上述变气隙型传感器衔铁的运动方向是垂直的。变面积型电感传感器的灵敏度比变气隙型小,但线性程度好,量程较大,

应用比较广泛。变面积传感器的工作原理如图 2-43 所示。

(3) 螺管插铁型电感传感器

螺管插铁型传感器是由一螺管线圈和一圆柱形铁心组成。线圈的电感量变化量与铁心插入长度的相对变化量成正比。这种传感的灵敏底低,但量程大,结构简单,因而应用很广泛。螺管插铁型传感器的工作原理如图 2-44 所示。

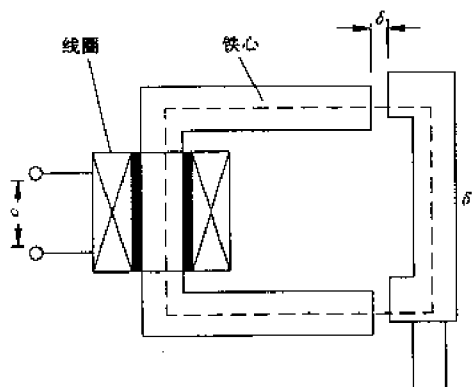


图 2-43 变面积传感器的工作原理

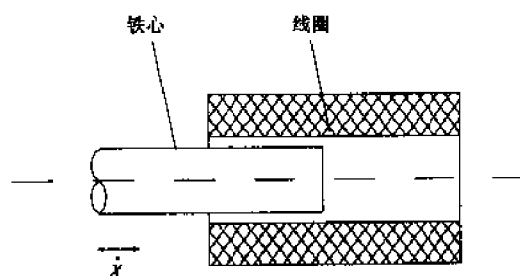


图 2-44 螺管插铁型传感器的工作原理

(4) 齿形传感器

齿形传感器也是一种气隙型传感器,它由导磁体、气隙、齿圈、线圈等组成。齿形传感器主要用于扭转振动、角振动的测量以及转速及大角位移量的精密测量等。传感器输出信号为感应电势,但所利用的参数不是电压幅值的变化,而是电势变化的频率。由其工作原理可知,当齿圈每转过一个齿时,气隙由小到大变化一次,产生一个脉冲波,其频率为

$$f = \frac{Nn}{60} \quad (2-54)$$

式中: f ——感应电势的变化频率(Hz);

N ——齿圈上的齿数;

n ——齿圈的转速(r/min)。

可见电势的变化频率与齿圈齿数和被测量物体的转速成正比。由于齿数是定值,故频率只随转速而变化。若取齿数 N 为 60,则频率 f 恰巧等于转速,故这种传感器可以测量角位移、角速度及转速。这是其它传感器难于做到的,如图 2-45 所示。

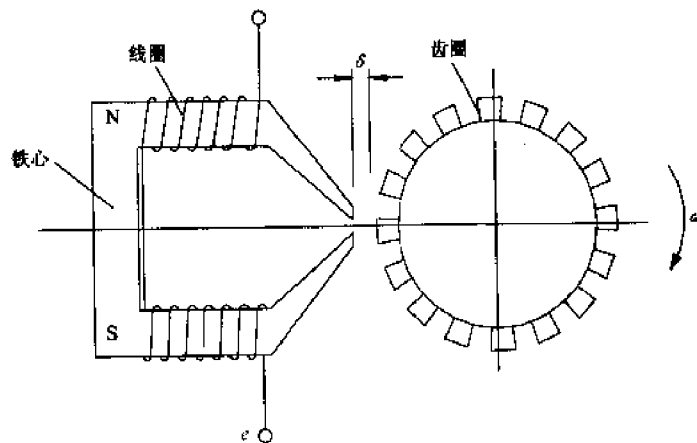


图 2-45 齿型传感器的工作原理

3. 压电晶体式传感器

某些晶体,如石英晶体或极化陶瓷,在一定方向的外力作用下或承受变形时,在晶面或极化面上将产生电荷,这种现象称为压电效应。反之,若将晶体放于电场中,其几何尺寸将发生变化,即产生变形,这种现象称之为逆压电效应。根据压电效应制成的传感器称为压电晶体式传感器。目前振动测量中最常用的是压电式加速度传感器和力传感器。压电式加速度传感器可以测量加速度,这种信号经采用电子方法一次积分后可以提供速度信号,二次积分后可以提供位移信号。这类传感器有许多优点:灵敏度高,频率范围广,动态范围大,线性良好,重量轻,体积小、安装方便,适用于各种不同的工作环境,故在振动和冲击测量中得到了广泛应用。

压电晶体式传感器主要由预紧弹簧、惯性块、压电元件、壳体和安装座等组成,其结构、工作原理如图 2-46 所示。压电元件和惯性块构成了一振动系统,其固有频率一般都很高,大都在 $10 \sim 15\text{kHz}$ 以上。由机械惯性式加速度传感器的原理得知,当被测频率远小于传感器的固有频率时,惯性块的相对运动与被测物体的振动加速度成正比,惯性质量产生的惯性力作用于压电元件上,产生压电效应,在元件的两极面生成电荷。

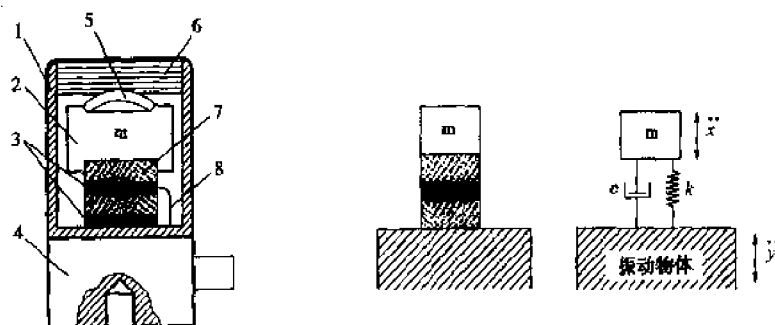


图 2-46 压电加速度传感器构造与工作原理

1-壳体;2-惯性块;3-绝缘垫;4-安装座;5-顶紧弹簧;6-顶盖螺帽;7-压电晶体片;8-引线

压电加速度传感器可以简化为一个单自由度的二阶力学系统,运动方程为

$$m(\ddot{X} + \ddot{Y}) + c\dot{X} + kX = 0 \quad (2-55)$$

式中: \ddot{X} 和 \ddot{Y} ——分别为传感器惯性块和振动物体的运动加速度;

m ——惯性块质量;

c ——阻尼系数。

设振动体作简谐运动,绝对位移为 $Y = Y_0 \sin \omega t$,代入式(2-52)有

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = -mY_0\omega^2 \sin \omega t \quad (2-56)$$

与前述惯性式传感器的运动方程一样,传感器的固频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \left(\frac{1}{s} \right) \text{ 或 } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)}$$

式中: k ——压电元件的刚度。

对于常见工程结构的振动,其固有频率多在几十赫兹以下,远小于压电晶体式传感器的固有频率,故有 $\omega_n \gg \omega$ (即频比 $\omega/\omega_n \ll 1$) 时,由惯性式加速度传感器原理知

$$x = \ddot{Y}/\omega_n^2 \quad (2-57)$$

则作用在压电元件上的弹性力 F 为

$$F = xk = \frac{\ddot{Y}}{\omega_n^2} m \omega_n^2 = m \ddot{Y} \tag{2-58}$$

也就是说,压电元件是在惯性块 m 的惯性力 F 作用下产生压电效应的,压电式晶体式传感器的压电效应与被测对象的加速度成正比,因此可用来测量结构振动的加速度反应。

三、传感器的选用与安装

在桥梁结构振动测试中,加速度一般在 $0.1\text{mm/s}^2 \sim 1\text{m/s}^2 (10\mu\text{g} \sim 0.1\text{g})$,频率一般在 $0.1 \sim 20\text{Hz}$ 范围内,通常采用加速度传感器来感受抬起结构的动力反应。常见加速度的性能比较见表 2-3。传感器的选用应遵循以下原则。

加速度传感器性能比较 表 2-3

结构形式	频率(Hz)	抗过载能力	体积	输出量	二次仪表	供电	是否适合野外	特 点
压电式	0.1 ~ 20k	好	小	电荷	电荷放大器	否	是	安装使用方便,体积小,不易损坏,但低频性能不好,需配电荷放大器
电磁式	0.4 ~ 80	好	较大	电压	放大器	是	是	体积大,低频性能一般,较易坏,需配放大器
压阻式	0 ~ 5k	差	小	电压		是	否	体积小,极易坏,不适合野外测试,需配直流电源
应变式	0 ~ 5k	差	小	应变	应变仪	是	否	体积小,极易坏,不适合野外测试,需配动态应变仪
力平衡式	0 ~ 80	好	较大	电压		是	是	低频性能好,体积大,是超低频信号测量的较佳选择,配电源

- (1)应保证传感器的质量小于被测系统有效质量的 1/10;
- (2)估计测试频率范围,并检查是否位于所选传感器的频率范围内;
- (3)估计测试的最大振动加速度的值,并检查是否已经超出传感器最大允许冲击加速度的 1/3。

一般说来,高灵敏度的传感器用于幅度小的振动,低灵敏度传感器用于振动较大的情况。因为桥梁振动的加速度很小,且频率较低,从表 2-3 中可以知,仅仅从性能指标上来看,压阻式与应变式加速度传感器也能满足桥梁动测的要求。实测中为了提高信噪比,总是希望传感器的灵敏度越高越好,灵敏度越高,以上两类加速度传感器的过载能力越小,例如量程 5g 的压阻式加速度传感器其过载为 50g,稍有碰撞就会损坏,因此不适合用于现场实测。

压电式(压电晶体或压电陶瓷)传感器的过载能力强,且价格便宜,体积小,便于携带,但其缺点是其工作频率一般为 0.1Hz 以上,考虑到电荷放大器的频响,其低频端的工作频率应更高。

在试验中,传感器的安装是很重要的,不正确的安装方法会产生次生振动,影响测试结果。传感器的安装应按照方便、牢靠的基本原则,根据传感器的安装部位和方向、传感器的重量来选择安装方法。传感器的安装方法有如下几种,可根据具体情况选用。

(1)用螺栓固定传感器底座,这是一种最有效的安装方法,但要在被测振动体上钻螺栓孔并攻丝,因而比较麻烦。

(2)用永久磁铁安装,即在传感器安装座上装一专用磁铁,然后利用磁铁吸力将传感器固定在振动体上,这种方法简单方便,但安装效果较用螺栓固定差。

(3)用蜡、石膏或两面粘贴胶带等材料胶粘,这种安装方法一般只能适用于常温。

(4)用专用探杆使用传感器与被测表面接触,振动通过探杆传递给传感器,一般用于不便于固定传感器的特殊情况,但这种方法只能用于频率在 1000Hz 以下的振动。

(5)用小砂袋放在传感器上方压紧。此法只适用于平面放置传感器。

(6)用快干胶或环氧树脂粘贴。

四、利用动测传感器测量索力

索结构桥梁包括斜拉桥、悬索桥、系杆拱桥等。在这些桥型中,悬索、拉索或吊杆是桥梁受力体系中的一个重要组成部分,拉索或吊杆的索力大小直接影响桥梁上部结构的受力和变形状态。因此,准确测试实际索力大小在施工监控和成桥检测中显得尤为重要。一般测定索力的方法有以下几种。

- ①电阻应变片测定法;
- ②拉索伸长量测定法;
- ③索拉力垂直度关系测定法;
- ④张拉千斤顶测定法;
- ⑤压力传感器测定法;
- ⑥振动测定法。

在这六种测试方法中,①~③从理论上分析是可行的,但实际操作中会遇到很多问题。④~⑤在拉索张拉过程中测试较为方便,只在锚头与垫板之间放置荷重传感器或千斤顶来测量索力,但不能测试成桥索力。方法⑥振动测定法,属于间接测量法,是将加速度传感器固定在拉索上,采用一定方法进行激振,测量拉索的振动响应,进行频谱分析得出拉索的自振频率,再根据索力与自振频率的关系计算索力。仪器配置图如图 2-47 所示。

一般地,在不考虑抗弯刚度的影响时,拉索的振动微分方程为:

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (2-59)$$

式中: y ——横坐标(垂直于索的长度方向);

x ——纵坐标(索的长度方向);

w ——单位索长的质量;

g ——重力加速度;

P ——索的张力;

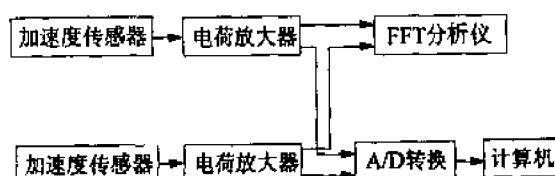


图 2-47 测索力仪器配置图

t ——时间。

在索两端固定的条件下,由上式可以求出拉索的自振频率:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{Tg}{w}} \quad (2-60)$$

$$P = \frac{4wl^2}{g} \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (2-61)$$

式中: f_n ——索的第 n 阶自振频率;

l ——索的计算长度;

n ——振动阶数。

振动法可采用激振器激振或人工激振。测试时使用专用的索夹或绑带将传感器固定在拉索上,进行激振和数据采集,通过计算分析可以很方便求出索力。用振动法测索力,不需要消耗一次性仪表,所用的仪器可以重复使用,既经济方便,又能满足工程检测的要求。

第三章

桥梁静载试验

QIAOLIANGJINGZAISHIYAN

第一节 静载试验的方法与程序

一、静载试验的目的

桥梁静载试验是按照预定的试验目的与试验方案,将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置上,观测桥梁结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量的试验项目,然后根据有关规范和规程的指标,判断桥梁结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。

桥梁结构包括上部结构和下部结构两部分。因此,桥梁结构的静载试验可以分为上部结构试验和下部结构试验。上部结构的形式有梁桥、拱桥、刚构桥、斜拉桥、悬索桥等各种体系,下部结构包括桥墩、桥台、基础三个部分,按照技术上可行、经济上合理的原则,它们之间可以组合成各式各样的桥梁结构形式。桥梁静载试验可以是生产鉴定性试验或科学研究性试验;可以是组成桥梁的主要构件试验或全桥整体试验;可以是实桥现场检测或者是桥梁结构模型的室内试验。为了能够较为客观地反映桥梁结构的工作性能,桥梁检测多采用实桥现场检测。一般地,桥梁静载试验主要是解决以下问题。

1. 检验桥梁结构的设计与施工质量,验证结构的安全性与可靠性。对于大、中跨度桥梁,都要求在竣工之后,通过试验来具体地、综合地鉴定其工程质量的可靠性,并将试验报告作为评定工程质量优劣的主要依据之一。

2. 验证桥梁结构的设计理论与计算方法,充实与完善桥梁结构的计算理论与施工技术,积累科学技术资料。随着交通事业的不断发展,采用新结构、新材料、新工艺的桥梁结构日益增多,这些桥梁在设计、施工中必然会遇到一些新问题,其设计计算理论或设计参数需要通过桥梁试验予以验证或确定,在大量试验检测数据积累的基础上,就可以逐步建立或完善这类桥梁的设计理论与计算方法。

3. 掌握桥梁结构的工作性能,判断桥梁结构的实际承载能力。目前,我国已建成了数万座各种型式的桥梁,在使用过程中,有些桥梁已不能满足当前通行荷载的要求,有些桥梁由于各种自然原因而产生不同程度的损伤与破坏,有些桥梁由于设计或施工差错而产生各种缺陷。对于这些桥梁,经常采用试验的方法,来确定其承载能力和使用性能,并由此确定限载方案或加固改造方案,特别是对于那些原始设计施工资料不全的既有桥梁,通过静载试验确定其承载能力与使用条件就显得势在必行。

随着我国桥梁建设事业的飞速发展,新结构、新材料、新工艺日益增多,带来了许多实际的理论、设计、施工问题,成为桥梁检测的新课题,而桥梁结构检测的成果又进一步验证、发展和完善了桥梁设计计算理论、施工技术及其他实践问题。另一方面,桥梁检测也为既有桥梁结构使用性能和残余寿命的评估提供了科学的依据,可以说,随着生产实践的发展,桥梁检测日益显得重要,同时,桥梁建设的不断发展也对桥梁检测提出了更高的要求。实践证明,要搞好一次桥梁检测,为设计、施工、理论研究提供可靠和完整的试验资料和科学依据,并不是一件轻而易举的事情,必须明确试验目的,遵循一定的程序,采用科学先进的量测手段,进行严密的准备和组织工作才可能达到预期的目标。为此,根据实际情况,必须把握住以下三个主要环节。

1.明确试验目的,抓住主要问题。桥梁静载试验涉及到理论计算、测点布置、加载、测试、数据分析整理等多个方面,因此,在进行试验之前一定要明确试验目的,预测试验桥梁的结构行为。这样才能有的放矢,合理地选择仪器仪表,准确地确定加载设备及加载程序,科学地布置测点及测试元件,充分地利用有限的人力、物力及其它有利条件,采取各种必要的手段,以达到预期的试验效果。

2.精心准备、严密组织。桥梁静载试验由于观测项目比较多、测点多、不同仪器仪表多,这就要求试验工作必须有严格的组织,统一的指挥,并能够紧密配合,协同作战。在正式试验之前,要做好充分的准备工作,对一些关键性的测试项目和测点要考虑备用的测试方法,注意防止和消除意外事故。大量试验证明,如果试验工作的某些环节考虑不周,轻者会使试验工作不能顺利进行,严重的会导致整个试验工作的失败。

3.加强测试人员培训,提高测试水平。参加试验检测的工作人员,必须在试验之前,熟练地掌握仪器的性能、操作要领以及故障排除技术和技巧,了解本次试验的目的、试验程序及测试要求。

二、静载试验的程序

一般情况下,桥梁静载试验可分为三个阶段,即桥梁结构的考察与试验工作准备阶段、加载试验与观测阶段、测试结果的分析总结阶段。

桥梁结构的考察与试验方案设计阶段是桥梁检测顺利进行的必要条件。桥梁结构检测与桥梁结构的设计、施工和理论计算的关系十分密切,现代桥梁的发展对于结构试验技术、试验组织与准备工作提出了更高的要求。准备工作包括技术资料的收集、桥梁现状检查、理论计算、试验方案制定、现场准备等一系列工作。因此,这一阶段工作是大量而细致的,实践证明,检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。桥梁结构的考察与试验工作准备阶段的具体工作内容如下。

1.技术资料的收集。桥梁技术资料包括桥梁设计文件、施工记录、监理记录、原有试验资料、桥梁养护与维修记录、环境因素的影响、现有交通量及重载车辆的情况等方面,掌握了这些资料,能使我们对于试验桥梁的技术状况有一个全面的了解。

2.桥梁现状检查。桥梁检查包括桥面平整度、排水情况、纵横坡的检查;包括承重结构开裂与否及裂缝分布情况、有无露筋现象及钢筋锈蚀程度、混凝土剥落碳化程度等情况的检查;也包括支座是否老化、河流冲刷情况、基础有无冻融灾害等方面的检查。通过桥梁现状检查,使我们对试验桥梁的现状做出宏观的判断。

3.理论分析计算。理论分析计算包括设计内力计算和试验荷载效应计算两个方面,设计内力计算是按照试验桥梁的设计图纸与设计荷载,按照设计规范,采用专用桥梁计算软件或通

用分析软件,计算出结构的设计内力;试验荷载效应计算是根据实际加载等级、加载位置及加载重量,计算出各级试验荷载作用下桥梁结构各测点的反应如位移、应变等,以便与实测值进行比较。

4. 试验方案制定。试验方案制定包括测试内容的确定、加载方案设计、观测方案设计、仪器仪表选用等方面,试验方案是整个检测工作技术纲领性文件,因此,必须具备全面、详实、可操作性强等基本特点。

5. 现场准备。现场准备工作包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试、通讯照明安排等一系列工作,现场准备阶段工作量大,工作条件复杂,是整个检测工作比较重要的一个环节。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上,按照预定的试验方案与试验程序,利用适宜的加载设备进行加载,运用各种测试仪器,观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等,并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时,为了使某一加载、观测方案更为完善,可先进行试探性试验,以便更完满地达到原定的试验目的。需要强调的是,对于静载试验,应根据当前所测得的各种指标与理论计算结果进行现场分析比较,以判断受力后结构行为是否正常,是否可以进行下一级加载,以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全,这对于存在病害的既有桥梁结构尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料,受各种因素的影响,原始测试数据一般显得缺乏条理性与规律性,未必能深刻揭示试验结构的内在行为。因此,应对它们进行科学的分析处理,去伪存真、去粗存精,进行综合分析比较,从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号,有时还需按照数理统计的方法进行分析,或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理,或按照有关规程的方法进行计算。这一阶段的工作,直接反映整个检测工作的质量。测试数据经分析处理后,按照相关规范或规程以及检测的目的要求,对检测对象做出科学的判断与评价。

目前,桥梁静载试验应按照我国现行的《大跨径混凝土桥梁的试验方法》、《公路桥梁设计规范》或《城市桥梁荷载规范》进行。最后,综合上述三个阶段的内容,形成桥梁静载试验报告。

第二节 桥梁结构静载试验的方案设计

试验方案设计是桥梁静载试验的重要环节,是对整个试验的全过程进行全面的规划和系统的安排。一般说来,试验方案的制定应根据试验目的,在充分考察和研究试验对象的基础上,分析与掌握各种有利条件与不利因素,进行理论分析计算后,对试验的方式、方法、数量等做出全面地规划。试验方案设计包括试验对象的选择、理论分析计算、加载方案设计、观测内容确定、测点布置及测试仪器选择等方面。

一、试验对象的选择

桥梁静载试验既要能够客观全面地评定结构的承载能力与使用性能,又要兼顾试验费用、试验时间的制约,因此,要进行必要的简化,科学合理地从全桥中选择具体的试验对象。一般说来,对于结构型式与跨度相同的多孔桥跨结构,可选择具有代表性的一孔或几孔进行加载试验量测;对于结构型式不相同的多孔桥跨结构,应按不同的结构型式分别选取具有代表性的

一孔或几孔进行试验;对于结构型式相同但跨度不同的多孔桥跨结构,应选取跨度最大的一孔或几孔进行试验;对于预制梁,应根据不同跨度及制梁工艺,按照一定的比例进行随机抽查试验。除了这几点之外,试验对象的选择还应考虑以下条件。

1. 试验孔或试验墩台的计算受力状态最为不利;
2. 试验孔或试验墩台的破损或缺陷比较严重;
3. 试验孔或试验墩台便于搭设脚手支架,布置测点及加载。

二、理论分析计算

确定了试验对象之后,要进行试验桥跨的理论分析计算,理论分析计算是加载方案、观测方案及试验桥跨性能评价的基础。因此,理论分析计算应采用先进的计算手段和工具,以使计算结果准确可靠。一般地,理论分析计算包括试验桥跨的设计内力计算和试验荷载效应计算两个方面。

设计内力计算是按照试验桥梁的设计图纸与设计荷载,选取合理的计算图式,按照设计规范,运用结构分析方法,采用专用桥梁计算软件或通用分析软件,计算出桥梁结构的设计内力。一般地,由于恒载已作用在桥梁结构上,设计内力计算是指活载内力计算,即按照《公路桥梁设计规范》计算由汽车、挂车、人群荷载所产生的各控制截面最不利活载内力,或按照《城市桥梁荷载规范》计算由城市-A级荷载、城市-B级荷载所产生的各控制截面最不利活载内力。对于常见桥型,控制截面的数量多少取决于准确地绘制出内力包络图的需要,控制截面最不利活载内力计算的一般方法是先求出该截面的各类影响线,然后进行影响线加载,再按照车道数、冲击系数及车道折减系数计算出该截面的最不利活载内力。此外,对于存在病害或缺陷的桥梁,还应按照《公路桥梁设计规范》进行内力组合,根据规范方法验算控制截面强度,以确保试验荷载实现活载内力时桥梁结构的安全。控制截面不仅出现设计内力峰值,也往往是进行观测量测的主要部位,把握住控制截面,就可以较为宏观全面地反映试验桥梁承载能力和工作性能。在进行静载试验时,常见桥型控制截面的设计内力及观测内容大致可归纳如下。

1. 简支梁桥:控制截面的设计内力包括跨中截面的弯矩与支点截面的剪力,对于曲线梁还包括支点截面的扭矩。相应的应变观测内容为跨中截面应变,必要时可增加中跨 $L/4$ 截面、 $3L/4$ 截面的应变;变形观测内容为支点沉降以及 $L/4$ 、跨中、 $3L/4$ 截面的挠度,对于曲线梁还包括跨中截面的扭转角。

2. 连续梁桥(连续刚构桥):控制截面的设计内力包括中跨跨中截面、中跨 $L/4$ 截面、中跨 $3L/4$ 截面、中支点截面、边跨(次边跨)跨中截面的弯矩、剪力。一般地,应变观测内容为中跨跨中截面、中支点截面、近中支点的边跨跨中截面的应变,必要时可增加中跨 $L/4$ 截面、中跨 $3L/4$ 截面的应变;变形观测内容为各跨支点沉降,各跨 $L/4$ 、跨中、 $3L/4$ 截面的挠度,对于曲线连续梁还应包括各跨支点、 $L/4$ 、跨中、 $3L/4$ 截面的扭转角。

3. T型刚构:控制截面的设计内力包括固端根部截面的弯矩与剪力、墩身控制截面的弯矩与轴力,相应的观测内容为固端根部截面、墩身控制截面的应变,悬臂端部的挠度、墩顶截面的水平位移与转角。

4. 拱桥:控制截面的设计内力包括拱肋或拱圈控制截面(拱顶、 $L/4$ 、拱脚)的轴力、弯矩,对于中承式、下承式拱桥还包括吊杆的轴力,对于系杆拱还包括系杆的轴力,对于上承式拱桥还包括立柱的轴力。与此相对应,观测内容为拱脚、 $L/4$ 、跨中、 $3L/4$ 处拱肋或拱圈截面的应变与挠度,墩台顶的挠度与水平位移,必要时还可增加 $L/8$ 、 $3L/8$ 、 $5L/8$ 、 $7L/8$ 截面的挠度。对于

中承式或下承式拱桥,还应测试吊杆的应变或伸长量;对于系杆拱,还应测试系杆的内力变化。

5. 斜拉桥:控制截面的设计内力包括加劲梁控制截面的弯矩、扭矩与轴力,索塔控制截面的弯矩与轴力,控制拉索的轴力,桥面系的局部弯曲应力等。相应的观测内容为各跨支点、 $L/4$ 、跨中、 $3L/4$ 截面的挠度,必要时还要观测上述部位的扭转角和横桥向位移,加劲梁控制截面及索塔控制截面的应变,索塔塔顶的水平位移,控制拉索的索力,桥面系的工作性能。

6. 悬索桥:控制截面的设计内力包括加劲梁控制截面的弯矩与剪力,主缆的轴力,索塔控制截面的轴力、弯矩,吊杆的轴力,桥面系的应力等。观测内容包括加劲梁支点、 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 、跨中、 $5L/8$ 、 $3L/4$ 、 $7L/8$ 截面的挠度以及上述测点在偏载情况下的扭转角和横桥向位移,加劲梁跨中截面、 $L/8$ 截面、索塔控制截面的应变,索塔塔顶的水平位移,控制吊杆的轴力,最大索股索力,主缆的表面温度,桥面系的工作性能等。

试验荷载效应计算是在设计内力计算结果的基础上,来确定加载位置、加载等级以及在试验荷载作用下结构反应大小的过程,也是一个反复试算的过程。由于桥梁静载试验为鉴定荷载试验,试验荷载原则上应尽量采用与设计标准荷载相同的荷载,但由于客观条件的限制,实际采用的试验荷载往往很难与设计标准荷载一致。在不影响主要试验目的的前提下,一般采用内力或变形等效的加载方式,即计算出设计标准荷载对控制截面产生的最不利内力,以此作为控制值,然后调整试验荷载使该截面内力逐级达到此控制值。为保证试验效果,根据《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求,在选择试验荷载大小及加载位置时应采用静载试验效率 η 进行调控,即

$$\eta = \frac{S_t}{S_d(1 + \mu)} \quad (3-1)$$

式中: S_t ——试验荷载作用下,检测部位变形或内力的计算值;

S_d ——设计标准荷载作用下,检测部位变形或内力的计算值;

μ ——设计取用的冲击系数。

η 取值宜在 0.8~1.05 之间。当桥梁调查、验算工作比较充分完善时, η 可采用低限值;当桥梁调查、验算工作不充分,尤其是缺乏设计计算资料时, η 可采用高限值。

根据上述两点,在计算试验荷载效应时,首先要根据控制截面的设计内力及加载设备的种类,初步确定加载位置、加载等级,以使试验荷载逐级达到该截面的设计内力,实现预定的加载效率,同时,应计算其他控制截面在试验荷载作用下内力,如未超过其设计内力,说明试验荷载的加载位置、加载等级有效且安全,如超过其设计内力,则应重新调整试验荷载的加载位置、加载等级,直至找到既可使控制截面达到其加载效率、又使其它截面在试验荷载作用下不超过其设计内力的加载方式为止。其次,根据最终确定的加载等级、加载位置及加载重量,计算出试验桥梁各级试验荷载作用下的结构行为,包括试验桥梁各应力测试截面的应力应变,各挠度测点的挠度,必要时还要根据试验桥梁的受力特点,计算出各测点的扭角、水平位移等结构反应,以便与实测值进行比较,评价该桥的工作性能。最后,在上述工作的基础上,结合现场实际情况,形成严密可行的加载程序,以便试验时实施。

三、加载方案设计

加载是桥梁静载试验重要的环节之一,包括加载设备的选用,加载、卸载程序的确定以及加载持续时间三个方面。实践证明,合理地选择加载设备及加载方法,对于顺利完成试验工作和保证试验质量,有着很大的影响。

1. 加载设备

桥梁静载试验的加载设备应根据试验目的要求、现场条件、加载量大小和经济方便的原则选用。对于现场静载试验,常用的加载设备主要有三种,即利用车辆荷载加载,利用重物加载,利用专门的加力架加载。

采用车辆荷载进行加载具有便于运输、加载卸载方便迅速等优点,是桥梁静载试验较常用的一种方法。通常可选用重载汽车或利用施工机械车辆,重物装卸运输比较方便。利用车辆荷载加载需注意两点,一是对于加载车辆应严格称重,保证试验车辆的重量与理论计算时车辆重量的取值相差不超过5%;二是尽可能采用与标准车相近的加载车辆,此时,应测量车轴之间的距离,如轴距与标准车差异较大时,则应按照实际轴距与重量重新计算试验荷载所产生的结构内力与结构反应。

重物加载是将重物(如铸铁块、预制块、沙包、水箱等)施加在桥面或构件上,通过重物逐级增加以实现控制截面的设计内力,达到加载效率。采用重物加载时也要进行重量检查,如重物数量较大时可进行随机抽查,以保证加载重量的准确性。采用重物直接加载的准备工作量较大,加载卸载时间较长,实际应用受到一定限制,重物加载一般用于现场单片梁试验、人行桥梁试验等场合。

专用加力架一般由地锚、千斤顶、加力架、测力环(力传感器)、支承等组成,如图3-1所示。千斤顶一端作用于加力架上并通过加力架传递给地锚,另一端作用在试验梁上,力的大小由测力环进行监控。一般说来,专用加力架临时工程量大,经济性差,仅适用于单片梁或桥梁局部构件的现场检测。

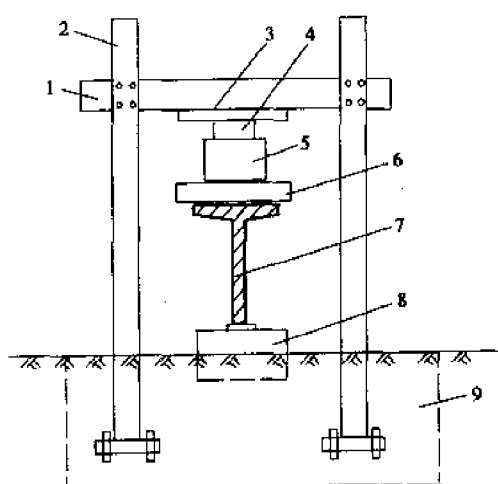


图3-1 加力架的构成示意

1-上横梁;2-拉杆;3-垫板;4-测力计;5-千斤顶;6-分配梁;7-试验梁;8-试验梁支承;9-地锚

2. 加载卸载程序

为使试验工作顺利进行,获得结构应变和变形随荷载增加的连续关系曲线,防止意外破坏,桥梁静载试验应采用科学严密的加载卸载程序。加载卸载程序就是试验进行期间荷载与时间的关系,如加载速度的快慢、分级荷载量值的大小、加载、卸载的流程等等。对于短期试验,加载程序确定的基本原则可归纳如下。

(1)加载卸载应该是分级递加和递减,不宜一次完成。分级加载的目的在于较全面地掌握试验桥梁实测变形、应变与荷载的相互关系,了解桥梁结构各阶段的工作性能,且便于观测操作。因此,《大跨径混凝土桥梁的试验方法》要求,静载试验荷载一般情况下应不少于四级加载,当使用较重车辆或达到设计内力所需的车辆较少时,应不少于三级加载,逐级使控制截面由试验所产生的内力逼近设计内力。采用分级加载方法,每级加载量值的大小和分级数量的多少要根据试验目的、观测项目与试验桥梁的具体情况来确定,如为了准确测出钢筋混凝土结构的开裂荷载,应在计算开裂荷载前,减小荷载增量幅度,加密荷载等级。

(2)正式加载前,要对试验桥梁进行预加载。预加载的目的在于起到演习作用,发现试验组织观测等方面的问题,以便在正式加载试验前予以解决。如检查试验仪器仪表的工作状态,检验试验设备的可靠性,检查现场组织工作与试验人员分工协作方面所存在的问题。此外,对于新建结构,通过预加载可以使结构进入正常工作状态,消除支点沉降、支座压缩等非弹性变

形。预加载的荷载大小一般宜取为最大试验荷载的 $1/3 \sim 1/2$, 对钢筋混凝土结构还应小于其开裂荷载。

(3) 当所检测的桥梁状况较差或存在缺陷时, 应尽可能增多加载等级, 并在试验过程中密切监测结构的反应, 以便在试验过程中根据实测数据对加载程序进行必要的调整或及时终止试验, 以确保试验桥梁、量测设备和人员的安全。

(4) 一般情况下, 加载车辆全部到位、达到设计内力后方可进行卸载, 卸载可采用 2~3 分级卸载, 并尽量使卸载的部分工况与加载的部分工况相对应, 以便进行校核。

在顺桥向, 加载车辆位置应尽可能靠近测试截面内力影响线的峰值处, 以便用较少的车辆来产生较大的试验荷载效应, 从而节省试验费用与测试时间。同时, 加载车辆位置还应尽可能兼顾不同测试截面的试验荷载效应, 以减少加载工况与测试工作量, 如三跨连续梁中跨跨中截面的加载与中支点截面的加载就可以互相兼顾。此外, 就横桥向位置而言, 对于直线桥跨每级荷载应尽可能对称, 以便减少测试工作量, 利用对称性校核测试数据。

在上述工作的基础上, 根据所确定的加载设备、加载等级、加载顺序与加载位置几个方面, 就可以形成一个比较严密的、操作性较强的加载程序, 作为正式试验时加载实施的纲领。

3. 加载时间

为减少温度变化对测试结果的影响, 加载时间宜选在温度较为稳定的晚 22 时至次日凌晨 6 时之间进行, 尤其是对于加载工况较多、加载时间较长的试验。如夜间加载或量测存在困难而必须在白天进行时, 一方面要采取严格良好的温度补偿措施, 另一方面应采取加载-卸载-加载的对策, 同时保证每一加卸载周期不超过 20min 为宜。

每次加载、卸载持续一定时间后方可进行观测, 以使结构的反应能够充分地表现出来, 如加载后持续的时间较短, 则测得的应变、变形值可能偏小。通常要根据观测仪表所指示的变化来确定加载持续时间, 当结构应力、变形基本稳定时方可进行各观测点读数。对于卸载后残余变形的观测, 零载持续时间则应适当延长, 这是因为结构的残余变形与其承载历史有关, 对于新建结构在第一次荷载作用下, 常有较大的残余变形, 以后再受力, 残余变形增加得很少。一般情况下, 试验时每级荷载持续时间应不小于 15min 方可进行观测; 卸载后观测残余变形、残余应变的时间间隔应不小于 30min。

四、观测内容

桥梁结构在荷载作用下所产生的变形可以分为两大类, 一类变形是反映结构整体工作性能的, 如梁的挠度、转角, 索塔的水平变位等, 称之为整体变形; 另一类变形是反映结构局部工作状况的, 如裂缝、纤维变形等, 这类称之为局部变形。在确定桥梁静载试验的观测项目时, 首先应考虑到结构的整体变形, 以概括结构受力的宏观行为; 其次要针对结构的特点及存在的主要问题, 抓住重点, 有的放矢, 不宜过分庞杂, 以能够全面地反映加载后结构的工作状态、解决桥梁的主要技术问题为宜。一般说来, 桥梁静载试验至少应观测以下内容。

1. 桥梁结构控制截面最大应力(应变)的数值及其随荷载的变化规律, 包括混凝土表面应变及外缘受力主筋的应力。通常, 应力测试以混凝土表面正应力测试为主, 一方面测试应变沿截面高度的分布, 借以推断结构的极限强度; 另一方面测试应变随试验荷载的变化规律, 由此判断结构是否处于弹性工作状态。对于受力较为复杂的情况, 还要测试最大主应力大小、方向及其随荷载的变化规律, 此外, 为了能够全面地反映结构应力分布, 常常在结构内部布设应力测点, 如钢筋应力测点、混凝土内部应力测点, 这类测点须在施工阶段就预埋相应的测试元件。

2. 一般情况下,要观测桥梁结构在各级试验荷载作用下的最大竖向挠度以及挠度沿桥轴线分布曲线。对于一些桥梁结构型式如拱桥、斜拉桥、悬索桥,还要观测拱肋或索塔控制点在试验荷载作用下顺桥向或横桥向的水平位移;对于采用偏载加载方式或对于曲线桥梁,还要观测试验结构变形控制点的水平位移和扭转变位。

3. 裂缝的出现和扩展,包括初始裂缝所处的位置,裂缝的长度、宽度、间距与方向的变化,以及卸载后裂缝的闭合情况。

4. 在试验荷载作用下,支座的压缩或支点的沉降,墩台的位移与转角。

5. 一些桥梁结构如斜拉桥、悬索桥、系杆拱的吊索(拉索)的索力,以及主缆(拉索)的表面温度。

五、测点布置

测点布置应遵循必要、适量、方便观测的基本原则,并使观测数据尽可能地准确、可靠。测点布置可按照以下几点进行。

1. 测点的位置应具有较强的代表性,以便进行测试数据分析。桥梁结构的最大挠度与最大应变,通常是试验者最感兴趣的,掌握了这些数据就可以比较宏观地了解结构的工作性能及强度储备。例如简支梁桥跨中截面的挠度最大,该截面上下缘混凝土的应力也最大,这种很有代表性的测点必须设法予以量测。

2. 测点的设置一定要有目的性,避免盲目设置测点。在满足试验要求的前提下,测点不宜设置过多,以便使试验工作重点突出,提高效率,保证质量。

3. 测点的布置也要有利于仪表的安装与观测读数,并对试验操作是安全的。为了便于测试读数,测点布置宜适当集中;对于测试读数比较困难危险的部位,应有妥善的安全措施。

4. 为了保证测试数据的可靠性,尚应布置一定数量的校核性测点。在现场检测过程中,由于偶然因素或外界干扰,会有部分测试元件、测试仪器不能处于正常工作状态或发生故障,影响量测数据的可靠性。因此,在量测部位应布置一定数量的校核性测点,如截面具有一个对称轴,在同一截面的同一高度应变测点不应少于2个,同一截面应变测点不应少于6个,以便判别量测数据的可靠程度,舍去可疑数据。

5. 在试验时,有时可以利用结构对称互等原理来进行数据分析校核,适当减少测点数量。例如简支梁在对称荷载作用下, $L/4$ 、 $3L/4$ 截面的挠度相等,两截面对应位置的应变也相等,利用这一点可少布置一些测点,进行测试数据校核。

六、测试仪器选择

根据测试项目的需要,在选择仪器仪表时,要注意以下几点。

1. 选择仪器仪表必须从试验的实际情况出发,选用的仪器仪表应满足测试精度的要求,一般情况下要求测量结果的极限相对误差不超过5%即可。

2. 在选用仪器仪表时,既要注意环境条件,又要避免盲目追求精度,因为精密量测仪器仪表的使用,要有比较良好的环境条件。

3. 为了简化测试工作,避免出现差错,量测仪器仪表的型号、规格,在同一次试验中种类愈少愈好,尽可能选用同一类型或规格的仪器仪表。

4. 仪器仪表应当有足够的量程,以满足测试的要求,试验中途的调试,会增加试验的误差。

5. 由于现场检测的测试条件较差,环境因素的影响较大,一般说来,电测仪器的适应性不

如机械式仪器仪表,而机械式仪器仪表的适应性不如光学仪器,因此,应根据实际情况,采用既简便易行又符合要求的仪器仪表。例如,当桥下净空较大、测点较多、挠度较大时,桥梁挠度观测宜选用光学仪器如精密水准仪,而单片梁静载试验挠度的量测宜用百分表。

第三节 试验现场组织

静载试验现场组织是实现预定的试验方案的重要保证,其内容包括试验前现场准备工作、加载测试工作及现场清理的全部内容。试验组织就是把上述内容按先后顺序互相衔接,形成一个有机、完整、高效率组织计划,并在试验中按照这个计划进行,只有遇到特殊情况或发现异常情况时,按照加载控制及加载终止的条件予以调整。

一、现场准备及测试工作安排

静载试验现场准备及测试工作包括试验前准备工作、测试量测及试验后现场清理工作。一般说来,试验前准备工作比较庞杂,试验方案的大部分工作都要在加载试验前具体化,要占全部试验工作的大部分时间。

1. 试验前准备工作

(1)为了能够较方便地布置测点、安装仪表或进行读数,必要时要搭设脚手架或使用升降设备,搭设的支架应牢固可靠,便于使用,同时注意所搭设的支架不要影响试验对象的自由变形。此外,要在距离测试部位适当的地方搭设棚帐,以供操作仪器使用;还要接通电源,安装照明设备。

(2)进行仪器仪表、加载设备的检查标定工作。试验出发前应对所携带的仪器仪表、设备进行全面的检查与标定,确保仪器仪表状态良好,并注意无遗漏,同时准备好各类人工记录仪器的记录表格。如采用加力架进行加载,要进行加力架强度、刚度、稳定性的验算,避免加载设备先于试验结构破坏的现象,并进行千斤顶的校验;如使用汽车或重物加载,要采用地磅进行严格地称重。

(3)按照试验方案所定的应变测点位置,进行应变测点的放样定位。对于结构表面测点,要进行表面打磨处理或局部改造(如在测点位置局部铲除桥面铺装);对于结构内部测点如钢筋计,则要在施工过程中预埋测试元件。然后,进行应变片的粘贴、编号、防潮与防护处理,进行温度补偿片的粘贴与防护,布设应变片与应变仪的连接导线,进行应变仪的预调平。对于要进行裂缝观测的试验桥梁,要提前用石灰浆溶液进行表面粉刷分格,表面分格可采用铅笔或木工墨斗,分格大小以20~30cm见方为宜。

(4)按照试验方案所定的变形测点位置,进行变形测点的定位布置。对于采用精密水准仪进行挠度测量,要进行测点标志埋设,测站、测量路线的布设;对于采用全站仪等光学仪器进行水平位移测量,要进行控制基准网、站牌、反光标志、测量路线的布设,测量测点的布置要牢靠、醒目,防止在试验过程中移位或破坏;对于采用百分表、千分表或位移计进行变形测量的,根据挠度理论计算值的大小和方向,安装测表并进行初读数调整及测读。

(5)根据预定的加载方案与加载程序,进行加载位置的放样定位,采用油漆或粉笔明确地划出加载的位置、加载等级,以便正式试验时指挥加载车辆或加载重物准确就位。

(6)对于运营桥梁,试验准备工作要注意测试元件、测试导线的防护,试验开始前应封闭交通,禁止闲杂人员和非试验用车辆进入。

(7)建立试验领导组织,进行人员分工安排。一般地,根据试验实际情况,设指挥一人,其下可根据使用的仪器型式、测试项目的情况划分小组,每组由经验丰富的人员担任组长,配备相应的通信联络工具或明确联络方式,以便统一指挥,统一行动。正式开始试验前,根据试验程序向全体工作人员进行技术交底,交底的内容包括试验测试内容、试验程序、注意事项等,明确所有测试人员的职责,做到人人心中有数。

(8)正式加载前,要进行预加载,以检查仪器的工作状态,消除非弹性变形。预加荷载卸载后,进行零荷载测量,读取各测点零荷载的读数。

2. 试验工作

(1)加载的位置、顺序、重量要准确无误,利用汽车加载时,要有专人指挥汽车行驶到指定位置。

(2)试验时,每台仪器应配备一个以上的观测人员进行观测记录,每级荷载作用下的实测值应与对应的理论计算值进行比较,如有异常情况应立即检查、分析原因,并立即向试验指挥人员汇报,以便试验指挥人员做出正确的判断。

(3)在每级荷载作用下,待结构反应稳定后,不同类别的测试项目(应变、变形、裂缝)应在同一时间进行读数。如某些项目观测时间较长,则应将观测时间较短的项目的读数时间安排在中间进行,以使各测试项目的读数基本同步。

(4)试验进行过程中,注意不要触动测试元件及测量导线,以免引起读数的波动。

3. 现场清理

(1)清理仪器仪表及可重复利用的测试元件,回收测试导线。

(2)拆除脚手架和棚帐,清理现场,以便开放交通。

(3)对于进行了打磨或局部改造的应变测点,要用混凝土或环氧砂浆进行修补;此外,还要拆除变形测量时所埋设的测点标志或临时站点设施。

二、加载控制及终止条件

在静载试验过程中,试验指挥人员应及时掌握各方面的情况,对加载进行控制。既要取得良好的试验效果,又要确保人员、仪器设备及试验桥梁的安全,避免不应有的损失。为此,应注意以下几点。

1.严格按照预定试验方案的加载程序进行加载,试验荷载的大小,测试截面的内力大小都应由小到大,逐步增加,并随时做好停止加载和卸载的准备。

2.对于变形控制点、应变控制点应随时观测、随时计算,必要时应对应变控制点的应变、典型裂缝的宽度进行实时监控观测,并将测试结果及时报告试验指挥人员。如实测值超过理论计算值较多或裂缝宽度急剧增大或听到异常的声响,则应暂停加载,待查明原因后再决定是否继续加载。

3.加载过程中应指定专人注意观察结构的薄弱部位是否有新裂缝出现,组合结构的结合面是否出现错位现象,结构是否出现不正常的响声,加载时墩台是否发生摇晃现象等。如发生这些情况应及时报告试验指挥人员,以便采取相应的措施。

4.试验过程中发生下列情况时应中途终止加载。

(1)在某一级试验荷载作用下,控制点的应变急剧增大,或某些测点应变处于继续增大的不稳定状态。

(2)在某一级试验荷载作用下,控制测点的应变或挠度超过规范允许值。

(3)加载过程中,结构原有的裂缝的长度、宽度急剧增大,裂缝宽度超过规范允许值的裂缝大量增多,出现新裂缝,对结构的使用寿命造成较大影响。

(4)发生其他损坏,影响桥梁结构的正常使用或承载能力。

第四节 桥梁桩基础静载试验

下部结构如桥墩、桥台、基础是桥梁结构的重要组成部分,它承担着上部结构的自重和汽车、人群等活荷载,并将这些荷载传递给地基。因此,下部结构的工作状态对桥梁结构的安全正常使用有决定性的影响。下部结构的静载试验是确定其承载能力的主要途径之一,也是将设计理论与工程实践统一起来的重要方法。下部结构的荷载试验包括墩台荷载试验和桩基础荷载试验,其中,桩基础静载试验是桥梁检测中较常进行的试验,特别是钻孔灌注桩在桥梁工程中广泛使用之后。在本节中,主要介绍桩基础静载试验的方法。

一、试验的目的与内容

桩基础静载试验的主要目的是确定桩的承载能力,即确定桩的允许荷载和极限荷载,查明桩基础强度的安全储备,了解桩基础的变位情况,并根据试验结果,修改原定的桩长或桩径,增减桩的数量,以确保桩基础的安全性与经济性。此外,通过桩基础静载试验还可以推求桩的计算参数,积累相应的设计计算资料,发展桩基础的设计理论与计算方法,完善桩基础的施工工艺。由于静载试验是在施工现场进行的,桩的类型、尺寸、施工方法,尤其是工程地质条件都十分接近拟建桥梁的实际情况。因此它的成果是最可靠准确的,桩基础的静载试验不仅可以鉴定桩的承载能力,而且对桩基础的设计、施工、科研都具有重要的意义。

桩基础静载试验分为竖向荷载试验与水平荷载试验。竖向荷载试验是对试验桩逐级施加竖向荷载,测量试验桩在各级荷载作用下的稳定沉降量,得出桩基础荷载与变位之间的关系,从而判定桩基础的竖向承载能力,简称“试桩”。水平荷载试验是对试验桩逐级施加水平荷载,测量试验桩在各级荷载作用下的水平变位,得出桩基础荷载与水平变位之间的关系,并由此判断试验桩的水平承载能力。为了能够准确地推断桩基础的承载力,试桩的数量应不少于桩基总数的2%,且不少于2根,试桩的施工方法、施工工艺、材料、尺寸及入土深度均应与设计桩基相同;同时,一些规范、规程对加载等级的划分、试桩的时间、变形稳定的标准、破坏的特征、资料的分析与评价等方面均有详细的规定。一般说来,试桩试验内容主要是测定荷载-变位关系,必要时还可增加一些应力、反力测试项目,大致内容如下。

1.荷载的测试。进行竖向荷载试验时,应测定竖向荷载的大小;进行水平荷载试验时,要测定水平荷载的大小。所有荷载都要分级施加在试桩上,直至达到规定的荷载或试桩出现破坏标志为止。由于荷载是试验的主要观测项目,所以应进行精确的测定。

2.变位的测试。变位是指桩在地面处和其他各截面的竖向位移、水平位移和转角。变位与荷载的关系说明了桩的工作性能,所以它是试桩必须测定的项目。此外,对于鉴定性试桩,还必须测定桩在地面处的变位以及试桩开裂情况。

3.应力的测试。通过测试桩中主要受力钢筋的应力、混凝土的应力,可以推算出测试截面的弯矩、轴力等,然后与理论计算结果比较,以便为修正计算参数或计算理论积累资料。

4.桩底反力测试。由于直接测定桩侧摩阻力有困难,通常多通过桩底反力和各截面轴向

力的测定来推算桩侧摩阻力,以便通过试桩荷载试验修正单位摩阻力。测定桩底反力,还可以查明钻孔桩底部的工作状态,判断桩底沉淀土的厚度。

5.土中应力测试。土中应力测试主要是测定试桩对土的水平压力(土抗力)的大小,此外,往往还钻取桩位处的原状土,以通过试验取得土的物理力学性能指标。

6.地面变形测试。地面变形是判断桩承载能力的重要因素,试验时应尽可能观测地面变形和开裂的情况。

二、单桩竖向荷载试验

1. 试验基本原理

桩的承载力由桩周围土的摩擦力和桩端岩石的抵抗力所组成,当这两个组成部分没有充分发挥之前,桩的下沉量随着荷载成正比地增加;当桩身产生突然增大的下沉或不稳定的下沉,说明桩身摩擦力和桩端阻力都已充分发挥,此时作用在桩头上的荷载就是破坏荷载,而它的前一级荷载就定义为桩的极限荷载。将桩的极限荷载除以安全系数,就得到桩的承载力。一般地,对于桥梁桩基础,安全系数采用 2.0。按照上述原理,试验时对试桩分级施加竖向荷载,测量试桩在各级试验荷载作用下的稳定沉降量,根据沉降与荷载及时间的关系,即可分析确定试桩的容许承载力。此外,还可以根据实际情况的要求,在加载过程中进行桩身应力、钢筋应力的测试,或通过预埋的压力传感器测试桩底反力。

2. 加载设备

试桩的加载方式主要有锚桩法和压重法两种。锚桩法是一种常用的加载装置,主要设备由锚梁、横梁和液压千斤顶等组成,如图 3-2 所示,采用千斤顶逐级施加荷载,反力通过横梁、锚梁传递给已经施工完毕的桩基,用油压表或力传感器量测荷载的大小,用百分表或位移计量测试桩的下沉量,以便进一步分析。一般说来,采用锚桩法进行试验应注意以下几个方面。

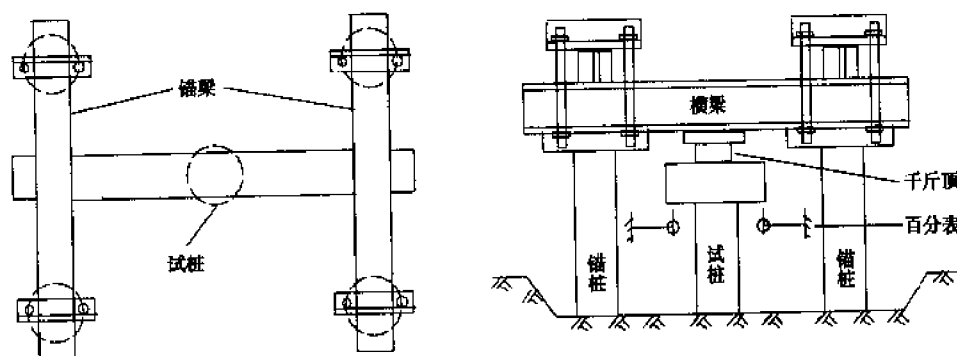


图 3-2 锚桩法加载装置

(1)锚桩设计。锚桩可根据需要布置 4~6 根,锚桩的入土深度应等于或大于试桩的入土深度,锚桩与试桩的距离应大于试桩直径的 3 倍,以减小锚桩对试桩的影响。同时,考虑到锚桩与试桩在受力性质上有所不同,试桩受轴向压力,由于桩身材料泊松比的关系,受力后其截面在横向有扩大的趋势,这有利于增强桩壁的摩阻力,地基土受力后的塑性区是在桩的下段发展;而作为反力装置的抗拔锚桩,受力后横向有缩小的趋势,相对地降低了桩壁摩阻力,塑性区在桩的上段发展,因此入土长度相等时,同一地点的锚桩的上拔力低于试桩的抗力。根据一些试验资料,上拔时桩壁的摩阻力极限值约为受压时的 $1/5 \sim 1/3$,可供设计锚桩时参考。此外,对于锚桩,应根据要求的锚固荷载,进行抗裂计算。

(2)加载装置设计。对于横梁、锚梁等加载装置,要进行强度、稳定性、变形验算,做出周密的设计,确保加载装置的加载能力不低于试桩破坏荷载或最大加载量的 1.5~2.0 倍,确保加载装置有足够的刚度。

(3)观测装置的布置。试桩受力后,会引起其周围的土体变形,为了能够准确地量测试桩的下沉量,观测装置的固定点如基准桩应与试桩、锚桩保持适当的距离,见表 3-1。

观测装置的固定点与试桩、锚桩间的距离 表 3-1

锚 桩 数 目	观测装置的固定点与试桩、锚桩间的最小距离(m)	
	与 试 桩	与 锚 桩
4	2.4	1.6
6	1.7	1.0

压重法也称为堆载法,是在试桩的两侧设置枕木垛,上面放置型钢或钢轨,将足够重量的钢锭或铅块堆放其上作为压重,在型钢下面安放主梁,千斤顶则放在主梁与桩顶之间,通过千斤顶对试桩逐级施加荷载,同时用百分表或位移计量测试桩的下沉量,如图 3-3 所示。由于这种加载方法临时工程量较大,多用于承载力较小的桩基静载试验。

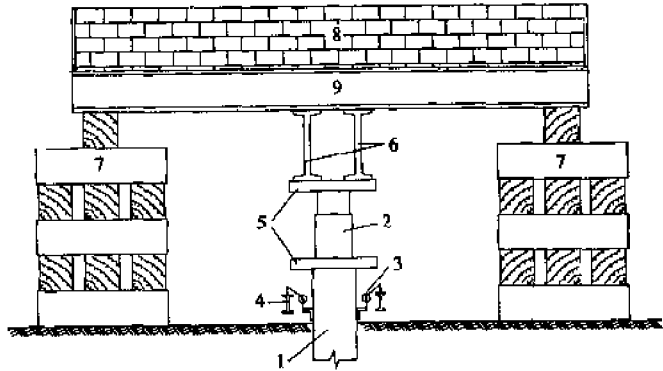


图 3-3 堆载法加载装置

1-试桩;2-千斤顶;3-百分表;4-基准梁;5-铜板;6-主梁;7-枕木;8-堆放的荷载;9-次梁

3. 试验基本要求

(1)试桩试验时间。对于沙性土地基的打入式预制桩,沉桩后距静载试验的时间间隔不得少于 7d;对于粘性土地基的打入式预制桩,沉桩后距静载试验的时间间隔不得少于 14d;对于钻孔灌注桩要满足桩身混凝土养护时间,一般情况下不少于 28d。此外,试桩的桩顶应完好无损,桩顶露出地面的长度应满足试桩仪器设备安装的需要,一般不小于 60cm。

(2)试桩的加载、卸载方法。根据有关计算公式,估计试桩的最大试验荷载,将其划分为 8~12 级,逐级等量施加;卸载可分为 4~6 级,逐级等量卸载,卸载量一般可取加载量的 2 倍;必要时,试桩的加载、卸载也可采取多循环方式。

(3)沉降测读时间。加载时,在每级加载后的第 1 小时内,每隔 15min 测读 1 次,以后每隔 30min 测读 1 次,直至沉降稳定为止。通常,沉降稳定的标准规定为:对沙性土 30min 沉降不超过 0.1mm,对粘性土 60min 不超过 0.1mm。待沉降稳定后,方可施加下一级荷载,循此加载测读,直至试桩破坏。卸载时,每级荷载持载 1h,按照 0、15、30、60min 测读 4 次,卸载至 0 荷载时,要测读残余稳定的沉降量,一般是在完全卸载后的 3h 后进行测读。

(4)终止加载条件。当出现下列情况之一时,一般认为试桩已达破坏状态,所施加的荷载即为破坏荷载,试桩即可终止加载。

a)试桩在某级荷载作用下的沉降量,大于前一级荷载沉降量的 5 倍;

b)试桩在某级荷载作用下的沉降量大于前一级荷载沉降量的 2 倍,且经 24h 尚未达到相对稳定;

c)荷载超过预估极限荷载的 50%,或已达到桩身材料的极限强度以及试桩桩顶出现明显的破损现象;

d)试桩桩顶的总沉降量超过 40mm。若桩长大于 40m,则控制的总沉降量可放宽,桩长每增加 10m,沉降量限值相应地增大 10mm。

4. 成果整理分析

为了比较准确地确定试桩的极限承载力,要根据试验原始记录资料,作成试桩曲线来分析。分析试桩曲线的方法很多,下面介绍两种常用方法。

(1) P - S 曲线转折点法

在由静载试验资料绘制的 P - S 曲线上,以曲线出现明显下弯转折点所对应的荷载作为极限荷载,如图 3-4 所示。其原因在于,当荷载超过极限荷载之后,桩周土达到破坏阶段发生大量塑性变形,引起桩发生较大的或较长时间仍未停止的下沉,所以在 P - S 曲线上呈现出明显的下弯转折点。为了便于判断,一般地, P - S 曲线以横坐标为荷载 P 轴,以 1cm 代表 50kN,纵

m 越大则桩的沉降速率越大。当桩顶荷载继续增大时,如发现绘制的 $S-\log t$ 线型不是一条直线而是折线时,则说明该级荷载作用下桩的沉降速率骤增,此为地基土塑性变形骤增的结果,标志桩已破坏。因此,可将相应于 $S-\log t$ 线由直线变为折线的那一级荷载定为试桩的破坏荷载,其前一级荷载即为桩的极限荷载。

三、单桩水平荷载试验

作用在桥梁桩基础的水平力有从上部结构传递下来的车辆制动力、风力,也可能有直接作用在下部结构的流水(流冰)冲击力、船舶撞击力等。同时,在水平荷载作用下,桩的承载能力、变形曲线、桩侧法向土应力的分布规律与桩周土层的地质特性、桩头约束特性、桩的数量及其布置方式等因素有关,是一个比较复杂的问题,依靠理论计算准确地确定这些参数是比较困难的,因此,通过荷载试验掌握桩的水平承载能力是非常重要的。单桩水平荷载试验的适用性和试桩的选择条件,原则上与竖向静载试验相同,但在测试方法和步骤上不同。目前,关于单桩水平荷载试验尚无统一的试验规定,确定极限荷载的标准也不一致,下面介绍常用的一般方法。

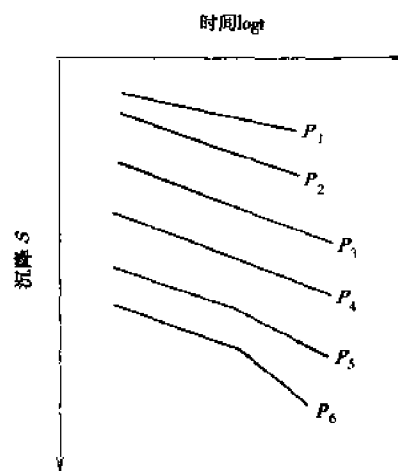


图 3-5 试桩 $S-\log t$ 曲线

桩的水平荷载试验的加载方式如图 3-6 所示,主要设备由垫板、导木、滚轴(圆钢)和卧式液压千斤顶等组成,采用千斤顶逐级施加荷载,反力直接传递给已经施工完毕的桩基,用油压表或力传感器量测荷载的大小,用百分表或位移计量测试桩的水平位移。观测装置、加载装置的要求原则上与竖向静载试验相同,但应注意以下两个方面。其一,反力装置的承载能力及其抗推刚度不应小于试桩,当采用顶推法加载时,反力装置与试桩之间的净间距不小于试桩直径的 5 倍;采用牵引法加载时,净间距不小于试桩直径的 10 倍,并不小于 6m。其二,基准点应设置在受试桩及反力装置影响的范围以外,其与试桩的净距一般不小于试桩直径的 5 倍,当设置在与加载轴线垂直方向或与试桩位移相反方向时,间距可适当减小,但不宜小于 2m。

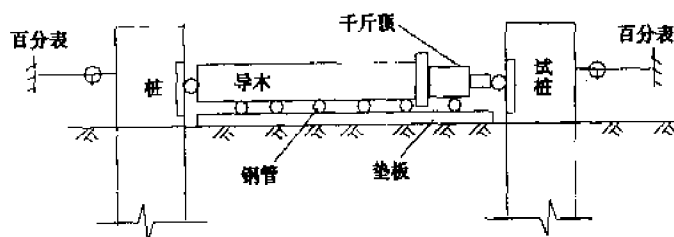


图 3-6 单桩水平静载试验装置

单桩水平荷载试验的基本要求可归纳如下。

(1) 试桩基本要求。试桩的位置应根据地质、地形、设计要求和该地区的相关经验综合考虑,选择有代表性的地点。对于打入预制桩,桩顶中心偏差不大于直径的 $1/8$,且不大于 10cm,轴线的倾斜度不大于 $1/100$;对于钻孔灌注桩,要保证桩的成孔情况、倾斜度、清孔效果等方面满足规范和设计要求。

(2)试桩试验时间。对于沙性土地基的打入预制桩,沉桩后距静载试验的时间间隔不得少于3d;对于粘性土地基的打入式预制桩,沉桩后距静载试验的时间间隔不得少于14d;对于钻孔灌注桩不少于28d。

(3)试桩的加载、卸载方法。加载方法一般采用单循环恒速水平加载方法,取试桩的估计最大试验荷载的1/10作为加载级差,试桩在施加某级荷载后,保持10min,记录其水平位移读数,然后卸载至零,再经过10min后测读其回弹位移,而后再加上原级荷载,如此即为一个循环。每级荷载均按以上过程反复5~6次后,方可施加下一级荷载,循此逐级加载,直至试桩达到极限荷载为止,根据实测资料,绘制水平静载试验位移-时间($U-t$)曲线,如图3-7所示。此外,试验也可以采用逐级等量连续加载方法,这种方法与竖向静载试验相同,即分级施加水平荷载,测读水平位移,直至桩周土出现明显的裂缝并隆起,或水平位移突然增大或水平位移经长时间后仍不能趋于稳定,即认为该试桩达到破坏状态,根据实测资料,绘制水平静载试验荷载-位移($H-U$)曲线。卸载时,每级卸载量为对应的两级加载量,总体上分为5级左右,逐级等量卸载。

(4)沉降测读时间。逐级连续加载时,在每级加载持载20min,按照0、5、15、20min测读;卸载时,每级荷载持载10min,按照0、5、10min测读3次,卸载至0荷载时持载30min,按照0、10、20、30min测读4次。循环加载时,根据循环加载持载时间,一般在每循环的0、5、15、20、25、30min测读6次位移。

(5)在恒定不变的荷载作用下,横向变形急剧增大,变形速率逐渐加快,或已达到试验要求的最大荷载或最大变位,一般认为试桩已达破坏状态,所施加的荷载即为破坏荷载,试桩即可终止加载。

采用循环加载方法时,可在绘制的水平试验位移-时间($U-t$)曲线上,将各级荷载反复作用的位移峰值连起来,形成该级荷载作用下的位移包络线(图3-7)。若此包络线为上凸时,说明在该级荷载反复作用下,桩的变形逐渐趋于稳定,试桩尚可进一步承载;若此包络线为下凹时,说明在该级荷载反复作用下,桩的变形不断增加,且不稳定,使桩趋于破坏,故可认为该级荷载为桩的破坏荷载,其前一级荷载即为该桩的极限荷载。采用逐级连续加载方法时,同竖向静载试验一样,分析桩的荷载-位移($H-U$)曲线,把相应于曲线上明显下弯转折点所对应的荷载定为极限荷载。将水平极限荷载除以安全系数,即可得出桩的横向容许承载力,安全系数一般取为2。

用水平静载试验确定单桩水平容许承载力时应注意到:

在实际工程中,桩基达到由上述按强度条件确定的极限荷载时的位移,往往已超过上部结构的容许水平位移,因此,很多情况下要按变形限值来确定单桩的水平容许承载力,即以桩的水平位移达到容许值时所承受的荷载作为桩的容许承载力。水平位移容许值可根据桩身材料强度、桩周土横向抗力要求、墩台顶横向位移要求以及上部结构容许水平位移限值来确定。目前,对于桥梁工程中的钻孔灌注桩,其在地面处水平位移限值为6mm,通常以此作为单桩横向容许承载力的判断标准,以满足上部结构、桩基、桩周土变形条件安全度的要求。可以说,这是一种较为概略的试桩水平位移限值标准。

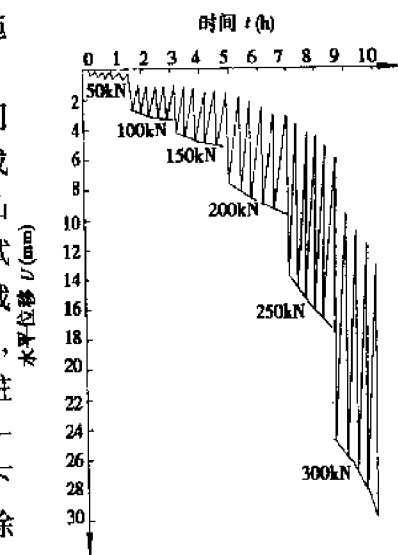


图3-7 桩基水平试验位移-时间($U-t$)曲线

第五节 静载试验数据整理分析

静载试验数据整理分析的直接目的是为了能够更好地达到预定的试验目的,以便对桥梁结构做出相应的技术评价。静载试验数据整理分析包括对现场实测数据进行修正、整理,也包括实测数据的评价方法与评价指标的取用。

一、实测资料整理

试验的原始资料与原始记录是研究试验结果、评价桥梁使用性能与承载能力的主要依据。原始记录是说明试验情况的第一手资料,从整体上看是最可靠的,但也难免是繁琐的、庞杂的,缺乏必要的条理性,不能够集中而明确地说明试验所得到的主要技术结论。因此,在实测资料的整理过程中,要进行去粗存精、去伪存真的加工,这样所得到的综合材料要比原始记录更为清楚地表达了试验主要成果。同时,在测试数据整理过程中,要重视和尊重原始资料与原始记录,珍惜有用的点滴资料,保持原始记录的完整性与严肃性。此外,对于一些量测方法和量测内容,要按照科学合理的方法进行计算和修正,以获取有价值的数据或进行量测误差分配。

1. 试验原始资料的内容

- (1) 试验桥梁的调查结果和验算结果;
- (2) 试验方案及编制说明;
- (3) 各测试项目的读数记录及结构裂缝分布图;
- (4) 桥梁结构材料的力学性能试验结果;
- (5) 荷载试验过程中出现的各种异常情况的记录、照片等。

2. 试验资料整理

一般地,对于处在弹性工作阶段的结构而言,测值等于加载读数减去初读数。在试验完成后,根据试验观测项目及相应的记录表格,就可直接计算出在各级荷载作用下相应的测值,找出各观测项目具有代表性的数据来。在测值计算时,要注意以下几个问题。

(1) 测值修正

测值修正是根据各类仪表的标定结果而进行测试数据修正的工作,如机械式仪表的校正系数,电测仪器的率定系数、灵敏系数,电阻应变仪观测导线电阻的影响等。一般说来,仪器仪表的偏差具有系统性,应在试验前设法予以排除,当这类因素对测试值的影响小于1%可不予修正。

(2) 测点应力计算

各测点的实测应力可按胡克定律,由实测应变求得,即

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (3-3)$$

钢材的弹性模量,可根据钢材的种类,采用有关规范或规程的规定值,也可截取试验结构做试件,通过试验测定该钢种的弹性模量。对于混凝土结构,其弹性模量确定方法有两种,一是按照设计图纸所规定的混凝土标号,采用规范规定值(表3-2);一是采用无损测试方法,测定试验结构混凝土的实际强度,然后根据实测强度查表求得相应的弹性模量值。第一种方法多用于新建桥梁结构,而第二种方法多用于既有结构的试验。

混凝土的弹性模量 E (MPa)

表 3-2

混凝土标号	15	20	25	30	40	50	60
弹性模量	2.3×10^4	2.6×10^4	2.85×10^4	3.0×10^4	3.3×10^4	3.5×10^4	3.65×10^4

当采用千分表、杠杆引伸仪、手持应变仪测读应变时,应变值为

$$\varepsilon = \frac{\text{测值(绝对变位)}}{\text{标距}} \quad (3-4)$$

采用电测法进行应变测量时,其测试结果(加载读数与初读数之差)即为应变值 ε 。一般地,测试截面的纤维应变是由多种应力综合组成,可能包括轴向应变、竖向弯曲应变、水平弯曲应变以及约束扭转应变等。测定这些应力所需要的测点数量和布置方式,随构件的截面形状与试验目的而定。对于单向应力状态,且沿主应力方向布置应变片的情况,正应力即为主应力;对于单向应力状态按主应力方向布置直角应变花的情况(图 3-8a)),主应力为

$$\sigma = \frac{E}{1 + \mu} \varepsilon \quad (3-5)$$

式中: ε ——应变测读值;

μ ——泊松比;

E ——混凝土弹性模量。

在平面应力状态下,当主应力方向已知、按主应力方向布置应变片测量应变,测值为 $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ 时,对应的主应力为

$$\sigma_a = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_a + \mu \varepsilon_b) \quad (3-6)$$

$$\sigma_b = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_b + \mu \varepsilon_a) \quad (3-7)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1 + \mu)} (\varepsilon_b - \varepsilon_a) \quad (3-8)$$

在平面应力状态下,当主应力方向未知,采用图 3-8b) 所示的 45° 应变花进行应变测量时,主应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{2[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]} \right) \quad (3-9)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2} \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{2[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]} \right) \quad (3-10)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \sqrt{2[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2]} \quad (3-11)$$

最大主应力与第一片应变片的夹角为

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (3-12)$$

平面应力状态主应力方向未知,采用图 3-8c) 所示的 60° 应变花进行应变测量时,主应力、剪应力为

$$\sigma_{\max} = E \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3(1 - \mu)} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3}{3} \right)^2 + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}{3}} \right] \quad (3-13)$$

$$\sigma_{\min} = E \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3(1 - \mu)} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3}{3} \right)^2 + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}{3}} \right] \quad (3-14)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{1 + \mu} \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3}{3} \right)^2 + \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}{3}} \quad (3-15)$$

最大主应力与第一片应变片的夹角为

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\sqrt{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{2\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3} \right) \quad (3-16)$$

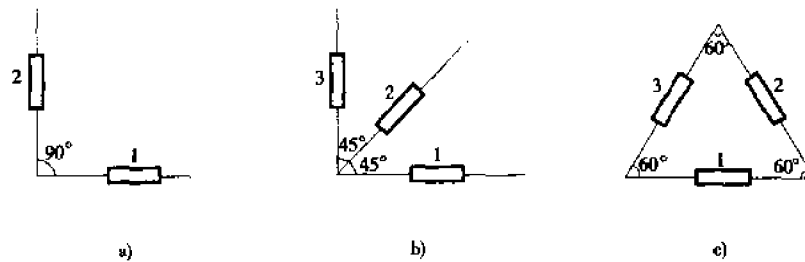


图 3-8 常见应变花型式

a) 直角应变花; b) 45°应变花; c) 60°应变花

(3) 挠度计算及误差处理方法

当采用精密光学仪器进行变形测量时,应根据测量误差理论、平差处理方法及试验所采用的测量路线进行测量误差的调整计算。首先,假定起始点的假设高程,计算各测点在各级试验荷载作用下的假定高程;然后,根据测量线路计算高差闭合差及高差闭合差的容许值,若测量成果的精度符合要求,即可进行高差闭合差的调整,调整方法是高差闭合差反号,按与各测段的路线长度成正比例地分配到各段高差中,计算出各测点在各级试验荷载作用下的改正高程;最后,将改正高程减去零载时的初始假定高程,即可得出各测点在各级试验荷载作用下的挠度。

(4) 支点沉降影响的修正

对于梁式桥,支点沉降会产生刚体位移和转角,测试结果不仅包括弹性挠度,也包括刚体位移,因此,当支点产生沉降时,应修正其对挠度的影响。以图 3-9 所示的简支梁为例,支点沉降为直线分布,修正量值可按式计算

$$\delta(x) = \frac{l-x}{l}a + \frac{x}{l}b \quad (3-17)$$

式中: $\delta(x)$ ——距支点 A 距离为 x 处的修正值;

l ——简支梁的跨度;

x ——挠度测点到 A 支点的距离;

a ——支点 A 的沉降量;

b ——支点 B 的沉降量。

(5) 荷载横向分布系数的计算

对于由多片主梁组成的桥梁结构,荷载横向分布的量测与计算往往是桥梁检测的内容之一。通过对桥梁结构跨中截面各主梁挠度的测定,可以绘制出跨中截面的横向挠度曲线,然后按照荷载横向分布的概念,运用变位互等原理,即可计算出任一主梁的荷载横向分布系数。一般地,各主梁截面尺寸相同,按照横向分布系数的定义

$$\eta_i = \frac{w_i}{\bar{w}_i} \quad (3-18)$$

式中: w_i ——荷载 P 引起的某一主梁的挠度;

\bar{w}_i ——荷载 P 均匀分布于全桥宽时所产生的挠度。

同时,荷载横向分布系数也可以用挠度图面积来定义(如图 3-10)

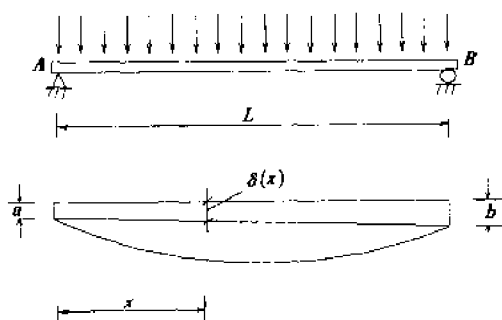


图 3-9 考虑支点沉降时梁的挠度修正

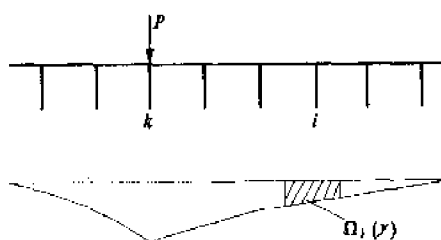


图 3-10 任一主梁的挠度曲线

$$\eta_i = \frac{\Omega_i(y)}{\Omega} = \frac{y_i}{\sum y_i} \quad (3-19)$$

其中: $\Omega_i(y)$ ——第 i 个主梁范围内挠度图的面积;

Ω ——挠度图的总面积;

y_i ——第 i 个主梁的挠度。

二、试验曲线整理

1. 荷载-变形曲线的整理

按照试验要求,可以针对各种变形如挠度、转角、应变等绘制荷载-变形曲线,以表达荷载与变形之间的关系。荷载与变形关系能够宏观地说明结构的基本状态和工作性质,说明结构是处于弹性,还是处于弹塑性工作阶段,同时也能反映某些局部现象如结构开裂与否以及节点的工作状态等。对于荷载-变形曲线,一般主要有四种类型,如图 3-11 所示。其中,曲线 1 是直线,它说明结构处于弹性工作状态,钢结构试验得到这样的结果是正常的,而钢筋混凝土、木结构等具有显著非弹性性质的结构,只有在承受多次正常荷载作用后再测试,才可能达到这样的结果。曲线 2 表示非弹性工作状态各种材料在初期加载时荷载-变形规律,曲线的斜率反映了结构的非弹性程度。曲线 3 是曲线 2 的

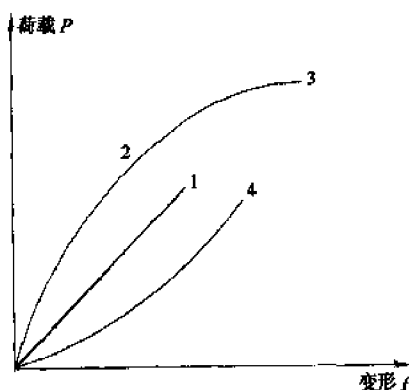


图 3-11 常见荷载-变形曲线的类型

延伸与极限情况,说明结构出现了屈服现象,如钢筋混凝土结构中钢筋的屈服、试桩的桩周土达到极限强度,在这种情况下,即使荷载不再增加,变形也可能进一步增大。曲线 4 主要表示卸载情况,表示一种非弹性变形的恢复过程。如果这种现象在加载过程中出现,则说明测试系统或试验结构本身有问题。

荷载-变形曲线的陡缓,表明了试验结构刚度的大小,曲线愈陡,结构刚度也愈大。根据荷载-变形曲线的形状与特征点,可以研究试验结构的工作状态,在试验曲线形状发生特别变化的地方,一定与结构中某些特殊的现象相联系,再利用其他实测资料进行综合分析,即可全面把握试验结构的受力行为。

2. 结构位置-实测变形曲线

结构位置-实测变形曲线主要有两种,其一是实测变形与试验结构位置曲线,如挠度沿桥轴线的分布曲线、挠度沿桥横向的分布曲线;其二是应变沿截面高度的分布曲线。利用沿桥梁跨径方向将各测点在各级试验荷载作用下实测挠度值连接起来的挠度曲线,可以宏观判断挠度测试结果是否正确,结构反应是否正常,卸载后残余变形如何分布等问题,有些时候还可利用对称性进行检查。利用沿桥梁横截面方向将各测点在各级试验荷载作用下实测挠度值连接起来的挠度曲线,可以进行横向分布系数的计算,进而验证所采用的横向分布计算理论的合理性。图 3-12 所示为一装配式钢筋混凝土 T 型梁在试验荷载作用下的桥轴线方向、跨中截面沿横桥向挠度实测曲线,通过上述两条曲线,就可以较为宏观、全面地把握试验结构的受力行为。利用应变沿截面高度的分布曲线,可以检查应变是否符合平截面假定,结合面是否产生相对滑移,判断试验结构是否处于弹性工作状态。

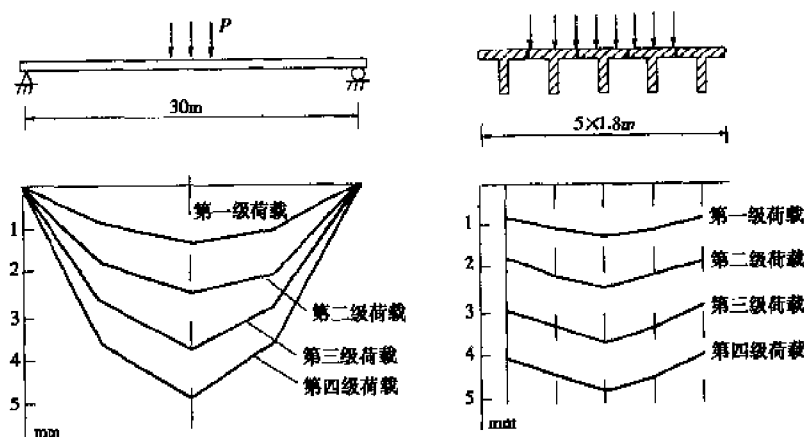


图 3-12 简支 T 梁静载试验实测曲线

3. 理论值-实测值关系曲线

将试验结构在各级荷载作用下的实测值与对应的理论计算值绘制在一起,进行实测值与理论值的比较,进而检验设计计算理论的正确性与合理性。图 3-13 所示为某连续梁桥跨中截面、支点截面应变测点理论值与实测值的比较。该桥跨度为 $19.62\text{m} + 25\text{m} + 30\text{m} + 25\text{m} + 19.62\text{m}$,截面为单箱五室箱形梁,桥宽 18.4m ,其中车行道为 15.0m ,人行道为 $2 \times 1.7\text{m}$,剪力滞后问题比较突出,在设计计算中,采用了板壳有限元方法进行试验荷载效应的分析计算,计算得出的有效分布宽度为 14.0m ,为验证计算结果的合理性,将静载试验各工况实测值与理论值进行比较,可以看出,理论值与实测值比较接近,但实测值总体上小于理论计算值,说明计算结果合理可信。一般说来,各种计算理论都作了一些简化和假设,和实际情况有一定出入,同时

也存在其适用范围、适用程度的问题,通过实测值与理论值的比较,不仅可以判断试验结构的使用性能与工作状态,而且可以验证计算理论,为规范的修订与完善积累设计资料,这对于新结构、新材料的推广应用有非常重要的意义。

4. 其他曲线

对于钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构,在试验过程中,当裂缝出现之后,应按照裂缝的开展情况绘制裂缝分布图,以及特征裂缝形态随试验荷载增加发展变化图,注明裂缝宽度、长度在每级荷载作用下的发展变化情况,并采用照相方式或采用米格纸将裂缝详细情况记录下来。进行破坏试验时,对于结构的破坏部位、破坏形态采用照相方式进行记录。

除了上述常用的试验曲线和图形外,根据试验类型、荷载性质、变形特点的不同,还可以绘制一些其它的结构试验特征曲线,如试验荷载-支点反力曲线,试桩的荷载-变形-时间曲线,某些结构局部变形(相对滑移、挤压)曲线、节点主应力轨迹曲线等。

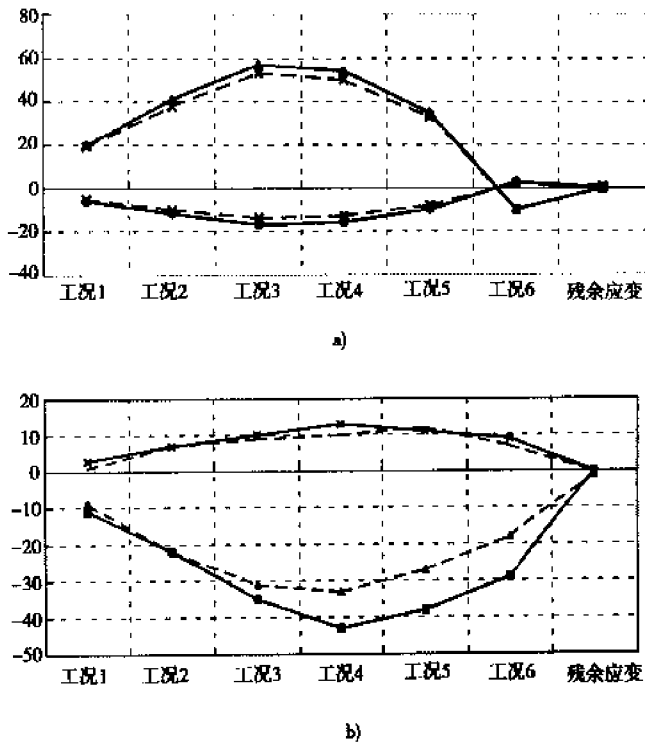


图 3-13 某试验桥梁实测应变-理论应变比较图

——理论值; ---实测值;纵坐标为 $\mu\epsilon$

a) 30m 跨跨中截面部分测点; b) 30m 跨支点截面部分测点

三、允许限值及评价方法

桥梁结构静载试验结束以后,要从试验结果的分析中对结构性能做出评价。如果试验的目的是为了探索结构内在的某种规律,或者是某一计算理论的准确度或适用程度,就需要对试验结果进行综合分析,找出互有联系的诸变量之间的相互关系,总结出相应的数学表达式或关系表。如果试验属于生产鉴定试验,则应从试验资料的整理分析中,提取充分而必要的数据,对结构的承载能力、使用性能做出判断,进而说明结构安全可靠和满足使用要求的程度。

桥梁结构静载试验的评价指标有两个方面。其一是根据控制测点的实测值与相应的理论计算值进行比较,来说明结构的工作性能和安全储备;其二是将控制测点的实测值与规范规定的允许值进行比较,从而说明结构所处的工作状况。下面对此做一详细说明。

1. 校验系数

所谓校验系数,是指某一测点的实测值与相应的理论计算值的比值,实测值可以是挠度、位移、应变或力的大小,校验系数表达式为

$$\lambda = \frac{\text{测点的实测值}}{\text{测点的理论计算值}} \quad (3-20)$$

当 $\lambda = 1$ 时,说明理论值与实测值完全相符;

$\lambda < 1$ 时,说明结构工作性能较好,承载能力有一定富余,有安全储备;

$\lambda > 1$ 时,说明结构的工作性能较差,设计强度不足,不够安全。

通常,桥梁结构的校验系数如表 3-3 所示,可供参考。

桥梁结构的校验系数 λ

表 3-3

类别	项目	校验系数
钢桥	应力	0.75 ~ 0.95
	挠度	0.75 ~ 0.95
预应力混凝土桥	混凝土应力	0.70 ~ 0.90
	钢筋应力	0.70 ~ 0.85
	挠度	0.60 ~ 0.85
钢筋混凝土桥	混凝土应力	0.60 ~ 0.85
	钢筋应力	0.70 ~ 0.85
	挠度	0.60 ~ 0.85

在大多数情况下,设计计算理论总是偏于安全的,往往忽略了一些次要因素,故桥梁结构的校验系数往往小于 1。然而,安全和经济是相对重要的,过度的安全储备是不必要的,设计时两者应尽可能兼顾。因此,《大跨径桥梁试验方法》规定,在最大试验荷载作用下,实测挠度、实测应变应满足下式要求

$$\beta < \frac{w_t}{w_d} \leq \alpha \quad (3-21)$$

式中: $\alpha = 1.05$, $\rho = 0.70$;

w_t ——实测值;

w_d ——相应的理论计算值。

同时,对于残余变形,《大跨径桥梁试验方法》规定,卸载后最大残余变形与该点的最大实测值的比值应满足下式的要求

$$\frac{w_p}{w_{\max}} \leq \gamma \quad (3-22)$$

式中: $\gamma = 0.2$;

w_p ——卸载后最大残余变形的实测值;

w_{\max} ——该点在试验过程中的最大实测值。

2. 规范允许限值

在设计规范中,从保证正常使用条件出发,对不同结构型式的桥梁分别规定了允许挠度、允许裂缝宽度的限值。在桥梁静载试验中,可以测出桥梁结构在设计荷载作用下控制截面的最大挠度及最大裂缝宽度,二者比较,即可做出试验桥梁工作性能与承载能力的评价。挠度评价指标为

$$\frac{f'}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right] \quad (3-23)$$

式中: $\left[\frac{f}{l} \right]$ ——规范规定的允许挠度限值,对于梁式桥主梁跨中,允许限值为 1/600;对于拱桥、桁架桥,允许限值为 1/800;对于梁式桥主梁悬臂端,允许限值为 1/300;

f' ——消除支座沉陷等影响的跨中截面最大实测挠度;

l ——桥梁计算跨度或悬臂长度。

对于钢筋混凝土桥,裂缝宽度应满足一定限值,即

$$\text{正常大气条件下} \quad \delta_{\max} < 0.2\text{mm} \quad (3-24)$$

$$\text{有侵蚀气体或海洋大气条件下} \quad \delta_{\max} < 0.1\text{mm} \quad (3-25)$$

对于部分预应力 B 类构件,裂缝宽度采用名义拉应力进行限制,即

$$\sigma_{\text{hl}} \leq [\sigma] \quad (3-26)$$

式中: σ_{hl} ——假设截面不开裂的弹性应力计算值,可按照材料力学方法计算;

$[\sigma]$ ——混凝土名义拉应力限值。

对于桥梁桩基础,为满足上部结构、桩基、桩周土变形条件安全度的要求,规范容许的地面处水平位移限值为 6mm;容许的竖向沉降为 40mm,超过此限值,即可认为该试桩已经达到破坏状态。

四、试验报告的编制

在对全部试验资料整理与分析的基础上,提出桥梁结构静载试验报告。试验报告内容包括以下各项。

1. 试验概况

试验概况的主要内容包括:试验桥梁的结构型式、跨度、桥宽、设计荷载、构造特点、施工概况等。对于鉴定性试验,要说明设计或施工过程中存在的技术问题,以及其在使用性能的影响。对于科学研究性的试验,要说明设计施工中需要解决的问题。

2. 试验目的与依据

根据试验桥梁的特点,要有针对性的地说明结构静载试验所要达到的目的与要求,说明试验的依据,试验对象的选取等。

3. 试验方案

试验方案包括理论分析计算结果、加载方案及加载程序、观测项目、测点布置、测试人员的组织安排及测试仪器选择等方面。

4. 试验日期及试验过程

主要说明组织桥梁静载试验的起讫日期,加载观测时间的安排及试验准备阶段的情况,此外,还要说明试验过程有无异常情况出现,试验时遇到的特殊问题及其解决方法等。

5. 试验主要成果与分析评价

依据桥梁静载试验的观测项目,将理论计算值、实测值及有关的参考限值进行比较,说明理论与实测的符合程度,从而说明试验对象的使用性能与承载能力,以及试验中所发现的新问题。综合实测数据、外观检查等方面的资料,说明试验对象的施工质量。对于一些科研性试验,要通过综合分析,说明计算理论的正确性或适用范围,以及存在的尚未解决的问题,如果试验资料丰富,还可以提出经验公式或参数图表。

6. 技术结论

在对测试资料综合分析的基础上,得出最后的技术结论,并对试验桥梁做出科学的评价。对于存在问题的桥梁结构,还要提出维修养护或加固改建的意见或建议。

7. 经验教训

从结构试验检测的角度,对本次试验的计划、程序、测试方法等方面,总结经验,提出不足或改进的意见。

8. 试验记录、图表、照片的摘录

将试验实测数据,以图表曲线的形式表达出来;对于试验桥梁所存在的缺陷,如果可能,以照片的形式记录下来。

第六节 静载试验实例

一、后张法预应力混凝土梁

1. 工程概况

某地铁工程所使用的一批后张部分预应力混凝土梁,长 24.6m,计算跨径 24.0m,截面为工字型,梁高 1.2m,上翼缘顶宽 1.6m,下翼缘底宽 1.08m,跨中腹板厚度 0.26m。设计荷载为地铁荷载,梁体混凝土为 C60,预应力筋采用 8-7 ϕ 5 的钢绞线。为检验该批预制梁的施工质量、承载能力及使用性能,根据《大跨径混凝土桥梁的试验方法》、《铁路部分预应力混凝土梁设计及验收规定》、《部分预应力混凝土结构设计建议》以及有关的设计文件资料,结合预制现场条件进行了静载试验。现简介如下。

2. 试验荷载及加载方案

简支梁控制截面为跨中截面,控制内力为跨中截面的正弯矩。经计算,该梁由二期恒载所产生的跨中弯矩 $M_2 = 1274.4\text{kN}\cdot\text{m}$,由活载所产生的跨中弯矩 $M_3 = 1847.9\text{kN}\cdot\text{m}$,因此,该梁的设计控制内力为 $M = M_2 + M_3 = 3122.3\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

根据现场情况,本次试验采用沙袋加载,即在梁顶宽 1.6m、长 24m 的范围内均布施加 8 层沙袋,加载的总高度约为 1.2m。在上述试验荷载作用下,跨中截面的最大弯矩为 $2695.7\text{kN}\cdot\text{m}$,则试验荷载效率 $\eta = 2695.7/3122.3 = 0.86$ 。说明试验的加载方法是有效安全的。在试验时,采用 C30 少筋混凝土浇筑临时墩,在临时墩上设置橡胶支座,以确保实际受力情况与计算图式一致。此外,为了便于沙袋堆放,采用 2.4m 长、0.1m 见方的方木加宽堆载面。据此,最终确定的加载程序如下。

(1) 加载前对沙袋重量进行过磅抽检,抽检量不少于沙袋总数的 5%,确保沙袋重量在 $50 \pm 2\text{kg}$ 范围内。正式加载前,非工作人员退场,各试验量测仪表读数调零,进行第一次空载读数。

(2) 加载阶段

工况 1: 第一级荷载,将 450 个沙袋均匀布置在 $24\text{m} \times 2.2\text{m}$ 范围内,加载高度约为 0.30m,相应的荷载集度约为 $q = 9.36\text{kN/m}$ 。

工况 2: 第二级荷载,将 450 个沙袋均匀布置在 $24\text{m} \times 2.2\text{m}$ 范围内,加载高度约为 0.30m,相应的荷载集度约为 $q = 9.36\text{kN/m}$ 。

工况 3: 第三级荷载,将 450 个沙袋均匀布置在 $24\text{m} \times 2.2\text{m}$ 范围内,加载高度约为 0.30m,相应的荷载集度约为 $q = 9.36\text{kN/m}$ 。

工况 4: 第四级荷载,将 450 个沙袋均匀布置在 $24\text{m} \times 2.2\text{m}$ 范围内,加载高度约为 0.30m,

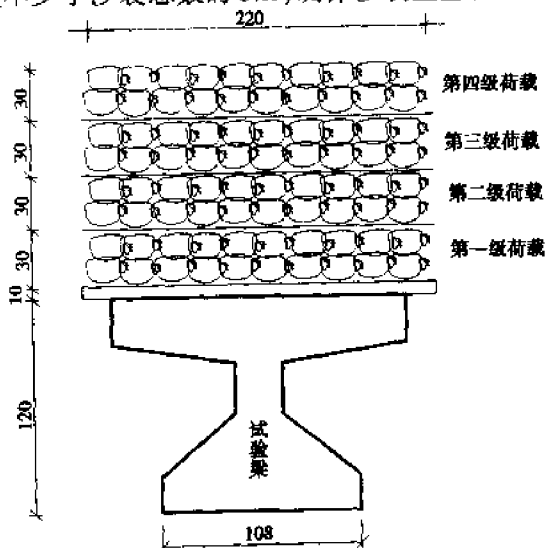


图 3-14 试验梁沙袋加载示意图(尺寸单位:cm)

相应的荷载集度约为 $q = 9.36\text{kN/m}$ 。

(3) 卸载阶段

工况 5: 第三、第四级荷载卸载;

工况 6: 第一、第二级荷载卸载。

试验加载如图 3-14 所示。加载过程中, 每级荷载就位后稳定 15min 进行读数。卸载时, 稳定 30min 进行读数。

3. 量测方案

挠度测点共布置 9 个, 如图 3-15 所示, 全部采用百分表进行测试, 其中表 1、表 9 用于支座沉陷测量。挠度测试精度为 0.01mm , 量测内容为各级荷载下的变形及卸载后残余变形。应变量测设置两个截面, 即跨中和 $1/4$ 截面, 布置 16 个混凝土应变测点, 6 个钢筋应变测点, 2 个钢绞线应变测点, 共计 24 个测点, 如图 3-16、图 3-17 所示。量测内容为各级荷载下的应变及卸载后的残余应变。

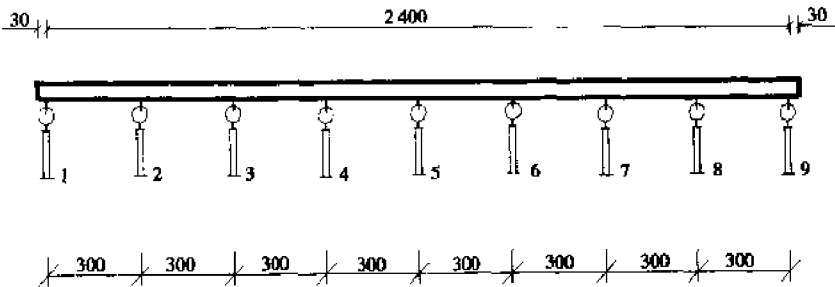


图 3-15 挠度测点布置示意图(尺寸单位:cm, 支座未示出)

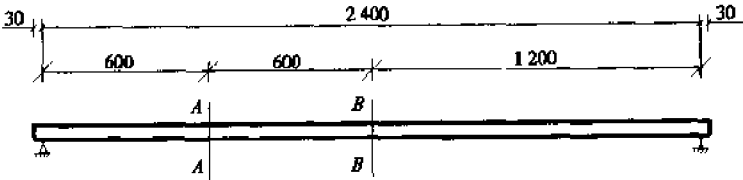


图 3-16 应变量测截面(尺寸单位:cm)

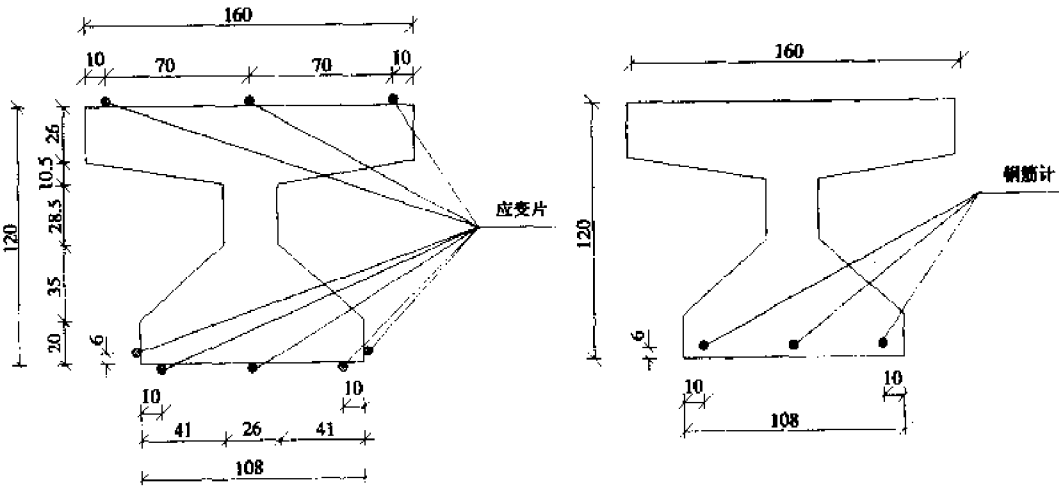


图 3-17 A-A、B-B 截面应变片的布置(尺寸单位:cm)

4. 试验主要测试结果及分析评价

在工况 4 试验荷载作用下,试验实测跨中截面最大挠度为 21.93mm,对应的理论计算挠度值为 25.80mm,两者的比值为 0.849,能满足式(3-21)及规范的要求。该梁跨中截面、L/4 截面在各级试验荷载作用下实测挠度与理论计算挠度对比见图 3-18。

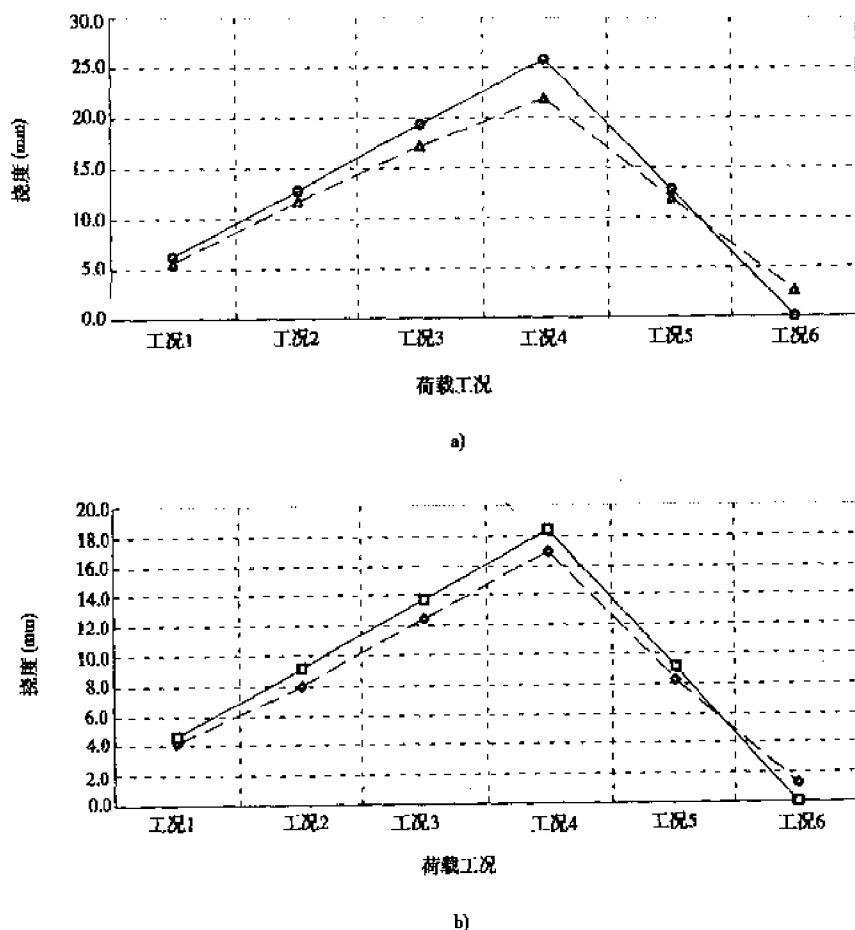


图 3-18 实测挠度与理论挠度比较图(—理论值,---实测值)
a)跨中截面;b)L/4 截面(测点 3)

在工况 4 荷载作用下,跨中、L/4 截面下缘混凝土实测应变分别为 $258\mu\epsilon$ 、 $196\mu\epsilon$,对应的理论计算值分别为 $297\mu\epsilon$ 、 $224\mu\epsilon$,两者的比值为 0.868、0.875,均能满足式(3-21)及规范的要求。该梁部分测点实测应力(应变)与理论计算结果比较见图 3-19。

卸载后 1h 对该桥进行了残余变形观测,跨中截面的残余挠度 2.65mm,跨中截面下缘的残余应变则为 $12\mu\epsilon$,与相应的最大挠度 21.9mm、最大应变 $258\mu\epsilon$ 相比为 0.119 和 0.0465;满足式(3-22)的要求。此外,在整个加载试验过程中,该梁下缘没有发现肉眼可见的裂缝。

上述测试结果表明:该梁在试验荷载作用下的工作性能良好,实测结果与理论计算吻合较好,处于弹性工作状态,各项检测指标均能满足《试验方法》、《铁路部分预应力混凝土梁设计及验收规定》、《部分预应力混凝土结构设计建议》及设计要求,预制施工质量可靠,承载能力足够。

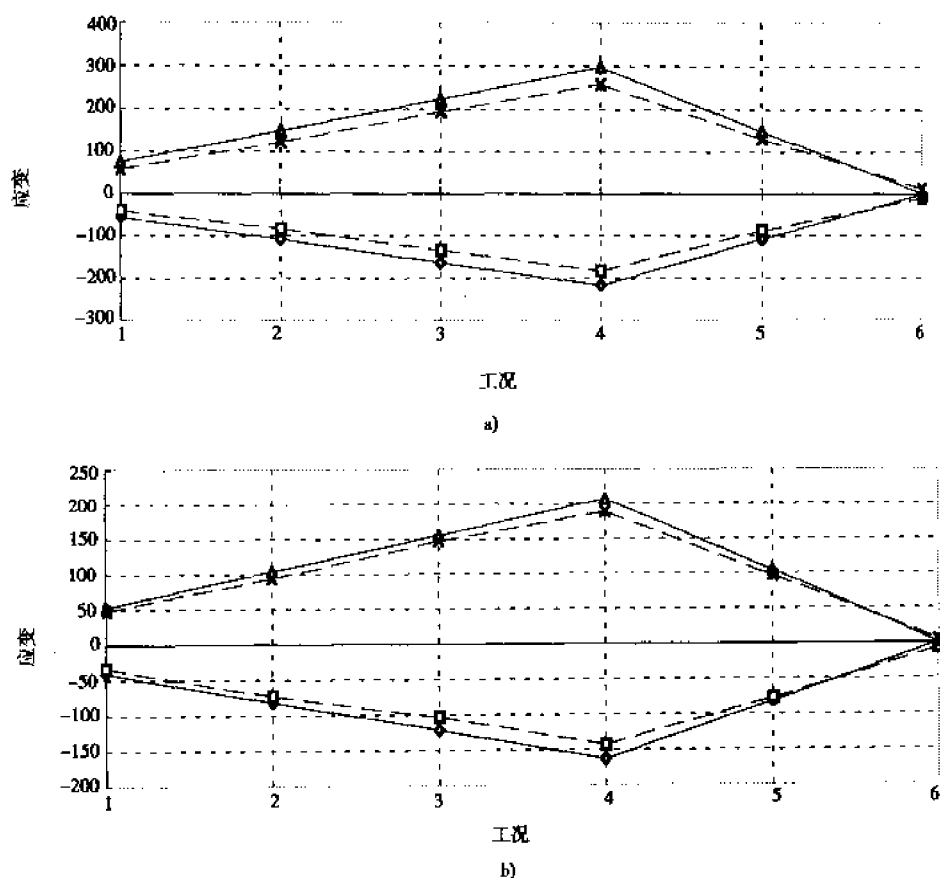


图 3-19 实测应变-理论应变比较图(——理论值,---实测值,纵坐标单位为 $\mu\epsilon$)
a)跨中截面上、下缘混凝土应变;b)L/4 截面上缘混凝土、下缘钢筋计应变

二、钢-混凝土连续结合梁

1. 工程概况

某三跨钢-混凝土结合梁结构,跨度为 $50 + 70 + 60\text{m}$,梁高 2.2m ,桥宽 $16.4 \sim 24.6\text{m}$,结构布置简图如图 3-20 所示。设计荷载为汽车-20 级,挂车-100。为了满足各方面的要求,并使结构轻盈美观,且分离出一落地匝道,在设计时采用多根箱梁结构,全桥钢结构从分离式双箱变化到分离式三箱的方式来实现桥面变宽(远匝道者为内主梁,近匝道者为外主梁)。鉴于该桥受力较为复杂,为检验该桥承载能力及使用性能,验证设计计算理论,建成后进行了静载试验,现简介如下。

2. 活载内力计算

由于该桥宽跨比较大,在活载作用下,剪力滞效应比较突出,故在活载内力计算时,首先按空间板壳分析计算模型,算出结合梁的有效分布宽度后,按照初等梁理论,采用空间杆单元进行活载效应的计算。经计算,得出该桥控制截面的有效分布宽度如表 3-4 所示。对比表 3-4 与 BS5400 的设计建议,说明计算结果合理可信,可将该桥的有效分布宽度偏于保守地取 $b = 10.0\text{m}$ 。然后,采用动态规划法加载,根据规范有关规定及考虑剪力滞后的截面特性,可得出各控制截面的活载内力、应力如表 3-5、表 3-6 所示。

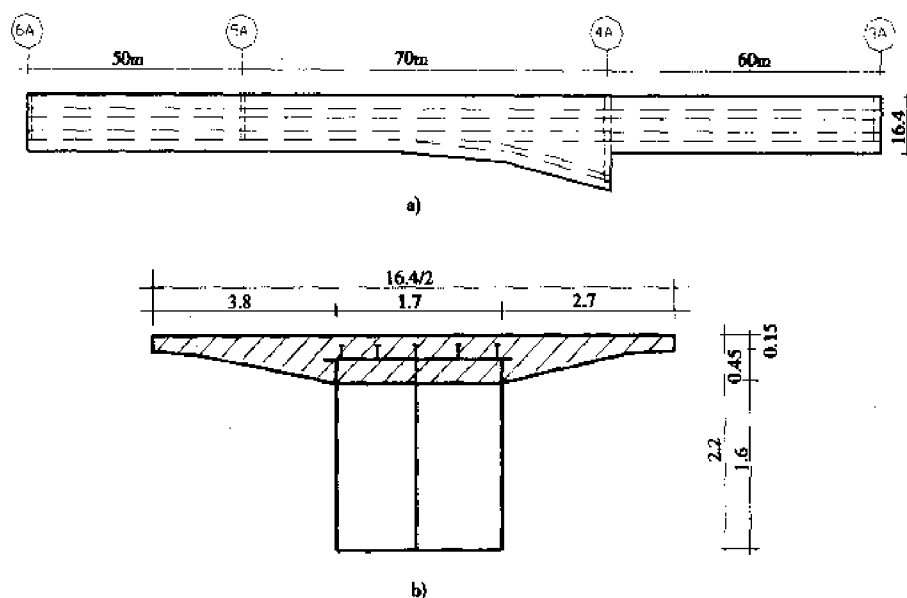


图 3-20 试验桥梁跨径布置示意图(尺寸单位:m)

a)试验桥梁跨径布置;b)试验桥梁 1/2 标准截面

试验桥梁的有效分布宽度 b 计算结果

表 3-4

截面	50m 跨中	5A 支点	70m 跨中	60m 跨中
有效宽度 b (m)	9.8147	9.1847	11.33	10.776

活载产生的内主梁内力、应力

表 3-5

坐标 (m)	备注	活载弯矩(N·m)		钢结构下缘应力(Pa)		混凝土翼板上缘应力(Pa)		钢结构上缘应力(Pa)	
		正弯矩	负弯矩	压应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力
0	6A 支点	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
25	跨中	5.19E+06	-2.77E+06	-1.07E+07	2.01E+07	-1.68E+06	8.97E+05	-7.68E+06	4.09E+06
50	5A 支点	1.45E+06	-6.62E+06	-1.75E+07	3.85E+06	-3.93E+05	1.79E+06	-1.79E+06	8.18E+06
85	跨中	<u>7.55E+06</u>	-2.56E+06	-6.98E+06	2.06E+07	-2.07E+06	7.34E+05	-9.44E+06	3.35E+06
102	3L/4	3.20E+06	-3.43E+06	-1.10E+07	1.02E+07	-9.67E+05	1.04E+06	-4.41E+06	4.74E+06
120	4A 支点	1.29E+06	-7.42E+06	-1.81E+07	3.13E+06	-3.22E+05	1.86E+06	-1.47E+06	8.47E+06
135	L/4	5.08E+06	-3.31E+06	-1.11E+07	1.71E+07	-1.57E+06	1.02E+06	-7.14E+06	4.66E+06
150	跨中	<u>7.21E+06</u>	-2.20E+06	-6.25E+06	2.05E+07	-2.20E+06	6.39E+05	-1.00E+07	2.91E+06
180	3A 支点	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

注:1.表中带下划线者为控制截面的控制内力;

2.坐标原点为 6A 支点。

活载产生的外主梁活载内力、应力

表 3-6

坐标 (m)	备注	活载弯矩(N·m)		钢结构下缘应力(Pa)		混凝土翼板上缘应力(Pa)		钢结构上缘应力(Pa)	
		正弯矩	负弯矩	压应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力
0	6A 支点	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
26	跨中	5.19E+06	-2.77E+06	-1.07E+07	2.01E+07	-1.68E+06	8.97E+05	-7.67E+06	4.09E+06
50	5A 支点	1.48E+06	-6.68E+06	-1.77E+07	3.93E+06	-4.02E+05	1.81E+06	-1.83E+06	8.25E+06

续上表

坐标 (m)	备注	活载弯矩(N·m)		钢结构下缘应力(Pa)		混凝土翼板上缘应力(Pa)		钢结构上缘应力(Pa)	
		正弯矩	负弯矩	压应力	拉应力	压应力	拉应力	压应力	拉应力
85	跨中	9.93E+06	-3.04E+06	-8.30E+06	2.71E+07	-2.85E+06	8.73E+05	-1.30E+07	3.98E+06
102	3L/4	3.25E+06	-2.91E+06	-9.28E+06	1.04E+07	-9.84E+05	8.80E+05	-4.49E+06	4.01E+06
120	4A 支点	1.33E+06	-6.78E+06	-1.61E+07	3.25E+06	-3.34E+05	1.65E+06	-1.52E+06	7.53E+06
134	L/4	4.74E+06	-2.95E+06	-9.92E+06	1.59E+07	-1.46E+06	9.11E+05	-6.66E+06	4.15E+06
150	跨中	7.36E+06	-1.98E+06	-5.64E+06	2.10E+07	-2.14E+06	5.76E+05	-9.77E+06	2.63E+06
180	3A 支点	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

注:1.表中带下划线者为控制截面的控制内力;

2.坐标原点为 6A 支点。

3. 试验荷载及加载方案

本次试验为鉴定性荷载试验,试验时用 9 台汽车(单车重 300kN 左右,总重约 2700kN)作为试验荷载。试验时,选取内主梁、外主梁 70m 跨跨中截面、60m 跨跨中截面及 4A 支点截面作为应力检测截面,根据 9 台试验车辆的实际布置(图 3-21),可得出试验荷载内力效应及加载效率 η 的计算结果如表 3-7、表 3-8 所示。在试验荷载作用下,校核其他截面内力,均未超过其设计内力,说明试验荷载的载位有效且安全。

内主梁试验荷载效应

表 3-7

工况	荷载产生的弯矩效应(N·m)			加载效率 η		
	70m 跨跨中截面	4A 支点截面	60m 跨跨中截面	70m 跨跨中截面	4A 支点截面	60m 跨跨中截面
1	3.275E+06	-1.754E+06	-7.740E+05	0.434	0.236	
2	6.549E+06	-3.058E+06	-1.435E+06	0.867	0.412	
3	6.704E+06	-3.375E+06	-1.572E+06	0.888	0.455	
4	6.045E+06	-4.962E+06	1.868E+06	0.801	0.669	0.259
5	5.385E+06	-6.548E+06	5.039E+06	0.713	0.882	0.699
6	1.956E+06	-4.928E+06	6.164E+06	0.259	0.664	0.855
7	2.615E+06	-3.341E+06	2.273E+06	0.346	0.450	0.315

外主梁试验荷载效应

表 3-8

工况	荷载产生的弯矩效应(N·m)			加载效率 η		
	70m 跨跨中截面	4A 支点截面	60m 跨跨中截面	70m 跨跨中截面	4A 支点截面	60m 跨跨中截面
1	3.463E+06	-1.456E+06	-6.560E+05	0.348	0.215	
2	6.923E+06	-2.910E+06	-1.312E+06	0.697	0.429	
3	9.310E+06	-4.012E+06	-1.762E+06	0.937	0.592	
4	8.484E+06	-5.534E+06	1.616E+06	0.854	0.816	0.219
5	7.635E+06	-7.045E+06	4.994E+06	0.769	1.039	0.678
6	1.801E+06	-4.499E+06	6.100E+06	0.181	0.664	0.829
7	2.632E+06	-2.977E+06	2.722E+06	0.265	0.439	0.370

静载试验程序如下:

(1)加载汽车过磅称重,将加载车辆停放在距测试桥跨 50m 以外的桥上,过磅称重结果如表 3-9 所示。由于试验车辆重量与理论计算所采用的 300kN 的车重比较接近,因此可不调整

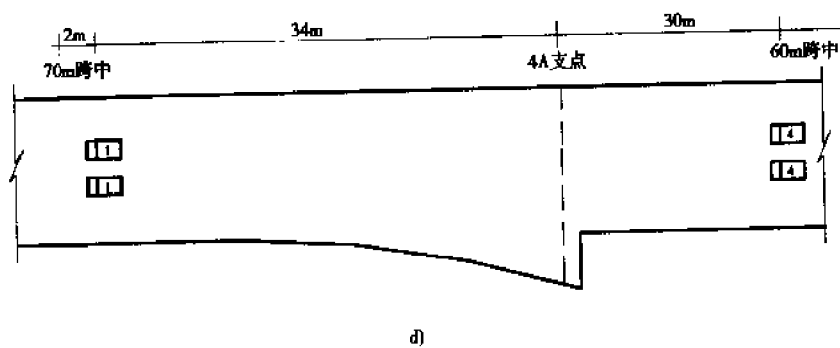
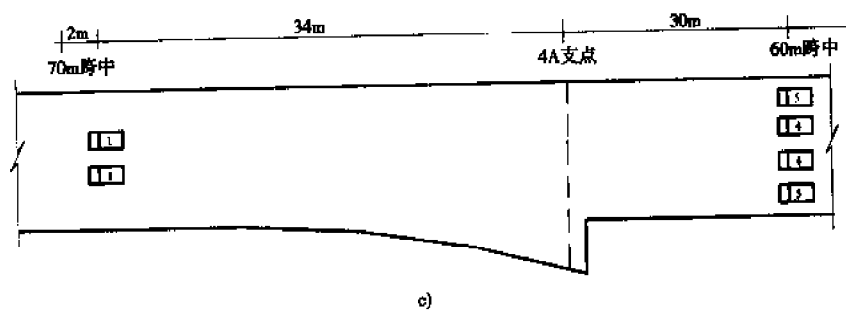
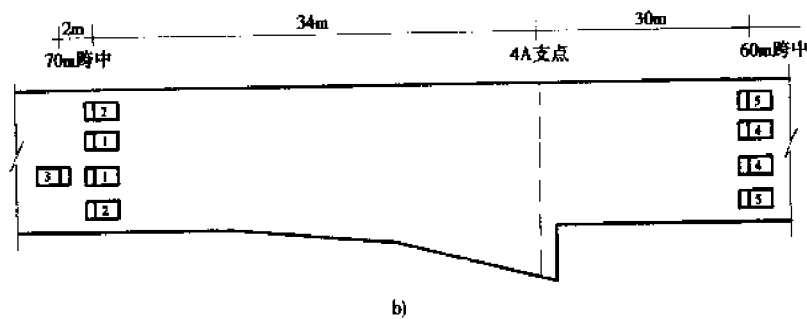
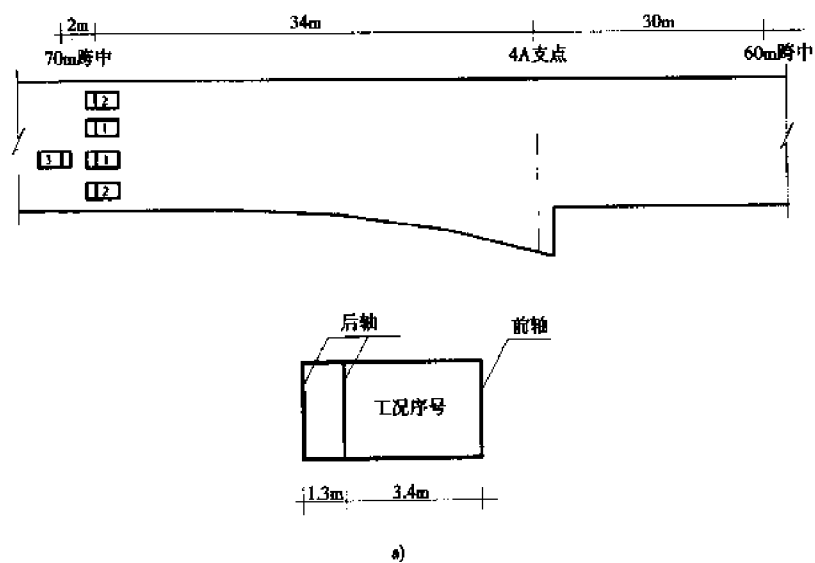


图 3-21 试验加载汽车载位布置示意
a)第一加载阶段及试验车辆示意;b)第二加载阶段;c)第三加载阶段;d)卸载阶段

理论计算结果。

加载车辆称重的轴重表(kN)

表 3-9

车号	前轴重	后轴重	总重	试验布置位置
00-10735	58.9	246.6	305.5	工况 1
00-01133	55.8	243.2	299.0	工况 1
00-01407	63.2	238.4	301.6	工况 2
00-05714	67.1	242.2	309.3	工况 2
00-13169	69.5	235.0	304.5	工况 3
00-00617	71.6	230.2	301.8	工况 4
00-43479	73.8	239.5	313.3	工况 4
00-09222	66.7	241.7	308.4	工况 5
00-81309	71.5	236.0	307.5	工况 5

(2)正式加载前,用四辆加载汽车在被测试桥跨上来回反复通行几次,对桥跨施行预压,以消除非弹性变形。预压后,非工作人员退场,待一切工作安排就绪,各试验量测仪表读数调零,进行第一次空载读数。

(3)正式实施试验加载,试验加载采用分级加载方法。试验加载汽车布置见图 3-21,试验加载的程序如下:

- ①第一加载阶段——使 70m 跨中产生最大正弯矩
工况 1: 2 台试验车辆(车号 00-10735、00-01133)在 70m 跨中位置对称加载;
工况 2: 2 台试验车辆(车号 00-01407、00-05714)在 70m 跨中位置对称加载;
工况 3: 1 台试验车辆(车号 00-13169)在 70m 跨中位置偏载加载。
- ②第二加载阶段——使 4A 支点截面产生最大负弯矩
工况 4: 2 台试验车辆(车号 00-00617、00-43479)在 60m 跨中位置对称加载;
工况 5: 2 台试验车辆(车号 00-09222、00-81309)在 60m 跨中位置对称加载。
- ③第三加载阶段——使 60m 跨中产生最大正弯矩
工况 6:工况 1、工况 3 中 3 台试验车辆卸载离桥。
- ④卸载阶段
工况 7:工况 5 中 2 台试验车辆卸载离桥;
工况 8:工况 2、工况 4 中 4 台试验车辆卸载离桥。

(4)每级汽车荷载驶入指定的区域就位后,稳定 15min 记录加载后第一次读数,间隔 10min 再记录加载的第二次读数,两次读数差均小于前次读数增量的 10%时,认为结构变化已趋稳定。该桥整个试验从 22:30 开始到次日凌晨 4:00 结束,历时 5h30min,由于该段时间内气温变化较小,可以忽视温度对试验结果的影响。

4. 量测方案

挠度测点布置如图 3-22 所示。变形测点共计 22 个,采用水泥钉固定在沥青铺装层上。变形测量采用二等水准测量标准,测量仪器为精密水准仪,测试精度为 0.1mm,后视点设置在桥外。量测内容为各级荷载下的竖向挠度及卸载后残余变形。为减小变形测量误差,每次测量采用闭合回路,即后视点⇒内 10⇒外 10⇒内 9⇒……⇒内 2⇒外 2⇒内 1⇒外 1⇒内 0⇒外 0⇒内 2⇒外 2⇒……⇒内 10⇒外 10⇒后视点,只有当闭合回路差满足要求时,本次变形测量方合格,否则,立即进行重测。

应变量测截面如图 3-23 所示,即选取 70m 跨跨中截面 A—A、支点截面 B—B、60m 跨跨中

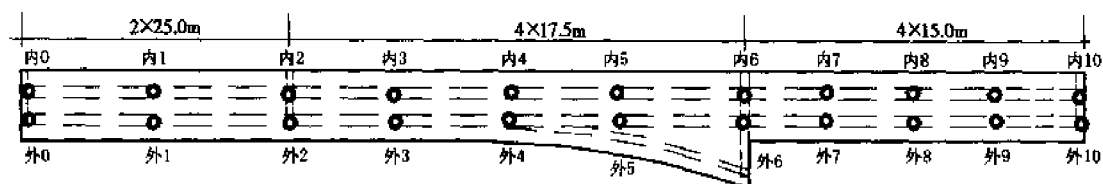


图 3-22 变形测点布置图

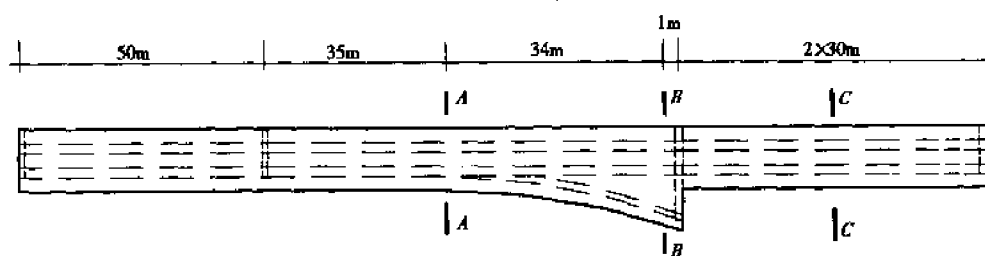


图 3-23 应变测试截面布置图

截面 C—C 作为应变测试截面,各截面应变测点布置如图 3-24 所示。量测内容为各级荷载下的应变及卸载后残余应变,测试仪器为 TDS303 数据采集系统。

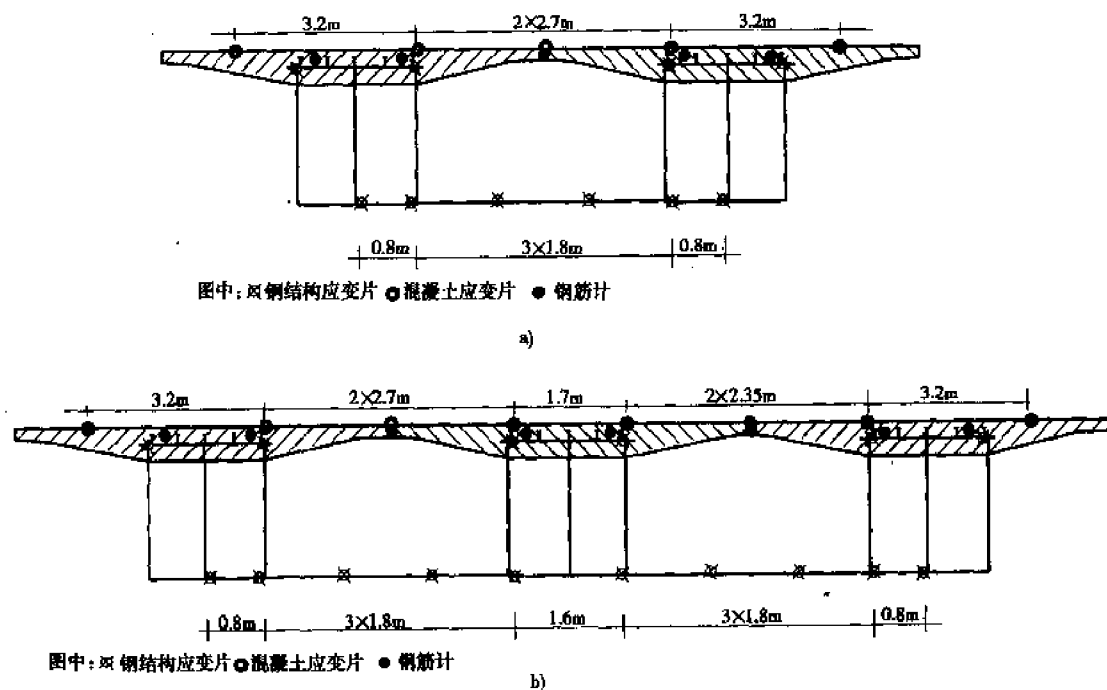


图 3-24 各应变测试截面测试元件布置图

a) A-A、C-C 截面应变测点布置; b) B-B 截面应变测点布置

5. 试验主要测试结果及分析评价

在工况 3 试验荷载作用下,试验实测内主梁 70m 跨中最大挠度为 20.3mm,外主梁 70m 跨中最大挠度为 26.1mm,而对应的理论计算挠度值为 24.87mm、31.79mm,两者的比值分别为 0.816、0.821,均能满足式(3-21)及规范的要求。该桥内主梁在试验荷载作用下实测挠度分布曲线见图 3-25。

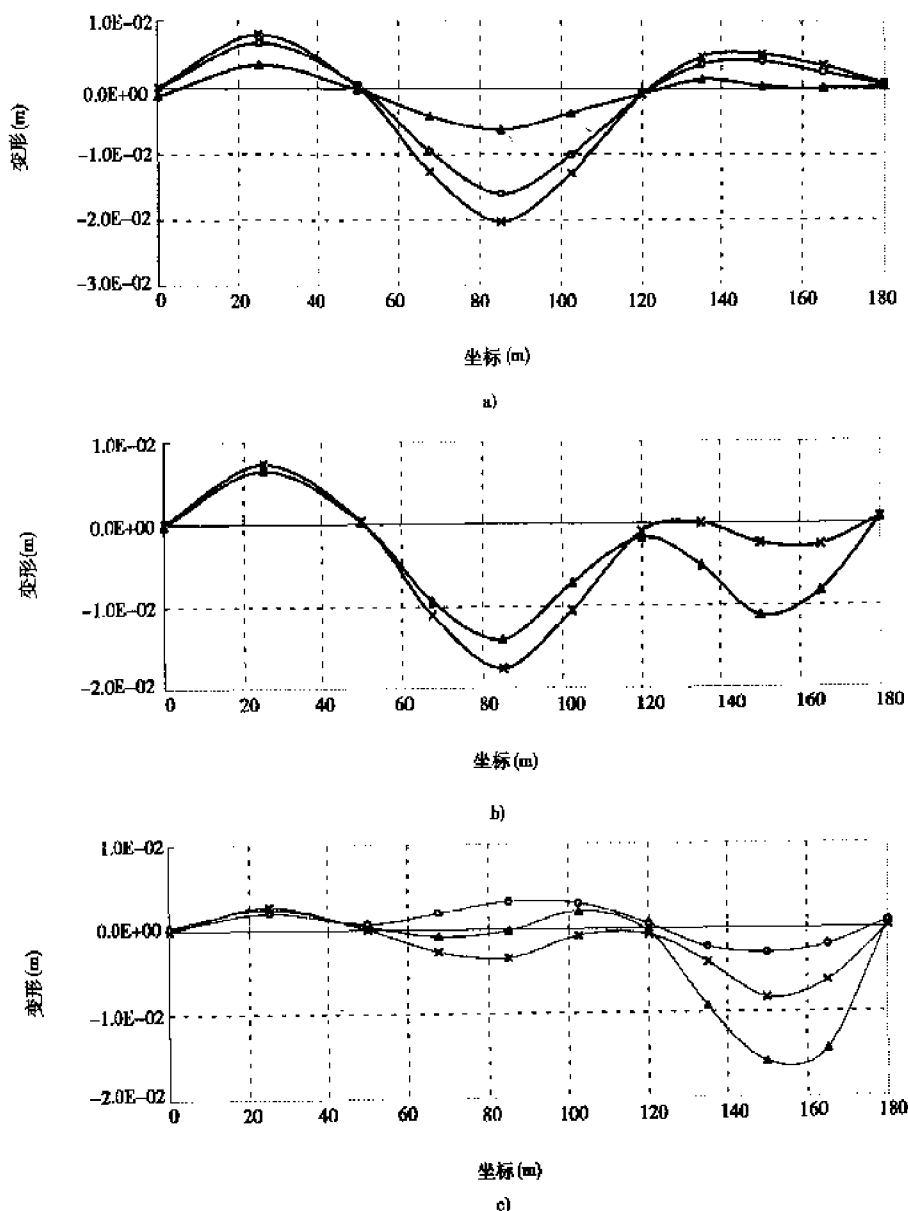


图 3-25 试验桥梁内主梁在各级试验荷载作用下实测变形

a) 工况 1、2、3 实测挠度 (Δ -工况 1; \circ -工况 2; \times -工况 3); b) 工况 4、5 实测挠度 (\times -工况 4; Δ -工况 5); c) 工况 6、7、8 实测变形 (\circ -工况 6; \times -工况 7; Δ -工况 8)

内主梁、外主梁各截面主要工况实测应变与对应的理论计算值比较如表 3-10 所示。各测试截面最大反应的实测平均值与理论计算值的比值见表 3-11, 均能满足式 (3-21) 及规范的要求, 该桥部分实测应力(应变)与理论计算结果比较见图 3-26。

内主梁主要工况实测最大应变值平均值与理论计算值比较 ($\mu\epsilon$)

表 3-10

梁跨	截面	工况	实测应变值			理论计算值		
			钢箱梁上缘	钢箱梁下缘	混凝土上缘	钢箱梁上缘	钢箱梁下缘	混凝土上缘
内主梁	70m 跨中截面	工况 3	-44	85	-78	-42	87	-84
	4A 支点截面	工况 5	36	-72	46	36	-76	45
	60m 跨中截面	工况 6	-38	79	-45	-39	83	-49

续上表

梁跨	截面	工况	实测应变值			理论计算值		
			钢箱梁上缘	钢箱梁下缘	混凝土上缘	钢箱梁上缘	钢箱梁下缘	混凝土上缘
外主梁	70m跨中截面	工况3	-53	107	-78	-58	121	-73
	4A 支点截面	工况5	37	-78	46	38	-82	48
	60m跨中截面	工况6	-35	82	-45	-40	85	-50

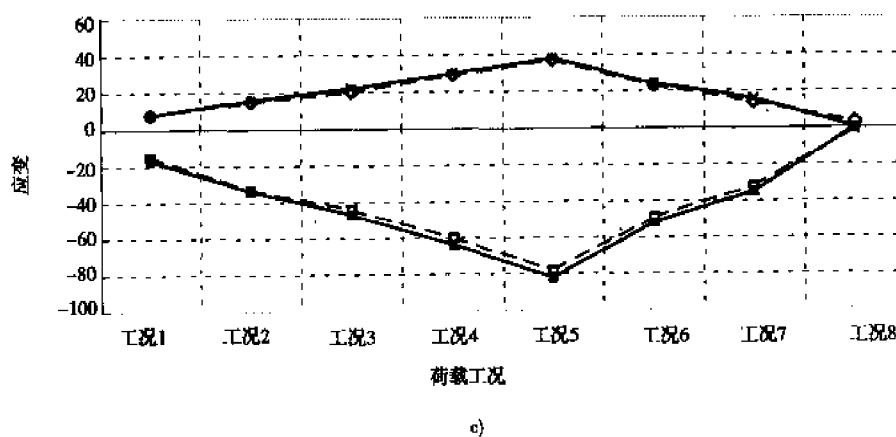
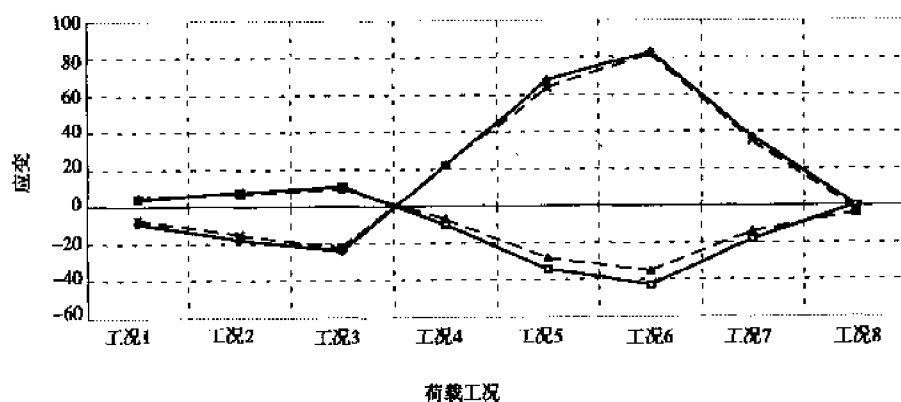
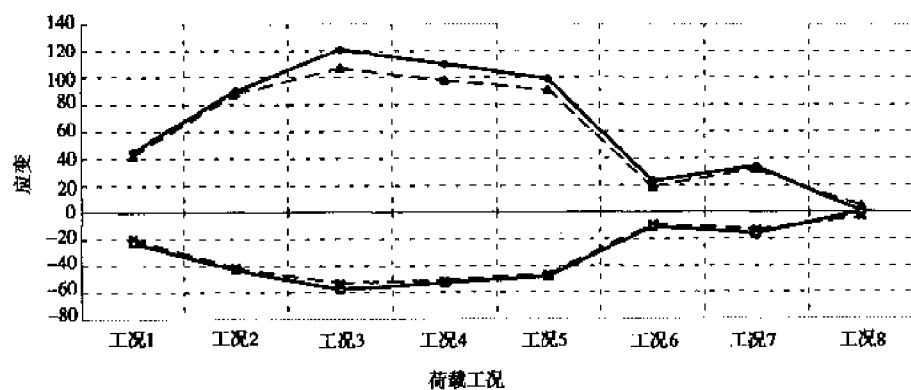


图 3-26 试验桥外主梁钢结构实测应变与理论应变比较(——理论值;-----实测值)
a)70m跨中截面;b)60m跨中截面;c)4A 支点截面

各测试截面钢箱梁下缘测点实测最大反应平均值与理论计算值的比值 表 3-11

梁跨及测试截面		工况	钢箱梁下缘	混凝土上缘
内主梁	70m 跨中截面	工况 3	0.977	0.928
	4A 支点截面	工况 5	0.947	1.022
	60m 跨中截面	工况 6	0.952	0.918
外主梁	70m 跨中截面	工况 3	0.884	0.928
	4A 支点截面	工况 5	0.951	1.022
	60m 跨中截面	工况 6	0.965	0.900

卸载后 1h 对该桥进行了残余变形观测,内主梁 70m 跨中的最大残余挠度 3.3mm,70m 跨中钢箱梁下缘的残余应变则为 $-2\mu\epsilon$,与相应的最大挠度 20.3mm、最大应变 $85\mu\epsilon$ 相比为 0.163 和 0.0235;外主梁 70m 跨中的最大残余挠度 3.2mm,70m 跨中钢箱梁下缘的残余应变则为 $4\mu\epsilon$,与相应的最大挠度 26.1mm、最大应变 $107\mu\epsilon$ 相比为 0.1007 和 0.0374,满足式(3-22)的要求。此外,在整个加载试验过程中,该桥支点区域的桥面没有发现肉眼可见的裂缝。

上述图表表明:该桥在试验荷载作用下的工作性能良好,实测结果与理论计算吻合较好,处于弹性工作状态,各项检测指标均能满足《试验方法》、《规范》及设计要求,可以投入正常运行。

第四章

桥梁动载试验

QIAOLIANGDONGZAISHIYAN

第一节 动载试验的方法与程序

桥梁结构是承受恒载、车辆荷载、人群荷载等主要荷载的结构物。当车辆以一定速度在桥上通过时,由于发动机的抖动、桥面的不平顺等原因会导致桥梁结构产生振动。此外,人群荷载、风动力、地震力的作用也会引起桥梁振动。随着交通运输事业的不断发展,一方面,车辆的数量、载重量有了迅速的增长,车辆的行驶速度也有了很大的提高;另一方面,随着新结构、新材料、新工艺的推广应用,桥梁结构逐渐趋向轻型化,而对于大跨度、超大跨度桥梁结构,地震、风振往往是设计施工的控制因素。因此,车辆荷载或其它动力荷载对桥梁结构的冲击和振动影响,已成为桥梁结构设计、计算、施工、运营、维修养护过程中的重要问题之一。桥梁结构的振动问题,影响因素比较多,涉及的理论比较复杂,仅靠理论分析是不能达到实用的结果,一般多采用理论分析与现场实测相结合的研究方法,因此,振动测试是解决工程结构振动问题必不可少的手段。近 20 年来,随着电子计算机普及与自动化技术的发展,振动测试技术取得了极大的进展;一方面表现在风洞试验、模拟地震振动台试验、拟动力试验得到了广泛的应用,另一方面表现为工程结构在地震荷载、风荷载、车辆荷载作用下动力反应的现场测试手段也得到了很大的改进。

桥梁结构的动载试验是利用某种激振方法激起桥梁结构的振动,测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、动力响应(加速度、动挠度)等参量的试验项目,从而宏观判断桥梁结构的整体刚度、运营性能。桥梁结构的动载试验与静载试验虽然在试验目的、测试内容等方面有所不同,但对于全面分析掌握桥梁结构的工作性能是同等重要的。就试验步骤而言,基本上与静载试验相同,动载试验也要经过准备、试验和分析总结三个阶段。就试验性质而言,动载试验也可分为生产鉴定性和科学研究性试验,一般情况下,动载试验多在现场实际结构上进行测试,也可根据桥梁结构的特点和实际需要在室内进行结构模型的动载试验,如在风洞内进行大跨度桥梁的风致振动试验、在模拟地震振动台上进行桥梁结构的地震响应试验研究等。桥梁结构的动载试验的基本任务大体可归纳为以下几个方面。

- (1)测定结构的动力特性,如测定桥梁结构或构件的自振频率、阻尼特性、振型等。
- (2)测定结构在动荷载作用下的强迫振动响应,如测定桥梁结构或构件在车辆荷载、风荷载作用下的振幅、动应力、加速度等。
- (3)测定动荷载的动力特性,如测定引起结构振动作用力的大小、方向、频率与作用规律等。

桥梁结构的动载试验中,常有大量的物理量如位移、应变、振幅、加速度等,需要进行量测、记录和分析。在静载试验中,可以通过仪器仪表观测而直接获得数据序列;在动载试验中,可通过仪器仪表将振动过程中大量的物理量进行测量并记录下来,这些随时间变化的物理量,一般称为信号,而测得的结果称为数据。根据这些数据,可以进行有关振动量之间相互关系的分析。一般说来,动载试验的数据和信号是比较复杂的,具体表现在以下三个方面。

(1)引起结构产生振动的振源(如车辆、人群、阵风或地震力等)和结构的振动响应都是随时间而变化的,是随机的、不确定的。例如汽车在不平整的桥面上行驶所引起的桥梁振动就是随机的,两次条件完全相同的试验不会量测到相同的动力响应。这种信号虽然可以检测,并得到时间历程曲线,但却不能预测。这类信号服从统计规律,可以从概率统计的观点去研究它。

(2)桥梁结构在动荷载作用下的响应不仅与激振源的特性相关,也与结构本身的动力特性密切相关。对于桥梁结构而言,本身就具有无限多个自由度,加上车辆与桥梁结构之间的耦合,其动力特性就更为复杂。

(3)在动载试验所记录的信号和数据中,常常会夹杂一些无用的干扰因素。干扰信号不同于量测误差,没有一定的规律。因此,必须对动载试验所测得的信号和数据进行科学的分析与处理,从中提取尽可能多的反映桥梁结构振动内在规律的有用信息。

信号的特征可用信号的幅值随时间而变化的数学表达式、图形或表格来表达,这类表达方式我们称之为信号的时域描述,如加速度时程曲线、位移时程曲线等。信号的时域描述比较简单、直观,通过多个测点的时程曲线,可以分析出结构的振幅、振型、阻尼特性、动力冲击系数等参量,但不能明确揭示信号的频率成分和振动系统的传递特性。为此常对信号进行频谱分析,研究其频率结构及其对应的幅值大小,即采用频域描述,这时,需要把时域信号通过傅立叶变换的数学处理变换为频域信号。时域信号的傅立叶变换就是把确定的或随机的波形分解为一系列简谐波的叠加,以得到振动能量按频率的分布情况,从而确定结构的频率和频率分布特性。

桥梁动载试验是在桥梁处于振动状态下,利用振动测试仪器对振动系统各种振动量进行测定、记录并加以分析的过程。因此,在进行动载试验时,首先应通过激振方法使桥梁处于一种特定的振动状态中,以便进行相应项目的测试。其次,要合理选取测试仪器仪表组成振动测试系统,振动测试系统一般由拾振部分、放大部分和分析部分组成,其原理框图如图 4-1 所示,这三部分可以由专门仪器配套使用,也可以配换使用。因此,要根据试验的环境条件和试验的

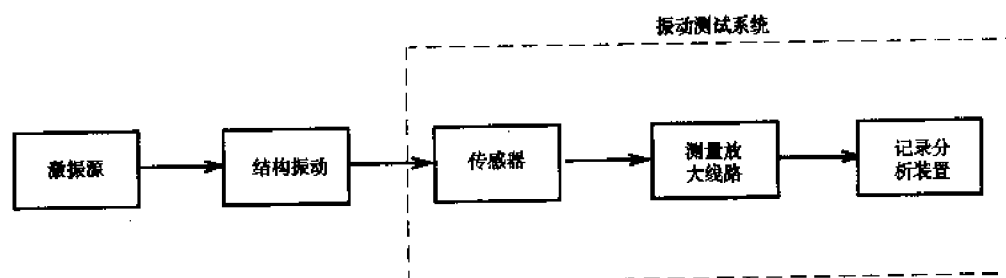


图 4-1 桥梁结构振动测试系统的原理框图

要求,选择组配合理的振动测试系统。仪器组配时除应考虑频带范围外,还要注意仪器间的阻抗匹配问题。再次,要根据测试桥梁的特点,制定测试内容、测点布置与测试方法,例如对于混凝土简支梁桥的动载试验,一般的观测项目有:跨中截面的动挠度、跨中截面钢筋或混凝土的动应力等。又例如要测定某一固有频率的振型时,应将传感器设置在振幅较大的各部位,并注意各测点的相位关系。最后,利用相应的专业软件对采集的数据或信号进行分析,即可得出桥

梁结构的频率、振型、阻尼比、冲击系数等振动参量。

在以下各节中,我们将详细地介绍桥梁动载试验的相关问题。

第二节 桥梁结构动力响应的测试

一、激振方法

桥梁动载试验的激振方法很多,如自振法、强迫振动法、脉动法等,选用时应根据桥梁的类型和刚度进行选择,以简单易行、便于测试为原则。通常,多将上述一种或两种方法结合起来,以便全面把握桥梁结构的动力特性。

1. 自振法

自振法的特点是使桥梁产生有阻尼的自由衰减振动,记录到的振动图形为桥梁的衰减振动曲线。为使桥梁产生自由振动,一般常用突然加载和突然卸载两种方法。

突然加载法是在被测结构上急速施加一个冲击作用力,由于施加冲击作用的时间短促,因此,施加于结构的作用实际上是一个冲击脉冲作用。根据振动理论可知,冲击脉冲的动能传递到结构振动系统的时间,要小于振动系统的自振周期,且冲击脉冲一般都包含了零频以上所有频率的能量,它的频谱是连续的。只有被测结构的固有频率与之相同或很接近时,冲击脉冲的频率分量才对结构起作用,从而激起结构以其固有频率作自由振动。采用突然加载法时,应注意冲击荷载的大小及其作用位置,如果要激起桥梁结构的整体振动,则必须在桥梁的主要受力构件上施加足够大的冲击力,冲击荷载的作用位置可按所需结构的振型来确定,如为了获得简支梁的第一振型,则冲击荷载应作用于跨中部位,测第二振型时冲击荷载应施加在跨度的 $1/4$ 处。在现场测试中,当测试桥梁结构整体振动时,常常采用试验车辆的后轮从三角垫块上突然下落对桥梁产生冲击作用,激起桥梁的竖向振动,简称“跳车试验”,跳车装置及其产生的典型波形如图 4-2 所示;当测试某一构件(如拉索)的振动时,常常采用木棒敲击的方法产生冲击作用。

突然卸载法是在结构上预先施加一个荷载作用,使结构产生一个初位移,然后突然卸去荷载,利用结构的弹性性质使其产生自由振动。为卸落荷载,可通过自动脱钩装置或剪断绳索等方法,有时也专门设计断裂装置,即当预施加力达到一定数值时,在绳索中间的断裂装置便突然断裂,由此激发结构的振动。一般说来,突然卸载法的荷载大小要根据振动测试系统所需的最小振幅计算求出。图 4-3 为突然卸载法的激振装置。

2. 强迫振动法

强迫振动法是利用专门的激振装置,对桥梁结构施加激振力,使结构产生强迫振动。改变激振力的频率而使结构产生共振现象,借助于共振现象来确定结构的动力特性。对于模型结构而言,常常采用激振设备来激发模型振动,常见的激振设备有机械式激振器、电动式激振器。使用时将激振器底座固定在模型上,由底座将激振器产生的交变激振力传递给模型结构。激振器在模型结构上的安装位置、激振频率和激振方向可以根据试验的要求和目的来确定,试验时,连续改变激振器的频率,进行“频率扫描”,当激振器的频率与模型的固有频率一致时,模型就会出现第一次共振,第二次共振现象……等等,由此即可得到模型的第一阶频率,第二阶频率……等。

对于原型桥梁结构,常常采用试验车辆以不同的行驶速度通过桥梁,使桥梁产生不同程度的强迫振动,简称“跑车试验”。由于桥面的平整度具有一定的随机性,所以由此引起的振动也

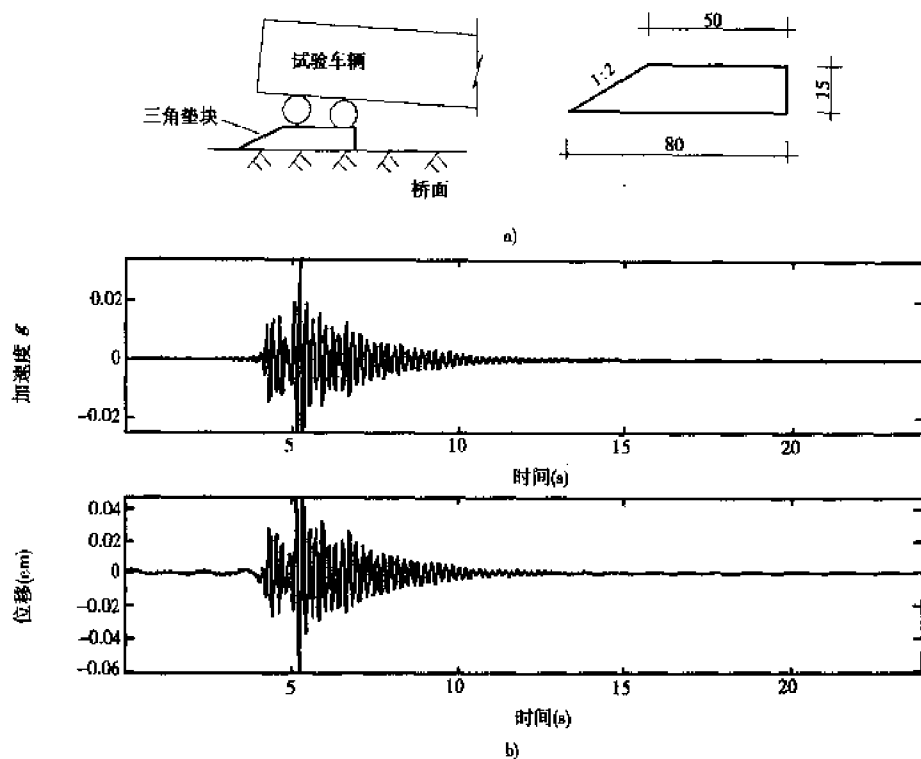


图 4-2 跳车试验及其产生的典型振动波形
a)三角垫块及跳车试验示意(cm);b)跳车试验产生的典型波形

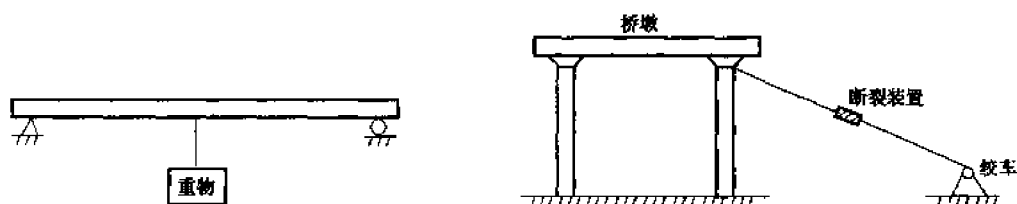


图 4-3 突然卸载法的试验装置

是随机的,当试验车辆以某一速度通过时,所产生的激振力频率可能会与桥梁结构的某阶固有频率比较接近,桥梁结构便产生类共振现象,此时桥梁各部位的振动响应达到最大值。在车辆驶离桥跨后,桥梁作自由衰减振动。这样,就可从记录到的波形曲线中分析得出桥梁的动力特性。在试验时,根据桥梁结构的设计行车速度,常采用 1 辆 10t 重的试验车辆以 20km/h、40km/h、60km/h、80km/h 的速度进行跑车试验。图 4-4 即为 1 辆 10t 重的试验车辆以 40km/h 的速度驶过跨度为 30m 混凝土连续梁桥时,跨中截面加速度时程曲线。

3. 脉动法

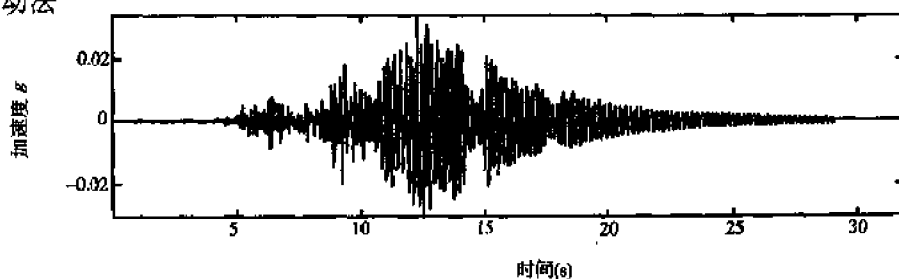


图 4-4 车速为 40km/h 时某连续梁跨中截面加速度时程曲线

脉动法是利用被测桥梁结构所处环境的微小而不规则的振动来确定桥梁结构的动力特性的方法。这种微振动通常称之为“地脉动”，它是由附近地壳的微小破裂和远处地震传来的脉动所产生的，或由附近的车辆、机器的振动所引发。结构的脉动具有一个重要特性，就是它能够明显地反映出结构的固有频率，因为结构的脉动是因外界不规则的干扰所引起的，具有各种频率成分，而结构的固有频率是脉动的主要成分，在脉动图上可以较为明显地反映出来。图 4-

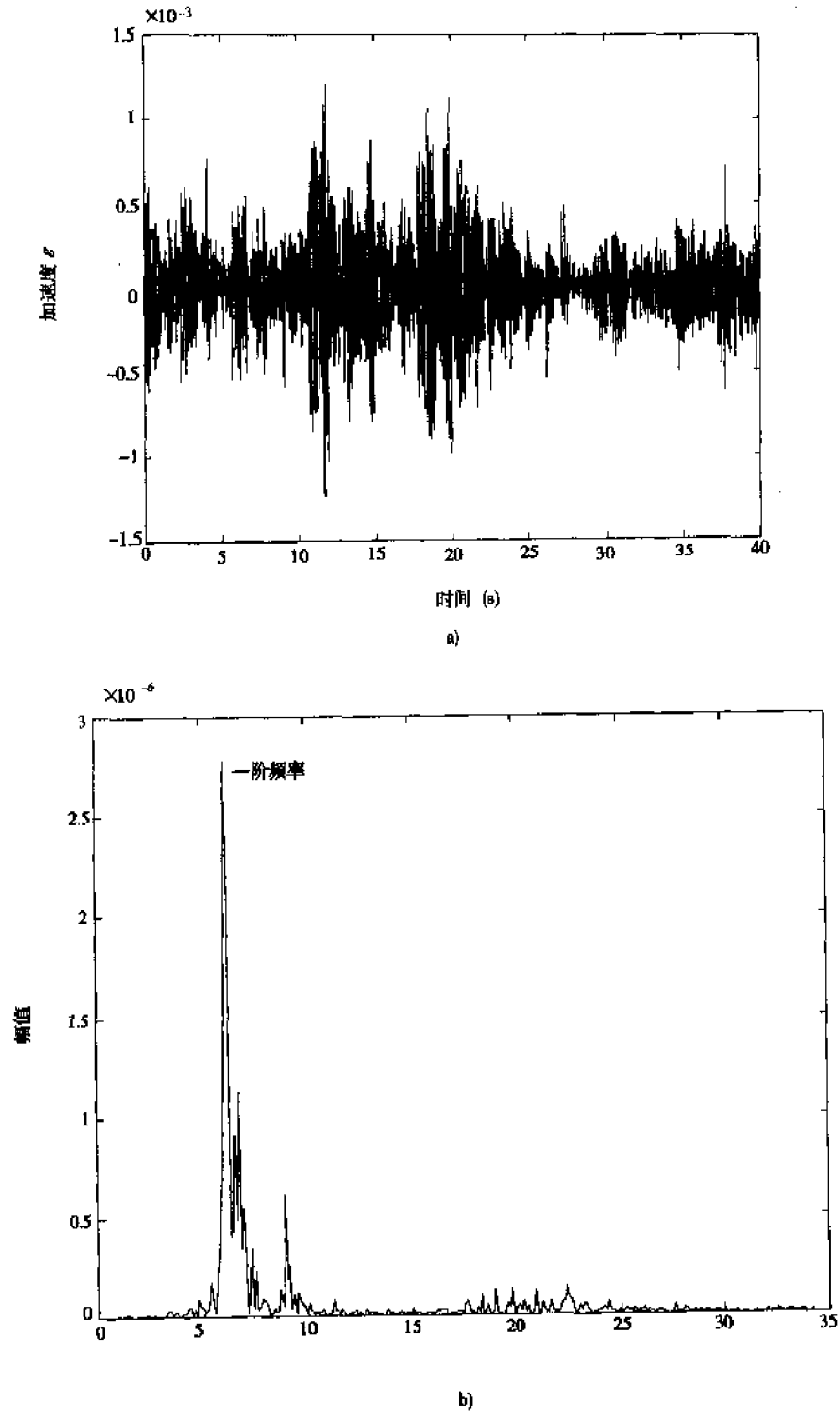


图 4-5 某桥结构脉动所产生的加速度时程曲线及其频谱图
a)地脉动所引起的桥梁加速度时程曲线;b)自功率谱图

5 所示的波形为某桥结构脉动记录曲线,振幅呈有规律的增减,通过频谱分析,即可得出该桥的一阶频率为 6.057Hz。

二、传感器选取与布置

一般地,在桥梁结构的动载试验中,人们关心的振动参量主要有三个,即结构的动应变、结构振动的位移和结构振动的加速度。结构的动应变与静应变的测量元件、测量方法基本相同,可以利用静载试验所布置的应变片,不同之处在于需要采用动态应变仪进行量测。桥梁结构振动的位移宏观反映了荷载的动力作用,动位移与相应的静位移相比较,便可得出桥梁的动力冲击系数,它是衡量桥梁结构整体刚度的主要指标。加速度则反映了桥梁动力响应对司机、乘客舒适性的影响,过大的加速度响应会导致司机、乘客的不适。因此,在桥梁动载试验中,通常选用的传感器是加速度传感器和位移传感器,通过位移传感器可以直接测量桥梁结构的位移时程曲线,进行分析之后可以得出其固有频率、冲击系数和阻尼比;通过加速度传感器可以直接测量桥梁结构的加速度时程曲线,进行频谱分析后可以得出其固有频率,进行数值积分后可以得到位移时程曲线等。然而,需要说明的是,位移传感器的安装一般需要有固定不动的支架,这对于桥梁、尤其是跨越江河的桥梁往往是难以实现的。为了能够方便准确地测得桥梁结构的动位移,可以采用激光(红外)挠度测定仪,其基本原理是:在桥梁测试部位上安装一个或多个测试光学标志点,通过光学系统把标志点成像在接受面上,当桥梁产生振动时,标志点跟着发生振动,通过测出标志点在接受面图像位置的变化值,就可得到桥梁振动的位移值,如图 4-6 所示。

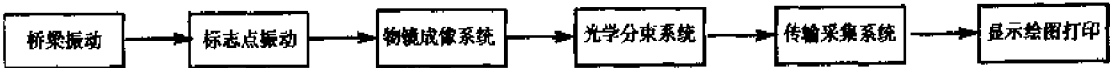


图 4-6 激光(红外)桥梁挠度测定仪基本原理框图

传感器的布置要根据结构型式而定,一般要根据动力特性的理论分析结果,按照理论计算得出的振型大致形状,在变位较大的部位布置传感器,以能够测得桥梁结构最大反应(如主跨跨中截面、边跨跨中截面振幅),并较好地勾画出振型曲线为宜。桥梁结构动力特性的理论分析计算,目前多利用各种专用桥梁计算软件或通用分析软件,计算得出桥梁结构的固有频率与振型。

桥梁结构的振型是结构相应于各阶固有频率的振动形式,一个振动系统的振型数目与其自由度数相等。桥梁结构是一具有连续分布质量的体系,也是一个无限多自由度体系,因此其固有频率及相应的振型也有无限多个。但是,对于一般桥梁结构,第一固有频率即基频,对结构动力分析才是重要的;对于较复杂的动力分析问题,也仅需要前几阶固有频率,因而在实际测试中,一些低阶振型才有实际意义,图 4-7 为常见梁式桥的前三阶振型。振型的测试一般采

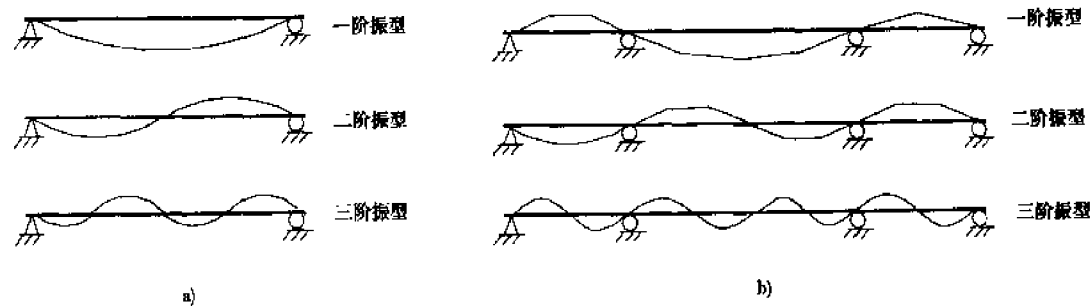


图 4-7 常见梁式桥的前三阶振型
a)简支梁的主要振型;b)连续梁的主要振型

用两种方法,一是在结构上同时布置许多传感器,传感器的位置可根据理论计算结果确定,这时须保证所有传感器的灵敏度相同,放大器的特性相同。表 4-1 为某五跨连续梁动力特性理论计算值,根据理论分析结果,该桥动载试验的传感器的布置方式如图 4-8 所示。另一种方法是只用两个传感器,其中一个传感器布置在支点或桥外,作为不动的参考点,另一个传感器不断的改变位置,测出桥梁结构各控制点的振动曲线。测出各测点的振动曲线后,比较各测点的振幅、相位便可绘制出振型曲线。

某五跨连续梁动力特性理论计算值 表 4-1

阶次	频率(Hz)	周期(s)	振型
1	4.39E+00	2.28E-01	竖向正对称
2	6.47E+00	1.55E-01	竖向反对称
3	7.57E+00	1.32E-01	面外水平振动

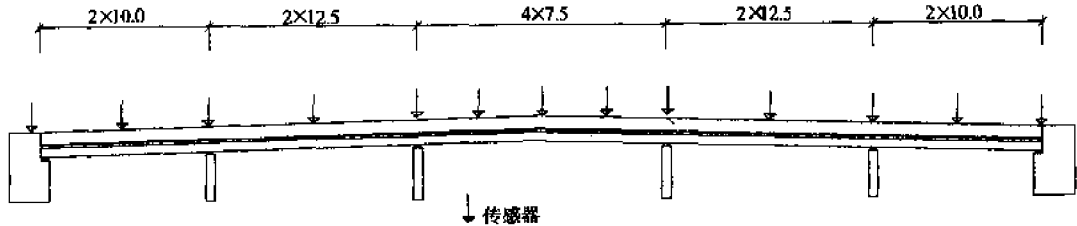


图 4-8 某五跨连续梁动载试验传感器布置(m)

三、振动测试系统组成

根据测试任务及测试对象的不同,一般可将振动测试系统分为两种类型。一种是仅测量测试对象的输出响应(这时输入常常难以测量或不能测量),从而求出其相关函数或功率谱密度函数来确定测试对象的动态特性。另一种是同时测量输入和输出,从而求出测试对象的动态特性。一般而言,振动测试系统由以下三部分组成。

- 1.激励部分 激励部分的作用是实现对测试对象的激励,使结构发生振动,如在跳车试验、跑车试验中的汽车就是激励源。
- 2.拾振部分 该部分由传感器(加速度、速度或位移传感器)、导线等组成。振动测试系统中,传感器的选用十分重要,应根据测试对象的振动频率,需要检测的物理量来选用不同种类的传感器。
- 3.数据采集分析系统 该部分的作用是将传感器采得的信号放大或转为电压量,然后进行记录及分析。大多数的数据采集分析系统都有模拟信号的放大、滤波及数字信号的放大滤波等功能。典型的数据采集分析系统由采样/保持、模拟量/数字量转换及数据采集记录三部分组成。

(1)采样/保持器

实现信号采样的电路称为采样器,由开关元件及其控制电路所组成。对时间连续的信号进行采样是通过周期脉冲序列的调制来完成的,实际的采样脉冲有一定宽度但通常远小于采样周期。在采样时间内要完成幅值从连续的模拟量到数字量的转换,会对模拟量/数字量转换器提出过高要求,即要求模拟量/数字量转换器有非常高的转换速度。因此,在实际实现采样时,是将采样所得到的时间离散信号通过记忆装置即保持器保持起来,在信号处于保持期间,再进行模拟量/数字量的转换。

(2)模拟量/数字量(A/D)转换器

在数据采集系统中,模拟量/数字量转换(A/D)是实现将模拟量转换为数字量的电子技术,实现这种转换技术的电路或器件称为模拟量/数字量转换器。通常所指的模拟量/数字量转换器都是对输入模拟量为直流电压信号而言,模拟量/数字量转换器将此直流电压转换为二进制数字量。

(3)数据采集记录

目前,大多数的数据采集分析系统的构成模式为:将具有单片机控制的数据采集仪和微型计算机采用通讯的方式联机,组成一套数据采集与分析系统。由于采集部分独立于计算机系统,因此各项性能指标和功能可以设计得很理想;同时,计算机可以通过通讯接口对采集部分进行控制、传送数据,具有较好的互换性,再配以不同的软件,可使整套仪器同时具有多种功能。

四、数据采集

1. 采样定理与采样频率

所谓采样,就是将连续变化的信号转变为时间域离散的信号。采样的核心问题是:信号在时域离散化后会不会失掉信息,即如何选取采样频率,从而保证采样后的离散信号能够准确而不失真地代表原有连续信号。

参见图 4-9,设模拟量信号为 $x_a(t)$,采样周期为 t_n ,则采样频率为 $f=1/t_n$ 。采样后的时间离散信号为

$$x(t) = x_a(nt_n) \quad (n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty) \quad (4-1)$$

现在我们来分析信号 $x(t)$ 的频谱 $x(\omega)$,并讨论 $x(\omega)$ 能复现原模拟量信号 $x_a(t)$ 的频谱 $x_a(\omega)$ 的条件。物理上,采样过程可以看成是周期为 t_n 的采样脉冲对模拟信号的调制。周期性单位脉冲序列记为 $\delta_s(t)$

$$\delta_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt_n) \quad (4-2)$$

单位脉冲序列形同梳子,又称梳状函数。当原始连续信号 $x_a(t)$ 按采样频率 f 采样后,采样信号 $x(t)$ 可以看成是 $x_a(t)$ 和脉冲序列 $\delta_s(t)$ 的乘积,即

$$x(t) = x_a(t)\delta_s(t) = x_a(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt_n) \quad (4-3)$$

单位脉冲序列 $\delta_s(t)$ 为周期函数,可按傅里叶级数展开,其傅里叶系数 C_n 为

$$C_n = \frac{1}{t_s} \int_{-\frac{t_s}{2}}^{\frac{t_s}{2}} \delta_s(t) e^{-j2\pi n t} dt = \frac{1}{t_s} \int_{-\frac{t_s}{2}}^{\frac{t_s}{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nt_s) e^{-j2\pi n t} dt \quad (4-4)$$

在 $|t| \leq \frac{t_s}{2}$ 积分区间,只有一个脉冲 $\delta(t)$,故

$$C_n = \frac{1}{t_s} \int_{-\frac{t_s}{2}}^{\frac{t_s}{2}} \delta(t) e^{-j2\pi n t} dt = \frac{1}{t_s} = f_s \quad (4-5)$$

由此可得 $\delta_s(t)$ 的傅氏级数的指数形式为

$$\delta_s(t) = f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j2\pi n f_s t} \quad (4-6)$$

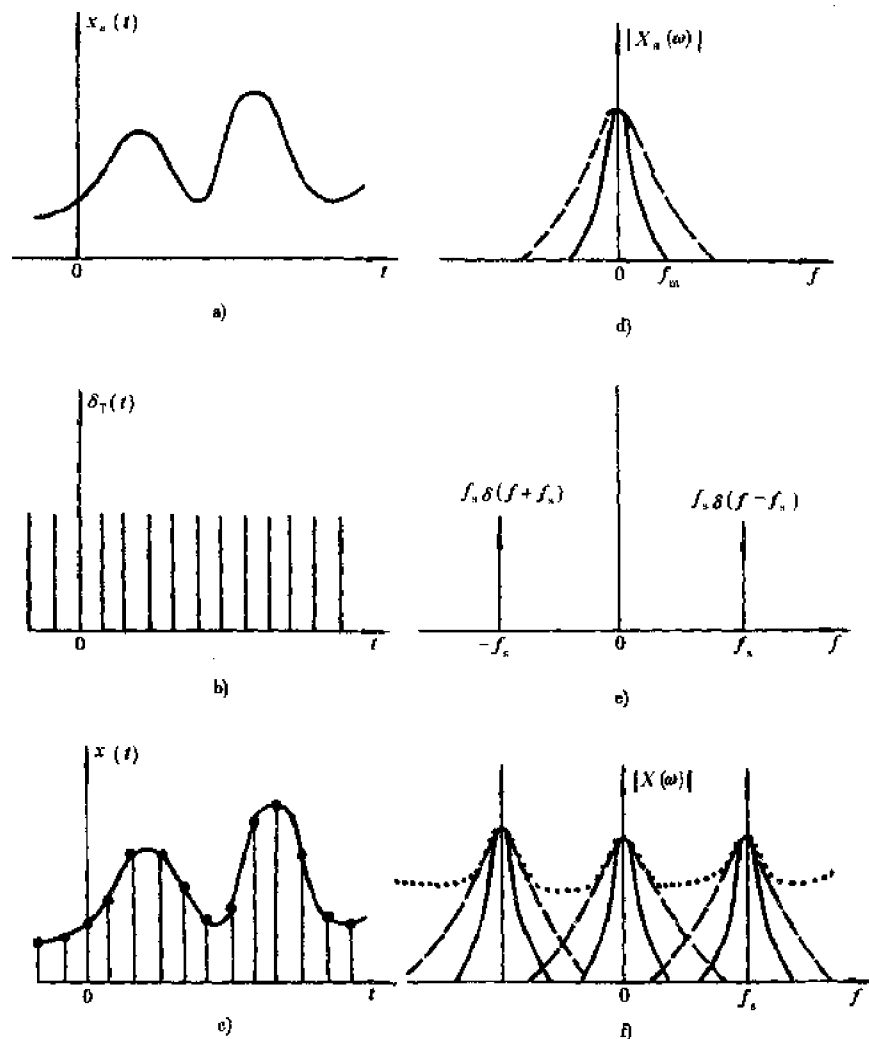


图 4-9 连续信号的离散

a) 连续信号; b) 梳状信号; c) 采样信号; d) 连续信号的频谱; e) 梳状信号的频谱; f) 采样信号的频谱

根据傅里叶变换的时移定理, 可得 $\delta_s(t)$ 的频谱为

$$F[\delta_s(t)] = f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \quad (4-7)$$

很明显, 只有当 $f = nf_s$ 时, $\delta(0)$ 才取值为 1, 即频谱的谱线是离散的, 谱线间距为 f_s (图 4-10e)。将式(4-6)代入式(4-3), 采样信号可表示为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_s x_a(t) e^{j2\pi n f_s t} \quad (4-8)$$

其傅氏变换为

$$x(\omega) = F[x(t)] = F\left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} f_s x_a(t) e^{j2\pi n f_s t}\right] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_s F[x_a(t) e^{j2\pi n f_s t}] \quad (4-9)$$

根据傅氏变换的频移定理, 上式可写成(注意自变量由 ω 换成 $f = \omega/2\pi$)

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_s X_a(f - nf_s) \quad (4-10)$$

式中, $x_a(f)$ 为原始连续信号的频谱(图 4-9d)。采样信号的频谱 $x(f)$ 如图 4-9f 所示。由此可见, 采样信号的频谱包含着原信号频谱及无限个经过平移的原信号频谱(频谱的幅值均乘以常数 f_s)。平移量等于采样频率 f_s 及其各次倍频 nf_s 。

当连续信号频谱的最大频率 $f_m \leq f_s/2$, 即 $f_s \geq 2f_m$ 时, 在 $0 \leq f_m$ 频率范围内, 采样信号的频谱 $x(f)$ 与原信号频谱完全一样, 即采样信号无失真。但是, 当 $f_m > f_s/2$ 或 $f_s < 2f_m$ 时, 平移谱将与原信号谱重叠, 使某些频带的幅值与原始频谱不同, 这种现象称为频率混叠, 如图 4-10d) 所示。频率混叠使采样信号产生失真, 造成误差。其物理概念是, 采样频率太低, 采样点太少, 以致不能复现原信号。

不难看出, 为了使采样过程不丢掉信息, 就要求能从采样信号的频谱中取出原信号频谱, 以保证能无失真地恢复原信号。这时, 采样频率 f_s 与原信号最大频率 f_m 之间必须满足如下关系

$$f_s \geq 2f_m \quad (4-11)$$

这就是著名的采样定律。满足临界条件 $f_s = 2f_m$ 的信号最大频率 f_m 称为折叠频率, 记为 f_c , 当信号频谱超过 $f_c/2$ 时, 将会以此为镜像对称轴折叠回来, 造成频谱重叠。

实际采样时, 在采样前并不知道信号的最大频率 f_m , 这时如何确定采样频率 f_s 就成为问题的关键。我们固然可以假设 f_m 很大, 从而确定 f_s 。但是, 随之带来的问题是由于采样频率太高而产生大量的离散数据, 增加所需内存容量; 或是在进一步进行数字频分析时, 由于频线数有限, 造成频率分辨率不足。为此, 可以根据动态测试任务的需要确定频率范围 f_c , 然后对原信号进行低通滤波, 限制信号带宽, 并由此按采样定律确定采样频率。

2. 量测噪声的抑制

在试验中, 测量信号常常受到各种电噪声的干扰, 会导致测试精度降低。电噪声可分为静电噪声、电感噪声、射频噪声、电流噪声、接地回路电流噪声等。电噪声的抑制是数据采集系统设计及使用过程中均应注意的问题, 虽然我们不可能完全消除电噪声干扰, 但可以尽可能地减少它的影响。一个好的测试系统在设计中已经考虑噪声的抑制问题, 以下仅从现场测试的环节来简要介绍抑制电噪声的方法。

(1) 加接交流稳压电源, 减少电源电压波动引起的噪声。同时, 各测试仪器电源都要尽量直接从总电源(稳压电源)的输出端接出, 且功率大的电源接入端口应安排在功率小的仪器的电源接入端口之后, 这样可以减少共电源仪器之间由于电流波动造成的相互影响。

(2) 测试系统单点接地。接地是一个很重要的抑制噪声的措施, 但必须是单点接地, 因为如果采用多点接地, 那么由此形成的一个或多个大地回路将引入大地噪声。单点接地有串联和并联两种接法, 并联接法是将所有仪器的接地线都并联地接到同一个接地点, 这种方法是比较理想的接地方法(高频电路除外), 但由于需要连很多根接地线, 布线复杂且笨重, 在实际测试中不常用。串联接法是将所有仪器的接地线串接在一起, 然后再接到接地点, 这种方法由于各接地线存在一定的阻抗而造成相互之间的影响, 因而不是一种合理的接地方法。但由于它布线简单, 当各电路电平相差不大时仍常采用, 此时应注意使低电平的电路接地线最靠近接地点接入。由于测试系统中各仪器电平大小基本一致, 故一般均采用这种接法。实际操作时, 某台关键仪器直接接地, 而其它仪器的接地是由仪器间的输入、输出插头间信号线的屏蔽相连接来完成的。此外, 由于被测物体一般为导体, 如果传感器与其直接相接触, 而被测物体与大地相连, 那么传感器相当于一个接地点, 它和测试系统的接地点、信号传输线以及两地点间的大地将形成回路, 引入大地噪声。解决的办法是将传感器与被测物体绝缘。最后, 尚应注意测试系统接地点与其它接地点严格分开。

(3) 所有电源线和信号传输线应尽可能采用屏蔽线。同时, 应注意不要让信号传输线与电源线平行, 且应尽可能使它们相互远离隔开。

(4)正在测试记录或分析时,应注意不要变动测试系统中任何仪器的任何开关,否则将产生高频噪声和出现瞬时过载现象,甚至损坏仪器。

(5)应尽量使仪器间的阻抗相互匹配,并使振动测试仪器接地电阻不大于 4Ω 。

五、试验组织

桥梁动载试验组织包括试验前现场准备、试验测试、实时分析及现场清理四个方面的工作。试验组织就是把上述工作内容互相衔接,形成一个有机、完整、高效率组织计划,并在试验中按照这个计划进行。动载试验组织虽然内容较少,但仍是试验成功的重要保证。

1. 试验前现场准备工作

(1)出发前应对所携带的仪器仪表、传感器等进行全面的检查与标定,确保仪器仪表状态良好。此外,要在距离测试部位适当的地方搭设棚帐,以供操作仪器使用;还要接通电源,安装照明设备,检查通讯设备的状态。

(2)按照试验方案所定的传感器布置位置,进行放样定位,布置测试导线,采用合适的方法将传感器固定在被测对象上。此外,根据被测结构的动力特性,确定“跳车试验”进行的位置,并做出标记。

(3)对于运营中的桥梁,试验准备工作要注意传感器、测试导线的防护,试验开始前应封闭交通,禁止闲杂人员和非试验用车辆进入。

(4)建立试验领导组织,进行人员分工安排。一般地,根据试验实际情况,设指挥一人,试验车辆导引员一人,测试人员数名,配备相应的通信联络工具或明确联络方式,以便统一指挥,统一行动。

(5)正式试验前,要进行预测试,以检查仪器、仪表、测量线路的工作状态,确定测量放大器的放大系数。

2. 试验工作

(1)动载试验的测试内容一般包括地脉动测试、跑车测试、跳车测试三项。试验时,宜从动力响应小的测试项目做起,即先进行地脉动测试、再进行 20km/h 、 40km/h 、 60km/h 跑车试验,最后进行跳车试验,以便根据动力响应的大小及时调整测量放大器的放大系数,避免量测溢出。

(2)进行跑车试验时,要较准确控制试验车辆的车速,并根据测试传感器的布置,确定试验车辆行驶途中进行数据采集的起止位置,以免测试数据产生遗漏。

(3)每次测试后,要在现场进行数据回放和频谱分析,并与测试桥梁动力特性的理论计算值进行比较,检查测试数据是否正常,实测频率是否与理论计算值接近。如有异常情况应立即检查、分析原因,必要时应重新进行测试。

(4)试验进行过程中,注意不要触动测试元件及测量导线,以免引起读数的波动。

(5)试验完成后,清理仪器仪表、传感器,回收测试导线,拆除棚帐,清理现场,以便开放交通。

第三节 动测数据分析与评价

桥梁结构的动力特性如固有频率、阻尼系数和振型等,它们只与结构本身的固有性质有关,如结构的组成形式、刚度、质量分布、支承情况和材料性质等,而与荷载等其它条件无关,结

构的动力特性是结构振动系统的基本特征,是进行结构动力分析所必须的参数。另一方面,桥梁结构在实际的动荷载作用下,结构各部位的动力响应,如振幅、应力、位移、加速度以及反映结构整体动力作用的冲击系数等,不仅反映了桥梁结构在动荷载作用下的受力状态,也反映了动力作用对司机、乘客舒适性的影响。桥梁结构的动载试验,就是要从大量的实测数据信号中,揭示桥梁结构振动的内在规律,综合评价桥梁结构的动力性能。

在动载试验中,可获取大量桥梁结构振动系统的各种振动量如位移、应力、加速度等的时间历程曲线。由于实际桥梁结构的振动往往很复杂,一般都是随机的,直接根据这样的信号或数据来分析判断结构振动的性质和规律是困难的,一般需对实测振动波形进行分析与处理,以便对结构的动态性能做进一步分析。常用的分析处理方法可以分为时域分析和频域分析两种。时域分析是直接对时程曲线进行分析,可以得出诸如振幅、阻尼比、振型、冲击系数等参数;频域分析是把时域信号通过傅立叶变换的数学处理变换为频域信号,揭示信号的频率成分和振动系统的传递特性,以得到振动能量按频率的分布情况,从而确定结构的频率和频率分布特性。得出这些振动参量后,就可以根据有关指标综合评价桥梁结构的动力性能。以下就对两种分析方法做一简述。

一、时域分析

在时域分析中,桥梁结构的一些动力参数可以直接在相应的时程曲线上得出,例如,可以在加速度时程曲线上得到各测点加速度振幅,在位移时程曲线上将最大动挠度减去最大静挠度即可得出位移振幅(图 4-10),通过比较各测点的振幅、相位就可得出振型。而另外一些参数如结构阻尼特性、冲击系数则需要对时程曲线进行一些分析处理,简述如下。

1. 桥梁结构阻尼特性的测定

桥梁结构的阻尼特性,一般用对数衰减率 δ 或阻尼比 D 来表示。实测的自由振动衰减曲线如图 4-11 所示,由振动理论可知,对数衰减率为

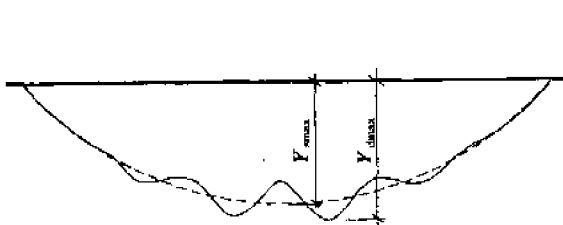


图 4-10 移动荷载作用下简支梁的挠度曲线

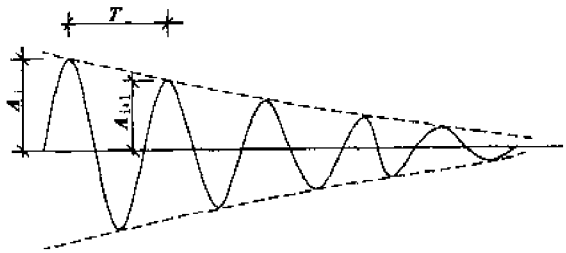


图 4-11 由自由振动衰减曲线求阻尼特性

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (4-12)$$

式中, A_i 和 A_{i+1} 分别为相邻两个波的振幅值,可以直接从衰减曲线上量取。实践中,常在衰减曲线上量取 n 个波形,求得平均衰减率

$$\delta_n = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+n}} \quad (4-13)$$

根据振动理论可知,对数衰减率与阻尼比 D 的关系为

$$\delta = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (4-14)$$

由于一般材料的阻尼比都很小,因此,式(4-14)可近似为

$$D = \frac{\delta}{2\pi} \quad (4-15)$$

图 4-2b)为试验车辆跳车试验所产生的自由振动衰减曲线,通过对实测数据的分析,可知该桥的阻尼比为 0.0218。通常,桥梁结构的阻尼比在 0.01~0.08 之间,阻尼比越大,说明桥梁结构耗散外部能量输入的能力越强,振动衰减得越快,反之亦然。

2. 冲击系数的确定

动力荷载作用与桥梁结构上产生的动挠度,一般较同样的静荷载所产生的相应的静挠度要大。动挠度与相应的静挠度的比值称为活荷载的冲击系数。由于挠度反映了桥梁结构的整体变形,是衡量结构刚度的主要指标,因此活载冲击系数综合地反映了动力荷载对桥梁结构的动力作用。活载冲击系数与桥梁结构的结构型式、车辆行驶速度、桥面的平整度等因素有关。为了测定桥梁结构的冲击系数,应使车辆以不同的速度驶过桥梁,逐次记录跨中截面的挠度时程曲线,如图 4-10 所示,按照冲击系数的定义有

$$1 + \mu = \frac{Y_{dmax}}{Y_{smax}} \quad (4-16)$$

式中: Y_{dmax} ——最大动挠度值;

Y_{smax} ——最大静挠度值。

图 4-12a)为 1 辆 10t 重的试验车辆以 20km/h 时速通过某预应力混凝土 T 型刚构桥时,T 构牛腿处的动挠度时程曲线,根据实测数据,可得该桥的冲击系数($1 + \mu$)为

$$1 + \mu = \frac{Y_{dmax}}{Y_{smax}} = \frac{5.576}{5.089} = 1.096$$

对动挠度进行频谱分析(4-12b)),从频谱图中可得出该桥第一阶频率为 1.08Hz。

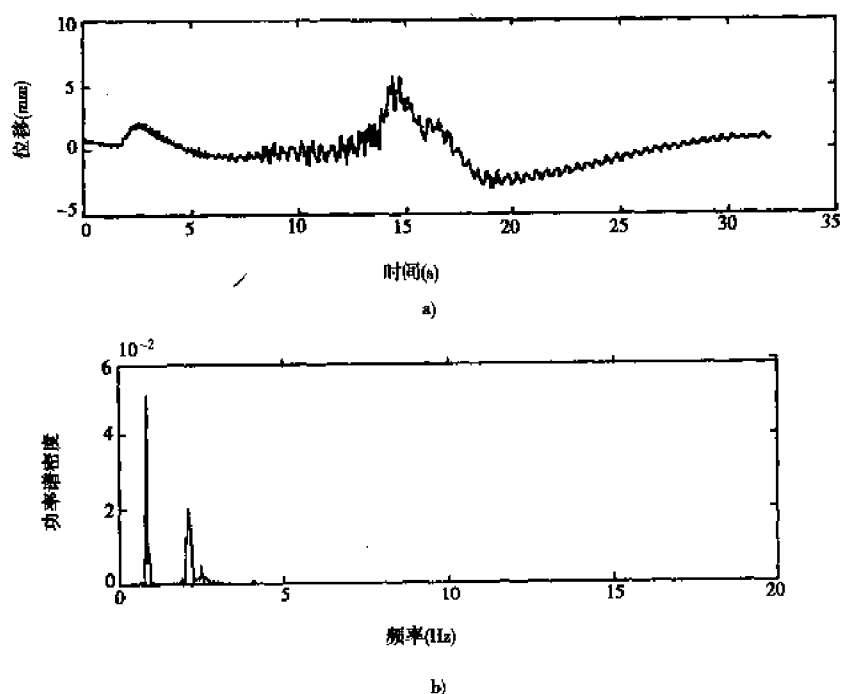


图 4-12 20km/h 跑车所产生的 T 型刚构牛腿处动挠度时程曲线及其频谱图
a) 动挠度时程曲线; b) 自功率谱图

二、频域分析方法

桥梁结构在风荷载、地震荷载、车辆荷载作用下所产生的振动,都是包含有多个频率成分的随机振动,它的规律不能用一个确定的函数来描述,因而就无法预知将要发生的振动规律。这种不确定性、不规则性是一切随机数据所共有的特点。随机变量的单个试验称为样本,每次单个试验的时间历程曲线称为样本记录,同一试验的多个试验的集合称为样本集合或总体,它代表一个随机过程。随机数据的不确定性、不规则性是对单个观测样本而言的,而大量的同一随机振动试验的集合都存在一定的统计规律。对于桥梁结构的振动,一般都属于平稳的、各态历经的随机过程,即随机过程的统计特征与时间无关,且可以用单个样本来替代整个过程的研究。随机数据可以用以下所述的几种统计函数来描述。

1. 均值、均方值和均方差

随机数据的均值、均方值和均方差是样本函数时间历程的一种简单平均,它们从不同方面反映了随机振动信号的强度,其表达式分别如下

$$\text{均值} \quad u_x = E[x(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (4-17)$$

$$\text{均方值} \quad \Psi_x^2 = E[x^2(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (4-18)$$

$$\text{均方差} \quad \sigma_x^2 = E[(x(t) - u_x)^2] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - u_x)^2 dt \quad (4-19)$$

均值反映了随机过程的静态强度,是时间历程的简单算术平均;均方值反映了总强度,它是时间历程平方值的平均;均方差反映了动态强度,是零均值信号的均方值。均值 u_x 、均方值 Ψ_x^2 、均方差 σ_x^2 三者之间的关系为

$$\Psi_x^2 = u_x^2 + \sigma_x^2 \quad (4-20)$$

2. 概率密度函数

各态历经随机振动过程的概率密度函数表示在样本记录中,瞬时数据 $x(t)$ 的值落在某一指定范围 $(x, x + \Delta x)$ 内的概率,如图 4-13 所示,其定义为

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{\text{Prob}[x < x(t) < x + \Delta x]}{\Delta x} \right] = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \right] \quad (4-21)$$

式中: T ——总观测时间;

T_x ——在总观测 T 时间内, $x(t)$ 落在 $(x, x + \Delta x)$ 区间内的时间总和。

根据上述定义可知,概率密度曲线 $p(x)$ 下的面积总和等于 1,它标志着随机数据落在全部范围内的必然性。概率密度函数与均值、均方值有内在的联系。均值 u_x 等于概率密度曲线下的面积形心的坐标,如图 4-14 所示,它可以由一次矩来计算

$$u_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x) dx \quad (4-22)$$

均方值 Ψ_x^2 可以由二次矩来计算

$$\Psi_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx \quad (4-23)$$

3. 自相关函数

随机变量的自相关函数是描述一个时刻的变量与另一时刻变量数值之间的依赖关系,对于各态历经随机过程的变量 $x(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 可以定义为 $x(t)$ 与它的延时 $x(t + \tau)$

乘积的时间平均,即

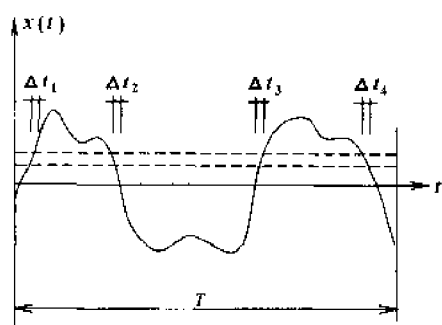


图 4-13 概率密度函数

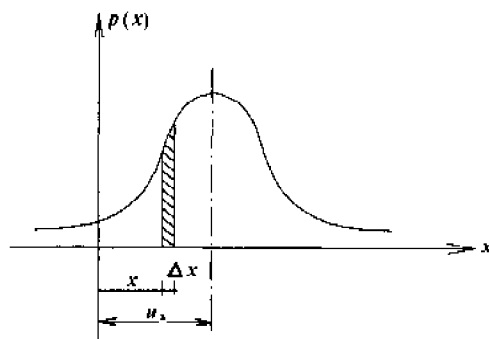


图 4-14 概率密度曲线与均值的关系

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (4-24)$$

自相关函数主要用来确定任一时刻的随机数据对它以后数据的影响程度, $R_x(\tau)$ 的数值大小说明影响程度的大小。因此, 可以利用自相关函数来鉴别混淆在随机数据中的周期成分, 因为当随机数据在时间间隔很大时, 自相关程度趋于零, 而周期成分不管时间间隔多大, 其自相关函数都变化不大。

4. 功率谱密度函数

对于平稳随机过程, 随机变量 $x(t)$ 的功率谱密度定义为样本函数在 $(f, f + \Delta f)$ 频率范围内均方值的谱密度, 即

$$G(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow \infty} \frac{\Psi_x^2(f, f + \Delta f)}{\Delta f} \quad (4-25)$$

由式(4-25)得到的功率谱称为单边功率谱。在实际分析时, 常采用自相关函数 $R_x(\tau)$ 的傅立叶变换来求得功率谱密度函数, 其表达式为

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (4-26)$$

由式(4-26)得到的功率谱称为双边功率谱密度函数, 也称为自功率谱密度, $S(f)$ 与 $G(f)$ 的关系为

$$G(f) = 2S(f) \quad (4-27)$$

由式(4-26)的逆变换可得

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{i2\pi f\tau} df \quad (4-28)$$

当 $\tau = 0$ 时, 上式可表示为

$$R_x(0) = \Psi_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) df \quad (4-29)$$

上式表明, 自功率谱密度 $S(f)$ 在整个频率域上的积分就是随机变量的均方值。一般振动的能量或功率与其振幅的平方或均方值成比例, 所以功率谱密度反映了随机数据在频率域内能量的分布情况, 某个频率对应的功率谱值大, 说明该频率在振动过程中占主导地位, 由此即可分析出结构的固有频率, 如图 4-15 所示。因而, 在分析随机数据的频率构成时, 我们常常利用其自功率谱的分布图形来判断桥梁结构的固有频率, 图 4-5b) 即为地脉动所产生的桥梁结构位移的自功率谱图, 从图上可以看出该桥的第一固有频率为 6.057Hz; 图 4-12b) 为跑车所产生的桥

梁结构动挠度的自功率谱,同样,从图上可以分析出该桥的固有频率。在实际测试中,随机数据的自功率谱计算常采用快速傅立叶变换来实现。

三、桥梁结构动力性能的分析评价

桥梁结构动力性能的一些参量如固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数以及动力响应的大小,是宏观评价桥梁结构的整体刚度、运营性能的重要指标;也是一些规范评价桥梁安全运营性能的主要尺度,如我国铁路桥梁规范(1959)规定铁路桥梁的自振周期应小于1.5s,并小于0.011s(l 为跨度,单位为m);我国铁路检定规范(1978)规

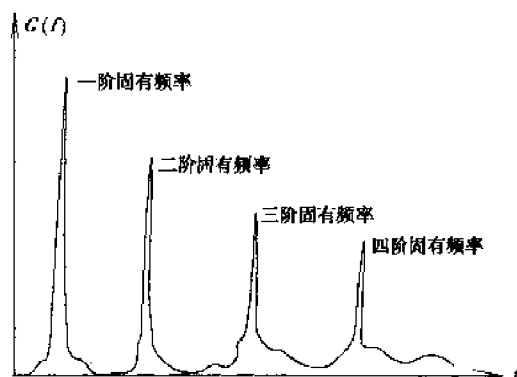


图 4-15 自功率谱图与结构的固有频率

定铁路桥梁的振幅不得大于 $\frac{l}{2.5B}$ mm(l 为跨度, B

为桥宽,单位为m),等等。目前,虽然国内外规范对桥梁结构的动力响应、动力特性尚无统一的评价尺度,但一般认为:桥梁结构的动力特性反映了结构的整体刚度、桥面的平整程度及耗散外部振动能量输入的能力,同时,过大的动力响应会影响车辆的安全行驶,会引起司机、乘客的不舒适,应予以设法避免。在实际测试中,通常通过以下几个方面来评价桥梁结构的动力性能。

1. 比较桥梁结构频率的理论计算值与实测值,如果实测值大于理论计算值,说明桥梁结构的实际刚度较大,反之则说明桥梁结构的刚度偏小,可能存在开裂或其它不正常现象。一般地,在进行理论计算时,常常会做出一些假设,忽略了一些次要因素,故理论计算值要大于实测值。

2. 根据动力冲击系数的实测值来评价桥梁结构的行车性能,实测冲击系数较大则说明桥梁结构的行车性能差,桥面的平整程度不良,反之亦然。

3. 根据实测加速度量值的大小,评价桥梁结构行车的舒适性。根据国内外研究资料,一般地,车辆在桥梁结构行驶时最大竖向加速度不宜超过0.065g(g 为重力加速度),否则就会引起司乘人员的不适。

4. 实测阻尼比的大小反映了桥梁结构耗散外部能量输入的能力,阻尼比大,说明桥梁结构耗散外部能量输入的能力强,振动衰减得快;阻尼比小,说明桥梁结构耗散外部能量输入的能力差,振动衰减得慢。但是,过大的阻尼比则说明桥梁结构可能存在开裂或支座工作状态不正常等现象。

第五章

混凝土无损检测技术

HUNNINGTUWUSUNJIANCEJISHU

第一节 概 述

一、混凝土无损检测技术的形成和发展

混凝土的无损检测技术,是指在不影响结构构件受力性能或其它使用功能的前提下,直接在构件上通过测定某些适当的物理量,推定混凝土的强度、均匀性、连续性、耐久性等一系列性能的检测方法。

早在 20 世纪 30 年代,人们就开始探索混凝土无损检测技术。1930 年首先出现了表面压痕法。1948 年瑞士人施密特(E. Schmid)研制成功回弹仪。1949 年加拿大的莱斯利(Leslie)等运用超声脉冲进行混凝土检测获得成功。60 年代罗马尼亚的费格瓦洛(I. Făoșoaru)提出超声回弹综合法。随后,许多国家也相继开展了这方面的研究工作,制订了有关的技术标准。我国在 20 世纪 50 年代开始引进瑞士、英国、波兰等国的回弹仪和超声仪,并结合工程应用开展了许多研究工作。经过几十年的研究和工程应用,我国研制了一系列的无损检测仪器设备,结合工程实践进行了大量的应用研究,逐步形成了《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—92)、《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02—88)、《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69—94)、《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21—90)等技术规程,并由此解决了工程实践中的问题,产生了巨大的社会效益。

无损检测技术与常规的混凝土结构破坏试验相比,具有如下一些特点。

- (1)不破坏被检测构件,不影响其使用性能,且简便快速;
- (2)可以在构件上直接进行表层或内部的全面检测,对新建工程和既有结构物都适用;
- (3)能获得破坏试验不能获得的信息,如能检测混凝土内部空洞、疏松、开裂、不均匀性、表层烧伤、冻害及化学腐蚀等;
- (4)可在同一构件上进行连续测试和重复测试,使检测结果有良好的可比性;
- (5)测试快速方便,费用低廉;
- (6)由于是间接检测,检测结果要受到许多因素的影响,检测精度要差一些。

目前,混凝土无损检测技术主要用于既有构件的强度推定、施工质量检验、结构内部缺陷检测等方面。随着对混凝土制作全过程质量控制要求的不断提高,对既有结构物维修养护的日益重视,无损检测技术在工程建设中会发挥越来越重要的作用。

二、常用无损检测方法的分类和特点

由于混凝土无损检测技术不仅能推定混凝土的强度,而且能够反映混凝土的均匀性、连续性等各项质量指标,因此在新建工程质量评价、已建工程的安全性评价等方面具有无可替代的作用,越来越受到人们的重视。为了便于了解全貌,按检测目的、基本原理分类如下。

1. 混凝土强度的无损检测方法

在工程实践中,需要运用无损检测方法推定混凝土的实际强度,主要有如下几种情况:①在施工过程中,由于管理、工艺或意外事故等原因影响了混凝土质量,或预留试块的取样、制作、养护、抗压试验等不符合有关技术规程或标准的规定,以致预留试件的强度不能代表结构混凝土的实际强度时,可以采用无损检测方法推定混凝土强度,作为混凝土合格性评定及验收依据。②当需要了解混凝土在施工期间的强度增长情况,以便进行拆模、吊装、预应力筋张拉或放张等后续工序时,可运用无损检测方法连续监测结构混凝土强度的发展,以便及时调整施工进度。同时,无损检测方法也可作为施工过程中质量控制的重要手段。③对于既有桥梁结构,在使用过程中,有些桥梁已不能满足当前通行荷载的要求,有些桥梁由于各种自然原因而产生不同程度的损伤与破坏,有些桥梁由于设计或施工不当而产生各种缺陷。对于这些桥梁的维修、加固、改建,可通过无损检测方法推定混凝土强度,以便提供加固、改建设计时的基本强度参数和其它设计依据。

混凝土强度的无损检测方法根据原理可分为三种。

(1) 半破损法

半破损法是以不影响构件的承载能力为前提,在构件上直接进行局部破坏性试验,或直接钻取芯样进行破坏性试验。属于这类方法的有钻芯法、拔出法、射击法等。这类方法的特点是以局部破坏性试验获得混凝土强度,因而较为直观可靠。其缺点是造成结构物的局部破坏,需进行修补,因而不宜用于大面积的全面检测。

钻芯法是利用专用钻机,从结构混凝土中钻取芯样以检测混凝土强度或观察混凝土内部质量的方法。钻芯法检测混凝土强度具有直观准确的优点,但其缺点是对构件的损伤较大,检测成本较高。因此,一般宜将钻芯法与其它非破损方法结合使用。

拔出法是使用拔出仪器拉拔埋在混凝土表层内的锚固件,将混凝土拔出一锥形体,根据混凝土抗拔力推算其抗压强度的方法。该法分为预埋法和后装法两种,前者是浇筑混凝土时预先将锚杆埋入,后者是在硬化后的混凝土上钻孔,装入(粘结或胀嵌)锚杆。

射击法也称穿透探针法或贯入阻力法,是采用一种称为温泽探针(Windor probe)的射击装置,将硬质合金钉打入混凝土中,根据钉的外露长度作为混凝土贯入阻力的度量并以此推算混凝土强度。钉的外露长度愈多,表明其混凝土强度愈高。这种方法适宜于混凝土早期强度发展情况的测定,也适用于同一结构不同部位混凝土强度的相对比较。该法的优点是测量迅速简便,由于有一定的射入深度(20~70mm),受混凝土表面状况及碳化层影响较小,但受混凝土粗骨料的影响十分明显。

(2) 非破损法

非破损法以混凝土强度与某些物理量之间的相关性为基础,检测时在不影响混凝土任何性能的前提下,测试这些物理量,然后根据相关关系推算被测混凝土的强度。属于这类方法的有回弹法、超声脉冲法、射线吸收与散射法、成熟度法等等。这类方法的特点是测试方便、费用低廉,但其测试结果的可靠性主要取决于混凝土的强度与所测试物理量之间的相关性。

回弹法是采用回弹仪进行混凝土强度测定,属于表面硬度法的一种。其原理是回弹仪中运动的重锤以一定冲击动能撞击顶在混凝土表面的冲击杆后,测出重锤被反弹回来的距离,以回弹值作为与强度相关的指标,来推定混凝土强度的一种方法。

超声波法检测混凝土强度的基本依据是超声波传播速度与混凝土弹性性质的密切关系。在实际检测中,超声声速又通过混凝土弹性模量与其力学强度的内在联系,与混凝土抗压强度建立相关关系并籍以推定混凝土的强度。

成熟度法主要以“度时积” $M(t) = \sum (T_s - T_0) \Delta t$ 作为推定强度的依据(式中 $M(t)$ 为成熟度, T_0 为基准温度, T_s 为时间 Δt 区间内混凝土的平均温度)。主要用于现场测量控制混凝土早期强度发展状况,一般多作为施工质量控制手段。

射线法主要根据 γ 射线在混凝土中的穿透衰减或散射强度推算混凝土的密实度,并据此推定混凝土的强度。这种方法由于涉及射线防护问题,目前在国内外应用较少。

(3) 综合法

所谓综合法就是采用两种或两种以上的无损检测方法,获取多种物理参量,并建立强度与多项物理参量的综合相关关系,以便从不同角度综合评价混凝土的强度。由于综合法采用多项物理参数,能较全面地反映构成混凝土强度的各种因素,并且还能抵消部分影响强度与物理量相关关系的因素,因而它比单一物理量的无损检测方法具有更高的准确性和可靠性。目前已被采用的综合法有超声回弹综合法、超声钻芯综合法、超声衰减综合法等等,其中超声回弹综合法已在国内外获得广泛应用。

2. 混凝土缺陷无损检测方法

所谓混凝土的缺陷,是指那些在宏观材质不连续、性能参数有明显变异,而且对结构的承载能力和使用性能产生影响的区域。即使整个结构的混凝土的普遍强度已达到设计要求,这些缺陷的存在也会使结构整体承载力严重下降,或影响结构的耐久性。因此,必须探明缺陷的部位、大小和性质,以便采取切实的处理措施,排除工程隐患。混凝土缺陷的成因十分复杂,检测要求也各不相同。混凝土缺陷现象大致有:内部空洞、蜂窝麻面、疏松、断层(桩)、结合面不密实、裂缝、碳化、冻融、化学腐蚀等。

混凝土缺陷的无损检测方法主要有超声脉冲法、脉冲回波法、雷达扫描法、红外热谱法、声发射法等等。

超声脉冲法检测内部缺陷分为穿透法和反射法。穿透法是根据超声脉冲穿过混凝土时,在缺陷区的声时、波幅、波形、接收信号的频率等参数所发生的变化来判断缺陷的,因此它只能在结构物的两个相对面上或同一面上进行测试。目前超声脉冲穿透法已较为成熟,并已普遍用于工程实践,许多国家都已编制了相应的技术规程。反射法则根据超声脉冲在缺陷表面产生反射波的现象进行缺陷判断。由于它不必像穿透法那样在两个测试面上进行,因此对某些只能在一个测试面上检测的结构物(如桩基础、路面等)具有特殊意义,也取得了广泛的工程应用。

脉冲回波法是采用落球、锤击等方法在被测物件中产生应力波,用传感器接收回波,然后采用时域或频域方法分析回波的反射位置,以判断混凝土中缺陷位置的方法。其特点是激励力足以产生较强的回波,因而可检测尺寸较大的构件,如深度达数十米的基桩或厚度较大的混凝土板等。

雷达扫描法是利用混凝土反射电磁波的原理,先向被检测的结构物发射电磁波,在电特性(电容率及导电率)不同的物质界面产生反射波,再根据反射波的性质,分析反射波的影像,便

可检测出结构的内部缺陷。其特点是可迅速对被测结构进行扫描,适用于道路、机场等结构物的大面积快速扫描。

红外热谱法是测量或记录混凝土热发射的方法。当混凝土中存在缺陷时,这些有缺陷的部位与正常部位相比,温度上升与下降的状况是不同的,其外表面会产生温度差。所以,从红外线照相机所测得的温度分布图像中,便能推断出缺陷的位置和大小。

声发射法是利用混凝土受力时因内部微小区域破坏而发声的现象,根据声发射信号分析混凝土损伤程度的一种方法,这种方法常用于混凝土受力破坏过程的监视,用以确定混凝土的受力历史和损伤程度。

3. 混凝土其它性能的无损检测方法

除了强度和缺陷检测以外,混凝土还有许多其它性能可用无损检测方法予以测定。其它性能主要是指与结构物使用功能有关的各种性能。主要有碳化深度、保护层厚度、受冻层深度、含水率、钢筋位置与钢筋锈蚀状况、水泥含量等。现代工程结构物所处的环境越来越复杂,对其它性能的要求越来越高,人们也越来越清楚地认识到其它性能与强度相关性的局限性很大,强度高未必其它性能就好,因此,其它性能的无损检测技术正引起重视。常用的检测方法有共振法、敲击法、磁测法、电测法、微波吸收法、中子散射法、中子活化法、渗透法等。

第二节 回弹法测混凝土强度

一、回弹法的基本原理

回弹法是采用回弹仪进行混凝土强度测定,属于表面硬度法的一种,其原理是回弹仪中运动的重锤以一定冲击动能撞击顶在混凝土表面的冲击杆后,测出重锤被反弹回来的距离,以回弹值(反弹距离与弹簧初始长度之比)作为与强度相关的指标,来推定混凝土强度的一种方法。混凝土表面硬度是一个与混凝土强度有关的量,表面硬度值是随强度的增大而提高的,采用具有一定动能的钢锤冲击混凝土表面时,其回弹值与混凝土表面硬度也有相关关系。所以,混凝土强度与回弹值存在相关关系。回弹法由于其操作简便、经济、快速,在国内外得到广泛的应用。

图 5-1 为回弹法的原理示意图。当重锤被拉到冲击前的起始状态时,若重锤的质量等于 1,则这时重锤所具有的势能 e 为

$$e = \frac{1}{2} E_s l^2 \quad (5-1)$$

式中: E_s ——拉力弹簧的刚度系数;

l ——拉力弹簧起始拉伸长度。

混凝土受冲击后产生瞬时弹性变形,其恢复力使重锤回弹,重锤被弹回到 x 位置时所具有的势能 e_x 为

$$e_x = \frac{1}{2} E_s x^2 \quad (5-2)$$

式中: x ——重锤反弹位置或重锤回弹时弹簧的拉伸长度。

重锤在弹击过程中所消耗的能量 Δe 为

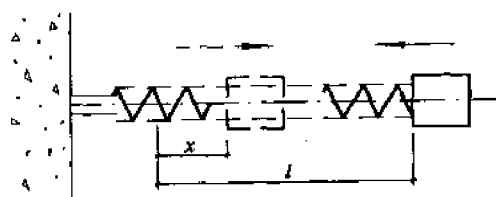


图 5-1 回弹法原理示意图

$$\Delta e = e - e_x \quad (5-3)$$

将式(5-1)、式(5-2)代入式(5-3)得

$$\Delta e = \frac{E_s l^2}{2} - \frac{E_s x^2}{2} = e \left[1 - \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] \quad (5-4)$$

$$\text{令} \quad R = \frac{x}{l} \quad (5-5)$$

在回弹仪中, l 为定值, 故 R 与 x 成正比, 称为回弹值。将 R 代入式(5-4)得:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\Delta e}{e}} = \sqrt{\frac{e_x}{e}} \quad (5-6)$$

从式(5-6)可知, 回弹值 R 是重锤冲击混凝土表面后剩余的势能与原有势能之比的平方根。简言之, 回弹值是重锤冲击过程中能量损失的反映。能量损失愈小, 说明混凝土表面硬度愈大, 其相应的回弹值也就愈高。由于混凝土表面硬度与其抗压强度有一致性的变化关系, 因此, 回弹值 R 的大小亦反映了混凝土抗压强度的大小。

二、回弹仪

1. 回弹仪的类型、构造及工作原理

回弹仪分类见表 5-1, 其中, 以 N 型应用最为广泛, 这种中型回弹仪是一种指针直读的直射锤击式仪器, 其构造如图 5-2 所示。使用时, 先对回弹仪施压, 弹击杆 1 徐徐向机壳内推进, 弹击拉簧 2 被拉伸, 使联接弹击拉簧的弹击锤 4 获得恒定的冲击能量(如图 5-3 所示), 当仪器水平状态工作时, 其冲击能量可由下式计算:

$$e = \frac{1}{2} E_s l^2 = 2.207(\text{J}) \quad (5-7)$$

式中: E_s ——弹击拉簧的刚度 = 0.784N/mm;

l ——弹击拉簧工作时拉伸长度 = 75mm。

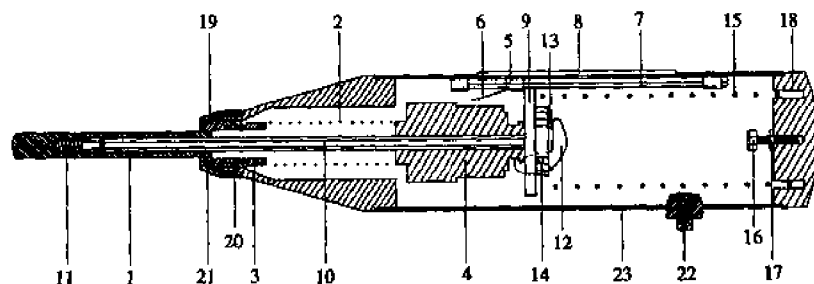


图 5-2 回弹仪的构造

1-弹击杆;2-弹击拉簧;3-拉簧座;4-弹击锤;5-指针块;6-指针片;7-指针轴;8-刻度尺;9-导向法兰;10-中心导杆;11-缓冲压簧;12-挂钩;13-挂钩压簧;14-挂钩销子;15-压簧;16-调零螺钉;17-紧面螺母;18-尾盖;19-盖帽;20-卡环;21-密封毡帽;22-按钮;23-外壳

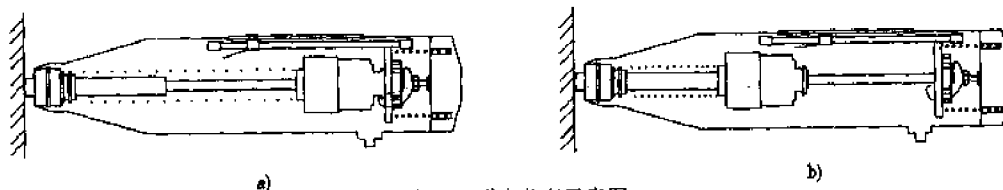


图 5-3 弹击状态示意图

a) 弹击锤脱钩前的状态; b) 弹击锤脱钩后的状态

当挂钩 12 与调零螺钉 16 互相挤压时,使弹击锤脱钩,弹击锤的冲击面与弹击杆的后端平面相碰撞如图 5-4,此时弹击锤释放出来的能量借助弹击杆传递给混凝土构件,混凝土弹性反应的能量又通过弹击杆传递给弹击锤,使弹击锤获得回弹的能量后向后弹回,弹击锤回弹的距离 l' 与弹击脱钩前距弹击杆后端平面的距离 l 之比即回弹值 R ,它由仪器外壳上的刻度尺 8 示出,如图 5-4 所示。

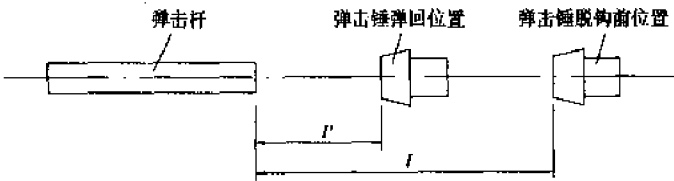


图 5-4 回弹位置示意

回弹仪分类

表 5-1

类 别	名 称	冲击能量	主要用途	备 注
L 型(小型)	L 型	0.735J	小型构件或刚度稍差的混凝土	
	LR 型	0.735J	小型构件或刚度稍差的混凝土	有回弹值自动画线装置
	LB 型	0.735J	烧结材料和陶瓷	
N 型(中型)	N 型	2.207J	普通混凝土构件	
	NA 型	2.207J	水下混凝土构件	
	NR 型	2.207J	普通混凝土构件	有回弹值自动画线装置
	ND-740 型	2.207J	普通混凝土构件	高精度数显式
	NP-750 型	2.207J	普通混凝土构件	数字处理式
	MTC-850 型	2.207J	普通混凝土构件	有专用电脑自动记录处理
	WS-200 型	2.207J	普通混凝土构件	远程自动显示记录
P 型(摆式)	P 型	0.883J	轻质建材、砂浆、饰面等	
	PT 型	0.883J	用于低强度胶凝制品	冲击面较大
M 型(大型)	M 型	29.40J	大型实心块体、机场跑道及公路路面的混凝土	

2. 回弹仪的率定

回弹仪使用性能的检验方法,一般采用钢砧率定法,即在符合标准的钢砧上,将仪器垂直向下弹击,回弹值的平均值应为 80 ± 2 ,以此作为使用过程中是否需要调整的标准(见图 5-5)。

试验研究表明,钢砧率定的主要作用是:

(1)当仪器为标准状态时,检验仪器的冲击能量是否等于或接近于 2.207J(N 型),此时在钢砧上的率定值应为 80 ± 2 ,此值作为校验仪器的标准之一;

(2)能较灵活地反映出弹击杆、中心导杆和弹击锤的加工精度以及工作时三者是否在同一轴线上。若不符合要求,则率定值低于 78,会影响测试值;

(3)转动呈标准状态回弹仪的弹击杆在中心导杆内的位置,可检验仪器本身测试的稳定性。当各个方向在钢砧上的率定值均为 80 ± 2 时,即表示该台仪器的测试性能是稳定的;

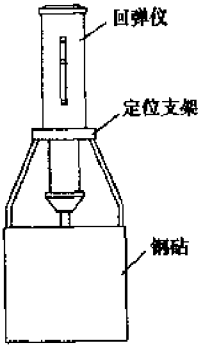


图 5-5 回弹仪率定示意图

(4)在仪器其他条件符合要求的情况下,用来校验仪器经使用后内部零部件有无损坏或出现某些障碍(包括传动部位及冲击面有无污物等),出现上述情况时率定值偏低且稳定性差。

我国《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—92)规定,如率定试验率定值不在 80 ± 2 范围内,应对仪器进行保养后再率定,如仍不合格应送校验单位校验。钢砧率定值不在 80 ± 2 范围内的仪器,不得用于测试。

3.回弹仪的操作、保养及校验

(1)操作

将弹击杆顶住混凝土的表面,轻压仪器,松开按钮,弹击杆徐徐伸出。使仪器对混凝土表面均匀施压,待弹击锤脱钩冲击弹击杆后即回弹,带动指针向后移动并停留在某一位置上,即为回弹值。继续顶住混凝土表面并在读取和记录回弹值后,逐渐对仪器减压,使弹击杆自仪器内伸出,重复进行上述操作,即可测得被测构件或结构的回弹值。操作中注意仪器的轴线应始终垂直于构件混凝土的表面。

(2)保养

仪器使用完毕后,要及时清除伸出仪器外壳的弹击杆、刻度尺表面及外壳上的污垢和尘土,当测试次数较多、对测试值有怀疑时,应将仪器拆卸,并用清洗剂清洗机芯的主要零件及其内孔,然后在中心导杆上抹一层薄薄的钟表油,其他零部件不得抹油。要注意检查尾盖的调零螺丝有无松动,弹击拉簧前端是否钩入拉簧座的原孔位内,否则应送校验单位校验。

(3)校验

当仪器超过检定有效期限,或累计弹击次数超过 6000 次,或仪器遭受撞击、损害、零部件损坏需要更换等情况均需送校验单位,按国家计量检定规程《混凝土回弹仪》(JJG817—93)进行校验。

三、回弹法测强曲线

我国地域辽阔,各地区材料、生产工艺及气候等均有差异,影响混凝土的抗压强度 f_{cu} 与回弹值 R 的因素非常广泛,如水泥品种、粗骨料、细骨料、外加剂的影响,混凝土的成型方法、养护方法的影响,环境湿度的影响,混凝土碳化及龄期的影响等等。回弹法测定混凝土的抗压强度,是建立在混凝土的抗压强度与回弹值之间具有一定的相关性的基础上的,这种相关性可用“ $f_{cu} - R$ ”相关曲线(或公式)来表示,通常称之为测强曲线。在我国,回弹法测强曲线分为全国统一测强曲线、地区曲线和专用曲线三种,以方便测试、提高测试精度,充分考虑各地区的材料差异。三种曲线制定的技术条件及使用范围见表 5-2。

回弹法测强相关曲线 表 5-2

名称	统一曲线	地区曲线	专用曲线
定义	由全国有代表性的材料、成型、养护工艺配制的混凝土试块,通过大量的破损与非破损试验所建立的曲线	由本地区有代表性的材料、成型、养护工艺配制的混凝土试块,通过较多的破损与非破损试验所建立的曲线	由与构件混凝土相同的材料、成型、养护工艺配制的混凝土试块,通过一定数量的破损与非破损试验所建立的曲线
适用范围	适用于无地区曲线或专用曲线时检测符合规定条件的构件或结构混凝土强度	适用于无专用曲线时检测符合规定条件的构件或结构混凝土强度	适用于检测与该构件相同条件的混凝土强度
误差	测强曲线的平均相对误差 $\leq \pm 15\%$, 相对标准差 $\leq 18\%$	测强曲线的平均相对误差 $\leq \pm 14\%$, 相对标准差 $\leq 17\%$	测强曲线的平均相对误差 $\leq \pm 12\%$, 相对标准差 $\leq 14\%$

测强相关曲线一般可用回归方程来表示。对于无碳化混凝土或在一定条件下成型养护的混凝土,可用回归方程表示

$$f_{cu}^c = f(R) \quad (5-8)$$

式中: f_{cu}^c ——回弹法测区混凝土强度值。

对于已经碳化的混凝土或龄期较长的混凝土,可由下列函数关系表示:

$$f_{cu}^c = f(R, d) \quad (5-9)$$

$$f_{cu}^c = f(R, d, t) \quad (5-10)$$

式中: d ——混凝土的碳化深度;

t ——混凝土的龄期。

如果定量测出已硬化的混凝土构件的含水率,可以采用下列函数式:

$$f_{cu}^c = f(R, d, t, W) \quad (5-11)$$

式中: W ——混凝土的含水率。

目前我国应用最广泛的是式(5-9),即采用回弹值和碳化深度两个指标来推定混凝土强度。按全国统一曲线制订的测区混凝土强度换算表见附表 1。

四、检测方法与数据处理

1. 检测准备

检测前,一般需要了解工程名称,设计、施工和建设单位名称,构件名称、编号、施工图及混凝土设计强度等级,水泥品种、标号、出厂厂名,砂石品种、粒径,外加剂或掺合料品种、掺量以及混凝土配合比,模板类型,混凝土灌注和养护情况、成型日期,构件存在的质量问题,混凝土试块抗压强度等。

一般地,检测构件的混凝土强度有两类方法,一类是逐个检测被测构件,另一类是抽样检测。逐个检测方法主要用于对混凝土强度质量有怀疑的独立结构或有明显质量问题的构件。抽样检测主要用于在相同的生产工艺条件下,强度等级相同、原材料和配合比基本一致且龄期相近的混凝土构件。被检测的试样应随机抽取不少于同类构件总数的 30%,还要求测区总数不少于 100 个。

2. 检测方法

当了解了被检测的混凝土构件情况后,需要在构件上选择及布置测区。所谓“测区”系指每一试样的测试区域。每一测区相当于试样同条件混凝土的一组试块。行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—92)规定,取一个构件混凝土作为评定混凝土强度的最小单元,至少取 10 个测区。但对长度小于 3m,高度低于 0.6 m 的构件,其测区数量可适当减少,但不应少于 5 个。测区的大小以能容纳 16 个回弹测点为宜。测区表面应清洁、平整、干燥,不应有接缝、饰面层、粉刷层、浮浆、油垢、蜂窝麻面等。必要时可采用砂轮清除表面杂物和不平整处。测区宜均匀布置在构件或结构的检测面上,相邻测区间距不宜过大,当混凝土浇筑质量比较均匀时可酌情增大间距,但不宜大于 2m;构件或结构的受力部位及易产生缺陷部位(如梁与柱相接的节点处)需布置测区;测区优先考虑布置在混凝土浇筑的侧面(与混凝土浇筑方向相垂直的贴模板的一面),如不能满足这一要求时,可选在混凝土浇筑的表面或底面;测区须避开位于混凝土内保护层附近设置的钢筋和预埋钢板。对于体积小、刚度差以及测试部位的厚度小于 100mm 的构件,应设置支撑加以固定。

按上述方法选取试样和布置测区后,先测量回弹值。测试时回弹仪应始终与测面相垂直,

并不得打在气孔和外露石子上。每一测区的两个测面用回弹仪各弹击 8 点,如一个测区只有一个测面,则需测 16 个点。同一测点只允许弹击一次,测点宜在测面范围内均匀分布,每一测点的回弹值读数准确至一度,相邻两测点的净距一般不小于 20mm,测点距构件边缘或外露钢筋、钢板的间距不得小于 30mm。

回弹完后即测量构件的碳化深度,用冲击钻在测区表面开直径为 15 mm 的孔洞,其深度应大于混凝土的碳化深度。清除洞中的粉末和碎屑后(注意不能用液体冲洗孔洞),立即用 1% 的酚酞酒精溶液滴在孔洞内壁的边缘处,碳化部分的混凝土不变色,而未碳化部分的混凝土会变成紫红色,然后用钢尺测量出碳化深度值,应准确至 0.5mm。

一般一个测区选择 1~3 处测量混凝土的碳化深度值,当相邻测区的混凝土质量或回弹值与它基本相同时,那么该测区的碳化深度值也可代表相邻测区的碳化深度值,一般应选不少于构件的 30% 测区数测量碳化深度值。

3. 回弹值计算

当回弹仪水平方向测试混凝土浇筑侧面时,应从每一测区的 16 个回弹值中剔除 3 个最大值和 3 个最小值,取余下的 10 个回弹值的平均值作为该测区的平均回弹值,计算公式为:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_i}{10} \tag{5-12}$$

式中: R_m ——测区平均回弹值,精确至 0.1;

R_i ——第 i 个测点的回弹值。

回弹法测强曲线是根据回弹仪水平方向测试混凝土试件侧面的试验数据计算得出的,当回弹仪非水平方向检测混凝土浇筑侧面时,应按下列公式修正

$$R_a = R_m + R_{aa} \tag{5-13}$$

式中: R_a ——修正后的测区回弹值;

R_{aa} ——测试角度为 α 的回弹修正值,按表 5-3 采用。

非水平方向检测时回弹值的修正值 R_{aa} 表 5-3

测试角度 R_m								
	+90	+60	+45	+30	-30	-45	-60	-90
20	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
30	-5.0	-4.0	-3.5	-2.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5
40	-4.0	-3.5	-3.0	-2.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0
50	-3.5	-3.0	-2.5	-1.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5

当水平方向检测混凝土浇筑顶面或底面时,应按下列公式修正:

$$R_a = R_m + (R_a^t + R_a^b) \tag{5-14}$$

式中: R_a^t ——测顶面时的回弹修正值,按表 5-4 采用;

R_a^b ——测底面时的回弹修正值,按表 5-4 采用。

不同浇筑面上的回弹修正值 R_a^t, R_a^b

表 5-4

R_m \ 测试面	顶面修正值 (R_a^t)	底面修正值 (R_a^b)
20	+2.5	-3.0
25	+2.0	-2.5
30	+1.5	-2.0
35	+1.0	-1.5
40	+0.5	-1.0
45	0	-0.5
50	0	0

在测试时,如仪器处于非水平状态,同时构件测区又非混凝土的浇灌侧面,则应对测得的回弹值先进行角度修正,再进行顶面或底面修正。

五、混凝土强度的计算

根据行业标准《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23—92)的规定,用回弹法检测混凝土强度时,除给出强度推定值外,对于测区数小于 10 个的构件,还要给出平均强度值、测区最小强度值;测区数大于等于 10 个的构件还要给出标准差。

1. 测区混凝土强度值换算值

测区混凝土强度换算值是指将测得的回弹值和碳化深度值换算成被测构件的测区的混凝土抗压强度值。构件第 i 个测区混凝土强度换算值($f_{cu,i}^e$),根据每一测区的平均回弹值(R_m)及平均碳化深度值(d_m),查阅由统一曲线编制的“测区混凝土强度换算表(附表 1)”得出;有地区或专用测强曲线时,混凝土强度换算值应按地区或专用测强曲线换算得出。

2. 构件混凝土强度的计算

(1) 构件混凝土强度平均值及标准差

结构或构件的测区混凝土强度平均值可根据各测区的混凝土强度换算值计算。当测区数为 10 个及以上时,应计算强度标准差。平均值和标准差应按下列公式计算

$$m f_{cu}^e = \frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^e}{n} \quad (5-15)$$

$$S f_{cu}^e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^e)^2 - n(m f_{cu}^e)^2}{n-1}} \quad (5-16)$$

式中: $m f_{cu}^e$ ——构件测区混凝土强度换算值的平均值(MPa),精确至 0.1 MPa;

n ——对于单个检测的构件,取一个构件的测区数;对批量检测的构件,取被抽检构件测区数之和;

$S f_{cu}^e$ ——构件测检混凝土强度换算值的标准差(MPa),精确至 0.01MPa。

(2) 构件混凝土强度推定值

结构或构件的混凝土强度推定值($f_{cu,e}$)是指相应于强度换算值总体分布中保证率不低于 95% 的结构或构件中的混凝土抗压强度值,应按下列公式确定:

a)当该构件测区数少于 10 个时

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^c \quad (5-17)$$

式中: $f_{cu,min}^c$ ——构件中最小的测区混凝土强度换算值。

b)当构件测区混凝土强度值中出现小于 10MPa 时:

$$f_{cu,e} < 10.0 \text{ MPa} \quad (5-18)$$

c)当该构件测区数不少于 10 个或按批量检测时,应按下列公式计算:

$$f_{cu,e} = m_{fcu}^c - 1.645 S_{fcu}^c \quad (5-19)$$

(3)对于按批量检测的构件,当该批构件混凝土强度标准差出现下列情况之一时,则该批构件应全部按单个构件检测:

a)当该批构件混凝土强度平均值小于 25MPa 时: $S_{fcu}^c > 4.5 \text{ MPa}$;

b)当该批构件混凝土强度平均值不小于 25MPa 时: $S_{fcu}^c > 5.5 \text{ MPa}$ 。

第三节 混凝土超声检测技术基础

一、概述

波动是自然界中普遍存在的一种物质运动形式,机械振动在物体中的传播即为机械波。当机械波的频率在人耳可闻的范围内(20~20000Hz)时,称为可闻声波,低于此范围的称为次声波,而超过 20000Hz 的称为超声波。超声波用于非破损检测,就是以超声波为媒介,获得物体内部信息的一种方法。目前超声波检测方法已应用于医疗诊断、钢材探伤、混凝土检测等诸多领域。混凝土超声检测是混凝土非破损检测技术中的一个重要方面,其应用主要有两个方面,一是推定混凝土强度,二是测定混凝土内部缺陷。我国自 20 世纪 50 年代开始这项技术的研究,在 60 年代初即应用于工程检测,发展极为迅速,目前已应用于建筑、水电、交通、铁道等各类工程中,从地面上部结构的检测发展到地下结构的检测;从一般小构件的检测发展到大体积混凝土的检测;从单一测强发展到测裂缝、测缺陷、弹性参数的全面检测等。随着计算机广泛应用与超声检测技术、仪器设备的发展,混凝土超声检测逐步实现了数据处理、分析自动化,提高了检测技术的准确性和可靠性,将会在土木工程中发挥更大作用。

混凝土超声检测目前主要是采用“穿透法”,其基本原理是用一发射换能器重复发射一定频率的超声脉冲波,让超声波在所检测的混凝土中传播,然后由接收换能器将信号传递给超声仪,由超声仪测量接收到的超声波信号的各种声学参数,并转化为电信号显示在示波屏上。研究表明:在混凝土中传播的超声波的波速、振幅、频率和波形等波动参数与所测混凝土的力学参数如弹性模量、泊松比、剪切模量以及内部应力分布状态有直接的关系,也与混凝土内部缺陷如断裂面、孔洞的大小及形状的分布有关。因此,当超声波在混凝土中传播后,它携带了有关混凝土的材料性能、内部结构及其组成的信息,准确测定这些声学参数的大小及变化,可以推断混凝土的强度和内部缺陷等情况。

二、超声仪

超声仪是超声检测的基本装置。它的作用是产生重复的电脉冲去激励发射换能器,发射换能器发射的超声波在混凝土中传播后被接收换能器接收,并转换成电信号放大后显示在示

波屏上。超声仪除了产生、接收、显示超声波外,还具有量测超声波有关参数,如声传播时间、接收波振幅、频率等功能。超声仪可分为非金属超声检测仪和金属超声检测仪两大类。一般地,非金属超声检测仪的电路如图 5-6 所示,分为脉冲振荡、发射—接收、混频电路、扫描示波、计时显示及电源等部分。超声仪应能满足以下要求。

(1)为满足大测距测量的要求,声时可测量范围在 $5000\mu\text{s}$ 以上(大致相当于 20m 测距),有足够的扫描延迟时间及声时显示位数;为满足声速测量精度的要求,测时最小分度宜为 $0.1\mu\text{s}$ 。

(2)仪器应具有良好的稳定性。声时显示调节在 $20\sim 30\mu\text{s}$ 范围内时,2h 内声时显示的漂移应不大于 $\pm 0.2\mu\text{s}$,且不允许发生间隔跳动。

(3)仪器接收放大器频率响应范围(频带)应有足够宽度,一般应不小于 $10\sim 200\text{kHz}$ 。

(4)仪器宜具有示波屏显示波形和游标测读功能,以便较准确地测读声时、振幅及频率等参数。

(5)适于一般现场测试情况下的温度、电源变化条件。

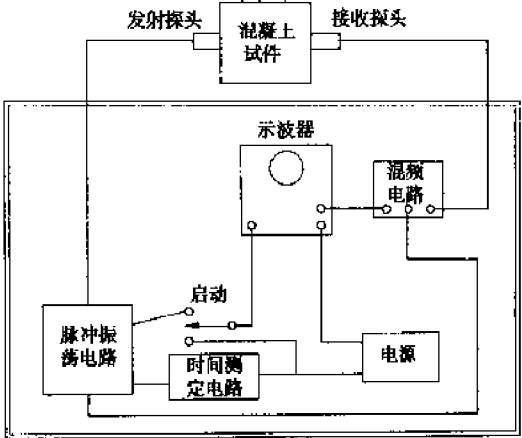


图 5-6 非金属超声检测仪原理图

三、换能器

应用超声波检测混凝土时,需要将电信号转换成发射探头的机械振动,再向被测介质发送超声波。超声波在被测介质中传播一定距离后由接收探头接收,并将其转换成电信号后再送入仪器进行处理。这种将声能与电能相互转换的器具称换能器。上述发射探头和接收探头即为超声换能器。换能器一般是由压电晶体构成,压电晶体在受到压力或拉力而产生变形时,能在其界面上产生电荷。这种特殊晶体的压电性能是可逆的,即晶体在外加电场的作用下,将产生变形。如果加在晶体界面上的是交变电场,则晶体由于反复变形而产生振动,并向周围介质发射声波。

1. 换能器的构造与性能

常用换能器按波形不同分为纵波换能器与横波换能器,分别用于纵波与横波的测量。目前,一般检测中所用的多是纵波换能器,其中又分为平面换能器、径向换能器以及一发多收换能器。

平面换能器包括普通平面换能器和夹心式平面换能器两种,其特点是将压电晶体制成圆片状,当受电脉冲的作用后,压电体沿厚度方向振动,超声波脉冲的发射或接收方向在圆片的法线方向。以普通平面换能器为例,其构造如图 5-7 所示。

2. 换能器的选配

在混凝土超声检测中,应根据结构的尺寸及检测目的来选择换能器。平面换能器用于一般结构的表面对测和平测;径向换能器(增压式、圆环式、一发双收式)则用在需钻孔检测或灌注桩声测管中检测等场合以及水下检测。由于超声波在混凝土中衰减较大,为了使其传播距离较远,混凝土超声检测时多使用频率在 200kHz 以下的低频率超声波。在此频率范

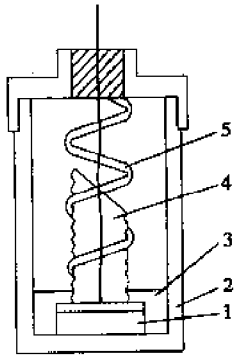


图 5-7 普通平面换能器构造
1-压电片(压电陶瓷); 2-外壳; 3-绝缘圈; 4-吸收块(背衬); 5-压簧

围内,换能器频率选择主要取决于结构或试件尺寸及混凝土对超声波衰减情况。根据实际使用情况,对于一般的正常混凝土,换能器的频率选择可参见表 5-5。

换能器频率选择 表 5-5

测距 (cm)	选用换能器频率 (kHz)	最小横截面尺寸 (cm)
10 ~ 20	100 ~ 200	10
20 ~ 100	50 ~ 100	20
100 ~ 300	50	20
300 ~ 500	30 ~ 50	30
> 500	20	50

3. 换能器与被测体的耦合

要使从换能器辐射面发出的超声波进入被测体,还必须解决换能器与被测体之间声耦合的问题。采用平面换能器时,由于被测混凝土表面粗糙不平,不论压得多紧,在换能器与被测对象之间仍会有空气夹层存在。由于固体与空气的特性阻抗相差悬殊,当超声波由换能器传播到空气夹层时,超声能量绝大部分被反射而难以进入混凝土。对于接收换能器来说,情况也一样。为此,需要在换能器与混凝土之间加上耦合剂。耦合剂一般是液体或膏体,它们充填于二者之间时,排掉了空气,形成耦合剂层,这样就会使大部分超声波进入混凝土。平面换能器的耦合剂一般采用膏体,如黄油、凡士林等。采用径向换能器在测试孔中测量时,通常用水作耦合剂。一般钻好孔后,应进行孔的冲洗,然后注满清水,将径向换能器置于孔中即可观测。应注意孔中水应尽量不含悬浮物(如泥浆、砂等),因为悬浮物对超声波有较强的散射衰减,影响振幅的测量。

四、混凝土主要声学参数

目前在混凝土超声检测中所常用的声学参数为声速、波形、频率及振幅。

1. 声速

声速即超声波在混凝土中传播的速度。它是混凝土超声检测中一个主要参数。混凝土的声速与混凝土弹性性质有关,也与混凝土内部结构(孔隙、材料组成等)有关。一般说来,弹性模量越高,密实性越好,声速也越高。同时,混凝土的强度与它的弹性模量和孔隙率(密实性)有密切关系,因此,对于同种材料与配合比的混凝土,强度越高,声速也越高。当混凝土内部有缺陷时(孔洞、蜂窝等),则该处混凝土的声速将比正常部位低。当超声波穿过裂缝传播时,所测得的声速也将比无裂缝处的声速有所降低。

2. 波形

这里指的波形系指在示波屏上显示的接收波波形。当超声波在传播过程中碰到混凝土内部缺陷、裂缝或异物时,由于超声波的绕射、反射和传播路径的复杂化,直达波、反射波、绕射波相继到达接收换能器,它们的频率和相位各不相同。这些波的叠加有时会使波形畸变。因此,对接收波波形的分析研究,有助于对混凝土内部质量及缺陷的判断。

3. 频率和振幅

在超声检测中,由电脉冲激发出的声脉冲信号是复频超声脉冲波,它包含了一系列不同成分的余弦波分量。这种含有各种频率成分的超声波在传播过程中,高频成分首先衰减。因此,可以把混凝土看作是一种类似高频滤波器的介质,超声波愈往前传播,其所包含的高频分量愈少,则主频率也逐渐下降。主频率下降的量值除与传播距离有关外,主要取决于混凝土本身的

性质和内部是否存在缺陷等。因此,测量超声波通过混凝土后频率的变化可以判断混凝土质量和内部缺陷、裂缝等情况。

接收波振幅通常指首波,即第一个波前半周的幅值,接收波振幅值反映了接收到的声波的强弱。对于内部有缺陷或裂缝的混凝土,由于缺陷使超声波反射或绕射,振幅也将明显减小。因此,振幅值也是判断混凝土缺陷的重要指标。

由于接收波主频率和振幅值的大小不仅取决于被测混凝土的性质和内部情况,还取决于仪器设备性能、所处的状态、耦合状态以及测距的大小,所以很难有统一的度量标准,目前只是作为同条件(同一仪器、同一状态、同一测距)下相对比较用。

第四节 超声-回弹综合法检测混凝土强度

一、概述

超声波检测混凝土强度的基本依据是超声波传播速度与混凝土弹性性质有密切关系,而混凝土弹性性质与其力学强度存在内在联系,因此,在实际检测中,可以建立超声声速与混凝土抗压强度相关关系并籍以推定混凝土的强度。超声测强以混凝土立方体试块 28d 龄期抗压强度为基准,把混凝土当作弹性体看待,通过大量试验研究原材料品种规格、配合比、施工工艺等因素对超声检测参数的影响,建立超声测强的经验公式,这样,通过测量超声波声速便可得出混凝土的抗压强度。目前,国内外按统计方法建立的“ $f_{cu} - v$ ”相关曲线基本上采用以下两种非线性的数学表达式

$$f_{cu} = Av^B \quad (5-20)$$

$$f_{cu} = Ae^{Bv} \quad (5-21)$$

式中: f_{cu} ——混凝土抗压强度;

v ——超声波声速;

A 、 B ——经验系数。

结构混凝土强度的综合法检测,就是采用两种或两种以上的单一方法或参数(力学的、物理的或声学的等)联合测试混凝土强度的方法。由于综合法比单一法测试误差小、适用范围广,因此在混凝土的质量控制与检测中的应用越来越多。超声回弹综合法是指采用超声仪和回弹仪,在结构混凝土同一测区分别测量声时值和回弹值,然后利用已建立起来的测强公式推算该测区混凝土强度的一种方法。与单一的回弹或超声法相比,综合法具有以下特点:

1. 减少混凝土龄期和含水率的影响。混凝土的龄期和含水率对超声声速和回弹值的影响有着本质的不同:混凝土含水率越大,超声声速偏高而回弹值偏低;混凝土龄期长,超声声速的增长率下降,而回弹值则因混凝土碳化程度增大而提高。因此,二者综合起来测定混凝土强度就可以部分减少龄期和含水率的影响。

2. 可以弥补相互间的不足。一个物理参数只能从某一方面、在一定范围内反映混凝土的力学性能,超过一定范围,它可能不很敏感或不起作用。例如回弹值 R 主要以表层的弹性性能来反映混凝土强度,当构件截面尺寸较大或内外质量有较大差异时,就很难反映混凝土的实际强度。超声声速主要反映材料的弹性性质,同时,由于超声波穿过材料,因而也反映材料内部的信息,但对于强度较高的混凝土(一般认为大于 35MPa),其“ $f_{cu} - v$ ”相关性较差。因此,采用回弹法和超声法综合测定混凝土强度,既可内外结合,又能在较低或较高的强度区间相互弥

补各自的不足,能够较确切地反映混凝土强度。

3.提高测试精度。由于综合法能减少一些因素的影响程度,较全面地反映整体混凝土质量,所以对提高无损检测混凝土强度的精度,具有明显的效果。

二、综合法测强的影响因素及测强曲线

1.综合法测强的影响因素

超声-回弹综合法测定混凝土强度的影响因素,比单一的超声法或回弹法要小得多。现将各影响因素及其修正方法汇总列于表 5-6 中。

“超声-回弹”综合法的影响因素

表 5-6

因 素	试验验证范围	影 响 程 度	修 正 方 法
水泥品种及用量	普通水泥、矿渣水泥、粉煤灰水泥 250 ~ 450kg/m ³	不显著	不修正
细骨料品种及砂率	山砂、特细砂、中砂;28% ~ 40%	不显著	不修正
粗骨料品种及用量	卵石、碎石、骨灰比;1:4.5 ~ 1:5.5	显著	必须修正或制订不同的 测强曲线
粗骨料粒径	0.5 ~ 2cm;0.5 ~ 3.2cm;0.5 ~ 4cm	不显著	> 4cm 应修正
外加剂	木钙减水剂、硫酸钠、三乙醇胺	不显著	不修正
碳化深度		不显著	不修正
含水率		有影响	尽可能干燥状态
测试面	浇筑侧面与浇筑上表面混凝土及 底面比较	有影响	对 v 、 R 分别进行修正

2.综合法测强曲线

用混凝土试块的抗压强度与非破损参数之间建立起来的相关关系曲线即为测强曲线。对于超声回弹综合法来说,即先对试块进行超声测试,然后进行回弹测试,最后将试块抗压破坏,当取得超声声速值 v 、回弹值 R 和混凝土强度值 f_{cu} 之后,选择相应的数学模型来拟合它们之间的关系。综合法测强曲线按其适用范围分为以下三类。

(1)统一测强曲线(全国曲线)

统一测强曲线的建立是以全国许多地区曲线为基础,经过大量的分析研究和计算汇总而成。该曲线以全国经常使用的有代表性的混凝土原材料、成型养护工艺和龄期为基本条件,适用于无地区测强曲线和专用测强曲线的单位,对全国大多数地区来说,具有一定的现场适应性,因此使用范围广,但精度稍差。

(2)地区(部门)测强曲线

以本地区或本部门通常使用的有代表性的混凝土原材料、成型养护工艺和龄期作为基本条件,制作相当数量的试块进行试验建立的测强曲线。这类曲线适用于无专用测强曲线的工程测试,充分反映了我国地域辽阔、各地材料差别较大的特点,因此,对本地区或本部门来说,其现场适应性和测试精度均优于统一测强曲线。

(3)专用测强曲线

以某一个具体工程为对象,采用与被测工程相同的原材料、配合比、成型养护工艺和龄期,制作一定数量的试块,通过非破损和破损试验建立的测强曲线。这类曲线针对性较强,测试精

度较地区(部门)曲线高。

三、综合法检测混凝土强度的方法

综合法检测混凝土强度技术,实质上就是超声法和回弹法两种单一测强的综合测试,因此,有关检测方法及相关规定,与前述相同。

1. 检测准备

检测构件时布置测区应符合下列规定:(1)按单个构件检测时,应在构件上均匀布置不少于10个测区;(2)当对同批构件抽样检测时,构件抽样数应不少于同批构件的30%,且不少于4件,每个构件测区数不少于10个;(3)对长度小于或等于2m的构件,其测区数量可适当减少,但不应少于3个。

当按批抽样检测时,凡符合下列条件的构件,才可作为同批构件:(1)混凝土强度等级相同;(2)混凝土原材料、配合比、成型工艺、养护条件及龄期基本相同;(3)构件种类相同;(4)在施工阶段所处状态相同。

每个构件的测区,应满足以下要求:(1)测区的布置应在混凝土浇筑方向的侧面;(2)测区应均匀布置,相邻两测区的间距不宜大于2m;(3)测区应避开钢筋密集区和预埋钢板;(4)测区尺寸为200mm×200mm;相对应的两个200mm×200mm方块应视为一个测区;测试面应清洁和平整;测区应标明编号。(5)测试面应清洁、平整、干燥,不应有接缝、饰面层、浮浆和油垢,并避开蜂窝、麻面部位,必要时可用砂轮片磨平不平整处。

每一测区宜先进行回弹测试,然后进行超声测试。对非同一测区的回弹值和超声声速值,不能按综合法计算混凝土强度。

2. 测试方法

回弹值的测量与计算在本章第二节已详述,这里不再重复。以下简要介绍超声声速值的测量与计算。

(1) 超声声时值的测量

超声测点应布置在回弹测试的同一测区内。测量超声声时值时,应保证换能器与混凝土耦合良好,测试的声时值应精确至0.1μs,声速值应精确至0.01km/s,超声波传播距离的测量误差应不大于±1%。在每个测区内的相对测试面上,应各布置3个超声测点,且发射和接收换能器的轴线应在同一直线上,见图5-8所示。

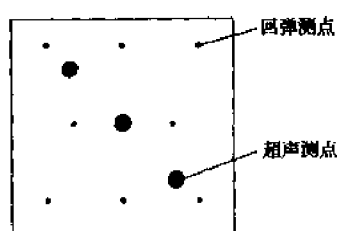


图 5-8 测区测点分布

(2) 声速值的计算

测区声速值应按下式计算

$$v = l/t_m \quad (5-22)$$

$$t_m = (t_1 + t_2 + t_3)/3 \quad (5-23)$$

式中: v ——测区声速值(km/s);

l ——超声波检测距离(mm);

t_m ——测区平均声时值(μs);

t_1, t_2, t_3 ——分别为测区中3个测点的声时值。

当在混凝土浇注的顶面与底面测试时,由于上表面砂浆较多强度偏低,底面粗骨料较多强

度偏高,综合起来与成型侧面是有区别的,此外,浇注表面不平整会使声速偏低,所以进行上表面与底面测试时声速应进行修正

$$v_a = 1.034v_i \quad (5-24)$$

式中: v_a ——修正后的测区声速值(km/s)。

四、混凝土强度的推定

用综合法检测构件混凝土强度时,构件第*i*个测区的混凝土强度换算值 $f_{cu,i}^c$,应根据修正后的测区回弹值 R_{ai} 及修正后的测区声速值 v_{ai} ,按已确定的综合法相关测强曲线计算。当结构所用材料与制定的测强曲线所用材料有较大差异时,须用同条件试块或从结构构件测区钻取的混凝土芯样进行修正,试件数量应不少于3个。此时,得到的测区混凝土强度换算值应乘以修正系数。修正系数可按下列公式计算:

有同条件立方体试块时

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} / f_{cu,i}^c \quad (5-25)$$

有混凝土芯样试件时

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} / f_{cu,i}^c \quad (5-26)$$

式中: η ——修正系数;

$f_{cu,i}$ ——第*i*个混凝土立方体试块抗压强度值;

$f_{cu,i}^c$ ——对应于第*i*个立方体试块或芯样试件的混凝土强度换算值;

$f_{cor,i}$ ——第*i*个混凝土心样试件抗压强度值;

n ——试件数。

构件混凝土强度的推定与本章第二节“回弹法检测混凝土强度”相同,这里就不再赘述。

第五节 超声法检测混凝土缺陷

一、概述

混凝土结构的缺陷,是指那些在宏观材质不连续、性能参数有明显变异,而且对结构的承载能力和使用性能产生影响的区域。混凝土结构物,由于设计、施工等原因或受使用环境、自然灾害的影响,在内部可能会存在不密实区域或空洞,在外部可能形成蜂窝、麻面、裂缝或损伤层等缺陷,这些缺陷的存在会严重影响结构的承载能力和耐久性。采用简便有效的方法查明混凝土各种缺陷的性质、范围及大小,以便进行技术处理,是工程建设、运营养护过程中一个重要问题。目前,在诸多混凝土缺陷的无损检测方法中,应用最广泛、最有效的是超声法检测。

1. 超声波检测混凝土缺陷的基本原理

采用超声脉冲波检测混凝土缺陷的基本依据是:利用超声波在技术条件相同(指混凝土原材料、配合比、龄期和测试距离一致)的混凝土中传播的时间(或速度)、接收波的振幅和频率等声学参数的变化,来判定混凝土的缺陷。因为超声脉冲波传播速度的快慢,与混凝土的密实程度有直接关系,对于技术条件相同的混凝土来说,声速高则混凝土密实,相反则混凝土不密实。当有空洞、裂缝等缺陷存在时,破坏了混凝土的整体性,由于空气的声阻抗率远小于混凝土的

声阻抗率,超声波遇到蜂窝、空洞或裂缝等缺陷时,会在缺陷界面发生反射和散射,因此传播的路程会增大,测得的声时会延长,声速会降低。其次,在缺陷界面超声波的声能被衰减,其中频率较高的部分衰减更快,因此接收信号的波幅明显降低,频率明显减小或频率谱中高频成分明显减少。再次,经缺陷反射或绕过缺陷传播的超声波信号与直达波信号之间存在相位差,叠加后互相干扰,致使接收信号的波形发生畸变。根据上述原理,在实际测试中,可以利用混凝土声学参数测量值和相对变化综合分析,判别混凝土缺陷的位置和范围,或者估算缺陷的尺寸。

2. 超声波检测混凝土缺陷的方法

超声脉冲波检测混凝土缺陷技术一般根据被测结构的形状、尺寸及所处环境,确定具体测试方法。常用的测试方法大致分为以下几种。

(1) 平面测试(用厚度振动式换能器)

对测法:一对发射(T)和接收(R)换能器,分别置于被测结构相互平行的两个表面,且两个换能器的轴线位于同一直线上;

斜测法:一对发射和接收换能器分别置于被测结构的两个表面,但两个换能器的轴线不在同一直线上;

单面平测法:一对发射和接收换能器分别置于被测结构同一表面上进行测试。

(2) 测试孔测试(采用径向振动式换能器)

孔中对测:一对换能器分别置于两个对应测试孔中,位于同一高度进行测试;

孔中斜测:一对换能器分别置于两个对应测试孔中,但不在同一高度进行而是在保持一定高程差的条件下进行测试;

孔中平测:一对换能器分别置于同一测试孔中,以一定的高程差同步移动进行测试。

本节将简述混凝土浅裂缝、深裂缝、混凝土匀质性、不密实和空洞区域、两次浇灌混凝土结合面等缺陷的超声波检测方法。

二、混凝土浅裂缝检测

所谓浅裂缝,系指局限于结构表层,开裂深度不大于 500mm 的裂缝。实际检测时一般可根据结构物的断面尺寸和裂缝在结构表面的宽度,大致估计被测的是浅裂缝还是深裂缝。对一般工程结构中的梁、柱、板和机场跑道等出现的裂缝,都属于浅裂缝。在测试时,根据被测结构的实际情况,浅裂缝可分为单面平测法和对穿斜测法。

1. 平测法

当结构的裂缝部位只具有一个表面可供检测时,可采用平测法进行裂缝深度检测。平测时应在裂缝的被测部位以不同的测距同时按跨缝和不跨缝布置测点进行声时测量。如图 5-9 所示,首先将发射换能器 T 和接收换能器 R 置于被测裂缝的同一侧,并将 T 耦合好保持不动,以 T、R 两个换能器内边缘间距 l'_i 为 100mm、150mm、200mm……,依次移动 R 并读取相应的声时值 t_i 。以 l' 为纵轴、 t 为横轴绘制 $l'-t$ 坐标图,如图 5-10 所示。也可用统计方法求 l' 与 t 之间的回归直线式 $l' = a + bt$,式中 a 、 b 为待求的回归系数。

每一个测点的超声实际传播距离为

$$l_i = l'_i + a \quad (5-27)$$

式中: l_i ——第 i 点的超声波实际传播距离(mm);

l'_i ——第 i 点的 T、R 换能器内边缘间距(mm);

a ——“时—距”图中 l' 轴的截距或回归所得的常数项(mm)。

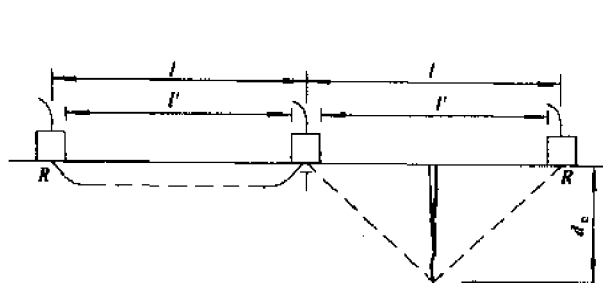


图 5-9 单面平测裂缝示意图

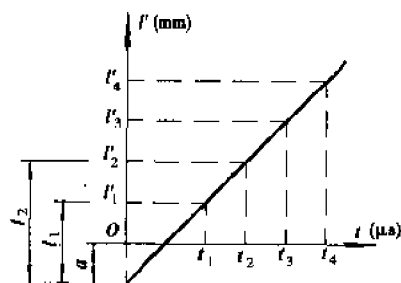


图 5-10 平测“时—距”图

其次,进行跨缝的声时测量。将 T、R 换能器分别置于以裂缝为轴线的对称两侧,两换能器中心连线垂直于裂缝走向,以 $l' = 100\text{mm}, 150\text{mm}, 200\text{mm} \dots$, 分别读取声时值 t_i^0 。该声时值便是超声波绕过裂缝末端传播的时间。根据几何关系,可推算出裂缝深度的计算式为

$$d_{ci} = \frac{l_i}{2} \sqrt{\left(\frac{t_i^0}{t_i}\right)^2 - 1} \quad (5-28)$$

式中: d_{ci} ——裂缝深度(mm);

t_i, t_i^0 ——分别代表测距为 l_i 时不跨缝、跨缝平测的声时值(μs)。

以不同测距取得的 d_{ci} 的平均值作为该裂缝的深度值 d_c , 如所得的 d_c 值大于原测距中任一个 l_i , 则应该把该 l_i 距离的 d_{ci} 舍弃后重新计算 d_c 值。

以声时推算浅裂缝深度,是假定裂缝中充满空气,声波绕过裂缝末端传播。若裂缝中有水或泥浆,则声波经水介质耦合穿裂缝而过,不能反映裂缝的真实深度。因此检测时,裂缝中不得有填充水和泥浆。当有钢筋穿过裂缝且与 T、R 换能器的连线大致平行靠近时,则沿钢筋传播的超声波首先到达接收换能器,测试结果也不能反映裂缝的深度。因此,布置测点时应注意使 T、R 换能器的连线至少与该钢筋的轴线相距 1.5 倍的裂缝预计深度,如图 5-11 所示,应使 $a \geq 1.5d_c$ 。

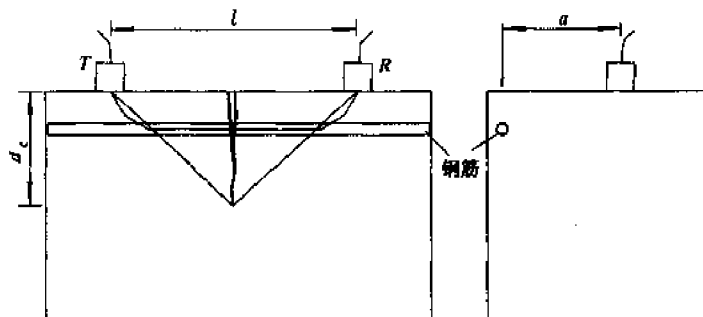


图 5-11 平测时避免钢筋的影响

2. 斜测法

当结构物的裂缝部位具有两个相互平行的测试表面时,可采用斜测法检测。可按图 5-12 所示方法布置换能器,保持 T、R 换能器的连线通过缝和不通过缝的测试距离相等、倾斜角一致的条件下,读取相应的声时、波幅和频率值。当 T、R 换能器的连线通过裂缝时,由于混凝土失去了连续性,超声波在裂缝界面上产生很大衰减,接收到的首波信号很微弱,其波幅和频率与不过缝的测点值比较有很大差异。据此便可判断裂缝的深度及是否在水平方向贯通。斜测法检测裂缝深度具有直观、可靠的特点,若条件许可宜优先选用。

三、混凝土深裂缝检测

所谓深裂缝,系指混凝土结构物表面开裂深度在 500mm 以上的裂缝。对于水坝、桥墩、大型设备基础等大体积混凝土结构,在浇筑混凝土过程中,由于水泥的水化热散失较慢,混凝土的内部温度比表面高,使结构断面形成较大的温差,当由此产生的拉应力大于混凝土抗拉强度时,便在混凝土中产生裂缝。

1. 测试方法

深裂缝的检测一般是在裂缝两侧钻测试孔,用径向振动式换能器置于测试孔中进行测试。如图 5-13 所示,在裂缝两侧分别钻测试孔 A、B。应在裂缝一侧多钻一个较浅的孔 C,测试无缝混凝土的声学参数,供对比判别之用。测试孔应满足下列要求:孔径应比换能器直径大 5~10mm;孔深应至少比裂缝预计深度深 700mm,经测试如浅于裂缝深度,则应加深测试孔;对应的两个测试孔,必须始终位于裂缝两侧,其轴线应保持平行;两个对应测试孔的间距宜为 2m,同一结构的各对应测孔间距应相同;孔中粉末屑应清理干净。

检测时应选用频率为 20~40kHz 的径向振动式换能器,并在其接线上做出等距离标志(一般间隔 100~500mm)。测试前要先向测试孔中注满清水作为耦合剂,然后将 T、R 换能器分别置于裂缝两侧的对应对应孔中,以相同高程等间距从上至下同步移动,逐点读取声时、波幅和换能器所处的深度。

2. 裂缝深度判定

以换能器所处深度 d 与对应的波幅值 A 绘制 $d-A$ 坐标图(图 5-14),随着换能器位置的下移,波幅逐渐增大,当换能器下移至某一位置后,波幅达到最大并基本稳定,该位置所对应的深度便是裂缝深度 d_c 。

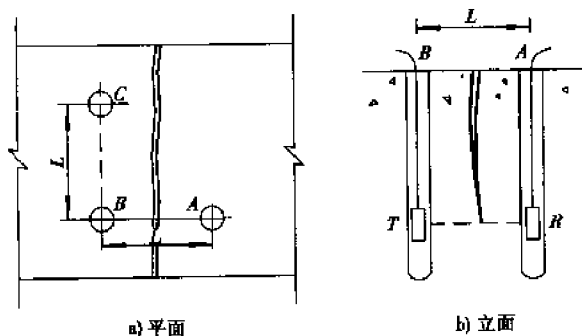


图 5-13 测试孔测裂缝深度

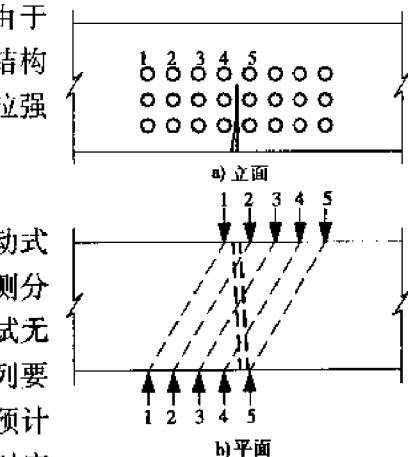


图 5-12 斜测裂缝深度示意图

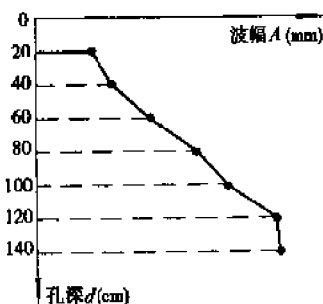


图 5-14 $d-A$ 坐标图

四、混凝土不密实区和空洞检测

混凝土和钢筋混凝土结构物在施工过程中,有时因漏振、漏浆或因石子架空在钢筋骨架上,导致混凝土内部形成蜂窝状不密实区或空洞。这种结构物内部的隐蔽缺陷,应及时检查出并进行技术处理。

1. 测试方法

混凝土内部的隐藏缺陷情况,无法凭直觉判断,因此这类缺陷的测试区域,一般总要大于所怀疑的有缺陷的区域,或者首先作大范围的粗测,根据粗测情况再着重对可疑区域进行细测。根据被测结构实际情况,可按下列方法布置换能器进行检测。

(1)平面对测

当结构被测部位具有两对平行表面时,可采用对测法。如图 5-15 所示,在测区的两对相互平行的测试面上,分别画出间距为 200 ~ 300mm 的网格,并编号确定对应的测点位置,然后将 T、R 换能器分别置于对应测点上,逐点读取相应的声时(t_i)、波幅(A_i)和频率(f_i),并量取测试距离(l_i)。

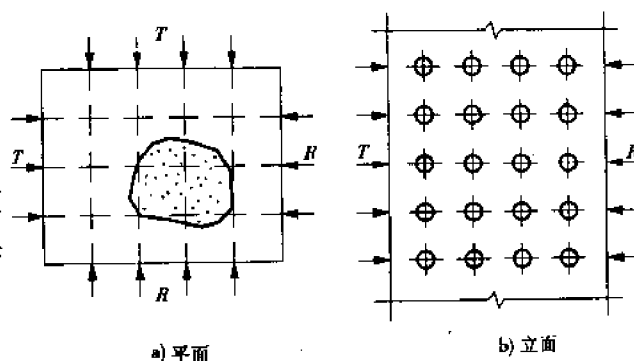


图 5-15 对测法换能器布置示意图

(2)平面斜测

结构中只有一对相互平行的测试面或被测部位处于结构的特殊位置,可采用斜测法进行检测。测点布置如图 5-16 所示。

(3)测试孔检测法

当结构的测试距离较大时,为了提高测试灵敏度,可在测区适当位置钻一个或多个平行于侧面的测试孔。测孔的直径一般为 45 ~ 50mm,测孔深度视检测需要而定。结构侧面采用厚度振动式换能器,一般用黄油耦合,测

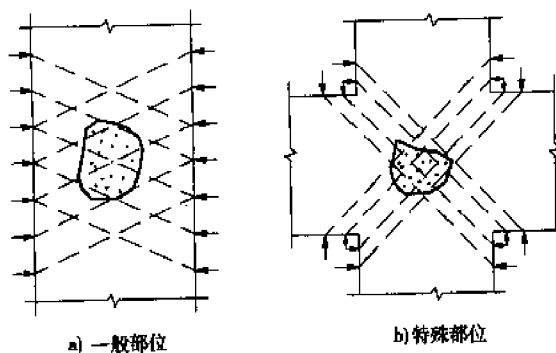


图 5-16 斜测法换能器布置示意图

孔中用径向振动式换能器,用清水作耦合剂。换能器布置如图 5-17 所示。检测时根据需要,可以将孔中和侧面的换能器置于同一高度,也可将二者保持一定的高度差,同步上下移动,逐点读取声时、波幅和频率值,并记下孔中换能器的位置。

2. 不密实区和空洞的判定

由于混凝土本身的不均匀性,即使是没有缺陷的混凝土,测得的声时、波幅等参数值也在一定范围内波动。因此,不可能有一个固定的临界指标作为判断缺陷的标准,一般都利用统计方法进行判别。一个测区的混凝土如果不存在空洞、蜂窝区或其它缺陷,则可认为这个测区的混凝土质量基本符合正态分布,虽因混凝土质量的不均匀性,使声学参数测量值产生一定离散,但一般服从统计规律。若混凝土内部存在缺陷,则这部分混凝土与周围的正常混凝土不属于同一母体,其声学参数必然存在明显差异。

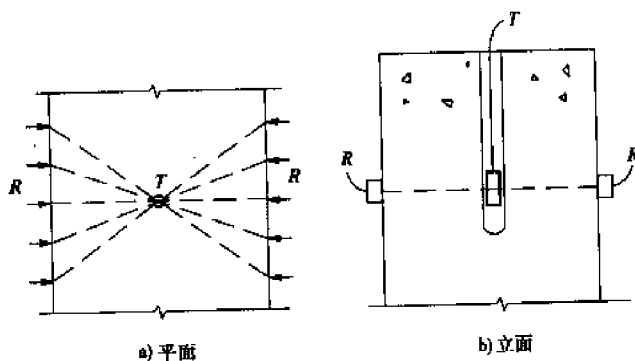


图 5-17 测试孔检测法换能器布置示意图

(1)混凝土声学参数的统计计算

测区混凝土声时(或声速)、波幅、频率测量值的平均值(m_x)和标准差(S_x)应按下式计算:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5-29)$$

$$S_x = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n X_i^2 - nm_x^2 \right) / (n-1)} \quad (5-30)$$

式中: X_i ——第 i 点的声时(或声速)、波幅、频率的测量值;

n ——一个测区参与统计的测点数。

(2) 测区中异常数据的判别

将一测区中各测点的声时值由小到大按顺序排列, 即 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n \leq t_{n+1} \dots$, 将排在后面明显大的数据视为可疑, 再将这些可疑数据中最小的一个(假定为 t_n)连同其前面的数据按式(5-29)、式(5-30)计算出 m_t 及 S_t 并代入式(5-31), 算出异常情况的判断值(X_0)

$$X_0 = m_t + \lambda_1 S_t \quad (5-31)$$

式中: λ_1 ——异常值判定系数, 应按表 5-7 取值。

统计数的个数 n 与对应的 λ_1 值

表 5-7

n	14	16	18	20	22	24	26	28	30
λ_1	1.47	1.53	1.59	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83
n	32	34	36	38	40	42	44	46	48
λ_1	1.86	1.89	1.92	1.94	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04
n	50	52	54	56	58	60	62	64	66
λ_1	2.05	2.07	2.09	2.10	2.12	2.13	2.14	2.16	2.17
n	68	70	72	74	76	78	80	82	84
λ_1	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26
n	86	88	90	92	94	96	98	100	102
λ_1	2.27	2.28	2.29	2.30	2.30	2.31	2.32	2.32	2.33

把 X_0 值与可疑数据中的最小值(t_n)相比较, 若 t_n 大于或等于 X_0 , 则 t_n 及排在其后的声时值均为异常值; 当 t_n 小于 X_0 时, 应再将 t_{n+1} 放进去重新进行统计计算和判别。

同样, 将一测区测点的波幅、频率或由声时计算的声速值按由大到小的顺序排列, 即 $X_1 \geq X_2 \geq \dots \geq X_n \geq X_{n+1} \geq \dots$, 将排在后面明显小的数据视为可疑, 再将这些可疑数据中最大的一个(假定为 X_n)连同其前面的数据按式(5-29)、式(5-30)计算出 m_t 及 S_t 并代入式(5-32), 算出异常情况的判断值(X_0)。

$$X_0 = m_x - \lambda_1 S_t \quad (5-32)$$

把判断值(X_0)与可疑数据中的最大值(X_n)相比较, 若 x_n 小于或等于 X_0 , 则 x_n 及排在其后的各数据均为异常值; 当 X_n 大于 X_0 , 应再将 X_{n+1} 放进去重新进行统计计算和判别。

(3) 不密实区和空洞范围的判定

一个构件或一个测区中, 某些测点的声时(或声速)、波幅或频率被判为异常值, 可结合异常测点的分布及波形状况, 判定混凝土内部存在不密实区和空洞的范围。当判定缺陷是空洞时, 其尺寸可按下面的方法估算。

如图 5-18 所示, 设检测距离为 l , 空洞中心(在另一对测试面上, 声时最长的测点位置)距一个测试面的垂直距离为 l_h , 声波在空洞附近无缺陷混凝土中传播的时间平均值为 m_{1a} , 绕空洞传播的时间(空洞处的最大声时)为 t_h , 空洞半径为 r 。

根据 l_h/l 值和 $(t_h - m_{ta})/m_{ta} \times 100\%$ 值,可由表 5-8 查得空洞半径 r 与测距 l 的比值,再计算空洞的大致尺寸 r 。

如被测部位只有一对可供测试表面,空洞尺寸可用下式计算

$$r = \frac{l}{2} \sqrt{\left(\frac{t_h}{m_{ta}}\right)^2 - 1} \quad (5-33)$$

式中: r ——空洞半径(mm);

l ——T、R 换能器之间的距离(mm);

t_h ——缺陷处的最大声时值(μs);

m_{ta} ——无缺陷区的平均声时值(μs)。

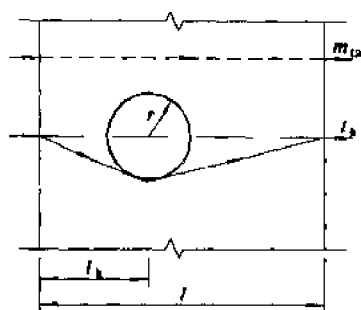


图 5-18 空洞尺寸估算原理示意图

空洞半径 r 与测区 l 的比值

表 5-8

$\begin{matrix} z \\ x \\ y \end{matrix}$	0.05	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
0.10(0.9)	1.42	3.77	6.26										
0.15(0.85)	1.00	2.56	4.06	5.96	8.39								
0.2(0.8)	0.78	2.02	3.17	4.62	6.36	8.44	10.9	13.9					
0.25(0.75)	0.67	1.72	2.69	3.90	5.34	7.03	8.98	11.2	13.8	16.8			
0.3(0.7)	0.60	1.53	2.40	3.46	4.73	6.21	7.91	9.38	12.0	14.4	17.1	20.1	23.6
0.35(0.65)	0.55	1.41	2.21	3.19	4.35	5.70	7.25	9.00	10.9	13.1	15.5	18.1	21.0
0.4(0.6)	0.52	1.34	2.09	3.02	4.12	5.39	6.84	10.3	12.3	14.5	16.9	19.6	19.8
0.45(0.55)	0.50	1.30	2.03	2.92	3.99	5.22	6.62	8.20	9.95	11.9	14.0	16.3	18.8
0.5	0.50	1.28	2.00	2.89	3.94	5.16	6.55	8.11	9.84	11.8	13.8	16.1	18.6

注:表中 $x = (t_h - t_m)/t_m \times 100\%$; $y = l_h/l$; $z = r/l$ 。

五、两次浇筑的混凝土结合面质量检测

对于一些重要的混凝土和钢筋混凝土结构物,为保证其整体性,应该连续不间断地一次浇筑完混凝土。但有时因施工工艺的需要或意外因素,在混凝土浇筑的中途停顿的间歇时间超过 3h 后再继续浇筑;还有已有的混凝土结构物因某些原因需加固补强,进行第二次混凝土浇筑等。在同一构件上,两次浇筑的混凝土之间,应保持良好的结合,使其形成一个整体,方能确保结构的安全使用。因此,一些结构构件新旧混凝土结合面质量的检测就非常必要,超声波检测技术的应用为其提供了有效途径。

1. 检测方法

超声波检测两次浇筑的混凝土结合面质量一般采用斜测法,通过穿过与不穿过结合面的超声波声速、波幅和频率等声学参数相比较进行判断。超声测点的布置方法如图 5-19 所示。

布置测点时应注意以下几点:

- (1)测试前应查明结合面的位置及走向,以正确确定被测部位及布置测点;
- (2)所布置的测点应避开平行超声波传播方向的主钢筋或预埋钢板;
- (3)使测试范围覆盖全部结合面或有怀疑的部位;

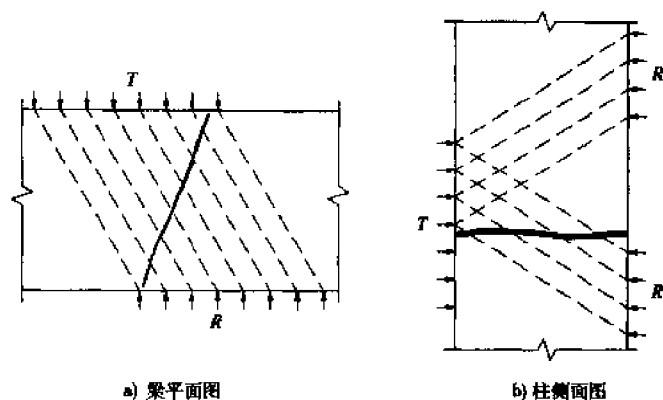


图 5-19 检测混凝土结合面时换能器布置示意图

- (4) 为保证各测点具有一定的可比性,每一对测点应保持其测线的倾斜度一致,测距相等;
- (5) 测点间距应根据被测结构尺寸和结合面外观质量情况而定,一般为 100 ~ 300mm,间距过大易造成缺陷漏检的危险。

2. 数据处理及判定

两次浇筑的混凝土结合面质量的判定与混凝土不密实区和空洞的判定方法基本相同。把超声波跨缝与不跨缝的声时(或声速)、波幅或频率的测量值放在一起,分别进行排列统计。当混凝土结合面中有局部地方存在缺陷时,该部位的混凝土失去连续性,超声脉冲波通过时,其波幅和频率会明显降低,声时也有不同程度增大。因此,凡被判为异常值的测点,查明无其它原因影响时,可以判定这些部位结合面质量不良。

六、混凝土表面损伤层检测

混凝土和钢筋混凝土结构物,在施工和使用过程中,其表面层会在物理和化学因素的作用下受到损害,如火灾、冻害和化学侵蚀等。从工程实测结果来看,一般总是最外层损伤程度较为严重,越向内部深入,损伤程度越轻。在这种情况下,混凝土强度和超声声速的分布应该是连续的,如图 5-20 所示。但为了计算方便,在进行混凝土表面损伤层厚度的超声波检测时,把损伤层与未损伤部分简单地分为两层来考虑,计算模型如图 5-21 所示。

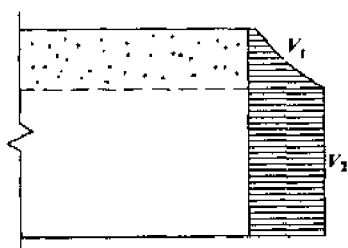


图 5-20 实际混凝土声速分布

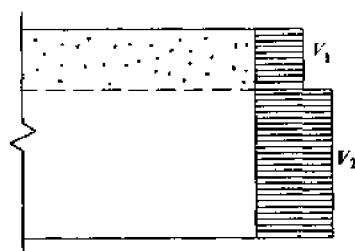


图 5-21 假设混凝土声速分布

1. 测试方法

超声脉冲法检测混凝土表面损伤层厚度宜选用频率较低的厚度振动式换能器,采用平测法检测,如图 5-22 所示。将发射换能器 T 置于测试面某一点保持不动,再将接收换能器 R 以测距 $l_i = 100, 150, 200\text{mm} \dots$, 依次置于各点,读取相应的声时值 t_i 。R 换能器每次移动的距离不宜大于 100mm,每一测区的测点数不得少于 5 个。

检测时测区测点的布置应满足以下要求：

- (1) 根据结构的损伤情况和外观质量选取有代表性的部位布置测区；
- (2) 结构被测表面应平整并处于自然干燥状态,且无接缝和饰面层；
- (3) 测点布置时应避免 T、R 换能器的连线方向与附近主钢筋的轴线平行。

2. 损伤层厚度判定

以各测点的声时值 t_i 和相应测距值 l_i 绘制“时-距”坐标图,如图 5-23 所示。两条直线的交点 B 所对应的测距定为 l_0 ,直线 AB 的斜率便是损伤层混凝土的声速 v_1 ,直线 BC 的斜率便是未损伤层混凝土的声速 v_2 ,则

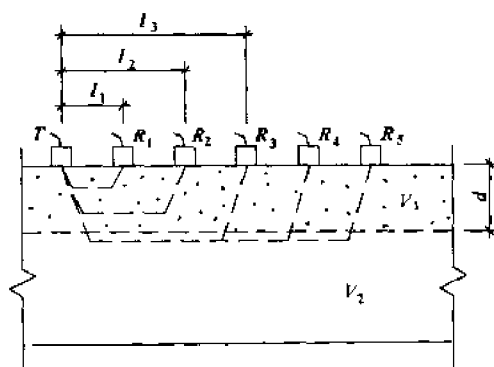


图 5-22 混凝土损伤层检测测点布置

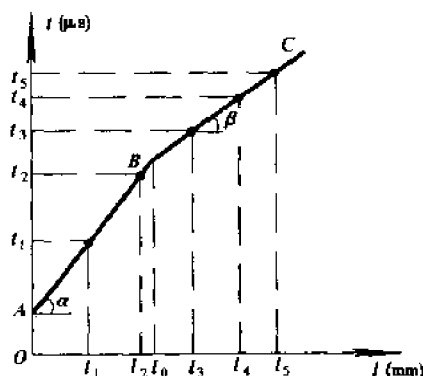


图 5-23 混凝土损伤层检测“时-距”图

$$v_1 = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} \quad (5-34)$$

$$v_2 = \operatorname{ctg} \beta = \frac{l_3 - l_2}{t_3 - t_2} \quad (5-35)$$

损伤层厚度可按下式计算

$$d = \frac{l_0}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \quad (5-36)$$

式中: d ——损伤层厚度(mm);

l_0 ——声速产生突变时的测距(mm);

v_1 ——损伤层混凝土的声速(km/s);

v_2 ——未损伤层混凝土的声速(km/s)。

七、混凝土匀质性检测

所谓混凝土匀质性检测,是对整个结构物或同一批构件的混凝土质量均匀性的检测。混凝土匀质性检测的传统方法是,在结构物浇筑混凝土现场取样制作混凝土标准试块,以其破坏强度的统计值来评价混凝土的匀质性。应该指出:这种方法存在一些局限性,例如,试块的数量有限;因结构的几何尺寸、成型方法等不同,结构物混凝土的密实程度与标准试块会存在较大差异,可以说标准试块的强度很难全面反映结构混凝土质量均匀性。为克服这些缺点,通常采用超声脉冲法检测混凝土的匀质性。超声脉冲法直接在结构上进行检测,具有全面、直接、方便、数据代表性强的优点,是检测混凝土匀质性的一种有效的方法。

1. 测试方法

一般采用厚度振动式换能器进行穿透对测法检测结构混凝土的匀质性。要求被测结构应具备一对相互平行的测试表面,并保持平整、干净。先在两个测试面上分别画出等间距的网格,并编上对应的测点序号。网格的间距大小取决于结构的种类和测试要求,一般为 200 ~ 500mm。对于测距较小,质量要求较高的结构,测点间距宜小些。测点布置时,应避免与超声波传播方向相一致的钢筋。

测试时,应使 T、R 换能器在对应的测点上保持良好耦合状态,逐点读取声时值 t_i 并测量对应测点的距离 l_i 值。

2. 计算和分析

混凝土的声速值、混凝土声速的平均值、标准差及离差系数分别按下列公式计算:

$$v_i = \frac{l_i}{t_i} \quad (5-37)$$

$$m_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (5-38)$$

$$S_v = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n v_i^2 - n \cdot m_v^2 \right) / (n - 1)} \quad (5-39)$$

$$C_v = \frac{S_v}{m_v} \quad (5-40)$$

式中: v_i ——第 i 点混凝土声值(km/s);

l_i ——超声检测距离(mm);

t_i ——第 i 点声时值(μ s);

m_v ——混凝土声速平均值(km/s);

S_v ——混凝土声速的标准差(km/s);

C_v ——混凝土声速的离差系数;

n ——测点数。

根据声速的标准差和离差系数(变异系数),可以相对比较相同测距的同类结构或各部位混凝土质量均匀性的优劣。

第六节 混凝土钻孔灌注桩完整性检测

一、概述

混凝土钻孔灌注桩是高层建筑、桥梁等工程结构常用的桩基形式之一。桩基属于地下隐蔽工程,施工技术比较复杂,工艺流程相互衔接紧密,施工时需灌注大量水下混凝土,稍有不慎极易出现缩颈、夹泥、断桩等多种形态复杂的质量缺陷,影响桩身的完整性和桩的承载能力,从而直接影响上部结构的安全。据统计国内外钻孔灌注桩的事故率高达 5% ~ 10%。因此,对钻孔灌注桩质量无损检测,具有特别重要的意义。

灌注桩的成桩质量通常应包含两方面内容,一是桩基的承载能力;二是桩身的完整性,桩基的承载能力检验有两种方法,一为静载试验,它具有直接、可靠等优点,但也存在试验费用高、试验过程长等不足;一为高应变检测法(又名大应变法),即根据土动力学和波动理论来推断桩基的承载能力,它具有试验简单、快速、费用低等优点,但可靠性稍差。桩身的完整性检测

是通过现场动力试验来判断桩身质量、内部缺陷的一种测试方法,常见的内部缺陷有夹泥、断裂、缩颈、混凝土离析及桩顶混凝土密实性较差等。桩身的完整性检测主要采用低应变检测法(又名小应变法),它具有速度快、设备轻便、费用低等优点,目前在国内外已得到广泛的应用。按其所依据的检测原理,常用的方法有反射波法、超声波透射法和机械阻抗法等。目前应用最为广泛的是反射波法。本节将分别介绍这三种方法。

二、反射波法

1. 基本原理

反射波法源于应力波理论,基本原理是在桩顶进行竖向激振,弹性波沿着桩身向下传播,在桩身存在明显波阻抗界面(如桩底、断桩或严重离析等部位)或桩身截面积变化(如缩径或扩径)部位,将产生反射波(如图 5-24 所示)。经接收、放大滤波和数据

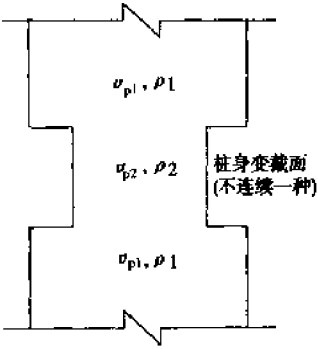


图 5-24 桩身不连续示例

处理,可识别来自桩身不同部位的反射信息,据此判断桩身的完整性。

通常,桩被假定为一维弹性杆件,由压缩波传播理论可推得不连续面两侧的波阻抗比为

$$\alpha = \frac{v_{p2} A_2 E_2}{v_{p1} A_1 E_1} = \frac{v_{p2} m_2}{v_{p1} m_1} = \frac{v_{p2} \rho_2}{v_{p1} \rho_1} \tag{5-41}$$

- 式中: v_{p1} 、 v_{p2} ——分别为不连续面上、下段的弹性波波速;
 ρ_1 、 ρ_2 ——分别为不连续面上、下段的质量密度;
 A_1 、 A_2 ——分别为不连续面上、下段的杆件截面积;
 E_1 、 E_2 ——分别为不连续面上、下段的弹性模量;
 m_1 、 m_2 ——分别为不连续面上、下段的质量。

因此, $v_{p1} \cdot \rho_1$ 及 $v_{p2} \cdot \rho_2$ 为上、下段的阻抗。当 $\alpha = 1$ 时,弹性杆连续,无突变。然后,截面 A 变化(缩、扩颈),或者质量密度 ρ 变化(孔隙、夹泥等),或者弹性波传播速度 v_p 变化(疏松与硬化),都会使 α 不为 1,形成不连续面,产生反射。因此, α 的变化可归纳成表 5-9。

波阻抗比 α 变化情况表		表 5-9
α	反射波与入射波的相位	杆的状态
0	同相	杆端为自由端
∞	反相	杆端为固定端
>1	反相	$A_2 E_2 / A_1 E_1 > 1$, 扩颈
<1	同相	$A_2 E_2 / A_1 E_1 < 1$, 缩颈

其次,由弹性杆件振动理论,可以得到式(5-42)及式(5-43)

$$2f_n L = v_p \quad (\text{两端自由}) \tag{5-42}$$

$$4f_n L = v_p \quad (\text{一端固定}) \tag{5-43}$$

- 式中: L ——桩长;
 f_n ——桩的固有频率。

当桩的持力层是土层时,可视作二端自由的弹性杆件,只有当桩与新鲜基岩(或微风化)良

好固结时,才可视作一端固定。

2. 测试设备

反射波检测系统主要由传感器、信号采集及处理器构成测桩仪器设备,弹性波激发设备由各类力锤组成,传感器可选用宽频带的速度型或加速度型传感器。如图 5-25 所示。

3. 现场布置与测试

(1)对于灌注桩,混凝土应达到养护龄期,测试时须将上部的浮浆及松散碎屑清理干净。

(2)桩头不平整时,应予整平,其面积至少应可放置一个传感器。

(3)检测前应对仪器设备进行检查,性能正常方可使用。

(4)激振点宜选择在桩头中心部位。传感器与桩头应采用石膏、橡皮泥或电磁铁紧密连接,避免用手在桩头上按压传感器,导致各种干扰。对于大直径的桩可设置两个或两个以上的传感器。

(5)根据桩位图及预定的百分比确定被测桩号及位置,并加以标识。检测混凝土灌注桩桩身完整性时,抽测数不得少于该批桩总数的 20%,且不少于 10 根;对混凝土预制桩,抽测数不小于 10%,且不少于 5 根。抽测不合格数超过抽测数的 30%时,应加倍抽测。被测桩的确定可按随机方法,或参考施工记录,抽测有疑问的桩;或按桩的作用抽取,如角桩、边桩等;也可几种方法结合起来确定。

(6)每一根被检测的桩均应进行两次以上重复测试,重复测试的波形应与原波形具有相似性。出现异常波形应在现场研究,排除影响测试的不良因素后再复测。每根桩检测的波形记录不少于 3 条,以备分析。

4. 检测资料的分析整理

(1)分析资料前,必须收集到下列资料:工程地质勘察报告、桩的设计资料、非正常桩的施工记录、桩身混凝土标号检测报告、压桩试验报告等。

(2)按式(5-42)即可得:

$$\frac{2L}{t_r} = v_p \quad (5-44)$$

式中: t_r ——桩的固有周期,也即桩底反射波到达时间(s);

L ——桩身全长(m);

v_p ——桩身混凝土波速。

如反射波由不连续面(缺陷)反射时,则式(5-44)可转换成:

$$L' = \frac{1}{2} v_{pm} t'_r \quad (5-45)$$

式中: L' ——缺陷的深度(m);

t'_r ——缺陷反射波到达时间(s);

v_{pm} ——同一工地内多根合格桩桩身的平均值。

由式(5-44),根据相应的混凝土波速 v_p ,即可得到桩底反射波到达时间。混凝土标号越高, v_p 越大。由于混凝土的骨料、水泥类型不同,相同标号的混凝土波速 v_p 有一定离散性。因此,波速与标号之间只是参考关系。常用混凝土波速的参考数据如表 5-10 所列。

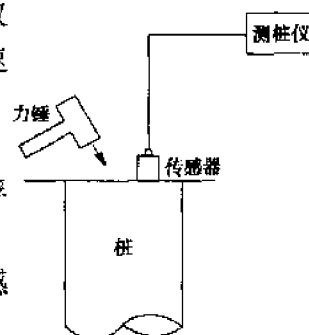


图 5-25 反射波法测桩系统示意图

混凝土标号与压缩波波速近似关系

表 5-10

混凝土标号	40	35	30	25	20
v_p (m/s)	> 4200	> 4000	3800	3200	2600

(3)如波形中有桩底反射波出现,说明该桩未断;如桩底反射波之前无其它反射波出现,说明该桩为完整桩。

(4)如在桩底反射波之前,尚有其他反射波出现,说明桩身存在不连续面。该反射波出现越早,说明不连续面越近桩头。其深度可由式(5-45)求得。每一个反射反映一个不连续面。如几个反射波的时间间隔相等,即为一个面的多次反射。

(5)对不连续面必须加以鉴别。如反射波与激发波同相位,即为缺陷(如缩颈、空洞等);如反向,则为扩颈。判断是否缺陷应结合工程地质资料及施工记录综合分析。

(6)如反射波出现较早,又无桩底反射,则断桩的几率极高。为避免误判,可横向激振,如出现低频振动,即为断桩。

(7)对于钻孔灌注桩,考虑到桩身与承台连接,桩头常有钢筋露出,这对实测波形有一定影响,严重时会影响反射信息的识别。这是因为在桩头激振时,钢筋所产生的回声极易被检波器接收,之后又与反射信息叠加在一起。克服这一因素影响的方法是,将检波器用细砂或粒土屏蔽起来,使检波器收不到声波信息。

三、超声透射法

钻孔灌注桩超声脉冲检测法的基本原理与超声测缺和测强技术基本相同。但由于桩深埋土内,而检测只能在地面进行,因此又有其特殊性。

1. 检测方式

为了使超声波能横穿各不同深度的横截面,必须使超声换能器伸入桩体内部。为此,需事先预埋声测管,作为换能器进入桩内的通道。根据声测管埋置的不同情况,可以有如下三种检测方法(图 5-26)。

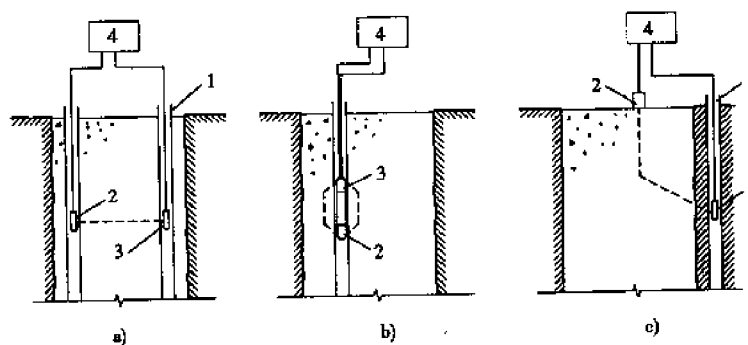


图 5-26 钻孔灌注桩超声波检测方式

a)双孔检测;b)单孔检测;c)桩外孔检测

1-声测管;2-发射换能器;3-接收换能器;4-超声检测仪

(1)双孔检测

在桩内预埋两根以上管道,把发射换能器和接收换能器分别置于两根管道中。检测时超声脉冲波穿过两管道之间的混凝土,实际检测范围即为超声波从发射到接收换能器所扫过的区域。为了尽可能扩大在桩横截面上的有效检测控制面积,必须使声测管的布置合理。双孔检测时根据两换能器高程的变化,又可分为平测、斜测、扇形扫测等方式。

(2)单孔检测

在某些特殊情况下,只有一个孔道可供检测使用,这时可采用单孔测量方式。两换能器放置在一个孔中,其间用隔声材料隔离。这时超声波从水中和混凝土中分别绕射到接收换能器,接收信号为从水及混凝土等不同声通路传播而来的信号的叠加,分析这一叠加信号即可获得孔道周围混凝土质量的信息。

运用这一检测方式时,必须运用信号分析技术,排除管中的影响干扰。当孔道内有钢制套管时,不能采用这种方法检测。

(3) 桩外孔检测

当桩的上部结构已施工,或桩内未预埋管道时,可在桩外的土基中钻一孔作为检测通道。检测时在桩顶放置一较强功率的低频平探头,向下沿桩身发射超声脉冲波,接收换能器由桩外孔中慢慢放下。超声脉冲沿桩身混凝土并穿过桩与测孔之间的土进入接收换能器,逐点测出声时波幅等参数,作为判断依据。这种方式的可测深度受仪器发射功率的限制,一般只能测到10m左右。

以上三种方式中,双孔检测是桩基超声脉冲检测的基本形式。其它两种方式在检测和结果分析上都比较困难,只能作为特殊情况下的补救措施。

2. 主要设备

目前常用的检测装置有两种。一种是用一般超声检测仪和发射及接收换能器所组成。换能器在声测管内的移动由人工操作,数据读出后再输入计算机处理。这套装置与一般检测装置通用,但检测速度慢、效率较低。

另一种是全自动智能化测桩专用检测装置(图5-27)。它由超声发射及接收装置、换能器自动升降装置、测量控制装置、数据处理计算机系统等四大部分所组成。数据处理计算机系统是测控装置的主控部件,具有人机对话、发布各类指令、进行数据处理等功能。它通过总线接口与测量控制装置联系,发出测量的控制命令,以及进行信息交换;升降机构根据指令通过步进电机进行上升、下降及定位等操作,移动换能器至各测点;超声发射和接收装置发射并接收超声波,取得测量数据,传送到数据处理计算机,进行数据处理、存储、显示和打印。由于测试系统由计算机控制,测量过程无需人工干预,因此可自动、迅速地全桩测量工作。

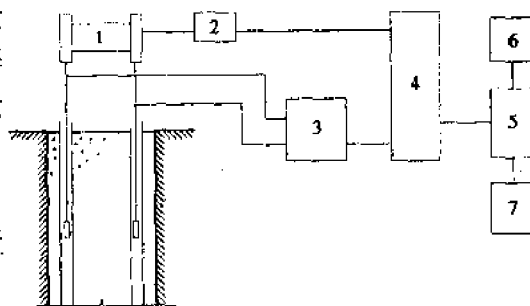


图 5-27 全自动智能化测桩专用检测装置原理框图

1-换能器升降机构;2-步进电机驱动电源;3-超声发射与接收装置;4-测控接口;5-计算机;6-磁带机;7-打印机

在桩基超声脉冲检测中,换能器在声测管内用清水耦合,因此应采用水密式的径向发射和接收换能器。常用的换能器有圆管式或增压式的水密型换能器,其共振频率为25~50kHz。

3. 超声波检测管的预埋

检测管是桩基超声检测的重要组成部分,它的埋置方式及在横截面上的布置形式,将影响检测结果。检测管材质的选择,以透声率最大及便于安装、费用低廉为原则。一般可采用钢管、塑料管和波纹管等,其内径宜为50~60mm。

检测管的埋置数量和横截面上的布局涉及检测的控制面积。通常有如图5-28所示的布置方式,图中阴影区为检测的控制面积。一般桩径小于1m时沿直径布置两根;桩径为1~2.5m布置三根,呈等边三角形分布;桩径大于2.5m时布置四根,呈正方形分布。

超声波检测管可焊接或绑扎在钢筋笼的内侧,检测管之间应基本上保持平行,不平行度控

制在 1‰以下。检测管底部应封闭,其接头和底部封口都不应漏浆,接口内壁应保持平整,不应有焊渣等凸出物,以免妨碍换能器移动。

4. 检测数据分析与判断

根据所测得的声学参数判断桩基缺陷是超声脉冲检测法的关键。目前常用的方法有两大类,一类为数值判据法,如概率法、PSD 判据法、多因素概率分析法等,根据测试值经适当的数学处理后,找出一个存在缺陷的临界值作为判断的依据。这种方法能对大量测试数据做出明确的分析和判断,若利用计算机进行,判断会十分迅速,通常用于全面扫测时缺陷有无的判断。另一类为声场阴影区重叠法,即从不同的方向测出缺陷背面所形成的声阴影区,这些声阴影的重叠区即为缺陷的所在位置。这类方法通常用于数值判据法确定缺陷位置后的细测判断,以便详细划定缺陷的区域和性质。下面仅介绍应用较方便的 PSD 判据法,其它方法可参考有关文献。

(1) 判据的形式

鉴于钻孔灌注桩的施工特点,混凝土的均匀性往往较差,超声声时值较为离散。同时,声测管不可能完全保持平行,有时由于钢筋笼扭曲,声测管位移较大,因而导致声时值的偏离。为了消除这些非缺陷因素的影响可能造成的误判,在实际测试中常采用“声时深度曲线相邻两点间的斜率和差值的乘积”作为判断依据,简称 PSD 判据。

设测点的深度为 H ,相应的声时为 t ,则声时随深度变化规律可用 $t-H$ 曲线表示,设其函数式为:

$$t = f(H) \quad (5-46)$$

当桩内存在缺陷时,在缺陷与完好混凝土界面处超声传播介质的性质产生突变,声时值也相应突变,函数不连续,故该函数的不连续点即为缺陷界面的位置。但在实际检测中总是每隔一定距离检测一点,即深度增量(即测点间距) ΔH 不可能趋向于零,而且由于缺陷表面凹凸不平以及孔洞等缺陷是由于波线曲折而引起声时变化的,所以实测 $t-H$ 曲线在缺陷界面处只表现为斜率的变化。该斜率可用相邻测点的声时差值与测点间距离之比求得,即

$$S_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{H_i - H_{i-1}} \quad (5-47)$$

式中: S_i ——第 $i-1$ 测点与第 i 测点之间 $t-H$ 曲线的斜率;

t_i, t_{i-1} ——相邻两测点的声时值;

H_i, H_{i-1} ——相邻两点的深度(或高程)。

通常,斜率仅能反映测点之间声时值变化的速率。当检测过程中测点间距不同时,虽所求得的斜率可能相同,但所对应的声时差值是不同的,而声时差值是与缺陷大小有关的参数。换言之,斜率只能反映该点缺陷的有无,为了使判据进一步反映缺陷的大小,就必须加大声时差值在判据中的权数。因此判据可写成:

$$K_i = S_i(t_i - t_{i-1}) = \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{H_i - H_{i-1}} \quad (5-48)$$

式中, K_i 即为 i 点的 PSD 判据值,其余各项同前。

显然,当 i 点处相邻两点的声时值没有变化或变化很小时, K_i 等于或接近于零;当声时值

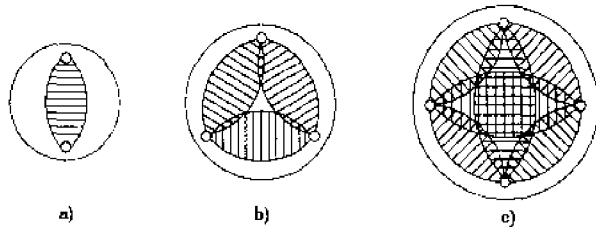


图 5-28 检测管的布置方式

a) 桩径小于 1m; b) 桩径为 1~2.5m; c) 桩径大于 2.5m

有明显变化或突变时, K_i 与 $(t_i, t_{i-1})^2$ 成正比, 因此 K_i 将大幅度变化。

实测表明, PSD 判据对缺陷十分敏感, 而对于因声测管不平行或混凝土不均匀等非缺陷因素引起的声时变化则不敏感, 因为这二者都是渐变过程, 相邻两测点间的声时差值都很小。因此, 运用 PSD 判据可基本上消除声测管不平行或混凝土不均匀等非缺陷因素所造成的影响。

为了对全桩各测点进行判别, 首先应将各测点的 K_i 值求出, 并绘制“ K_i-H ”曲线进行分析, 凡是在 K_i 值较大的地方, 均可列为缺陷可疑点, 作进一步的细测。

(2) 临界判据值及缺陷大小与 PSD 判据的关系

PSD 临界判据值实际上反映了测点间距、声波穿透距离、介质性质、测量的声时值等参数之间的综合关系, 该关系随缺陷的性质不同而不同, 现分别介绍如下:

① 假定缺陷为夹层

如图 5-29 所示, 设混凝土的声速为 V_1 , 夹层中夹杂物的声速为 V_2 , 声程为 L (两声测管的中心距离), 测点间距为 $\Delta H (= H_i - H_{i-1})$ 。若测量结果在完好混凝土中的声时值为 t_{i-1} , 夹层中的声时值为 t_i , 即可推导出遇有声速为 V_2 的夹杂物时, 夹层断桩的临界判据值 K_c 。

$$\begin{aligned} \text{因} \quad t_{i-1} &= L/V_1, t_i = L/V_2 \\ \text{则} \quad K_c &= \frac{(t_i - t_{i-1})}{H_i - H_{i-1}} = \frac{L^2(V_1 - V_2)^2}{V_1^2 V_2^2 \Delta H} \end{aligned} \quad (5-49)$$

若某点 i 的 PSD 判据 K_i 大于该点的临界判据值 K_c , 则该点可判为夹层或断桩。

实际测试时, 一般 V_1 可取所测桩身混凝土声速的平均值, V_2 则应根据预估夹杂物取样实测。例如, 某桩混凝土平均声速 $V_1 = 3700\text{m/s}$, 两管间距 $L = 0.5\text{m}$, 根据地质条件及施工记录分析, 该桩可能形成夹层的夹杂物为砂、砾石的混合物, 取样实测 $V_2 = 3210\text{m/s}$, 测点间距采用 $\Delta H = 0.5\text{m}$, 由式(5-39)可求得该桩产生砂砾夹层的临界判据值 $K_c = 851.037$ (将声时值单位化为 $\text{m}/\mu\text{s}$)。因此, 当检测结果中, 若某点的判据值 K_i 大于 K_c , 则该点可判为砂砾夹层。

② 假定缺陷为空洞

当桩内缺陷是半径为 R 的空洞时, 声波将绕过空洞或折线传播, 如图 5-30 所示。以 t_{i-1} 代表超声波在完好混凝土中直线传播时的声时值, t_i 代表声波遇到空洞或成折线传播时

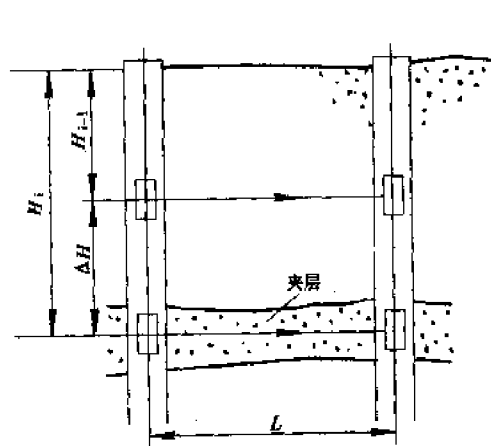


图 5-29 桩内有夹层

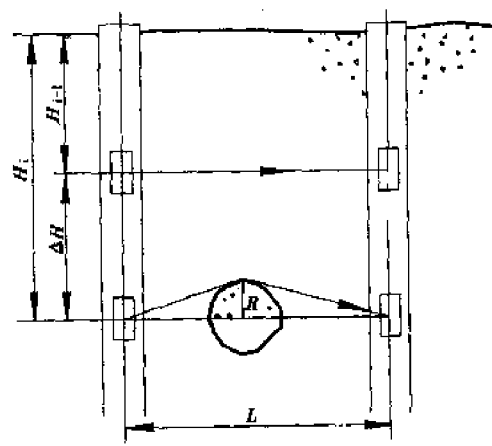


图 5-30 桩内有空洞

的声时值, 则可导得判据值 K_i 与空洞半径 R 之间的关系式:

$$\text{因} \quad t_{i-1} = L/V_1, t_i = \frac{2\sqrt{R^2 + (L/2)^2}}{V_1},$$

$$K_i = \frac{4R^2 + 2L^2 - 2L\sqrt{4R^2 + L^2}}{\Delta H V_1^2} \quad (5-50)$$

应用时,将实测 K_i 代入上式,即可解方程求得空洞的半径 R 。

③假定缺陷为“蜂窝”或被其它介质填塞的孔洞

假定缺陷为“蜂窝”或被其它介质填塞的孔洞(图 5-31),这时超声波在缺陷区的传播有两条途径。一部分声波穿过缺陷介质到达接收换能器,另一部分沿缺陷绕行。当绕行声时小于穿行声时时,可按空洞处理。反之,则缺陷半径 R 与 PSD 判据的关系可按相同的方法求出:

$$K_i = \frac{4R^2(V_1 - V_3)^2}{\Delta H V_1^2 V_3^2} \quad (5-51)$$

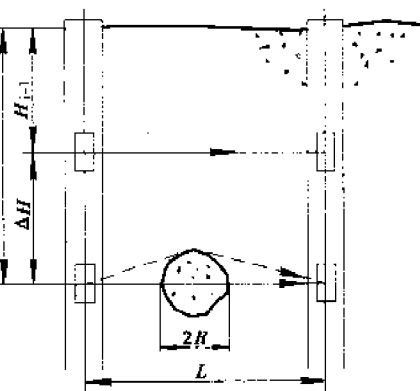


图 5-31 蜂窝状疏松或被泥沙填塞的孔洞

式中, V_3 为缺陷内夹杂物声速。大量试验表明:一般蜂窝状疏松区的声速约为密实混凝土声速的 80% ~ 90%,若取 $V_3 = 0.85 V_1$,则公式可写成:

$$K_i = \frac{0.125 R^2}{\Delta H V_1^2} \quad (5-52)$$

由于声通路有两个途径,只有当穿行声时小于绕行声时时,才能用上式计算。通过上述临界判据值以及各种缺陷大小与判据值的关系式,用它们与各点的实测值所计算的判据值作比较,即可确定缺陷的位置、性质与大小。

四、机械阻抗法

1. 基本原理

机械阻抗法适用范围较为广泛,可用于各种工程结构的动力分析。在桩基检测中,机械阻抗法有稳态激振和瞬态激振两种方式,适用于检测桩身混凝土的完整性,推定缺陷类型及其在桩中的部位。

机械阻抗的定义是,作用于某结构物上的力 F 与该结构的响应 S 之比,即机械阻抗 $Z = F/S$,而这种响应既可以是位移、速度,又可以是加速度。如果在桩头施加幅值为 $|F|$ 的正弦激振力时,相应于每一激振频率的弹性波在桩身混凝土中传播速度为 v_p ,则 F/v_p 就是机械阻抗 Z ,其倒数为机械导纳 N ,即

$$N = 1/Z \quad (5-53)$$

$$N(j\omega) = \frac{v_p(j\omega)}{F(j\omega)} \quad (5-54)$$

式中: N ——机械导纳;

F ——对结构施加的作用力;

v_p ——结构的运动速度。

系统在动态力作用下的阻抗(或导纳)是以激振频率 ω 为自变量的复函数 $Z(j\omega)$ 或 $N(j\omega)$ 。对不同的 ω 值,阻抗(或导纳)的幅值和幅角也就不同,这就提供了用阻抗和导纳随频率变化的图像来研究系统(如桩基础)动态特性的可能性。由于桩的动力特性与桩身完整性密切相关,通过对桩的动态特性的分析计算,可估计桩身混凝土的缺陷类型及其在桩身中的部位。

2. 测试设备

稳态阻抗法用的设备有:由频率计控制的电磁式激振器、力传感器、加速度(或速度)传感器、电荷放大器、信号采集处理计算机、输出设备(打印机、绘图仪等);瞬态阻抗法用的设备是将稳态法的激振器换给力棒,如图 5-32 所示。

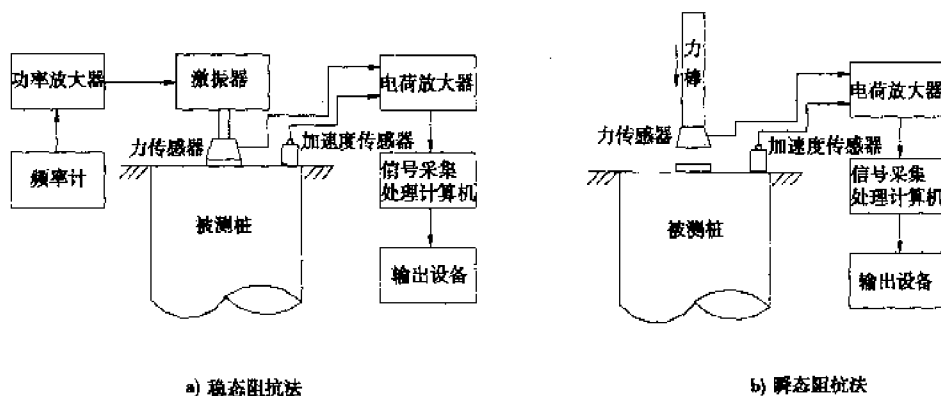


图 5-32 机械阻抗法检测系统基本组成示意图

3. 现场布置与测试

- (1) 将桩头清理平整干净,检查仪器设备的工作状态;
- (2) 激振点应尽量接近桩顶中心位置,速度或加速度传感器可置于桩顶边缘位置;
- (3) 力传感器与桩的接触面必须安置垫块,垫块可由橡胶、塑胶或其它材料组成;
- (4) 对于稳态激振,则由频率计调节激振频率,由低到高,将速度(或加速度)以及激振力的信号由数据采集器记录、处理;
- (5) 在瞬态激振中,重复测试的次数应大于 4 次。

4. 检测资料的分析整理

机械阻抗法的资料分析主要是对导纳曲线的分析。桩的典型导纳曲线如图 5-33 所示,由图可求得峰与峰之间频率差 Δf ,该 Δf 反映了被测桩的固有频率,即 $\Delta f = f_n$,故

$$f_n = \Delta f = \frac{v_p}{2L} \quad (5-55)$$

由导纳-频率曲线获得 Δf 值后,可由已知的桩长代入,求得 v_p 值,检验 v_p 值与相应标号的混凝土波速是否接近。如在合理范围内,即为该桩的波速。

如按上述方法得到的 v_p 值偏大很多,则桩身可能存在断裂现象。桩身越短,其 f_n (也即 Δf) 越高,所以, Δf 越大,断裂位置越接近桩头。将该场地桩的平均 v_p 代入,即可获得断裂位置的深度 L' 。

如果被测桩的导纳曲线与正常桩的典型曲线有较大出入,则桩身可能出现各种缺陷。如果曲线类似调制波形(图 5-34),则 Δf_2 表示了桩身缺陷处的反射, Δf_1 表示了桩底的反射或桩身更深部位缺陷的反射。如果桩的导纳曲线各峰值逐渐加大或减小,而各峰之间的 Δf 均相等,则桩身横截面可能沿深度方向存在扩大或缩小现象。

总之,判别桩基质量是一个综合分析过程。在分析中也常用对比法,即从多根桩的检测中找出质量良好的桩的导纳曲线及其判据作为参考标准。同时为了便于进一步分析判断,常事先收集有关桩位处的地质剖面、施工设备和成桩工艺、施工过程中曾发生过的各种事故和处理情况等。

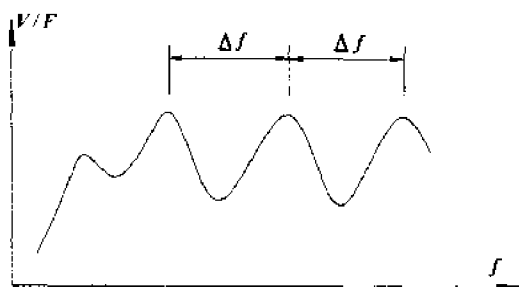


图 5-33 桩的导纳-频率曲线

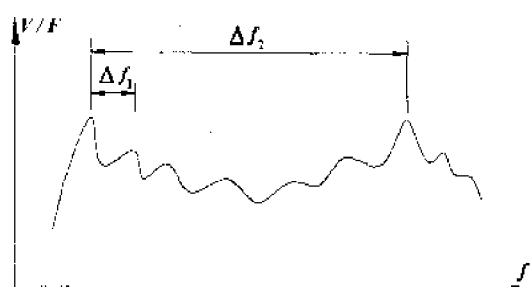


图 5-34 有缺陷桩的导纳-频率曲线示意图

第七节 局部破损检测方法简介

局部破损检测方法,是以不影响构件的承载能力为前提,在构件上直接进行局部破坏性试验,或直接钻取芯样、拔出混凝土锥体等手段检测混凝土强度或缺陷的方法。属于这类方法的有钻芯法、拔出法、射击法、拔脱法、就地嵌注试件法等。这类方法的优点是以局部破坏性试验获得混凝土性能指标,因而较为直观可靠,缺点是造成结构物的局部破坏,需进行修补,因而不宜用于大面积的检测。

在我国,钻取芯样法应用已比较广泛,拔出法近几年发展较快,射击法即贯入阻力法的研究也已取得可喜进展,本节仅对这三种方法进行简介。

一、钻芯法

1. 钻芯法的应用及特点

钻芯法是利用专用钻机,从结构混凝土中钻取芯样以检测混凝土强度或观察混凝土内部质量的方法。用钻芯法检测混凝土的强度、裂缝、接缝、分层、孔洞、或离析等缺陷,具有直观、精度高等特点,因而广泛应用于工业与民用建筑、大坝、桥梁、公路、机场跑道等混凝土结构或构筑物的质量检测。但这种方法对构件的损伤较大、检测成本较高,只有在下列情况下才进行钻取芯样检测其强度。

- (1)对试块抗压强度的测试结果有怀疑时;
- (2)因材料、施工或养护不良而发生混凝土质量问题时;
- (3)混凝土遭受冻害、火灾、化学侵蚀或其它损害时;
- (4)需检测经多年使用的建筑结构或构筑物中混凝土强度时;
- (5)对施工有特殊要求的构件,如机场跑道测量厚度。

另外,对混凝土强度等级低于 10 号的结构,不宜采用钻芯法检测。因为当混凝土强度低于 10MPa 时,在钻取芯样的过程中容易破坏砂浆与粗骨料之间的粘结力,钻出的芯样表面变得较粗糙,甚至很难取出完整芯样。

2. 混凝土芯样选取

(1) 钻芯位置的选择

钻芯时会对结构混凝土造成局部损伤,因此在选择钻芯位置时要特别慎重。芯样应在构件的下列部位钻取:构件受力较小部位;混凝土强度质量具有代表性的部位;便于钻芯机安装与操作的部位;芯样钻取应避开主筋、预埋件和管线的位置,并尽量避开其它钢筋。另外,在使用回弹、超声或综合等非破损方法与钻芯法共同检测结构混凝土强度时,取芯位置应选择在其

有代表性的非破损检测区内。

(2) 芯样尺寸

应根据检测的目的选取适宜尺寸的钻头,当钻取的芯样是为了进行抗压试验时,则芯样的直径与混凝土粗骨料粒径之间应保持一定的比例关系,一般情况芯样直径为粗骨料粒径的 3 倍。在钢筋过密或因取芯位置不允许钻取较大芯样的特殊情况下,芯样直径可为粗骨料直径的 2 倍。为了减少结构构件的损伤程度,确保结构安全,在粗骨料最大粒径限制范围内,应尽量选取小直径钻头。如取芯是为了检测混凝土的内部缺陷或受冻害、腐蚀层的深度等,则芯样直径的选择可不受粗骨料最大粒径的限制。

(3) 钻芯数量的确定

取芯的数量,应根据检测要求而定。按单个构件检测时,每个构件的钻芯数量不应少于 3 个,取芯位置应尽量分散,以减少对强度的影响;对于较小构件,钻芯数量可取 2 个。对构件的局部区域进行检测时,一般应由要求检测的单位提出钻芯位置及芯样数量。

3. 混凝土强度推定

芯样试件的抗压强度等于试件破坏时的最大压力除以截面积,截面积用平均直径计算。我国是以边长 150mm 的立方体试块作为标准试块,因此,由非标准尺寸圆柱体(芯样)测得的试件强度应换算成标准尺寸立方体试件强度。

芯样试件的混凝土换算强度可按下列公式计算

$$f_{cu}^c = \alpha \frac{4F}{\pi d^2} \quad (5-56)$$

式中: f_{cu}^c ——芯样试件混凝土强度换算值(MPa),精确至 0.1MPa;

F ——芯样试件抗压试验得到的最大压力(N);

d ——芯样试件的平均直径(mm);

α ——不同高径比的芯样试件混凝土强度换算系数,可按表 5-11 选用。

芯样试件混凝土强度换算系数

表 5-11

高径比(h/d)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
系数(α)	1.00	1.04	1.07	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.21	1.22	1.24

二、拔出法

拔出法是使用拔出仪器拉拔埋在混凝土表层内的锚件,将混凝土拔出一锥形体,根据混凝土抗拔力推算其抗压强度的方法。该法分为两类,一类是预埋拔出法,是浇筑混凝土时预先将锚杆埋入,混凝土硬化后需测定其强度时拔出;另一种是后装拔出法,即在硬化后的混凝土上钻孔,装入(粘结或胀嵌)锚固件进行拔出。拔出法是一种测试结果可靠、适用范围广泛的微破损检测方法。我国从 1985 年开始进行后装拔出法的研究工作,并已制订了相关的行业规范:《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69:94)。

1. 预埋拔出法

预埋拔出法是在混凝土表层以下一定距离处预先埋入一个钢制锚固件,混凝土硬化后,通过锚固件施加拔出力。当拔出力增至一定限度时,混凝土将沿着一个与轴线呈一定角度的圆锥面破裂,并最后拔出一个圆锥体。预埋拔出装置包括锚头、拉杆和拔出试验仪的支承环,如图 5-35 所示。锚头直径为 d_2 ,锚头埋深为 h ,承力环内径为 d_3 ,拔出夹角为 2α 。统计表明:当 d_2 、 h 和 2α 值在一定范围时,混凝土的抗压强度与极限拉拔力之间具有良好的线性关系。

预埋拔出试验的操作步骤可分为:安装预埋件、浇筑混凝土、拆除连接件、用拔出仪拉拔锚头,如图 5-36 所示。当拔出试验达到拉拔力时,混凝土将大致沿 2α 的圆锥面产生开裂破坏,最终有一个截头圆锥体脱离母体。

预埋拔出法必须在浇灌混凝土前预先埋设锚头,主要用于混凝土施工控制和特殊混凝土的强度检测,如决定拆除模板、支架或加置荷载的适当时间;决定施加或放松预应力的适当时间;决定构件吊运的适当时间;决定停止湿热养护、终止保温的适当时间;也可用于喷射混凝土等特种混凝土的强度检测。

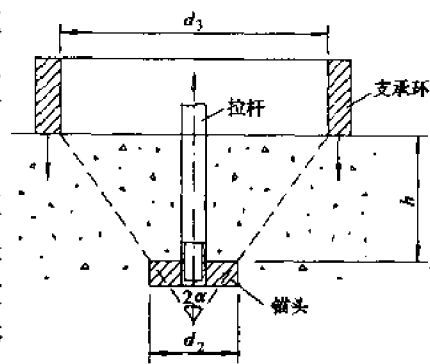


图 5-35 拔出试验简图

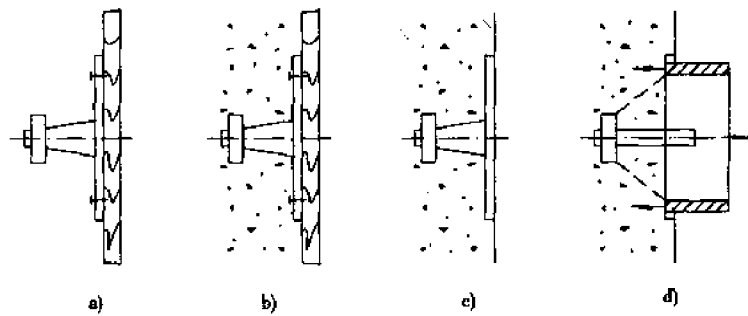


图 5-36 预埋拔出试验操作步骤
a) 安装预埋件; b) 浇筑混凝土; c) 拆除连接件; d) 拔出试验

2. 后装拔出法

后装拔出法是在硬化后的混凝土上钻孔,装入(粘结或胀嵌)锚固件进行拔出。这种方法不需要预先埋设锚固件,使用时只要避开钢筋或预埋钢板位置即可。因此,后装拔出法在新旧混凝土的各种构件上都可以使用,适应性较强,检测结果的可靠性也较高,已成为许多国家注意和研究的现场混凝土强度检测方法之一。后装拔出法可分为几种,如丹麦的 CAPO 试验法,日本的安装经过改进的膨胀螺栓试验,我国的 TYL 型拔出仪等。各种试验方法虽然并不完全相同,但差别不大。以丹麦的 CAPO 拔出试验为例,试验步骤如图 5-37 所示。试验时先在混凝土检测部位钻一直径 18mm、深 50mm 的孔,在孔深 25mm 处用特制的带金刚石磨头的扩孔装置磨出一环形沟槽,将可以伸张的金属胀环送入孔中沟槽,并使其张开嵌入沟槽内,再将千斤顶与锚固件连接,并施加拉力直至拔出一混凝土圆锥体,用测力计测读其极限抗拔力。

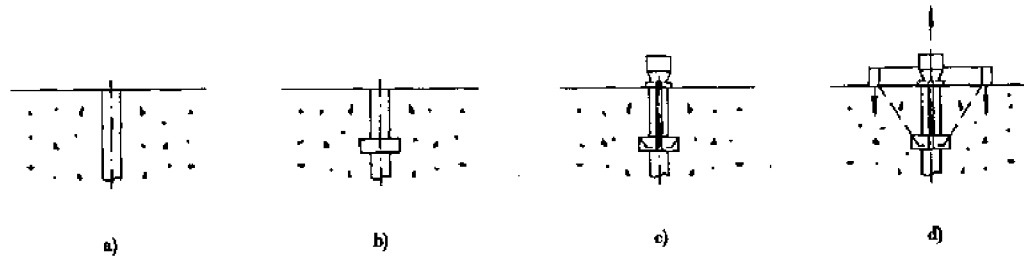


图 5-37 后装拔出法试验操作步骤
a) 钻孔; b) 磨槽; c) 安装锚固件; d) 拔出试验

3. 混凝土强度推定

拔出法检测混凝土强度,一个重要的前提就是预先建立混凝土极限拔出力 and 抗压强度的

相关关系,即测强曲线。在建立测强曲线时,一般是通过大量的试验,将试验所得的拔出力 and 抗压强度按最小二乘法原理,进行回归分析。回归分析一般是采用直线回归方程

$$f_{cu} = A + B \cdot F_p \quad (5-57)$$

式中: A 、 B ——回归系数;

f_{cu} ——混凝土立方体试块抗压强度(MPa);

F_p ——极限拔出力(kN)。

直线方程使用方便、回归简单、相关性好,是国内外普遍采用的方程形式。有了回归方程后,混凝土强度推定值就可按前述测强方法(如回弹法)进行计算,详见有关技术规程。

三、射击法

射击法又名射钉法或贯入阻力法,其测试仪器是美国于1964年最早研制出来的。这种方法是用一个被称作温泽探针(Windor probe)的射击装置,将一硬质合金钉打入混凝土中,根据钉的外露长度作为混凝土贯入阻力的度量并以此推算混凝土强度。钉的外露长度愈多,表明其混凝土强度愈高。这种方法在美国和加拿大应用相当普遍,主要用于测定混凝土早期强度发展情况,也适用于同一结构不同部位混凝土强度的相对比较。该法的优点是测量迅速简便,由于有一定的射入深度(20~70mm),受混凝土表面状况及碳化层影响较小,但受混凝土粗骨料的影响十分明显。

1. 基本原理

射击法检测混凝土强度是通过精确控制的动力将一根特制的钢钉射入混凝土中,根据贯入阻力推定其强度。由于被测试的混凝土在射钉的冲击作用下产生综合压缩、拉伸、剪切和摩擦等复杂应力状态,要在理论上建立贯入深度与混凝土强度的相关关系是很困难的,一般均借助于试验方法来确定。

射击检测法的基本原理是:发射枪对准混凝土表面发射子弹,弹内火药燃烧释放出来的能量推动钢钉高速进入混凝土中,一部分能量消耗于射钉与混凝土之间的摩擦,另一部分能量由于混凝土受挤压、破碎而被消耗。子弹爆发的初始动能被全部吸收,因而阻止了射钉的回弹作用。如果发射枪引发的子弹初始动能固定,射钉的尺寸不变,则射钉贯入混凝土中的深度取决于混凝土的力学性质。因此测出钢钉外露部分的长度,即可确定混凝土的贯入阻力。通过试验,建立贯入阻力与混凝土强度的试验相关关系,便可据以推定混凝土强度。

2. 主要设备及操作

射击法检测混凝土强度所用设备如下:

(1)发射枪,是引发火药实现射击的装置。火药燃烧后产生气体作用在活塞上,活塞推动射钉射击。

(2)子弹,与发射枪配套使用。按装药量不同分几种型号,应根据需要选用。

(3)射钉,是用淬火的合金钢制成的钉,尖端锋利,顶端平整并带有金属垫圈,便于量测和试验后拔出。钉身上带塑料垫圈,发射时起导向作用。

(4)其它辅助工具如钉锤、撬棍、游标卡尺等,以量测射入深度,将射进混凝土中的钢钉拔出。

操作步骤如下:由发射管口将射钉装入,用送钉器推至发射管底部;拉出送弹器装上子弹,再推回原位;将发射枪对准预定的射击点,把钢钉射入混凝土中;然后用游标卡尺量出钢钉外露部分的长度。量测前应检查钢钉嵌入混凝土中的情况,嵌入不牢的应予废弃,再补充发射。最后利用混凝土抗压强度与射钉外露长度的相关关系式,计算混凝土强度。

第八节 无损检测实例

一、超声-回弹综合法检测混凝土强度

1. 工程概况

某人行天桥的梯道跨度为 $13.0 + 13.0 + 8.0\text{m}$, 桥宽 3.0m , 设计荷载为 3.5kN/m^2 , 采用 25 号混凝土。该桥投入使用几年后, 有关部门发现梯道梁底出现了宽度 $0.2 \sim 3.0\text{mm}$ 的裂缝。为探明裂缝成因, 检验混凝土质量, 根据《超声回弹综合法、检测混凝土强度技术规程 (CECS 02:88)》, 采用了超声-回弹综合法测试梯道梁体混凝土强度, 以便采取必要的处理措施, 现简介如下。

2. 检测过程

本次检测在梯道每跨梁体侧面均匀布置 10 个超声-回弹测区, 每个测区尺寸为 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。每一测区的两个相对测试面上均匀布置 8 个回弹测点、3 个超声测点, 先进行回弹测试, 后进行超声测试。测试时将测试面用砂轮片磨机清除杂物和磨平不平整处, 并擦净残留粉尘, 以保持清洁、平整、干燥。

3. 检测结果

计算测区回弹值时, 应从该测区两个相对测试面的 16 个回弹值中, 剔除 3 个最大值和 3 个最小值, 然后将余下的 10 个回弹值求平均值, 得到测区平均回弹值 R_m 。测区超声声速值 v 是将超声波传播距离除以 3 个超声测点的平均声时值得到的。由于本次测试回弹仪均处于水平状态, 且测试面是在混凝土浇灌的侧面, 因而所求得的测区平均回弹值和超声声速值均无需修正。部分测试结果见表 5-12, 由于没有专用或地区测强曲线, 因此测区混凝土强度换算值可由附表 2 查得, 该梯道梁体混凝土强度推定值即为各测区中最小的混凝土强度换算值。经过统计整理, 可得该天桥梯道梁体混凝土强度推定值为 24.2MPa , 基本上达到设计要求。

综合法测强原始记录表

表 5-12

测 区		1	2	3	4	6	7	8	9	10
项 目										
回弹值	1	33	37	38	42	52	40	36	29	36
	2	30	30	34	38	42	25	32	28	35
	3	38	32	32	28	35	35	32	29	35
	4	29	35	28	43	31	29	32	36	38
	5	36	26	40	35	38	31	33	40	40
	6	40	27	35	34	32	30	38	41	40
	7	41	36	38	33	37	32	37	29	35
	8	29	29	40	36	30	35	43	32	38
	9	32	33	29	29	29	26	49	31	40
	10	31	38	35	45	40	37	32	36	29
	11	36	37	31	30	35	36	38	40	35
	12	40	43	38	37	38	29	34	43	31
	13	43	49	32	32	40	33	32	37	38
	14	36	32	35	33	29	38	37	30	30
	15	37	38	31	36	35	40	30	29	32
	16	34	34	38	31	32	28	29	36	35
	R_m	35.3	34.4	34.8	34.5	35.2	32.7	34.3	33.6	35.7

续上表

测 区		1	2	3	4	6	7	8	9	10
项 目	1	224.4	228.1	237.2	221.3	227.4	224.1	228.5	231.3	233.1
	2	224.8	231.5	234.6	240.6	236.2	227.3	233.3	223.5	227.4
	3	225.9	227.3	232.1	243.2	232.2	233.1	232.4	225.3	231.6
	平均值	225.0	229.0	234.6	235.0	231.9	228.2	231.4	226.7	230.7
测距(mm)		1000								
声速(km/s)		4.44	4.37	4.26	4.36	4.31	4.38	4.32	4.41	4.33
换算强度(MPa)		28.0	26.1	25.5	25.1	26.5	24.2	25.5	25.6	27.3

二、钢管混凝土拱肋密实性检测

1. 工程概况

某钢管混凝土系杆拱桥,计算跨径为 64.0m,矢跨比为 1/5,矢高为 12.8m。钢管拱肋截面呈圆端形,高 1.60m,宽 1.20m,拱肋内灌注 C50 微膨胀混凝土。在灌注拱肋混凝土时,由于钢管内加劲肋、焊缝、灌注工艺等原因的影响,使钢管与内填混凝土出现脱粘、空隙等缺陷,导致拱肋实际受力与原设计意图不相符。为确保施工质量,探明混凝土与钢管之间的间隙所处位置及其严重程度,针对该桥钢管混凝土拱肋的实际情况,进行了超声波检测,简介如下。

2. 测试原理

钢管混凝土超声检测不同于普通混凝土试件或钢筋混凝土构件,由于钢板的存在,使超声波在钢管混凝土中的传播途径比较复杂。当钢管与混凝土之间无空隙存在时,其传播路径是:发射 \Rightarrow 直线穿过钢管壁 \Rightarrow 直线穿过混凝土 \Rightarrow 直线穿过钢管壁 \Rightarrow 接收。由于钢管壁厚度与管径相比很小,可略去管壁厚度不计。这样,当钢管与混凝土之间无空隙存在时,超声波通过给定距离的时间,可以通过波的现场实测速度来预测。当混凝土与钢管壁之间存在间隙时,超声波不能直接穿过间隙,而必须绕过间隙传播,这样,便导致传播时间的增长、波幅衰减幅度的增大、波的相位发生变化。比较无间隙和有间隙两种情况下,超声波通过给定距离的时间差别、相位变化及衰减幅度,便可推断出间隙的存在与否、所处位置及其大小程度。上述判别方法的前提条件是:超声波通过混凝土传播的声时值必须小于直接通过钢管壁绕射的声时值,否则,超声波首波将不穿过混凝土而直接沿钢管壁到达接收探头,就无法判断其内部缺陷。图 5-38 是钢管混凝土无缺陷典型超声波形,波形无畸变,脉冲包络线是圆弧状,首波频率比沿钢管壁传过来的超声脉冲低;图 5-39 是钢管中混凝土与钢管壁脱离或有空洞时典型超声脉冲波形,由混凝土传过来的脉冲波很难测读首波,或虽能测读,但波形畸变大,首波频率极小。

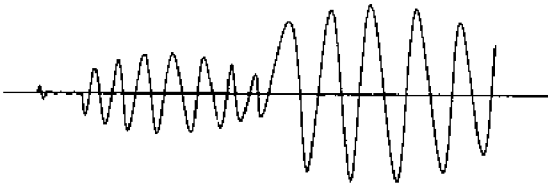


图 5-38 无缺陷钢管混凝土正常波形

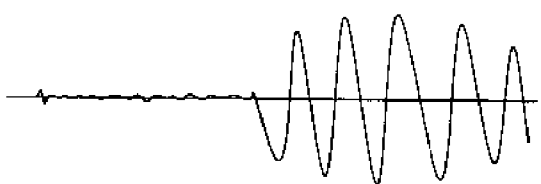


图 5-39 有缺陷钢管混凝土畸变波形

3. 测试方法

(1) 全桥拱肋超声测区布置

考虑到该桥拱肋的实际情况,超声检测测区具体布置为:两根吊杆之间和每根吊杆与拱肋相交的端部各设 1 个测区,拱脚处适当加密增设 2 个测区。这样,每片拱肋共有 25 个测区,全

桥共布置 50 个测区。测区具体布置见图 5-40。

(2)各测区内测点布置

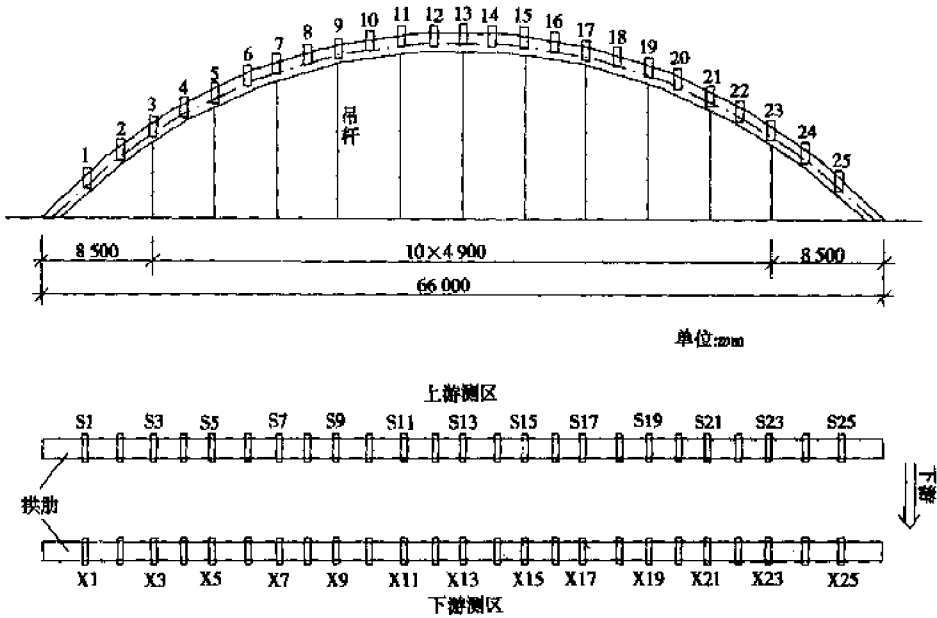


图 5-40 测区平面布置示意图(单位:mm)

本次测试截面的测点分别布置在钢管顶、底、两侧,一侧发射、一侧接收,如图 5-41 所示。每个测试截面布五对测点:1 号点位于钢管两侧面的正中,3 号点位于钢管上下正中,2 号、4 号点分别位于 3 号点两侧的 1/8 弧长处,除 1、2、3、4 点对测外,另将 2 号、4 号点对测,如图 5-41 所示。

(3)检测方法步骤

①现场测试钢板与混凝土的声速。对于混凝土,在现场选取了与拱肋混凝土同期浇注的标准试块 3 个,进行了 12 对点的声速测试,测得混凝土平均声速为 4630m/s;对于钢管,在现场专门布置了 12 个声速测点,测得钢的平均声速为 5350m/s。

②根据各测点路径波距及实测声速,计算各测点路径的理论声时,见表 5-13。

③采用对测法,逐测区、测点进行测试,通过比较超声波实测声时与理论声时的差异、波形的畸变程度与衰减幅度来判定间隙的存在与否及大小。

④综合声时、波形、相位三方面参数,评价该测区内填混凝土的密实性,在此基础上,通过对 94 个测区的测试结果综合分析,评价该桥拱肋内填混凝土的密实性。

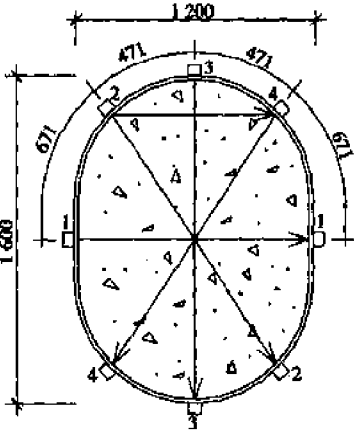


图 5-41 测点布置示意图(单位:mm)

各测点波距及理论声时计算值 表 5-13

测点路径	直线传播波距(mm)	理论声时计算值(μ s)
1-1	1200.0	259.1
2-2,4-4	1509.7	326.1
3-3	1600.0	345.6
2-4	848.6	183.3

4. 测试结果及综合评价

根据超声波检测结果,比较实测声时与计算声时、波形畸变程度、相位变化及波幅衰减幅度,便可推断出间隙的存在与否、间隙在该截面的位置及钢管是否与混凝土脱离等问题。将部分检测结果汇总如表 5-14 所示。

钢管混凝土拱肋密实性超声检测结果(部分测区) 表 5-14

测区 编号	测点 编号	超声波检测结果		
		声时(μ s)	波形畸变分级	超声综合评判结果
X2 测 区	1-1	262.0	Ⓐ	基本正常,钢管与混凝土基本密实
	2-2	322.6	Ⓐ	
	3-3	358.8	Ⓒ	
	4-4	332.4	Ⓐ	
	2-4	178.0	Ⓐ	
X6 测 区	1-1	263.6	Ⓐ	钢管上部约 1/3 ~ 1/2 弧长范围内与混凝土存在间隙
	2-2	334.8	Ⓐ	
	3-3	380.4	⊗	
	4-4	378.0	⊗	
	2-4	197.2	Ⓐ	
S10 测 区	1-1	266.8	Ⓐ	钢管上部约 1/5 弧长范围内与混凝土存在间隙
	2-2	333.2	Ⓒ	
	3-3	361.2	⊗	
	4-4	335.6	Ⓒ	
	2-4	210.8	⊗	
S11 测 区	1-1	275.6	Ⓒ	钢管与混凝土基本脱开,拱顶局部间隙严重
	2-2	328.4	Ⓒ	
	3-3	427.6	⊗⊗	
	4-4	338.0	⊗	
	2-4	210.8	⊗	

注:Ⓐ——波形正常;Ⓒ——有小畸变;⊗——畸变较大;⊗⊗——畸变严重。

5. 部分实测波形

部分测点实测波形如图 5-42、图 5-43 所示。

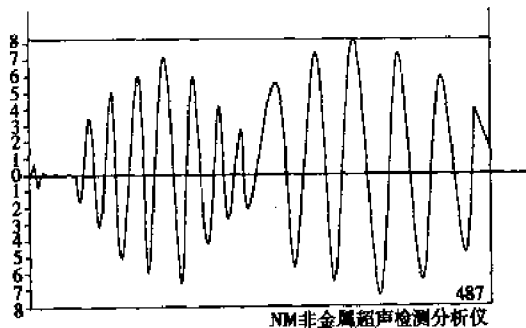


图 5-42 X2 测区 4-4 测点实测波形

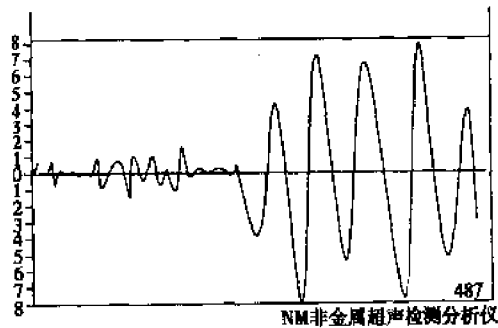


图 5-43 S11 测区 3-3 测点实测波形

6. 结论

根据上述测试结果,可以得出如下结论:除拱脚6m左右范围外,该桥拱肋截面上侧约1/5弧长范围内几乎普遍存在钢管与混凝土脱空的现象,其中有部分截面空隙发展到占钢管上部1/3~1/2弧长的范围;此外,在吊杆周围向跨中一侧的拱背,普遍存在间隙较大、但面积不大的空隙;由于焊缝与钢管内纵横肋的存在,空隙的形状比较复杂、多变,缺乏规律性,且连通性较差。

三、混凝土钻孔灌注桩完整性检测

1. 资料介绍

反射波法检测混凝土钻孔灌注桩的基本原理是:应力波以波速 V 在桩身传播,无论是桩底反射信号或者是阻抗变化处的波反射信号均是通过相应的两倍长度的时间而为桩头的检波器所接收,故而有

$$V = 2L/t \quad (5-58)$$

$$\text{或} \quad \Delta L = V \cdot \Delta t / 2 \quad (5-59)$$

式中: V ——应力波在桩身混凝土中传播的波速;

L ——整桩长;

ΔL ——缺陷位置距桩头的长度;

t 、 Δt ——整桩中及缺陷处反射的应力波在桩身中传播时间。

为了更好地掌握反射波法测桩的规律性,进行了一组模型桩试验。模型桩共5根,桩长均为5.0m。其中一根为完整桩,另4根在距桩头3.5m处人为设置了一些常见缺陷:离析、缩颈、扩颈、断桩等。模型桩结构如图5-44所示。

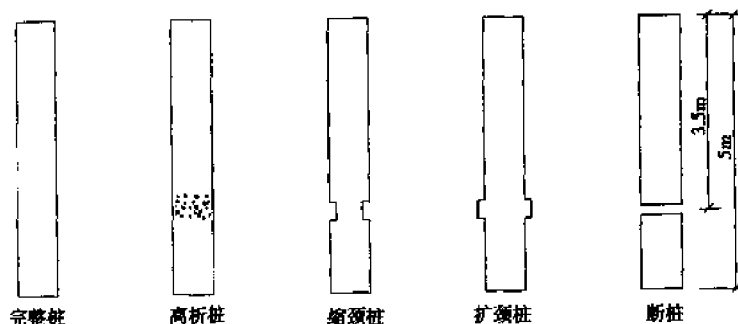


图 5-44 模型桩结构示意图

2. 反射波法测试结果

(1) 完整桩

完整桩测试结果见图5-45。已知桩长 $L = 5.0\text{m}$,由图中可得桩底反射时间 $t = 2.50\text{ms}$,所以

$$V = \frac{2L}{t} = \frac{2 \times 5.0}{2.5 \times 10^{-3}} = 4000 (\text{m/s})$$

即应力波在整桩中平均波速为 4000 m/s 。桩头激振信号与桩底反射间无异常信号。

(2) 离析松散桩

实测图如图5-46所示。由图知整桩反射时间 $t = 2.50\text{ms}$,缺陷反射时间 $\Delta t = 1.70\text{ms}$ 。计算整桩波速为

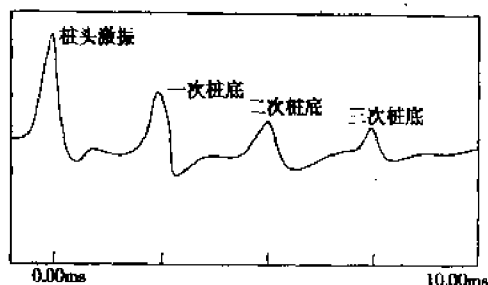


图 5-45 完整桩测试结果

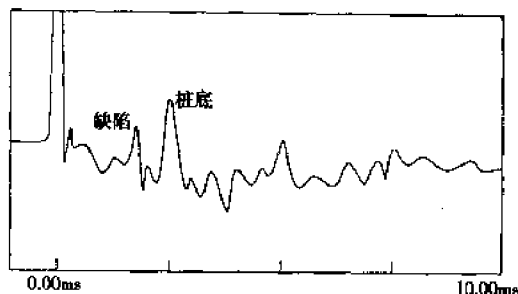


图 5-46 离析松散桩测试结果

$$V = \frac{2L}{t} = \frac{2 \times 5.0}{2.5 \times 10^{-3}} = 4000 (\text{m/s})$$

计算缺陷位置

$$\Delta L = \frac{V \cdot \Delta t}{2} = \frac{4000 \times 1.7 \times 10^{-3}}{2} = 3.4 \text{m}$$

计算结果与预设的缺陷位置基本吻合,且缺陷反射信号与激振信号同相。

(3) 缩颈桩

实测图如图 5-47 所示。由图知整桩桩底反射时间 $t = 2.50 \text{ms}$, 缺陷反射时间 $\Delta t = 1.60 \text{ms}$ 。计算整桩波速为

$$V = \frac{2L}{t} = \frac{2 \times 5.0}{2.5 \times 10^{-3}} = 4000 (\text{m/s})$$

计算缺陷位置

$$\Delta L = 1.60 \times 10^{-3} \times 4000 / 2 = 3.2 \text{m}$$

从图中标明位置处可见缩颈桩缺陷反射信号与桩底反射信号同相。

(4) 扩颈桩

实测图如图 5-48 所示。由图知整桩桩底反射时间 $t = 2.50 \text{ms}$, 缺陷反射时间 $\Delta t = 1.65 \text{ms}$ 。计算整桩波速为:

$$V = \frac{2L}{t} = \frac{2 \times 5.0}{2.5 \times 10^{-3}} = 4000 (\text{m/s})$$

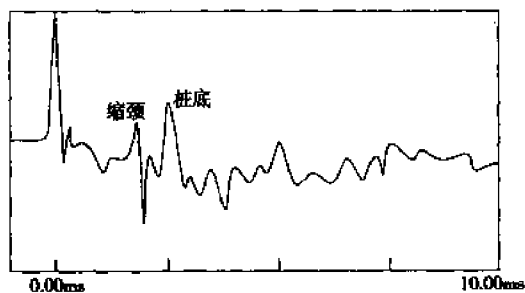


图 5-47 缩颈桩测试结果

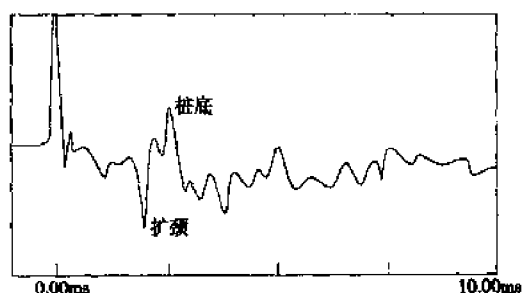


图 5-48 扩颈桩测试结果

计算缺陷位置:

$$\Delta L = 1.65 \times 10^{-3} \times 4000 / 2 = 3.3 \text{m}$$

从图中可见扩颈桩缺陷反射信号与激振信号反向。

(5) 断桩

实测波形如图 5-49 所示。预设的缺陷位置在距桩头 3.5m 处,图中有一个反射时间为 $\Delta t = 1.70\text{ms}$ 的反射信号,而未见 $t = 2.50\text{ms}$ 的桩底反射信号。由完整桩测得的波速为 4000m/s ,计算可得桩长为

$$\Delta L = V \cdot \Delta t / 2 = 4000 \times 1.70 \times 10^{-3} / 2 = 3.4\text{m}$$

该桩波形与完整桩的测试波形类似,不同的是根据所测得的波形中桩底反射时间算出的桩长较已知桩长短得较多,这表明该桩为断桩。

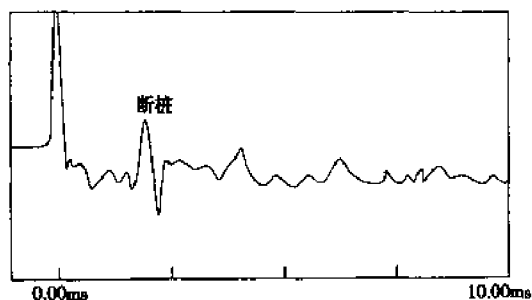


图 5-49 断桩测试结果

通过上述的模型桩测试结果表明,反射波法在桩基完整性方面的检测技术较为完善,技术上实用性很强,其良好效果已为许多工程实例所证明。

第六章

桥梁施工控制与长期监测

QIAOLIANGSHIGONGKONGZHIZHUYUCHANGQIJIANCE

第一节 桥梁施工控制的基本概念

一、概述

施工是设计意图实现的关键,好的桥梁设计必须要有高水平的桥梁施工技术来支持;另一方面,桥梁施工技术的发展为桥梁设计意图的实现提供了灵活多样的手段,为新结构、新材料的推广应用提供了充分的技术保障。桥梁施工技术包含施工设计计算、施工方法、施工工艺、施工设备、施工控制等诸多内容。其中,施工控制是施工技术的重要组成部分,并始终贯穿于桥梁施工中。

桥梁施工,特别是大跨径桥梁的施工,是一个复杂的系统工程。在该系统中,设计图是目标,而从开工到竣工整个施工过程中,将受到许多确定和不确定因素的影响,包括设计计算假定、材料性能参数、施工精度、施工荷载、大气温度等诸多方面的因素,这些因素总会使实际状态与理想目标状态之间存在一定的差异。因此,在施工过程中如何从受各种因素影响而失真的参数中找出相对真实之值,对施工状态进行实时监测、预测、调整,对设计目标的实现是至关重要的。一般地,上述工作常以现代控制论为理论基础来进行,所以称之为施工控制。近年来,随着桥梁跨径不断增大,人们已普遍认识到施工控制在施工技术中的重要地位与作用,施工控制越来越成为施工技术的重要内容。实际上,桥梁施工控制早在以前的施工过程中就已被人们采用,如在施工中为了保证桥梁建成时的线型符合设计要求,在有支架施工时总是要在支架上设置预拱度;在悬臂施工中总是要使施工节段的立模(或安装)标高高于设计标高一定数值,这实质上就是在对施工实施控制,这些方面处理的好坏常常被看作是施工技术水平高低的体现。

桥梁施工控制不仅是桥梁施工技术的重要组成部分,而且也是实施难度相对较大的部分。不同体系、不同施工方法、不同材料的桥梁,其施工控制技术要求也不一样。以钢桁梁的悬臂架设为例,为最终达到设计标高,通常采用预设拱度的方法来解决,即将先架设的节点预先抬高来考虑后架设节段的影响。由于钢材的匀质性和制造尺寸的相对准确性,预设拱度方法在钢桁梁悬臂拼装过程中是较为成功的方法。但是,对于同样采用悬臂浇筑法施工的混凝土桥梁就不那么容易,因为混凝土桥梁除了材料特性的离散性外,它还要受温度、湿度、时间等因素的影响,加上各节段混凝土的龄期、强度、持载历史等因素各不相同,这就会造成各节段的内力

和变形随着混凝土浇筑过程变化而偏离设计值的现象,甚至出现超过设计允许的内力和变形。对这种情况,若不通过有效的施工控制实时跟踪、及时调整,就势必造成成桥状态的线型和内力不符合设计要求。

桥梁施工控制是确保桥梁施工宏观质量的关键。衡量一座桥梁的施工宏观质量标准就是其成桥状态的线型以及受力情况是否符合设计要求。对采用多工序、多阶段施工的桥梁上部结构,要求结构内力和标高的最终状态符合设计要求是很不容易的。例如混凝土斜拉桥,悬臂施工时主梁各节段要考虑预抬高以使其标高符合设计要求,同时还要求成桥状态下斜拉索的内力也达到设计要求,但由于斜拉桥是多次超静定结构,主梁标高的调整将影响到斜拉索的内力,某根斜拉索内力的调整又影响到主梁标高和邻近斜拉索的内力。因此,如不进行有效的监测控制,就可能导致内力或桥面线形难以达到设计目标值。例如我国某混凝土斜拉桥,由于种种原因,成桥后主梁外观呈波浪形,不但影响行车舒适,也留下外观缺陷。为此,应对施工过程的各阶段、各工序进行模拟,考虑混凝土徐变、收缩的影响,预先计算出各阶段内力和位移的预计值。将施工中的实测值与预计值进行比较,若相差超过允许的范围即进行调整,并通过对设计参数的识别和拉索索力的优化调整,实现施工作业与施工控制之间的良性循环,最后达到对主梁变形和拉索索力双重控制的目的,使各阶段内力和变形达到或接近预计值,确保桥梁的施工质量。

桥梁施工控制又是桥梁建设的安全保证,这一点对于大跨度桥梁更为突出。在施工过程中,由于每一阶段结构的内力和变形目标值是可以预计的,各施工阶段结构的实际内力和变形是可以监测得到的,这样就可以较全面地跟踪掌握施工进度和发展情况。当发现施工过程中监测的实际值与计算的预计值相差过大时,就要进行检查、分析原因,采取及时必要的措施,否则将可能出现事故。例如,跨径 548.64m 的加拿大魁北克桥曾在施工中两次发生事故,该桥采用悬臂拼装法施工,当南侧桁架快架设完毕时,突然崩塌坠落,原因是桁架悬臂长度太长(悬臂长度 176.8m),靠近中间墩处的下弦杆受力过大,致使下弦杆腹板失去稳定而引起全桁架严重破坏。尽管造成事故的原因是设计问题,若当时采用了施工控制手段,在内力较大的杆件中布置监测点,当发现异常现象时,及时停工检查,就不会发生突然崩塌坠落事故。由此可见,桥梁施工监测控制就是桥梁建设的安全系统,为确保桥梁施工安全,对施工过程进行监测控制是必不可少的。

二、桥梁施工控制与桥梁施工质量控制的关系

桥梁施工质量控制是对施工全过程的各工序进行检查、监督和管理,消除影响工程质量的各種不利因素,使所建造的工程符合设计图纸、技术规范和验收标准的要求。桥梁施工控制就是对桥梁施工过程中结构的受力、变形及稳定进行监控,使施工中的结构状态处于最优状态,保证施工过程安全和成桥状态(包括内力和线型状态)符合设计、规范要求。

从上述两者所做的工作和欲达到的目的来看,桥梁施工控制与桥梁施工质量控制目标是一致的,都是保证桥梁建设质量的手段。桥梁施工质量控制重在“微观控制”,而桥梁施工控制重在“宏观调控”,是桥梁施工质量控制的补充与前提。以悬臂浇筑施工的预应力混凝土梁桥为例,施工质量控制重在钢筋、钢绞线自身质量控制,波纹管安装精度控制,模板安装精度控制,混凝土原材料及混凝土拌制质量控制,混凝土浇筑、养护质量控制,混凝土强度检验、预应力张拉控制,管道灌浆质量控制等;而施工控制则是在施工过程中监测结构内力和变形情况,根据已施工完成节段内力和变形状态,在考虑各种影响因素后,确定下一节段的施工是否需要

调整,或提供下一节段的立模标高。可见桥梁施工控制属于施工质量与安全控制范畴,虽不能完全替代质量控制,却为实现质量控制的总体目标提供保障。在小跨径桥梁施工中,往往不单独实施施工控制,而将施工控制的内容包含在施工质量控制中。

三、桥梁施工控制的发展

系统地实施桥梁施工控制的历史并不长。最早较系统地把工程控制论应用到桥梁施工管理中的是日本。20世纪80年代初,日本修建日夜野预应力混凝土连续梁桥时,就建立了施工控制所需的应力、挠度等参数的观测系统,并运用计算机对所测参数进行现场处理,然后将处理后的实测参数进行结构计算分析,最后将分析结果运用于现场进行施工控制。到80年代后期,日本在修建 chichby 斜拉桥和 Yokohama 海湾斜拉桥时,成功地利用计算机联网传输技术建立了一个用于拉索索力调整的自动监控系统,实现了施工过程中实测参数与设计值的快速验证比较,对保证施工安全和精度、加快工程进度起到了决定性的作用。该系统主要由自动测量数据采集、精度控制支持和结构计算机分析三部分组成,但由于结构计算分析是借助控制室大型计算机进行的,因此,受通讯电缆架设费用等因素的影响,使其推广受到限制。此后,日本又研制一个以现场微机为主要计算分析手段的斜拉桥施工双控系统,这一系统除包含上述提及的三个部分外,还增加了两个数据库,即测量参数和计算参数数据库。此系统的最大特点是在现场完成自动测试、分析和控制全过程,并可进行设计值敏感性分析和实际结构行为预测。该系统在1989年建成的 Nitchu 桥和1991年建成的 Tomei-Ashigara 桥上应用效果良好。

在我国,在20世纪50年代就已注意到施工中结构内力和变形的调控,如1957年建成的武汉长江大桥在施工过程中就进行了应力、标高的调整,1982年,上海浏港大桥(主跨200m的斜拉桥)首次根据现代工程控制的基本思想,有效地进行了主梁挠度和索塔塔顶水平位移的施工控制。进入80年代后期,随着计算机辅助桥梁施工的发展,桥梁施工控制技术在工程实践中获得了广泛的应用,并取得了较好成果。

目前,桥梁施工控制技术已纳入常规施工管理工作中,控制方法已从人工测量、分析与预报,发展到监控、分析、预报、调整的自动化控制,并已形成了较完善的桥梁施工控制系统。即便如此,由于影响桥梁施工的因素非常复杂,同时,新结构、大跨度、超大跨度桥梁也对施工控制提出了更高的要求,因此,深入研究桥梁施工控制理论与方法,研制更加合理实用的软件,开发更加方便、精确的监测仪器设备,建立完善的桥梁施工控制系统仍是桥梁建设事业发展的迫切需要。

第二节 桥梁施工控制的工作内容

桥梁施工控制的任务就是要确保在施工过程中桥梁结构的内力和变形始终处于容许的安全范围内,确保成桥状态(包括成桥线型与成桥结构内力)符合设计要求。桥梁施工控制围绕上述控制任务而展开,不同类型的桥梁,其施工控制工作内容不全相同,但从总体上来看,包括以下几个方面。

一、几何(变形)控制

不论采用什么施工方法,桥梁结构在施工过程中总要产生变形。结构的变形受到诸多因素的影响,会使桥梁结构在施工过程中的实际位置(立面标高,平面位置)偏离预期状态,甚至

导致桥梁难以顺利合拢,或造成成桥线形与设计目标不符。桥梁施工控制中的几何控制就是使桥梁结构在施工中的实际状态与预期状态之间的偏差控制在容许范围内,成桥线形状态符合设计要求。

与桥梁工程质量的优劣需用其质量检验评定标准来检验一样,施工控制的结果也需有一定的标准,即用偏差容许值来评判。偏差容许值与桥梁的规模、跨径大小、技术难度等有关,目前还没有统一规定,常根据具体桥梁的施工控制需要来确定。同时,为保证几何控制总目标的实现,每道工序的几何控制偏差的允许范围也需事先确定出来。下面根据一些桥梁施工控制的实例,列出目前几种主要桥型常见施工控制指标(表 6-1~表 6-3),供参考。

悬臂浇筑预应力混凝土连续梁桥、连续-刚构桥偏差限值(mm) 表 6-1

控制项目	成桥后线形	合拢相对高差	轴 线
控制偏差限值	± 50	± 30	按施工技术规范(JTJ 014—89)执行

混凝土斜拉桥偏差限值(mm) 表 6-2

索塔	控制项目	轴线偏位	倾斜度	塔顶高程
	控制偏差限值	± 10	$< H/2500$ 且 < 30	± 10
主梁(悬浇时)	控制项目	轴线偏位	合拢高差	线形
	控制偏差限值	± 10	± 30	± 40
主梁(悬拼时)	控制项目	轴线偏位	拼接高程	合拢高差
	控制偏差限值	± 10	± 10	± 30

悬索桥施工控制偏差限值(mm) 表 6-3

索塔	控制项目	轴线偏位	倾斜度	塔顶高程	
	控制偏差限值	± 10	$< H/2500$ 且 < 30	± 10	
主缆线形	控制项目	基准索标高	基准索股高差	索股标高	主缆标高
	控制偏差限值	± 20	± 10	± 10	± 50
索夹安装	控制项目	纵横向偏位	纵向位置	横向扭转	
	控制偏差限值	± 20	± 10	± 6	
索鞍偏移、 高程	控制项目	纵横向位置	标高	中线偏差	高程偏差
	控制偏差限值	± 10	± 20	± 2	± 20

注:表 6-2、表 6-3 中 H 为索塔高度。

二、应力控制

桥梁结构在施工过程中以及在成桥状态的受力情况是否与设计相符合是施工控制要解决的重要问题。通常通过结构应力的监测来了解实际应力状态,若发现实际应力状态与理论计算应力状态的差别超限就要进行原因查找和调控,使之控制在允许范围之内。一旦结构应力超出允许范围,轻者会给结构造成危害,重者将会发生结构破坏。所以,它比变形控制显得更加重要,因此必须对结构应力实施严格监控。应力控制的项目和限值目前尚无明确的规定,需根据实际情况确定,通常包括以下几个方面。

1. 结构在自重下的应力;
2. 结构在施工荷载下的应力;
3. 结构预加应力;

4. 斜拉桥拉索张力;
5. 悬索桥主缆、吊杆拉力,中下承式拱桥吊杆拉力;
6. 温度应力,特别是大体积基础、墩柱的温度应力;
7. 其他应力,如基础变位、风荷载、雪荷载等引起的结构应力。
8. 施工设备如支架、挂篮、缆索吊装系统等应力。

三、稳定控制

桥梁结构的稳定性关系到桥梁结构的安全,它与桥梁的强度有着同等的甚至更重要的意义。桥梁施工过程中不仅要严格控制变形和应力,而且要严格地控制施工各阶段结构构件的局部和整体稳定。桥梁的稳定安全系数是衡量结构安全的重要指标,但现行规范中尚未详细列出各种结构在不同工况下的最小稳定系数,有待进一步完善。目前主要通过稳定分析计算,并结合结构应力、变形情况来综合评定、控制其稳定性。此外,除桥梁结构本身的稳定性必须得到控制外,施工过程中所用的支架、挂篮、缆索吊装系统等施工设备的稳定性也应满足要求。

四、安全控制

桥梁施工过程中安全控制是桥梁施工控制的重要内容,桥梁施工安全控制是上述变形控制、应力控制、稳定控制的综合体现。变形控制、应力控制、稳定控制取得了成效,安全控制也就得到了保障。结构型式不同,直接影响施工安全的因素也不一样,在施工控制中需根据实际情况,确定其安全控制重点。

第三节 桥梁施工控制的理论与方法简介

一、现代控制论简介

控制论作为一门技术科学,在过去的几十年中取得了长足的进展,其发展过程大体上可分为三个阶段。第一代控制理论指经典控制理论,经典控制理论是指 20 世纪 60 年代前逐步发展起来的控制理论,其主要研究对象是具有单输入单输出的单变量的线性系统。系统的分析的主要工具是传递函数,系统的动态性能主要决定于传递函数所对应的零点与极点的分布情况,属于频域分析的范畴。第二代控制理论指现代控制理论。现代控制理论通常是指 20 世纪 60 年代以后迅速发展起来的控制理论,其研究的对象主要是多输入、多输出的多变量系统,这类系统可以是线性的,也可以是非线性的;可以是定常的,也可以是时变的。系统的数学模型描述主要采用状态方程,系统的动态性能主要决定于状态方程的解,系统的分析与综合主要采用状态空间分析法,属于时域分析的范畴。第三代控制理论指大系统理论和智能控制理论,大系统的主要特点是包含若干个子系统,如大型电力网、大型通信网、大型交通网、大型土建工程等,这些子系统通过控制中心协调工作,采用多级递阶控制以实现多指标综合最优化。所谓大系统就是规模十分庞大的系统。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,并形成了很多独立的分支,如反馈控制、最优控制、自适应控制、模糊控制等,目前,应用最广泛的是最优控制理论。一般地,系统是线性的、定常的、随机的、具有多个输入输出变量,在进行控制时常常涉及到系统状态的最优估计与预报、最优控制向量的大小、系统辨识等问题,桥梁施工控制也具有这些特点。以较为

常用的随机最优控制为例,其控制框图如图 6-1 所示,控制的基本理论可归纳如下。

最优控制问题是在已知系统的状态方程、初始条件以及某些约束条件下,寻求一个最优控制向量,使系统的状态或输出在控制向量作用下满足某种准则或使某一性能指标达到最优值。根据数学模型的不同,最优控制问题可分为确定性的最优控制问题和非确定性的最优控制问题。确定性的最优控制问题是指控制对象的运动规律可以用确定的数学模型来描述。这是现代控制理论中发展较为成熟的一部分,其核心内容是控制对象在性能指标最优的条件下,求解系统控制向量与状态变量之间的变化规律。找到了这个规律,也就找到了实现最优控制的途径。非确定性的最优控制问题也称为随机控制问题。这类问题特点是控制对象的输入与输出量测中均存在的随机的噪声干扰,即数学模型中含有随机变量,解决这类问题,需要用概率论与随机过程理论等数学工具。对于随机最优控制,根据分离原理,控制可以分为确定性最优控制和状态向量的最优估计两部分串联而构成,最优控制器只与状态向量和目标函数有关,而与随机干扰、量测噪声和初始状态无关,最优估计只与随机干扰、量测噪声和初始状态有关,而与控制向量无关。

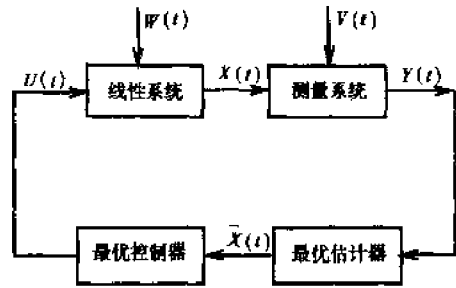


图 6-1 随机最优控制实施框图

一般地,线性定常随机最优控制系统的数学描述如下。

$$\text{状态方程} \quad \dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + W(t) \quad (6-1)$$

$$\text{量测方程} \quad Y(t) = C(t)X(t) + V(t) \quad (6-2)$$

式中: $X(t)$ ——状态向量;

$U(t)$ ——控制向量;

$W(t)$ ——随机干扰;

$Y(t)$ ——量测向量;

$V(t)$ ——量测噪声。

而 $A(t)$ 为系统特性矩阵, $B(t)$ 为控制作用分布矩阵, $C(t)$ 为量测矩阵。

$$\text{控制向量的约束条件} \quad U(t) \in \bar{U} \quad (6-3)$$

式中: \bar{U} ——一个封闭的点集合,称为控制域。

$$\text{初始条件为} \quad X(t_0) = X_0 \quad (6-4)$$

终值条件表示终止时刻 t_f 的状态,它可以是状态空间中的一个确定点,也可以是状态空间中的某一个目标集中的任一点,通常表示为

$$X(t_f) = X_f \quad (6-5)$$

指标函数也称性能指标。最优控制实际上是在某个性能指标下的最优控制,性能指标一般表示为

$$J = \phi[X(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} f(X(t), U(t), t) dt \quad (6-6)$$

式中第一项为终值性能指标,第二项为积分项性能指标。对于常见随机最优控制问题,性能指标可以进一步表示为

$$J = \frac{1}{2} E \left\{ \int_{t_0}^{t_f} [X^T(t) Q_1 X(t) + U^T(t) Q_2 U(t)] dt \right\} \quad (6-7)$$

式中: Q_1, Q_2 ——加权矩阵,反映了控制过程各变量的相对重要性;

$E\{\cdot\}$ ——数学期望。

可见随机最优控制就是系统的状态方程在给定初始条件 $X(t_0) = X_0$ 和随机干扰作用下,选择有约束或无约束的控制向量 $U(t)$,使 $X(t)$ 从初始状态出发,在时间区域 $[t_0, t_f]$ 中转移到目标集,并在沿着这条状态轨迹转移过程中,使性能指标取得极值,则称所选择的控制向量 U 为最优控制。一般地,最优控制问题的求解方法可采用庞特里亚金极大值原理和贝尔曼动态规划方法,所得到的最优控制向量为

$$U(t) = -L(t)\bar{X}(t) \quad (6-8)$$

式中: $L(t)$ ——控制增益矩阵;

$\bar{X}(t)$ ——状态向量的最优估计值。

即随机最优控制向量是状态向量最优估计值 $\bar{X}(t)$ 的线性函数,可以用简单的线性反馈来实现。一般地,如式(6-2)所示,量测到的状态变量信号总由有用信号 $X(t)$ 和量测噪声 $V(t)$ 混合组成,为此要进行状态向量的最优估计。最优估计值就是要从量测信号中去伪存真,求得最接近真实情况的估计值,解决最优估计的最常用的方法是卡尔曼滤波法。

在控制过程中,系统辨识也是一个经常遇到的问题。所谓系统辨识就是通过观测一个系统或一个过程的输入、输出关系来确定其数学模型的方法。在许多实际系统中,由于根据物理、化学定律而推导建立起来的所谓机理模型一般都比较复杂,用它不便于寻求一个最优控制方案,或者由于没有足够的有关系统及其环境的先验知识,因而无法确定其内部结构或参数大小,因此,面临的首要问题就是通过试验,量测系统的输入、输出,从中找出一个既简单又能最恰当地描述该系统特征的数学模型,这样才便于实现最优控制。系统辨识由数据、模型和准则三个要素构成,按照准则在一组模型中选择一个与数据拟合得最好的模型。系统辨识框图如图 6-2 所示。系统辨识的内容和步骤包括辨识准备、试验设计、模型选择与结构参数辨识、模型参数估计与验证。系统辨识的基本方法包括最小二乘法、极大似然法等。

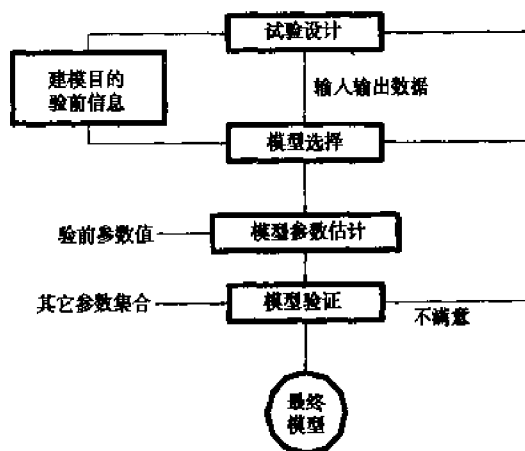


图 6-2 系统辨识基本原理图

除了上述提及的随机最优控制理论、系统辨识之外,现代控制论的其它一些分支如自适应控制、模糊控制、智能控制等理论也广泛地应用于工程实践,这部分的内容比较庞杂,可参见有关书目。

二、桥梁施工控制方法

桥梁施工是一个复杂的系统工程,桥梁施工的过程也就是该系统的运行过程,施工过程中结构的受力状态、安全性能和成桥状态是桥梁施工控制的目标,在整个施工过程中,受许多确定和不确定因素的影响,会使实际状态与理想目标状态之间存在一定的差异。因此,对施工状态进行实时监测、预测、调整,从而实现设计目标就成为桥梁施工控制的中心任务。一般地,桥梁施工控制是以上述现代控制论为理论基础,根据具体桥型特点,将结构内力、线形作为状态向量,将拉索或预应力钢筋张拉力等作为控制向量,控制流程大致可归纳如下。

1. 每一施工阶段(或节段)的结构内力、变形进行监控测量。测量的内容包括结构高程及线形的变化,结构主要截面的应力状态,主要材料试验结果如混凝土的弹性模量、容重等,主要施工设备的重量、位置等,对于斜拉桥、系杆拱还包括拉索索力。

2. 计算参数及结构状态的估计。需要估计的计算参数包括混凝土的弹性模量的变化规律、预应力损失、收缩徐变系数、构件日照温差的变化范围等,这些参数的估计可以采用基于结构静力分析的参数辨识方法。结构状态的估计是指从包含有量测误差的监控测量结果中进行状态向量的最优估计。

3. 结构模拟分析。通过结构倒退分析,基于计算参数的最优估计结果,计算出各施工阶段结构的理想目标状态,通过结构前进分析,计算出下一施工阶段(或节段)结构内力、标高的预测值。结构模拟分析一般采用专用的桥梁施工控制分析软件进行。

4. 比较各施工阶段(或节段)的目标状态与实际状态。如果二者的偏差超过事先确定的范围,根据前述控制论的基本理论和实际状态监控测量的结果,通过结构模拟分析计算,确定拉索或预应力钢筋张拉力、预抬高度等控制量调整方法和调整量值,以使实际状态与目标状态尽可能接近。

5. 对每一施工阶段(或节段),按照上述流程进行监控测量、状态估计、模拟分析、控制量调整,直至桥梁施工完成,使每一施工过程状态及成桥状态均接近目标状态。

随着桥梁结构形式、施工特点及具体控制内容的不同,其施工控制方法也不相同。总的来讲,桥梁施工控制可分为事后控制法、预测控制法、自适应控制法、最大宽容度法等,结合应用实例简述如下。

事后调整控制法是指在施工过程中,对已经施工完成的结构部分进行检查,当状态与设计要求不符时,即可通过一定手段对其进行调整,使之达到要求。这种方法仅适用于那些结构内力与线形能够调整的情况,斜拉桥就是其中的一种。事后调整根据具体情况又分两种。一种方法是施工过程中每个施工阶段(或节段)完成后,当发现结构状态与设计不符时,即可通过调整斜拉索力来调整结构状态,然后继续施工,直到施工完成。这种方法工作量很大,并且索力调整本身也较麻烦,调整效果也不一定好。另一种方法是在桥梁结构形成后,检查结构状态,如果与设计不符,则可对斜拉索力进行一次性调整。这种方法从理论上讲也是可行的,但实施较困难。因对施工过程中的结构内力状态不清楚,容易出现安全事故,且最终的线形往往难以达到理想状态。所以,事后调整不是一个好的控制方法,只能算是一个补救措施。

预测控制法是指在全面考虑影响桥梁结构状态的各种因素和施工所要达到的目标后,对结构的每一个施工阶段(节段)形成前后的状态进行预测,使施工沿着预定状态进行。由于预测状态与实际状态间免不了有偏差存在,某种偏差对施工目标的影响则在后续施工状态的预测时予以考虑,以此循环,直到施工完成和获得与设计相符合的结构状态。预测控制法是桥梁施工控制的主要方法。预测控制以现代控制论为理论基础,其预测方法常见的有卡尔曼滤波法、灰色理论法等,基本原理框图如图 6-3 所示。

自适应控制法也称为参数识别修正法。它是指在施工过程中,结构的某些设计参数如容重、弹性模量、混凝土的收缩徐变系数、摩阻系数等与实际情况不完全相符,系统不能按设计要求得到符合目标的输出结果。因此,可以通过系统辨识或参数估计,根据桥梁结构变形、应力等方面的实测结果与按照参数的初步估计值的理论计算结果的反复比较,来逐步逼近结构设计计算参数的真实值,不断地修正参数,使实际输出与目标值逼近,从而实现控制意图。图 6-4 所示为自适应施工控制流程。

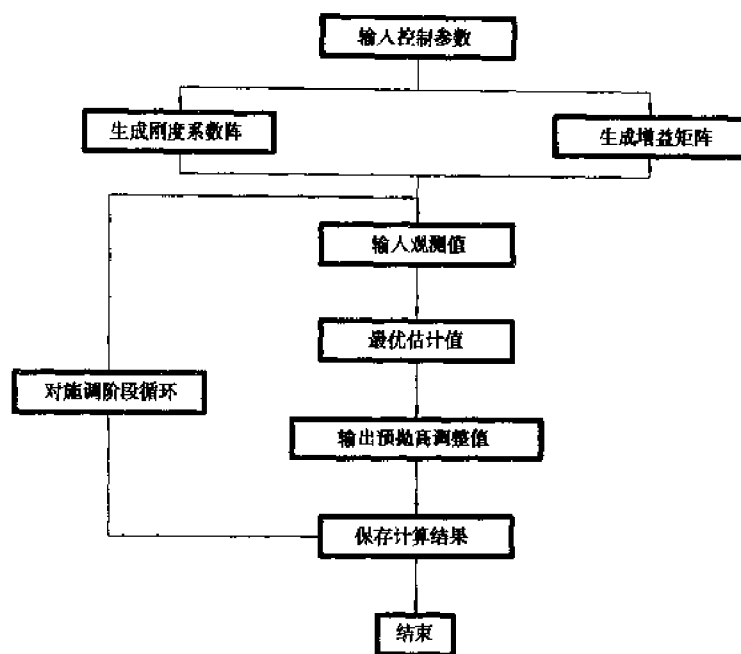


图 6-3 随机最优施工控制实施过程框图

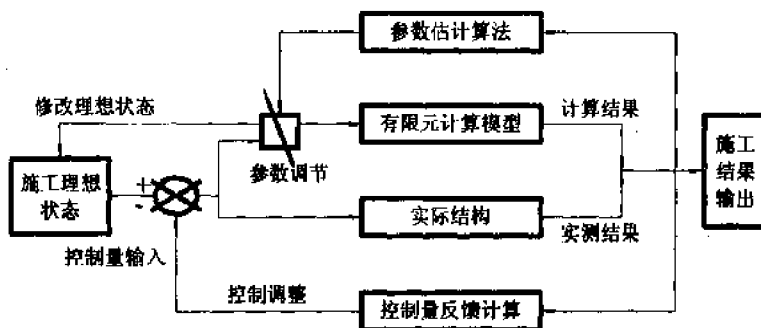


图 6-4 自适应施工控制实施框图

还有一种方法是在设计时给予主梁标高和内力最大的宽容度,即偏差的容许值。如某斜拉桥悬臂长为 215m,主梁线形设计的宽容度达 $\pm 15\text{cm}$,同时对每一节段的偏差也规定了限值范围,这种做法减小了控制难度。此外,当采用支架法施工时,支架安全控制则主要通过对支架应力、变形进行跟踪监测,并将其监测值与相应计算值比较,判断是否在安全范围内,若有异常出现,则暂停施工,查找原因,确保施工安全。

三、影响桥梁施工控制的因素

大跨度桥梁施工控制的主要目的是使施工实际状态最大限度地与设计理想状态相吻合。要实现上述目标,就必须全面了解可能使施工状态偏离理想设计状态的所有因素,以便对施工实施有的放矢的有效控制。一般说来,影响桥梁施工控制的因素主要有以下几方面。

1. 结构参数

不论何种桥梁的施工控制,结构参数都是必须考虑的重要因素。结构参数是施工控制中结构施工模拟分析的基本资料,其准确性直接影响分析结果的准确性。事实上,实际桥梁结构参数一般是很难与设计所采用的结构参数完全吻合的,总是存在一定的偏差,施工控制中如何

恰当地计入这些偏差,使结构参数尽量接近桥梁的真实结构参数,是首先需要解决的问题。结构参数主要包括:

(1)结构构件截面尺寸。任何施工都可能存在截面尺寸误差,验收规范中也允许出现不超过限值的误差,而这种误差将直接导致截面特性误差,从而直接影响结构内力、变形等的分析结果。所以,控制过程中要对结构尺寸进行动态取值和误差分析。

(2)材料弹性模量。结构材料弹性模量和结构变形有直接关系,对通常遇到的超静定结构来讲,弹性模量对结构分析结果影响更大。但混凝土结构的弹性模量总会与设计采用值产生偏差,所以,在施工过程中要根据施工进度经常性地进行现场抽样试验,特别是在混凝土强度波动较大的情况下,应随时对材料弹性模量的取值进行修正。

(3)材料容重。材料容重是引起结构内力与变形主要因素,施工控制中必须要计入实际容重与设计取值间可能存在的偏差,特别是混凝土材料,不同的集料与不同的钢筋含量都会对容重产生影响,施工控制中必须对其进行准确估计与识别。

(4)材料热膨胀系数。热膨胀系数的准确与否也将对施工控制产生影响,尤其是钢结构要特别注意。

(5)施工荷载。施工荷载对受力与变形的影响在控制分析中是不能忽略的,一定要根据实际取值。

(6)预加应力。预加应力是预应力混凝土结构内力与变形控制时要考虑的重要结构参数,但预加应力值的大小受很多因素的影响,包括张拉设备、管道摩阻、预应力钢筋断面尺寸、弹性模量等,施工控制中要对其取值偏差做出合理估计。斜拉桥索力直接影响结构变形与受力,了解各阶段真实索力是非常必要的。

2. 施工工艺

施工控制是为施工服务的,反过来,施工工艺的好坏又直接影响控制目标的实现,除要求施工工艺必须符合施工规范要求外,在施工控制中尚须计入构件制作、安装等方面的误差。

3. 施工监测

监测包括结构温度监测、应力监测、变形监测等,是桥梁施工控制最基本的手段之一。由于测量仪器仪表、测量方法、数据采集、环境条件等因素的影响,施工监控测量结果会存在误差。该误差一方面可能造成结构实际参数、状态与目标值吻合较好的假象,也可能造成将本来较好的状态调整得更差的情况,所以,保证测量的可靠性对施工控制极为重要。在控制过程中,除要从测量仪器设备、方法上尽量设法减小测量误差外,在进行控制分析时还应进行结构状态监控测量结果的最优估计。

4. 结构分析计算模型

无论采用什么分析方法和手段,总是要对实际桥梁结构进行简化,建立计算模型。这种简化使分析计算模型与实际结构受力情况之间存在误差,包括各种假定、边界条件处理、模型化的本身精度等。施工控制时需要在这方面做大量工作,必要时还要进行专门的试验研究,以使计算模型误差所产生的影响减到最低限度。

5. 温度变化

温度变化对桥梁结构的受力与变形影响很大。在不同时刻对结构状态(应力,变形状态)进行量测,其结果是不一样的。温度变化相当复杂,包括季节温差、日照温差、骤变温差等方面,而在原定控制状态中又无法预先知道温度实际变化情况,通常在控制实施过程中是将控制

理想状态定位在某一特定温度条件下进行模拟分析和结构状态监控测量,从而将温度变化不确定性剔除。

6. 混凝土的收缩徐变

对混凝土桥梁结构而言,材料收缩、徐变对结构内力、变形有较大的影响,当采用悬臂浇筑施工方法时,这一点比较突出,这主要是由于悬臂浇筑施工时各节段混凝土龄期、应力水准和加载持续时间相差较大,在施工控制时可采用参数辨识或模型试验方法来确定收缩徐变参数,以期采用较为合理的、符合实际的收缩、徐变计算模型。

7. 施工管理

施工管理好坏不仅直接影响桥梁施工质量、进度,也会影响施工控制的顺利进行。以悬臂浇筑施工的混凝土连续梁、连续刚构桥为例,如果两相对悬臂施工进度存在差别,就必然使两悬臂在合拢前等待不同的时间,从而产生不同的徐变变形,由于徐变变形较难准确估计,所以容易造成合拢困难。

四、桥梁施工控制系统

如前所述,影响桥梁施工控制的因素很多,牵涉到方方面面,要使桥梁施工安全、顺利地向前推进,达到预期的控制目标,就必须建立完善、有效的控制系统。

桥梁施工控制系统的功能要根据不同的工程施工实际情况来考虑,但不论是哪种类型的桥梁施工控制系统,都必须具备管理与控制的功能,即施工控制系统一般应由施工管理系统与现场控制系统两个分系统组成,而各分系统又由多个子系统组成。图 6-5 为桥梁施工控制系统框图。其中,施工现场控制分系统是整个施工管理、控制系统的核心,具有数据比较、结构当前状态估计、误差分析、参数识别、前进或倒退结构分析、未来状态预测等功能,施工现场控制分系统的流程框图如图 6-6 所示。

在现场施工时,首先将由设计计算确定的各施工阶段的施工控制目标数据送入施工现场控制分系统,然后在当前施工阶段完成后的现场监测数据进行判别与滤波处理后,将其也送入施工现场控制分系统,该系统则对两方面的数据信息进行分析处理,最后输出有关信息数据供施工控制决策时参考。施工现场控制分系统通常由以下几个子系统组成。

1. 施工控制分析子系统

施工控制分析子系统必须具有很强的适应性、可操作性和可视性,以满足施工过程中结构逐步变化的要求,一般应能够快速、准确地完成结构施工过程的模拟分析,它是判别当前结构实际状态是否与目标状态相符合以及对未来状态进行预测的工具。用于施工控制分析的软件宜将计算结果数据转换成几何图形图像信息,以显示相应施工过程的结构内力与变形状态,形象地比较所控制项目的实测值、目标计算值以及参数的变化。

2. 参数识别子系统

参数识别子系统包括结构参数敏感性分析和结构参数识别计算分析两个子系统。结构参数敏感性分析是考察各参数对结构状态的影响程度,通过参数敏感性分析,将参数分类,确定

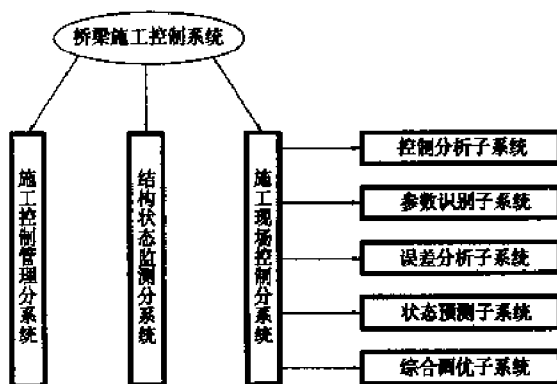


图 6-5 桥梁施工控制系统框图

出主要影响参数和次要影响参数,为参数识别打下基础。结构参数识别就是对结构参数进行分析、判定与确认,通过参数识别确定出结构参数的真实值,为准确地进行结构分析提供可靠数据。

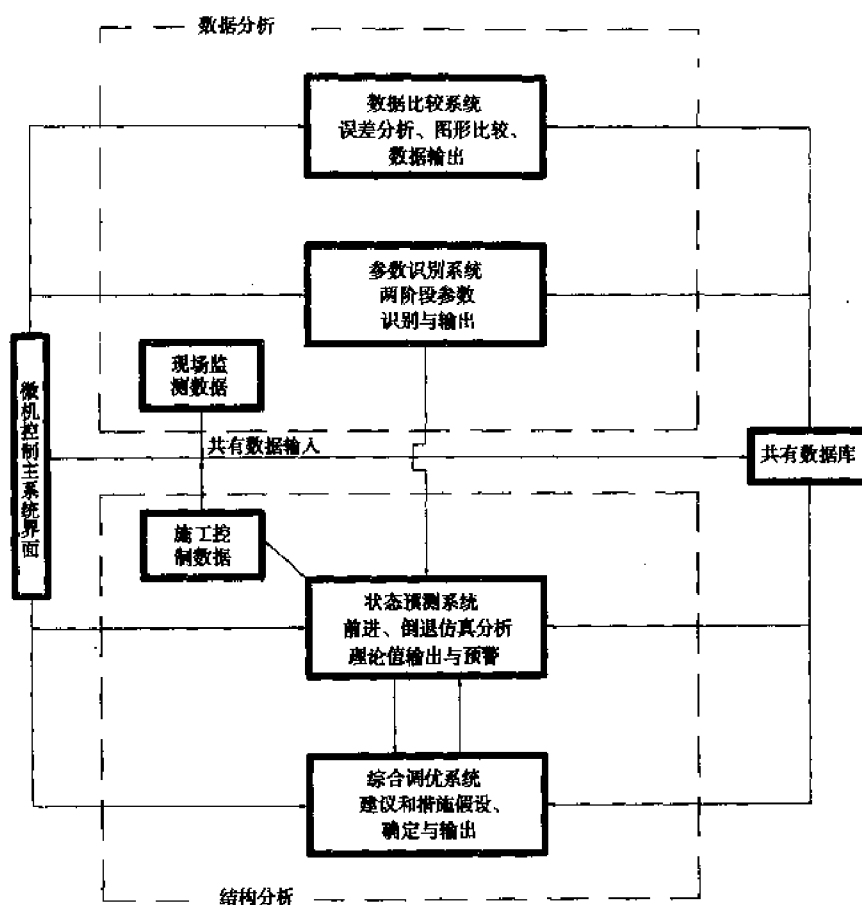


图 6-6 施工现场控制分系统的流程框图

3. 误差分析子系统

施工过程中总是存在误差,这些误差会使实际施工状态偏离理想状态和控制目标。该系统主要功能是对结构理想状态、实测状态和误差信息进行分析,选择最佳调整方案,使结构施工实际状态、设计理想状态的差值控制在允许范围内。

4. 状态预测调整子系统

该子系统的功能是在计入结构参数调整修改值、结构前一阶段状态最优估计值、结构施工误差、量测误差等信息后,通过控制模拟分析系统对结构施工状态确定出下一阶段的校正控制值,并通过修改施工方案予以实现。

5. 桥梁结构施工状态监测子系统

该系统包括对结构设计参数进行监测以及对结构状态(包括应力、变形或标高)参数进行量测两个子系统。前者主要是为控制模拟分析提供合理的基本参数,后者提供了结构实际状态参数,并由此判断当前施工状态是否与设计目标值相符合。

总之,桥梁施工控制是一个系统工程,牵涉的面很广,要有效地实施施工控制,就必须注重施工管理,注重控制实现的准确性与及时性,建立完善的控制系统和制订实施细则,并在实施中根据实际情况进行调整,否则施工控制很难取得预期的成效。

第四节 桥梁结构长期监测与健康诊断技术

自从 20 世纪 50 年代以来,人们就意识到桥梁安全监测的重要性。早期的监测主要针对桥梁结构的长期内力变形、基础的沉降等问题,涉及的内容比较单一,技术手段也以测量学方法为主,所以应用范围受到了一定的限制。近年来随着大跨桥梁的建设,桥梁结构性能的长期监测与健康诊断技术受到了国内外学术界、工程界的广泛重视,也在一些大跨度桥梁建设和运营过程中进行了有益的尝试,如丹麦对 Farø 斜拉桥、Great Belt East 悬索桥进行了施工阶段及通车后的监测;挪威在主跨 530m 的 Skamsundet 斜拉桥所安装的全自动数据采集系统已能对加速度、倾斜度、应变、温度、位移进行自动监测;我国的青马大桥、虎门大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥等在施工阶段已安装设置了传感设备,以备运营期间的实时监测。桥梁结构性能的长期监测与健康诊断技术的应用将起到确保桥梁运营安全、延长桥梁使用寿命的作用,同时能够较早地发现桥梁病害以利及时维修养护,降低桥梁的维修费用,并避免桥梁大修时关闭交通所引起的重大损失。以下就对桥梁结构内力变位的长期监测与健康诊断系统做一简要介绍。

一、桥梁内力(应力)变位的长期监测

在桥梁结构的使用过程中,由于受地质情况复杂、地下水位变化、混凝土收缩、徐变、温度变化、桥梁周边施工、使用荷载增大等种种因素的影响,桥梁结构的内力(应力)会发生变化,基础会产生沉降或变位,桥梁结构的线形或平面位置会产生变化,对于静定结构,这些变化往往引起桥面线形不顺畅,影响行车的舒适性;对于超静定结构,这些变化不仅会引起桥面线形不顺畅,而且会导致桥梁结构实际受力状况恶化,导致附属设施的破坏。就长期监测内容而言,其范围比较广,如超静定结构由于徐变而产生的内力、变形的变化,混凝土结构的裂缝开展情况、桥梁基础的沉降变位等;就重要性而言,上述因素对桥梁结构的影响是长期的、严重的,甚至会危及桥梁结构的安全使用,因此必须通过相应的监测方法、监测手段,掌握上述因素的变化规律、发展趋势以及其对桥梁结构受力状态、使用性能的影响程度。以较为常见的桥梁基础沉降或桥梁变位为例,以下对桥梁内力(应力)变位的长期监测的方法作一简要介绍。

所谓桥梁基础沉降或桥梁变位的长期监测,是指针对桥梁的某些几何变量、在一个较长的时间段内按照预定计划进行若干次测量、比较、分析的过程。目前,对于基础沉降和桥面线形的监测,一般常采用测量学方法,根据实际情况,按照测量学变形观测的基本理论,建立相应的观测网点和测量路线,利用全站仪、精密水准仪、测距仪、GPS 全球定位系统等测量仪器设备,在独立假定的坐标系中,测量桥梁变位控制点的坐标。然后,通过对各次测量所得出的桥梁变位控制点坐标比较,分析判断桥梁结构长期变位的发展趋势;通过结构计算分析,得出由长期变位所产生的结构内力、应力增量。综合上述两个方面及设计内力、配筋等结构基本情况,就可以宏观判断桥梁结构的安全性能,提出相应的处理措施或荷载限制建议。在进行基础沉降和桥梁变位的长期监测时,除遵循测量学变形观测的基本原则之外,尚应注意以下几个问题。

1. 控制基准网与桥梁变形控制点布设

控制基准网应由 4~6 个以上的基准点组成,以构成若干个大三角形。基准点应布置在桥梁以外的适当范围内,并与桥梁变形控制点具有良好的通视条件。在整个监测过程中,应定期对基准网进行检查,确保各基准点固定不变。

桥梁变形控制点的设置应根据桥梁结构的实际情况和观测目的来确定。变形控制点可以

是相对高程观测点,可以是平面相对位置观测点,也可以是二者的结合,视桥梁结构具体情况和观测目的而定。一般说来,变形控制点应设在桥梁墩台基础等引起桥梁其它部位变位的部位;或设置在桥跨跨中、 $L/4$ 、 $3L/4$ 等变形较大的部位;对于斜拉桥、悬索桥,还应在索塔塔顶设置变形观测点。此外,为保证观测精度,尚应设置一些校核测点。变形测点宜采用强制归心标志,固定在易于保存的部位,必要时还要采取一些保护措施,以确保其在整个观测过程中相对于桥梁稳定不变。

2. 监测期限与监测安排

桥梁基础沉降和桥面变位长期监测的时间长度、观测时间间隔、观测安排等方面应根据所监测对象的特点及外部条件来确定。一般说来,监测由地质情况、地下水位变化、混凝土收缩徐变、温度变化等因素引起的桥梁变位时,监测的时间长度应在 1 年以上,以便能够较为准确地分析各影响因素的影响程度,排除一些次要因素,采取相应的对策。同时,只有确认由上述因素引起的变位已经基本稳定不变时,监测工作方可终止。监测由桥梁周边施工、使用荷载增大等因素引起的桥梁变位时,检测的时间长度可根据具体情况来确定。对于一些危桥、病桥的长期监测,监测的时间长度宜适当延长。至于观测时间间隔、观测安排,应根据桥梁结构的实际情况、外部条件和监测费用等方面来统筹考虑,一般地,由变化时限长的影响因素如年温差所引起的变位观测宜安排得稀疏一些,观测时间间隔宜长一些;而那些变化时限较短的影响因素所引起的变位观测宜安排得密集一些,观测时间间隔宜短一些。

3. 量测制度

(1)在整个观测过程中,所采用的仪器设备均应定时进行检查校验。

(2)在整个观测过程中,每次观测均采用相同观测线路,采用同一仪器设备,测量人员应固定不变。

(3)对于监测期限在 1 年以上的情况,量测时间安排应涵盖季节温湿变化、水文变化的各种极端情况。

(4)对于监测期限在 2 年以上的情况,每年相同季度、月份的观测条件应基本相同,以便观测结果的比较分析。

(5)每次测量应在夜间进行,以消除温度的影响。

(6)在整个观测过程中,如通过前一阶段的观测,发现监测桥梁的变位有突然变化时,应加密测量次数、增加测点布置。

总的说来,桥梁基础沉降和结构变位的长期监测要根据实际情况灵活地确定监测计划,以便有的放矢,以下简要介绍一个监测实例。某三跨桁架拱桥拓宽时在旧桥两侧各修建一座新桥,新桥选用了与旧桥相同的跨径布置,旧桥为扩大基础,埋深较浅,新桥为桩基础,新桥基础距旧桥基础最小距离为 2.0m。同时,受交通状况及施工场地的制约,在新桥施工全过程中,旧桥要继续通行车辆;在新桥上部结构施工期间,旧桥上堆放了大量的施工机械和施工材料。为确保旧桥的安全,在新桥施工期间对旧桥进行了变位的中长期监测。在 140d 监测期限内,共进行了 29 期平面变位测量、78 期沉降测量工作。变形观测基准网设置在旧桥的四周,8 个变形测点设置在旧桥的桥墩、桥台上,如图 6-7 所示。为了提高观测精度,基准点与变形测点之间的距离均在 100m 以内,所有平面基准点均采用带有强制归心装置的混凝土观测墩,所有变形测点均安置强制归心装置,并采用铜质标心。

在监测实施时,按照二等变形测量要求,高程基准网布设成闭合水准路线,每段水准路线均进行往返观测。水平变位测量采用电子全站仪进行观测,各测站的水平方向、边长均观测 6

测回,确保每期观测的各项技术指标均符合规范要求。此外,为了检核基准网的稳定性,在监测过程中,对基准网进行了6次观测,确保基准网稳定不变。

考虑到施工荷载对旧桥各变形观测点影响较大,监测时根据旧桥内力分析计算结果,得出了不均匀沉降、变位的最大限值,提出了新桥上部结构施工期间旧桥的通行荷载和施工荷载限制建议。监测结果表明:荷载限制措施是有效的,新桥施工期间旧桥未发现异常情况,各变形观测点的累积最大沉降、最大水平位移量分别为4.1mm、12.2mm,两墩台之间的累积最大不均匀沉降量为1.7mm,最大不均匀水平位移为4.3mm,新桥施工期间旧桥是安全的。

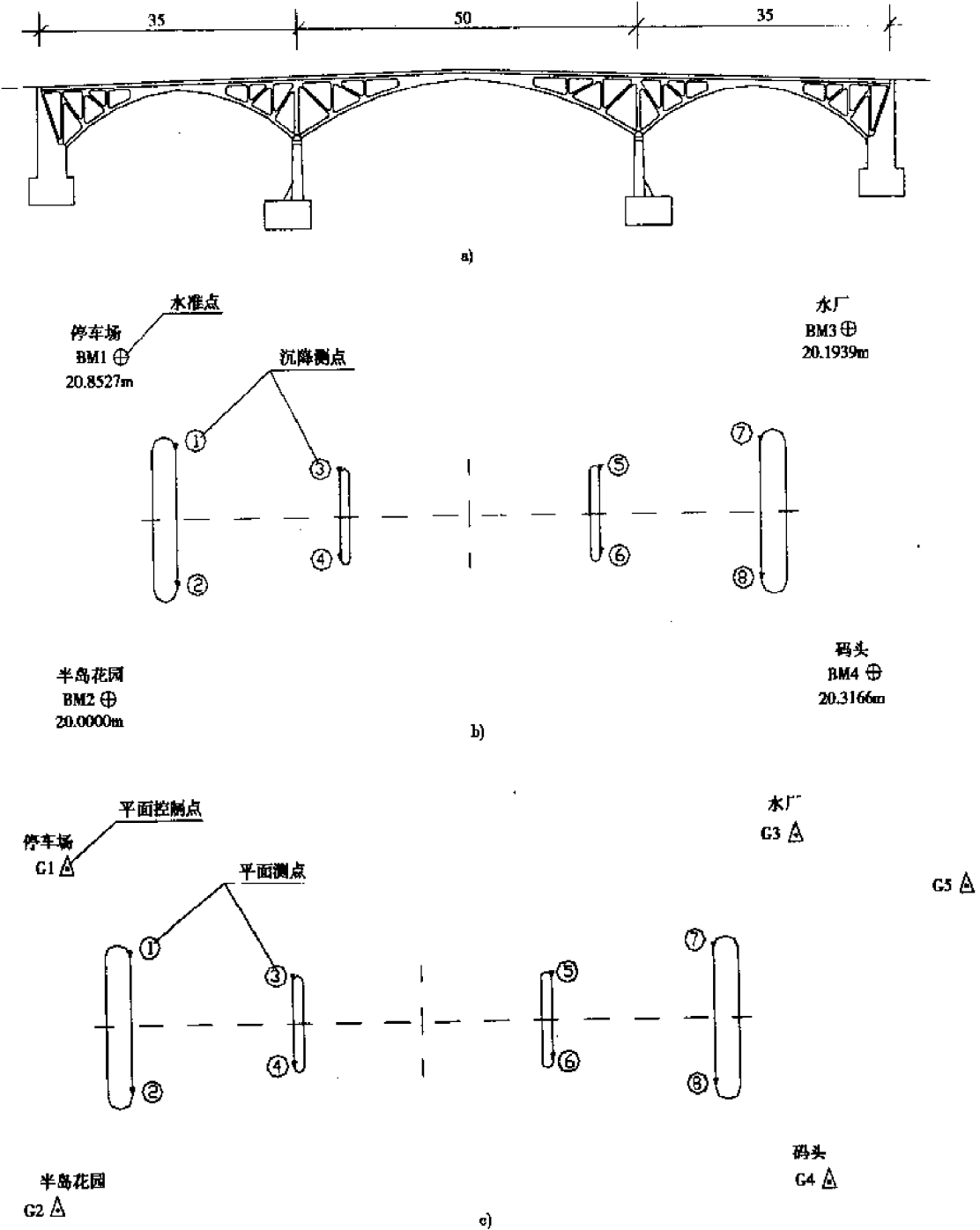


图 6-7 某桥长期监测基准网及变形控制点的布置

a) 监测桥梁立面布置(单位:m); b) 沉降测点与高程控制网; c) 水平变位测点与平面控制网

二、桥梁结构健康诊断简介

随着大跨桥梁的建设,桥梁结构性能的健康诊断技术得到了迅速地发展。所谓健康诊断系统,是指利用一些设置在桥梁关键部位的传感器、测试元件、测试仪器,实时在线地量测桥梁结构在运营过程中的各种反应,并将这些数据传输给中心控制系统,按照事先确定的评价方法与反应限值,实时地评价诊断桥梁结构的健康状况,必要时提出相应的处理措施,并在极端情况下(如台风、地震)给出警示信号或关闭交通。目前,桥梁结构健康诊断技术主要用于大跨度重要桥梁,是传统长期监测技术的发展和延伸,它的特点表现在:监测内容广泛全面,测试、诊断、评估实现了自动化,能够实时发现桥梁病害或不良反应并及时进行处理。桥梁结构性能的健康诊断技术不仅是保证大跨度桥梁的安全运营的重要手段,而且可以修改、完善大跨度桥梁的设计理论与设计规范,降低大跨度桥梁的维修费用,因此具有重大理论意义。

一般说来,桥梁健康诊断技术的内容包括以下几个方面。

1. 桥梁荷载实时在线监控。监控内容包括风荷载、地震、温度和交通荷载。所使用的传感器大致有:风速仪,记录风向、风速,连接数据处理系统后可得风功率谱;温度计,记录温度、温度差时程历史;动态地秤,记录交通荷载流时程历史,连接数据处理系统后可得交通荷载谱;强震仪,记录地震作用;摄像机,记录车流情况和交通事故。

2. 几何变位监测。采用位移计、倾角仪、GPS、电子测距器、数字像机等工具,监测桥梁各部位的静态位置和静位移,如索塔的水平变位和倾斜度、主缆和加劲梁的线形变化、支座和伸缩缝的相对位移等。

3. 结构反应监测。如采用应变仪记录桥梁主要受力构件的应变历程,以得到构件疲劳应力循环谱;采用测力计记录拉索、吊杆的张力历史;用拾振仪记录桥梁结构各部位的动态反应如加速度、振幅,分析监测结构的动力特性。

4. 建立桥梁结构状态的数据库。根据大量的、全面的监测数据结果,建立、更新桥梁结构性能、结构状态的数据库,利用模态分析技术,实时评估结构的损伤位置、程度、性质。

桥梁健康监测系统在采集到上述数据后,进行数据的分析处理,根据具体桥梁的特点,按照给定的评价方法与反应限值,实时地、合理地评估桥梁目前状态,评价诊断桥梁结构的健康状况。在突发性极端事件(如地震、台风)发生后,能够全面、快速的识别出结构损伤损坏程度,进行结构性能的全面评估,必要时提出相应的处理措施,以便采取交通管制措施或确定维修加固对策。

目前,桥梁健康诊断系统尚在进一步发展中,也仅用于大跨度重要桥梁。可以相信,随着技术的进步和人们对桥梁使用状况的重视,桥梁健康诊断监测技术必将会得到快速发展和广泛应用。

第七章

误差分析与数据处理

WUCHAFENXIYUSHUJUCHULI

第一节 测定值的误差

一、误差的产生与种类

通过试验,可得到表达试验结果的一系列数据,但是,在大多数情况之下,这些未经分析与处理的试验数据往往具有一定的离散性,很难用来说明问题。因此,应根据测试方法和试验对象的性质对测试数据进行分析与处理,使其能最大限度地发挥作用,这在整个试验工作中是十分重要的。

在试验中,由于测试方法、测试仪表、周围环境(如温度、湿度等)、测试人员的熟练程度以及感官条件等因素的影响,使被测量(如应变、应力和位移等)的测定值与其客观存在的真值之间总会有一定的差异存在,这种由多因素影响所造成的测定值与其真值不一致的矛盾,在数值上的表现即为误差

$$\text{误差} = \text{测定值} - \text{真值} \quad (7-1)$$

尽管误差的产生是不可避免的,但是随着科学技术的提高,人们的经验、技巧和专门知识的丰富,在测试过程中误差可被控制得越来越小。对于某些因素引起的误差,可经过周密考虑与必要的准备,在测试过程中加以消除或减小,对于另一些因素引起的误差也可设法估计出它们的大小,然后对量测结果给予修正,对于不能确切估计出大小的误差,也应设法知道它们的可能的最大值,据以确定量测结果的可靠程度。

误差根据其性质、特点和产生原因,可分为三类。

1. 系统误差

系统误差由某固定不变的因素所引起的误差,它的出现具有一定的规律性,例如误差的大小与符号都不变。引起系统误差的主要原因有:

(1)测试仪器未经校准,刻度值偏大或偏小;再如砝码未经校准,应变仪的灵敏系数未经校准等。

(2)周围环境的改变,如外界温度、湿度及电磁场的变化等。

(3)个人的习惯与偏向,如读数常偏高或偏低。

由上可见,系统误差对测值的影响有固定的偏向和一定的规律性,因此可根据误差产生的具体原因采取适当措施予以消除或校正,例如对仪器校准、对环境进行控制,对结果进行修正

等。

2. 偶然误差

偶然误差又称随机误差,它是由不易控制的多种因素造成的误差,它的特点是有时大、有时小,有时正、有时负,没有固定的大小和偏向。因此无法在记录数据中将其消除或修正。但在多次重复量测中,它服从统计规律,即可以按概率论的方法给以合理处理。偶然误差的大小决定了测定值的精确度,因此,它是误差理论的研究对象。

3. 过失误差

这种误差的产生是由测试人的过失所引起的,如试验中粗心大意,精神不集中,操作方法不正确,计算错误等。只要认真仔细,正确操作,过失误差是可以避免的。

由此可知,上述第一、三种误差是可以消除的,而第二种误差即偶然误差是无法消除的,但它服从统计规律,因此,误差理论分析就是对偶然误差的规律性进行研究和探讨。

进行误差分析的目的在于解决以下两方面的问题。

(1) 已知个别测定值的误差,如何估计最终试验结果的误差。

(2) 根据试验目的和要求,如何确定个别测量时所需要的精度,也是采用何种精度等级的仪器才能达到测试的要求。

二、测定值的精确度与准确度

1. 真值与平均值

任何物理量的真值,由于各种条件的限制是无法测得的,所以,一般说来,真值是未知的。为了使真值这个概念具有现实意义,通常可将真值定义为:在无系统误差和过失误差的条件下,观测次数为无限多时的平均值即为真值。但在实践中不可能观测无限多次,而只能是有限次,对于有限次观测值的平均值只能是近似真值或最佳值,称此最佳值为平均值。常用的平均值有算术平均值和加权平均值两种,其中算术平均值为最佳值。

(1) 算术平均值

设 x_1, x_2, \dots, x_n 代表各次观测值, n 表示观测次数,则算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (7-2)$$

算术平均值表达了观测值的集中趋势,当观测值符合正态分布时,可以证明,在有限次测定中,算术平均值 \bar{x} 是真值的最佳近似值。观测次数 n 越大, \bar{x} 的精度越高,也越接近真值。然而,当 n 增加到一定程度时, \bar{x} 精度的提高就不显著了,所以在一般的测定中, n 很少大于 10,一般 $n = 3 \sim 5$ 即可。

(2) 加权平均值

设对同一物理量用不同方法去测定,或对同一物理量由不同人去测定,计算平均值时常对比较可靠的数值予以加重平均,称为加权平均。如 x_1, x_2, \dots, x_n 为各次的观测值, W_1, W_2, \dots, W_n 代表各观测值的对应权,则加权平均值为

$$\bar{W} = \frac{W_1 x_1 + W_2 x_2 + \dots + W_n x_n}{W_1 + W_2 + \dots + W_n} \quad (7-3)$$

各观测值的权数,在很多情况下是可以根据经验来确定的,权越大则说明对应的测定值越可信;反之,权越小则说明该测定值越不可信。

2. 精确度与准确度

精确度是指在某物理量的测试中,多次测量所得数据的重复程度,或者说是向某一中心趋向的集中程度。准确度则指观测值与真值的相符程度,两者越相符,准确度就越高。在一组观测数据中,尽管精确度很高,但准确度不一定很好;反之,若准确度好,则精确度不一定高。精确度与准确度的区别,可用下述打靶的例子来说明。

图 7-1 中表示三个射击成绩,他们射击的目标都是靶心,但结果却不相同。由图可见, A 的射击精度很高,弹着点很集中,可是准确度不够好。B 的射击成绩最差,精确度既不高,准确度也很差。C 的成绩最好,精确度和准确度都很高。

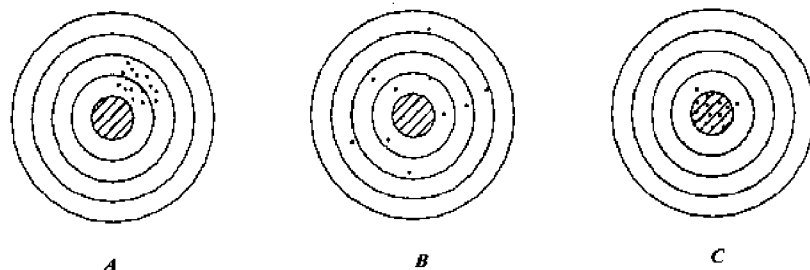


图 7-1 精确度与准确度的示意

A 的精确度高,重复性好,表明偶然误差小,但存在某些系统误差未被发觉,或者是由于枪械的准心没有校正(属于仪器未经校准的原因),或者是对风速估计不准(属环境影响),也可能是瞄准或姿势不正确(个人习惯和偏向)。由此可知,准确度是与系统误差联系在一起的,而精确度则与偶然误差联系在一起。

通常习惯于用误差来说明结果的准确度。设真值为 X ,观测值为 x ,则

绝对误差为:
$$\Delta x = x - X \quad (7-4)$$

相对误差为:
$$\epsilon = \frac{\Delta x}{X} = \frac{x - X}{X} \approx \frac{x - X}{X} \quad (7-5)$$

绝对误差说明误差的大小,相对误差说明了误差的比重或程度。可见,相对误差能更清楚地表达结果的准确度,相对误差越大则准确度越低。在绝大多数情况下,真值 X 不易得到,因此,绝对误差 Δx 和相对误差 ϵ 也不能确定。但是,往往可以肯定 Δx 的绝对值不超过某一个最大值 Δx_{\max} ,称为最大绝对误差,用绝对误差表示测定值时,可写成 $x \pm \Delta x_{\max}$,而最大相对误差为 $\epsilon_{\max} = \pm \Delta x_{\max} / \Delta x$,最大相对误差即通常仪器使用范围的误差。

第二节 测定结果的误差估计

一、多次测量结果的误差估计

由式(7-1)可知

$$\text{测定值} = \text{真值} + \text{误差}$$

或
$$\text{测定值} = \text{真值} + \text{系统误差} + \text{偶然误差}$$

在多次重复测定中,偶然误差是一随机变量,测定值也是随机变量。因此,可以用算术平均误差和标准差来表示,所用的离散样本即为各次观测值。

1. 算术平均误差

仍以 x_1, x_2, \dots, x_n 表示一组观测值, \bar{x} 为其算术平均值,则算术平均误差为

$$\delta = \frac{\sum |d_i|}{n} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7-6)$$

式中 n 为观测次数, d_i 为观测值与平均值的偏差, 在一组观测值中, 观测值与平均值之偏差 d_i 的代数和为零。即

$$\begin{aligned} d_1 &= x_1 - \bar{x} \\ d_2 &= x_2 - \bar{x} \\ &\dots\dots \\ d_n &= x_n - \bar{x} \end{aligned}$$

$$\text{相加则为 } \sum d_i = \sum x_i - n\bar{x}$$

$$\text{根据式(7-2), 有 } \sum x_i - n\bar{x} = 0 \quad \therefore \sum d_i = 0$$

算术平均误差是表示误差的一种较好的方法, 但这个方法对于大的偏差和小的偏差同样进行平均, 这就不能反映各观测值之间重复性的好坏。

2. 标准误差

标准误差也称为均方根误差, 它是衡量测定精度的一个数值, 标准误差越小说明测定的精度越高。在有限次观测情况下, 标准误差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (7-7)$$

很明显, 标准误差反映了观测值在算术平均误差附近的分散和偏离程度, 它对于较大或较小的误差反应比较敏感, 所以能很好地反映观测值的集中程度(精确度), 因而也是一种重要的误差表示方法。

为了使在观测次数不够多时, 应用误差理论处理数据有足够的准确度, 有人提出在计算标准误差时, 引入一个修正系数 c , 即

$$\sigma = c \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (7-8)$$

其中 c 的选取与观测次数 n 有关, 见表 7-1。由表可看出, 当观测次数 n 大于 10 时, 不再考虑修正系数 c , 所得结果仍相当可靠。

修正系数 C							表 7-1
n	2	3	4	5	6	7	10
c	1.48	1.21	1.14	1.11	1.08	1.06	1.04

3. 或然误差

或然误差 γ 的意义是指在一组观测值中, 若不计正负号, 误差大于 γ 的观测值和误差小于 γ 的观测值将各占其观测次数的一半, 也就是说, 落在 $+\gamma$ 和 $-\gamma$ 之间的观测次数占总观测数的一半, 可证明或然误差 γ 和标准误差 σ 、算术平均误差 δ 的关系为

$$\gamma = 0.6745\sigma = 0.8454\delta \quad (7-9)$$

在表示测定结果时, 除了要给出平均值外, 还应给出平均值的误差, 如用绝对误差表示时平均值的算术平均误差: $\bar{x} \pm \sigma$

平均值的标准误差: $\bar{x} \pm \sigma$

平均值的或然误差: $\bar{x} \pm \gamma$

测定结果也可用相对误差表示, 如

$$\bar{x} \pm \frac{\delta}{x} \times 100\%$$

$$\bar{x} \pm \frac{\sigma}{x} \times 100\%$$

$$x \pm \frac{\gamma}{x} \times 100\%$$

二、多次量测误差的分布

对于大量重复的测定来说,测定值的误差服从统计规律,其概率分布取正态分布形式,则误差的函数形式为

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (7-10)$$

式中: x 表示量测的误差, y 表示量测误差 x 出现的概率密度, σ 为标准误差。

图 7-2 是按上式给出的误差概率密度图,由图中可明显地看出。

1. 小误差比大误差出现的机会多,即小误差的概率大。

2. 大小相等而符号相反的误差出现的概率相等,故误差分布曲线对称于纵轴。

3. 极大的正负误差出现的概率非常小,故大误差一般不会出现。

4. 标准误差 σ 越小,曲线中部升得越高,两旁下降得越快,曲线突起,说明观测值集中;相反,当 σ 大时,曲线变得越加扁平,说明观测值分散。所以标准误差 σ 标志着一组数据的观测精度, σ 越小则精度越高; σ 越大则精度越低。

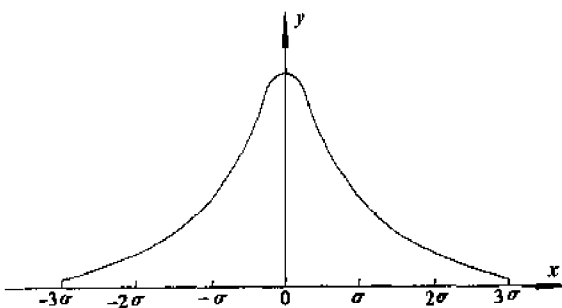


图 7-2 误差概率密度图

如欲确定误差在 $-x_1$ 与 $+x_1$ 之间的观测值出现的概率,则应在此区间内将 y 积分,即

$$Y = \int_{-x_1}^{+x_1} y dx \quad (7-11)$$

计算结果表明,误差在 $-\sigma$ 与 $+\sigma$ 之间的概率为 68%,在 -2σ 与 $+2\sigma$ 之间的概率为 95%,在 -3σ 与 $+3\sigma$ 之间的概率为 99.7%。一般情况下,99.7% 已可认为代表多次量测的全体,因此将 3σ 称为极限误差。如将某一多次量测的物理量记为 $\bar{x} \pm 3\sigma$,则可认为对该物理量所进行的任一次测定,都不会超过该范围。

三、可疑数据的弃取

在对某一量进行多次重复测定时,往往会遇到个别的观测值和其它多数观测值相差较大的情况,这种个别的数据即为可疑数据。对于可疑数据的保留或舍弃,应有一个科学的根据,既不能不加分析地一概保留,也不能草率地一律舍弃。只有在充分确认可疑数据是由于在测试过程中的某些过失原因所造成时,才将它舍弃。否则,应根据误差理论确定的数值来决定取舍。

根据误差的统计规律,绝对值越大的随机误差,其出现的概率越小;随机误差的绝对值不会超过某一范围。因此可以选择一个范围来对各个数据进行鉴别,如果某个数据的偏差超出

此范围,则认为该数据中包含有过失误差,应予以剔除。常用的判别范围和鉴别方法如下。

1.3 σ 方法

如前所述,在多次量测中,误差在 -3σ 与 $+3\sigma$ 之间时,其出现的概率 99.7%,在此范围之外的误差出现的概率只有 0.3%,也就是测量 300 多次才能遇到一次。而对于通常只进行有限次的测量,就可以认为超出 $+3\sigma$ 的误差已不属于偶然误差,而是系统误差或过失误差了,因此,可将这样的测值舍弃。

2. 格拉布斯方法

格拉布斯方法的主要步骤为:

(1)把试验所得数据从小到大排列: x_1, x_2, \dots, x_n 。

(2)选定显著性水平(一般 $\alpha = 0.05$),根据 n 及 α 从 $T(n, \alpha)$ 表中求得 T 值。

(3)计算统计量 T 值。

$$\text{当最小值 } x_1 \text{ 为可疑时: } T = \frac{\bar{x} - x_1}{\sigma} \quad (7-12)$$

$$\text{当最大值 } x_n \text{ 为可疑时: } T = \frac{x_n - \bar{x}}{\sigma} \quad (7-13)$$

(4)查表 7-2 中相应于 n 与 α 的 $T(n, \alpha)$ 值。

(5)当计算的统计量 $T \geq T(n, \alpha)$ 时,则所怀疑的数据是异常的,应予舍去。当 $T < T(n, \alpha)$ 时,则不能舍去。

这样判定的概率为 $\alpha = 0.05$ 。相应于 n 及 $\alpha = 1\% \sim 5.0\%$ 的 $T(n, \alpha)$ 值列于表 7-2。

n, α 和 T 值的关系

表 7-2

T α	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$	$n=10$
5.0%	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18
2.5%	1.15	1.48	1.71	1.89	2.02	2.13	2.21	2.39
1.0%	1.15	1.49	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41

以上两种方法中, 3σ 方法比较简单,但要求较宽,几乎绝大部分数据可不舍弃。格拉布斯方法比 3σ 要严格得多。

四、间接测量时的误差估计

有时,在测试中无法对某一物理量 u 进行直接量测,但对于同它有关的量 x, y, z 可以直接量测,然后根据一定的函数关系计算出所求物理量 u 。这时需考虑 x, y, z 的误差对 u 的影响,也就是由直接测量的误差来计算间接测量的误差并确定误差传递的规律。

设 u 与 x, y, z 的关系为:

$$u = f(x, y, z) \quad (7-14)$$

而 x, y, z 的量测误差分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, 由它们所引起 u 的误差为 Δu , 则有

$$u + \Delta u = f(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) \quad (7-15)$$

由泰勒公式,并略去误差的高次项,得

$$u + \Delta u = f(x, y, z) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \quad (7-16)$$

或

$$\Delta u = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \quad (7-17)$$

这就是间接测量时误差的一般关系式,称为误差传递公式,对于系统误差和偶然误差都适用。

现考虑在排除系统误差的条件下,标准误差的传递公式。仍设 $u = f(x, y, z)$, 按式(7-17)有

$$\Delta u = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z$$

如果量测的总次数为 n , 对于第 i 次则有

$$\Delta u_i = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y_i + \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z_i \quad (7-18)$$

将上式两边平方,得

$$\Delta u_i^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta x_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \Delta y_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta z_i^2 + 2\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) \Delta x_i \cdot \Delta y_i + \dots$$

将上式由 1 到 n 求和,考虑到偶然误差的正态分布,正、负误差出现的概率相等,交叉相乘项相互抵消,则有

$$\sum \Delta u_i^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sum \Delta x_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sum \Delta y_i^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sum \Delta z_i^2$$

两边同乘以 $\frac{1}{n-1}$ 并开方,得标准误差

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2} \quad (7-19)$$

这就是间接测量中误差传递的标准误差公式。上式两端同乘以 0.6745 则得或然误差

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \gamma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \gamma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \gamma_z^2} \quad (7-20)$$

五、单次量测的误差估计

在桥梁结构试验中,有时难以对同一测点的测值在同样的加载条件下进行多次重复测定,试验过程不能重演,因而就无法得到测值的算术平均值。这时,需要估计出在单次量测中含有多大偶然性误差,以便确定测试结果的可信程度。

在讨论多次量测的误差分布时,将 3σ 作为极限误差,实际上它是任意选出某一次读数的最大绝对误差 Δx_{\max} , 所以 3σ 可以作为单次量测误差估计的标准。但是,标准误差 σ 无法从单次量测的结果中得到,需由量测系统的各个环节所引起的误差来确定,可根据标准误差式(7-19)得到。为便于应用,将式(7-19)改写为

$$\sigma = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\sigma_x\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\sigma_y\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)\sigma_z\right]^2} \quad (7-21)$$

上式两边同乘 3, 并令 $d = 3\sigma$, $d_1 = 3\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)\sigma_x$, $d_2 = 3\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)\sigma_y$, $d_3 = 3\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)\sigma_z$, 则上式化为

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2} \quad (7-22)$$

此处 d 可理解为物理量 u 的量测结果的最大绝对误差,而 d_1, d_2, d_3 , 则分别是 x, y, z 这些环节给总结果(u 的量测结果)带来的最大绝对误差。将上式两端同除以 u , 并令 $\delta = \frac{d}{u}$, δ_1

$= \frac{d_1}{u}$, $\delta_2 = \frac{d_2}{u}$, $\delta_3 = \frac{d_3}{u}$, 则得:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (7-23)$$

上式的含义是,物理量 u 的量测结果的最大相对误差等于各个环节给这个量测结果所带来的相对误差平方和的开方。

在应用式(7-23)估计单次量测误差时,必须注意以下两点。

(1)各个环节的误差 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 是偶然误差或可作为偶然误差处理的。

(2) $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 必须是表示各个环节给量测结果带来的误差而不是各个环节本身的误差。

对于电测来说,量测系统各个环节可能给量测结果带来的误差有以下几项:贴片工艺引起的误差,应变仪和记录器的误差以及标定误差等。令 $\delta_{\text{基}}, \delta_{\text{片}}, \delta_{\text{仪}}, \delta_{\text{记}}, \delta_{\text{标}}$ 分别表示上述各个环节给量测结果带来的最大相对误差,按式(7-23)可得到单次量测结果的最大相对误差为

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_{\text{基}}^2 + \delta_{\text{片}}^2 + \delta_{\text{仪}}^2 + \delta_{\text{记}}^2 + \delta_{\text{标}}^2}$$

在贴片工艺方面,主要考虑的是应变片轴线与规定方向有偏斜所引起的误差,这是一种偶然误差,一般规定贴片的最大偏斜为 5° ,其所引起的相对误差为 1% ,即 $\sigma_{\text{基}} = 1\%$ 。应变片和量测条件方面属于偶然性误差的是应变片的灵敏系数 K ,根据包装说明确定,如 $K = 2.02 \pm 1\%$,即 $\delta_{\text{片}} = \pm 1\%$ 。

属于仪器偶然性误差的除标定误差外,还有振幅特性误差 $\delta_{\text{仪1}}$,稳定性误差 $\delta_{\text{仪2}}$,设仪器的 $\delta_{\text{仪1}} = \pm 1\%, \delta_{\text{仪2}} = 1\%$,则应变仪对测试结果引起的最大相对误差为

$$\delta_{\text{仪}} = \pm \sqrt{\delta_{\text{仪1}}^2 + \delta_{\text{仪2}}^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{100}\right)^2 + \left(\frac{1}{100}\right)^2} = \pm 1.41\%$$

记录器方面属于偶然性误差的有非线性误差 $\delta_{\text{记1}}$,记录曲线取值引起的误差 $\delta_{\text{记2}}$ 。设 $\delta_{\text{记1}} = 3\%, \delta_{\text{记2}} = 2.5\%$,于是

$$\delta_{\text{记}} = \pm \sqrt{\delta_{\text{记1}}^2 + \delta_{\text{记2}}^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{3}{100}\right)^2 + \left(\frac{2.5}{100}\right)^2} = \pm 3.88\%$$

总的标定误差包括:应变仪的标定误差 $\delta_{\text{标1}}$,非线性误差 $\delta_{\text{标2}}$,以及由记录曲线取值引起的误差 $\delta_{\text{标3}}$,设 $\delta_{\text{标1}} = \pm 1\%, \delta_{\text{标2}} = \pm 3\%, \delta_{\text{标3}} = \pm 5\%$,则总的标定误差为

$$\delta_{\text{标}} = \pm \sqrt{\delta_{\text{标1}}^2 + \delta_{\text{标2}}^2 + \delta_{\text{标3}}^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{100}\right)^2 + \left(\frac{3}{100}\right)^2 + \left(\frac{5}{100}\right)^2} = \pm 5.92\%$$

最后,将 $\delta_{\text{基}}, \delta_{\text{片}}, \delta_{\text{仪}}, \delta_{\text{记}}$ 和 $\delta_{\text{标}}$ 代入式(7-23),可得电测法测定应变的最大相对误差为

$$\begin{aligned} \delta &= \pm \sqrt{\delta_{\text{基}}^2 + \delta_{\text{片}}^2 + \delta_{\text{仪}}^2 + \delta_{\text{记}}^2 + \delta_{\text{标}}^2} \\ &= \pm \sqrt{(1\%)^2 + (1\%)^2 + (1.41\%)^2 + (3.88\%)^2 + (5.92\%)^2} \\ &= \pm 7.35\% \end{aligned}$$

第三节 试验曲线与经验公式

经过整理的试验数据,需采用一定的方式表示出来,以供进一步分析与使用。在结构试验中,通过各种仪表测得的数据,反映了试验过程中某些变量之间的相互关系。例如,在进行桥梁结构的静应力测定时,测得的数据直接地反映了施加于桥梁上的荷载数量与构件应力数值之间的相互关系。在通常的桥梁试验中,所测得的挠度值既反映了桥梁结构的综合变形情况;也说明它与施加荷载和结构刚度等有关数值的相互关系。而在桥梁的动载试验中,测定值往

往是荷载的大小、车辆行驶速度、振动系统的自振特性等有关数值的相互关系。

因此,常把试验的结果视为某些变量的函数关系的反映,分析测定数据的任务就在于发现和推导这种函数关系,并从函数所反映的各变量之间的规律去理解试验对象在试验过程中反映出来的各种现象的理论依据。由此可见,获取准确的试验数据仅是全部试验工作的一部分内容,更为重要的却往往是这些数据的函数化。

函数关系的表示方式有很多种,如表格法、试验曲线法、经验公式法等。

一、表格法

表格法是一种基本的表示方法。利用表格使有关变量的数据系统化,表格法有利于保存试验结果,形式紧凑,便于各数据之间的参考比较。表格的内容只是罗列了在测试范围内符合某种函数关系,而又不能明确表达函数关系的各变量数值。因此,很难根据表格中列出的数值直接判定各变量间的函数关系。所以表格法常作为试验过程中对变量函数关系分析的第一阶段的资料整理。

二、试验曲线

试验曲线表示法是测得的数据按一定的坐标体系,以变量为横坐标,以其函数为纵坐标,将相应的数据作图,再以符合数值规律的曲线连贯这些数据点。曲线表示法简明、直观,可以从曲线上明显看出各变量之间的相互变化规律以及变化趋势,对于在试验中的某些遗漏数据,也可在描绘的曲线中得到弥补。但是仅仅根据试验曲线仍无法对所测结果的函数关系进行解析分析,并且,如从图上直接得到变量所对应的函数值,常会带来相当大的误差。为此,就需要将已描绘的试验曲线公式化。即以一定的数学公式来反映试验曲线所表示的函数关系,以便对试验结果作进一步的分析。

绘制试验曲线经常采用直角坐标。将试验结果按其数值描绘于坐标平面的相应位置,连接这些数据点就得到了试验曲线。根据数据点描绘曲线应注意以下几点。

(1)曲线所经过之处应尽量与所有数据点相近。

(2)由于试验曲线除代表各测点的情况外,还代表测试结果的全貌,因此,曲线不一定要通过每个数据点,尤其两端的数据点。因为测试结果都具有一定的误差,没有必要要求曲线正好通过全部数据点。

(3)曲线应顺直、光滑,曲线一侧的点数应与另一侧的点数大致相同。

应指出,绘制试验曲线必须有足够的数据点。如果数据点过少,则只能将它们直线相连,观其大概的趋势。

在绘出曲线以后,就可以大致判断出同曲线相对应的方程式的形式。试验曲线的类型较多,在工程中应用最广的有直线、抛物线、双曲线和指数曲线四种。

三、经验公式

在坐标平面上的任一曲线都对应于一个函数表达式,所以,一般由试验测定值所绘出的曲线,都能用一个确定的公式来表示其对应的函数关系,虽然通常的试验曲线所对应的数学公式不完全准确,总含有一定程度的误差。又因试验曲线本身也只是对客观实际的近似模拟,所以与试验曲线对应的这种公式是近似的,是经验公式。

在试验中,以正确的试验方法,精确的测试仪表,经过多次试验所得的数据,应当能够反映

一定的有关变量之间的函数关系,这样,各变量之间的变化规律的曲线,就可以用一定的函数式来反映。经验公式的方法能以一个简单的数学式反映试验数据各变量间的全部规律,凡对于公式中所示运算具有意义的任何变量值,都可以算得对应的函数值。更为重要的是可以据此作数学解析,从理论上对各种影响因素进行分析,并对试验范围以外的一些情况进行估计。

建立经验公式的通常作法是根据试验曲线假设一个最简单的方程,将方程中的常数确定后,再用测试数据进行检验,若不满意,则将方程修改后再试,直至获得比较满意的方程式。建立经验公式的一般步骤如下。

(1)测定值的修正。在结构试验中,尤其是对于现场试验,由于试验条件所限,测定值总会存在一定的误差,有时会出现较大的误差而无法进行分析。所有这类数据都会影响试验的正确性,因此,建立经验公式的第一步工作是按照上述的误差分析方法将测定的数据加以分析处理。

(2)绘制试验曲线。在测定值修正后,在选定的坐标上绘制试验曲线,一般说,绘制的曲线应当从测得数据较多的坐标点群穿过,即曲线的两侧数据点的数目应大致相同。

(3)曲线改直。由于直线方程便于验证与分析,因此,常用改换坐标分度或改换变量的方法使曲线变为直线。在处理曲线改直时,可参考下列几种常用的方法:

- a)以 x 与 y 绘图
- b)以 $\log x$ 与 y 绘图
- c)以 $\log x$ 与 $\log y$ 绘图
- d)以 x^n 与 $\log y$ 绘图, $n = 1, 2, 3$ 等

(4)估计曲线所反映的函数形式。根据描绘试验曲线,判断和推导变量的函数关系,对于线性的函数关系,一般可由目测直接确定,对于较复杂的函数关系则很难直接估计,这时需根据经验与解析几何原理决定函数关系所具有的形式。

(5)确定已知函数中的常数。在曲线的函数形式确定以后,为建立完整的经验公式,需确定函数中的常数。由于线性关系函数中常数的确定较为方便,因此,常采用曲线方程直线化的方法,即曲线改直的方法来处理。确定经验公式中常数的方法很多,一般常用的有图解法、选点法、平均法和最小二乘法等,可根据所需精度来选择。

(6)经验公式的检验。由于在确定经验公式时,主要是根据曲线上的有限个点的坐标推算而得,因此所确定的经验公式与试验曲线不会完全相符。这就需要对已确定的经验公式进行检验,一般可将某些变量的测定值代入经验公式,检验其函数值与曲线是否相符,如误差较大,应进行适当的修正,直到满意时为止。

第四节 回归分析方法

回归分析的任务是处理自变量与因变量之间关系,揭示试验结果所反映的各物理量之间的内在规律,找出它们之间的定量表达式——回归方程。例如,用超声法或回弹法检测混凝土强度时,声速 V 和回弹值 R 与混凝土抗压强度 f 随着原材料、养护方法和龄期等的变化而变化,这些变化值,在数学上统称为变量,这些量都属非确定的量。混凝土强度 f 这一变量在某种程度上是随着声速 V 或回弹值 R 的变化而变化,通常称声速 V 或回弹值 R 为自变量,混凝土强度 f 为因变量。从大量的实测数据中发现这种不确定量中的某种规律性称为相关关系。回归分析就是寻求非确定性联系的统计相关关系,找出能描述变量之间关系的定量表达式,去

预测、确定因变量的取值,并估计其精确程度。

应用回归分析方法主要研究解决下列问题。

(1)通过回归分析,观察变量之间是否有一定的联系。如存在着联系,选择合适的数学模式对变量之间的联系给以近似描述。

(2)用统计指标说明变量之间关系的密切程度。这些统计指标还可以用来说明回归方程对观察值的拟合程度的好坏。

(3)根据样本资料求得的现象之间的联系形式和密切程度,推断总体中现象之间联系形式和密切程度。

(4)根据自变量的数值,预测或控制因变量的数值,并应用统计推断方法,估计预测值的可靠程度。

通常,应根据试验结果选择适当的回归方程,一般常采用线性回归方程。当所求变量与某一单一量测指标相关时,用一元方程线性回归方程;当所求变量与多项量测指标相关时,则用多元方程线性回归方程。下面简要介绍常用的一元线性、二元线性的回归计算方法。

一、一元线性回归

一元线性回归是指一个因变量 y 只与一个自变量 x 有相关关系,它们之间关系的形态表现为具有直线趋势。令因变量的值为 y ,各次检测的结果为 y_i ,并令自变量为 x ,每次检测的指标值为 x_i , n 为检测总数,则回归方程的系数、相关系数与精度计算公式可归纳如下。

回归方程为

$$y = a + bx \quad (7-24)$$

1. 系数 a 、 b

$$a = \bar{y} - b\bar{x}; \quad b = \frac{L_{XY}}{L_{XX}} \quad (7-25)$$

$$\text{式中: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; L_{XX} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; L_{XY} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

2. 相关系数 r

$$r = \frac{L_{XY}}{\sqrt{L_{XX}L_{YY}}} \quad (7-26)$$

式中, L_{XX} , L_{XY} 的计算同上, L_{YY} 按下式计算

$$L_{YY} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (7-27)$$

一元线性回归的相关系数 r 在 -1 至 $+1$ 之间变化, $r=0$ 表示不相关, $r>0$ 表示正相关, $r<0$ 负相关。 r 趋向于 1 表示相关性加强,当 $r=1$ 时表示完全相关,所有的试验点均与回归方程吻合。

3. 回归方程的精度计算

一元线性回归的相对平均误差 $\bar{\sigma}$ 为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n |(y_i - \hat{y}_i)/\hat{y}_i|}{n} \quad (7-28)$$

相对标准误差 σ_i 为

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \hat{y}_i)/\hat{y}_i]^2}{n-1}} \quad (7-29)$$

标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{L_{YY} - L_{XY}b}{n-2}} = \sqrt{\frac{(1-r^2)L_{YY}}{n-2}} \quad (7-30)$$

式中: y_i 为试验实测因变量值; \hat{y}_i 为某检测指标 x_i 按回归方程计算的计算值; n 为试件数。其余各项含义同前。

4. 一元线性回归示例

采用回弹法检测混凝土强度时,回弹值 R 与混凝土抗压强度 f 基本符合直线函数关系,可用一元线性回归分析的方法进行数据处理。如有 30 个混凝土试块分别进行了回弹和抗压强度试验,试验数据见表 7-3。

回弹值和抗压强度值回归计算表

表 7-3

试块序号	回弹值 R_i	抗压强度 f_i	R_i^2	f_i^2	$R_i f_i$
1	27.1	12.2	734.41	148.84	330.62
2	27.5	11.6	756.25	134.56	319.00
3	30.3	16.9	918.09	285.61	512.07
4	31.0	17.5	961.00	306.25	542.50
5	35.7	20.5	1274.49	420.25	731.85
6	35.4	32.1	1253.16	1030.41	1136.34
7	38.9	31.0	1513.21	961.00	1205.90
8	37.6	32.9	1413.76	1082.41	1237.04
9	26.9	12.0	723.61	144.00	322.80
10	25.0	10.8	625.00	116.64	270.00
11	28.0	14.4	784.00	207.36	407.20
12	31.0	18.0	961.00	338.56	570.40
13	32.2	22.8	1036.84	519.84	734.16
14	37.8	27.9	1428.84	778.41	1054.62
15	36.6	32.9	1339.56	1082.41	1204.14
16	36.6	30.8	1339.56	948.64	1127.28
17	24.2	10.8	585.64	116.64	261.36
18	31.0	15.2	961.00	231.04	471.20
19	30.4	16.3	924.16	265.69	495.52
20	33.3	22.4	1108.89	501.76	745.92
21	37.2	31.7	1383.84	1004.89	1179.24
22	38.4	27.0	1474.56	729.00	1036.80
23	37.6	32.5	1413.76	1056.25	1222.00
24	22.9	10.6	524.41	112.36	242.74
25	30.5	12.9	930.25	166.41	393.45
26	30.4	14.6	924.16	213.16	443.84
27	29.7	18.6	882.09	345.96	552.42
28	36.7	25.4	1346.89	645.16	932.18
29	37.8	23.2	1428.84	528.24	876.96
30	36.0	28.3	1296.00	800.89	1018.80
Σ	973.7	634.2	32247.3	15232.6	21574.4

由上表计算可得

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{973.7}{30} = 32.46, \bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i = \frac{634.2}{30} = 21.14$$

$$\sum_{i=1}^n R_i^2 = 32247.3, \sum_{i=1}^n f_i^2 = 15232.6, \sum_{i=1}^n R_i f_i = 21574.3$$

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right)^2 = \frac{1}{30} (973.7)^2 = 31603.1, \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2 = \frac{1}{30} (634.2)^2 = 13407.0$$

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right) \left(\sum_{i=1}^n f_i \right) = \frac{1}{30} (973.7 \times 634.2) = 20584.0$$

$$L_{XX} = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 = \sum_{i=1}^n R_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right)^2 = 32247.3 - 31603.1 = 644.2$$

$$L_{YY} = \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 = \sum_{i=1}^n f_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2 = 15232.6 - 13407.0 = 1825.6$$

$$L_{XY} = \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(f_i - \bar{f}) = \sum_{i=1}^n R_i f_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n R_i \right) \left(\sum_{i=1}^n f_i \right) = 21574.3 - 20584.0 = 990.3$$

$$b = \frac{L_{XY}}{L_{XX}} = \frac{990.3}{644.2} = 1.5373, a = \bar{f} - b\bar{R} = 21.14 - 1.5373 \times 32.46 = -28.76$$

$$\text{最后得回归方程} \quad f_i = -28.76 + 1.54R_i$$

$$\text{方程的相关系数 } r = \frac{L_{XY}}{\sqrt{L_{XX}L_{YY}}} = \frac{990.3}{\sqrt{644.2 \times 1825.6}} = 0.9132, \text{ 相关系数 } r \text{ 接近于 } 1, \text{ 说明配}$$

的回归直线是有意义的。

二、二元线性回归

令因变量 y , 检测值 y_i ; 令自变量为 x_1 和 x_2 , 检测指标值为 x_{1i} 和 x_{2i} ; n 为检测总数。回归方程式为

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (7-31)$$

现将回归方程的系数、相关系数与精度计算公式归纳如下。

1. 系数 a, b_1, b_2

$$a = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 \quad (7-32)$$

$$b_1 = \frac{L_{10}L_{22} - L_{20}L_{12}}{L_{11}L_{22} - L_{12}^2} \quad (7-33)$$

$$b_2 = \frac{L_{20}L_{11} - L_{10}L_{21}}{L_{11}L_{22} - L_{12}^2} \quad (7-34)$$

$$\text{式中: } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \bar{x}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{1i}; \bar{x}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{2i}; L_{11} = \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2;$$

$$L_{22} = \sum_{i=1}^n (x_{2i} - \bar{x}_2)^2; L_{12} = L_{21} = \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2);$$

$$L_{10} = \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)(y_i - \bar{y}); L_{20} = \sum_{i=1}^n (x_{2i} - \bar{x}_2)(y_i - \bar{y})$$

2. 全相关系数 r' 的求法

$$r' = \sqrt{\frac{b_1 L_{10} + b_2 L_{20}}{L_{00}}} \quad (7-35)$$

式中, $L_{00} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$; 其余各项含义同前。

3. 回归方程精度的计算

二元回归分析的标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{L_{00} - b_1 L_{10} - b_2 L_{20}}{n - k - 1}} \quad (7-36)$$

相对标准误差 σ_t 为

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \hat{y}_i)/\hat{y}_i]^2}{n - 1}} \quad (7-37)$$

式中: σ 为标准误差; σ_t 为相对标准误差; k 为检测指标个数即自变量个数, 对于二元回归 $k = 2$; 其余各项含义同前。

附表1 回弹法测区混凝土强度换算表

平均回 弹值 R_m	测区混凝土强度换算值(MPa)													
	平均碳化深度值 d_a (mm)													
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	≥6.0	
20.0	10.3	10.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20.2	10.5	10.3	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20.4	10.7	10.5	10.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20.6	11.0	10.8	10.4	10.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20.8	11.2	11.0	10.6	10.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.0	11.4	11.2	10.8	10.5	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.2	11.6	11.4	11.0	10.7	10.2	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.4	11.8	11.6	11.2	10.9	10.4	10.0	—	—	—	—	—	—	—	
21.6	12.0	11.8	11.4	11.0	10.6	10.2	—	—	—	—	—	—	—	
21.8	12.3	12.1	11.7	11.3	10.8	10.5	10.1	—	—	—	—	—	—	
22.0	12.5	12.2	11.9	11.5	11.0	10.6	10.2	—	—	—	—	—	—	
22.2	12.7	12.4	12.1	11.7	11.2	10.8	10.4	10.0	—	—	—	—	—	
22.4	13.0	12.7	12.4	12.0	11.4	11.0	10.7	10.3	10.0	—	—	—	—	
22.6	13.2	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	10.8	10.4	10.2	—	—	—	—	
22.8	13.4	13.1	12.7	12.3	11.8	11.4	11.0	10.6	10.3	—	—	—	—	
23.0	13.7	13.4	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.8	10.5	10.1	—	—	—	
23.2	13.9	13.6	13.2	12.8	12.2	11.8	11.4	11.0	10.7	10.3	10.0	—	—	
23.4	14.1	13.8	13.4	13.0	12.4	12.0	11.6	11.2	10.9	10.4	10.2	—	—	
23.6	14.4	14.1	13.7	13.2	12.7	12.2	11.8	11.4	11.1	10.7	10.4	10.1	—	
23.8	14.6	14.3	13.9	13.4	12.8	12.4	12.0	11.5	11.2	10.8	10.5	10.2	—	
24.0	14.9	14.6	14.2	13.7	13.1	12.7	12.2	11.8	11.5	11.0	10.7	10.4	10.1	
24.2	15.1	14.8	14.3	13.9	13.3	12.8	12.4	11.9	11.6	11.2	10.9	10.6	10.3	
24.4	15.4	15.1	14.6	14.2	13.6	13.1	12.6	12.2	11.9	11.4	11.1	10.8	10.4	
24.6	15.6	15.3	14.8	14.4	13.7	13.3	12.8	12.3	12.0	11.5	11.2	10.9	10.6	
24.8	15.9	15.6	15.1	14.6	14.0	13.5	13.0	12.6	12.2	11.8	11.4	11.1	10.7	
25.0	16.2	15.9	15.4	14.9	14.3	13.8	13.3	12.8	12.5	12.0	11.7	11.3	10.9	
25.2	16.4	16.1	15.6	15.1	14.4	13.9	13.4	13.0	12.6	12.1	11.8	11.5	11.0	
25.4	16.7	16.4	15.9	15.4	14.7	14.2	13.7	13.2	12.9	12.4	12.0	11.7	11.2	
25.6	16.9	16.6	16.1	15.7	14.9	14.4	13.9	13.4	13.0	12.5	12.2	11.8	11.3	
25.8	17.2	16.9	16.3	15.8	15.1	14.6	14.1	13.6	13.2	12.7	12.4	12.0	11.5	
26.0	17.5	17.2	16.6	16.1	15.4	14.9	14.4	13.8	13.5	13.0	12.6	12.2	11.6	
26.2	17.8	17.4	16.9	16.4	15.7	15.1	14.6	14.0	13.7	13.2	12.8	12.4	11.8	
26.4	18.0	17.6	17.1	16.6	15.8	15.3	14.8	14.2	13.9	13.3	13.0	12.6	12.0	
26.6	18.3	17.9	17.4	16.8	16.1	15.6	15.0	14.4	14.1	13.5	13.2	12.8	12.1	

续上表

平均回 弹值 R_n	测区混凝土强度换算值(MPa)												
	平均碳化深度值 d_m (mm)												
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	≥6.0
26.8	18.6	18.2	17.7	17.1	16.4	15.8	15.3	14.6	14.3	13.8	13.4	12.9	12.3
27.0	18.9	18.5	18.0	17.4	16.6	16.1	15.5	14.8	14.6	14.0	13.6	13.1	12.4
27.2	19.1	18.7	18.1	17.6	16.8	16.2	15.7	15.0	14.7	14.1	13.8	13.3	12.6
27.4	19.4	19.0	18.4	17.8	17.0	16.4	15.9	15.2	14.9	14.3	14.0	13.4	12.7
27.6	19.7	19.3	18.7	18.0	17.2	16.6	16.1	15.4	15.1	14.5	14.1	13.6	12.9
27.8	20.0	19.6	19.0	18.2	17.4	16.8	16.3	15.6	15.3	14.7	14.2	13.7	13.0
28.0	20.3	19.7	19.2	18.4	17.6	17.0	16.5	15.8	15.4	14.8	14.4	13.9	13.2
28.2	20.6	20.0	19.5	18.6	17.8	17.2	16.7	16.0	15.6	15.0	14.6	14.0	13.3
28.4	20.9	20.3	19.7	18.8	18.0	17.4	16.9	16.2	15.8	15.2	14.8	14.2	13.5
28.6	21.2	20.6	20.0	19.1	18.2	17.6	17.1	16.4	16.0	15.4	15.0	14.3	13.6
28.8	21.5	20.9	20.2	19.4	18.5	17.8	17.3	16.6	16.2	15.6	15.2	14.5	13.8
29.0	21.8	21.1	20.5	19.6	18.7	18.1	17.5	16.8	16.4	15.8	15.4	14.6	13.9
29.2	22.1	21.4	20.8	19.9	19.0	18.3	17.7	17.0	16.6	16.0	15.6	14.8	14.1
29.4	22.4	21.7	21.1	20.2	19.3	18.6	17.9	17.2	16.8	16.2	15.8	15.0	14.2
29.6	22.7	22.0	21.3	20.4	19.5	18.8	18.2	17.5	17.0	16.4	16.0	15.1	14.4
29.8	23.0	22.3	21.6	20.7	19.8	19.1	18.4	17.7	17.2	16.6	16.2	15.3	14.5
30.0	23.3	22.6	21.9	21.0	20.0	19.3	18.6	17.9	17.4	16.8	16.4	15.4	14.7
30.2	23.6	22.9	22.2	21.2	20.3	19.6	18.9	18.2	17.6	17.0	16.6	15.6	14.9
30.4	23.9	23.2	22.5	21.5	20.6	19.8	19.1	18.4	17.8	17.2	16.8	15.8	15.1
30.6	24.3	23.6	22.8	21.9	20.9	20.2	19.4	18.7	18.0	17.5	17.0	16.0	15.2
30.8	24.6	23.9	23.1	22.1	21.2	20.4	19.7	18.9	18.2	17.7	17.2	16.2	15.4
31.0	24.9	24.2	23.4	22.4	21.4	20.7	19.9	19.2	18.4	17.9	17.4	16.4	15.5
31.2	25.2	24.4	23.7	22.7	21.7	20.9	20.2	19.4	18.6	18.1	17.6	16.6	15.7
31.4	25.6	24.8	24.1	23.0	22.0	21.2	20.5	19.7	18.9	18.4	17.8	16.9	15.8
31.6	25.9	25.1	24.3	23.3	22.3	21.5	20.7	19.9	19.2	18.6	18.0	17.1	16.0
31.8	26.2	25.4	24.6	23.6	22.5	21.7	21.0	20.2	19.4	18.9	18.2	17.3	16.2
32.0	26.5	25.7	24.9	23.9	22.8	22.0	21.2	20.4	19.6	19.1	18.4	17.5	16.4
32.2	26.9	26.1	25.3	24.2	23.1	22.3	21.5	20.7	19.9	19.4	18.6	17.7	16.6
32.4	27.2	26.4	25.6	24.5	23.4	22.6	21.8	20.9	20.1	19.6	18.8	17.9	16.8
32.6	27.6	26.8	25.9	24.8	23.7	22.9	22.1	21.3	20.4	19.9	19.0	18.1	17.0
32.8	27.9	27.1	26.2	25.1	24.0	23.2	22.3	21.5	20.6	20.1	19.2	18.3	17.2
33.0	28.2	27.4	26.5	25.4	24.3	23.4	22.6	21.7	20.9	20.3	19.4	18.5	17.4
33.2	28.6	27.7	26.8	25.7	24.6	23.7	22.9	22.0	21.2	20.5	19.6	18.7	17.6
33.4	28.9	28.0	27.1	26.0	24.9	24.0	23.1	22.3	21.4	20.7	19.8	18.9	17.8
33.6	29.3	28.4	27.4	26.4	25.2	24.2	23.3	22.6	21.7	20.9	20.0	19.1	18.0

续上表

平均回 弹值 R_m	测区混凝土强度换算值(MPa)												
	平均碳化深度值 d_m (mm)												
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	≥ 6.0
33.8	29.6	28.7	27.7	26.6	25.4	24.4	23.5	22.8	21.9	21.1	20.2	19.3	18.2
34.0	30.0	29.1	28.0	26.8	25.6	24.6	23.7	23.0	22.1	21.3	20.4	19.5	18.3
34.2	30.3	29.4	28.3	27.0	25.8	24.8	23.9	23.2	22.3	21.5	20.6	19.7	18.4
34.4	30.7	29.8	28.6	27.2	26.0	25.0	24.1	23.4	22.5	21.7	20.8	19.8	18.6
34.6	31.1	30.2	28.9	27.4	26.2	25.2	24.3	23.6	22.7	21.9	21.0	20.0	18.8
34.8	31.4	30.5	29.2	27.6	26.4	25.4	24.5	23.8	22.9	22.1	21.2	20.2	19.0
35.0	31.8	30.8	29.6	28.0	26.7	25.8	24.8	24.0	23.2	22.3	21.4	20.4	19.2
35.2	32.1	31.1	29.9	28.2	27.0	26.0	25.0	24.2	23.4	22.5	21.6	20.6	19.4
35.4	32.5	31.5	30.2	28.6	27.3	26.3	25.4	24.4	23.7	22.8	21.8	20.8	19.6
35.6	32.9	31.9	30.6	29.0	27.6	26.6	25.7	24.7	24.0	23.0	22.0	21.0	19.8
35.8	33.3	32.3	31.0	29.3	28.0	27.0	26.0	25.0	24.3	23.3	22.2	21.2	20.0
36.0	33.6	32.6	31.2	29.6	28.2	27.2	26.2	25.2	24.5	23.5	22.4	21.4	20.2
36.2	34.0	33.0	31.6	29.9	28.6	27.5	26.5	25.5	24.8	23.8	22.6	21.6	20.4
36.4	34.4	33.4	32.0	30.3	28.9	27.9	26.8	25.8	25.1	24.1	22.8	21.8	20.6
36.6	34.8	33.8	32.4	30.6	29.2	28.2	27.1	26.1	25.4	24.4	23.0	22.0	20.9
36.8	35.2	34.1	32.7	31.0	29.6	28.5	27.5	26.4	25.7	24.6	23.2	22.2	21.1
37.0	35.5	34.4	33.0	31.2	29.8	28.8	27.7	26.6	25.9	24.8	23.4	22.4	21.3
37.2	35.9	34.8	33.4	31.6	30.2	29.1	28.0	26.9	26.2	25.1	23.7	22.6	21.5
37.4	36.3	35.2	33.8	31.9	30.5	29.4	28.3	27.2	26.5	25.4	24.0	22.9	21.8
37.6	36.7	35.6	34.1	32.3	30.8	29.7	28.6	27.5	26.8	25.7	24.2	23.1	22.0
37.8	37.1	36.0	34.5	32.6	31.2	30.0	28.9	27.8	27.1	26.0	24.5	23.4	22.3
38.0	37.5	36.4	34.9	33.0	31.5	30.3	29.2	28.1	27.4	26.2	24.8	23.6	22.5
38.2	37.9	36.8	35.2	33.4	31.8	30.6	29.5	28.4	27.7	26.5	25.0	23.9	22.7
38.4	38.3	37.2	35.6	33.7	32.1	30.9	29.8	28.7	28.0	26.8	25.3	24.1	23.0
38.6	38.7	37.5	36.0	34.1	32.4	31.2	30.1	29.0	28.3	27.0	25.5	24.4	23.2
38.8	39.1	37.9	36.4	34.4	32.7	31.5	30.4	29.3	28.5	27.2	25.8	24.6	23.5
39.0	39.5	38.2	36.7	34.7	33.0	31.8	30.6	29.6	28.8	27.4	26.0	24.8	23.7
39.2	39.9	38.5	37.0	35.0	33.3	32.1	30.8	29.8	29.0	27.6	26.2	25.0	24.0
39.4	40.3	38.8	37.3	35.3	33.6	32.4	31.0	30.0	29.2	27.8	26.4	25.2	24.2
39.6	40.7	39.1	37.6	35.6	33.9	32.7	31.2	30.2	29.4	28.0	26.6	25.4	24.4
39.8	41.2	39.6	38.0	35.9	34.2	33.0	31.4	30.5	29.7	28.2	26.8	25.6	24.7
40.0	41.6	39.9	38.3	36.2	34.5	33.3	31.7	30.8	30.0	28.4	27.0	25.8	25.0
40.2	42.0	40.3	38.6	36.5	34.8	33.6	32.0	31.1	30.2	28.6	27.3	26.0	25.2
40.4	42.4	40.7	39.0	36.9	35.1	33.9	32.3	31.4	30.5	28.8	27.6	26.2	25.4
40.6	42.8	41.1	39.4	37.2	35.4	34.2	32.6	31.7	30.8	29.1	27.8	26.5	25.7

续上表

平均回 弹值 R_m	测区混凝土强度换算值(MPa)												
	平均碳化深度值 d_m (mm)												
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	≥ 6.0
40.8	43.3	41.6	39.8	37.7	35.7	34.5	32.9	32.0	31.2	29.4	28.1	26.8	26.0
41.0	43.7	42.0	40.2	38.0	36.0	34.8	33.2	32.3	31.5	29.7	28.4	27.1	26.2
41.2	44.1	42.3	40.6	38.4	36.3	35.1	33.5	32.6	31.8	30.0	28.7	27.3	26.5
41.4	44.5	42.7	40.9	38.7	36.6	35.4	33.8	32.9	32.0	30.3	28.9	27.6	26.7
41.6	45.0	43.2	41.4	39.2	36.9	35.7	34.2	33.3	32.4	30.6	29.2	27.9	27.0
41.8	45.4	43.6	41.8	39.5	37.2	36.0	34.5	33.6	32.7	30.9	29.5	28.1	27.2
42.0	45.9	44.1	42.2	39.9	37.6	36.3	34.9	34.0	33.0	31.2	29.8	28.5	27.5
42.2	46.3	44.4	42.6	40.3	38.0	36.6	35.2	34.3	33.3	31.5	30.1	28.7	27.8
42.4	46.7	44.8	43.0	40.6	38.3	36.9	35.5	34.6	33.6	31.8	30.4	29.0	28.0
42.6	47.2	45.3	43.4	41.1	38.7	37.3	35.9	34.9	34.0	32.1	30.7	29.3	28.3
42.8	47.6	45.7	43.8	41.4	39.0	37.6	36.2	35.2	34.3	32.4	30.9	29.5	28.6
43.0	48.1	46.2	44.2	41.8	39.4	38.0	36.6	35.6	34.6	32.7	31.3	29.8	28.9
43.2	48.5	46.6	44.6	42.2	39.8	38.3	36.9	35.9	34.9	33.0	31.5	30.1	29.1
43.4	49.0	47.0	45.1	42.6	40.2	38.7	37.2	36.3	35.3	33.3	31.8	30.4	29.4
43.6	49.4	47.4	45.4	43.0	40.5	39.0	37.5	36.6	35.6	33.6	32.1	30.6	29.6
43.8	49.9	47.9	45.9	43.4	40.9	39.4	37.9	36.9	35.9	33.9	32.4	30.9	29.9
44.0	50.4	48.4	46.4	43.8	41.3	39.8	38.3	37.3	36.3	34.3	32.8	31.2	30.2
44.2	50.8	48.8	46.7	44.2	41.7	40.1	38.6	37.6	36.6	34.5	33.0	31.5	30.5
44.4	51.3	49.2	47.2	44.6	42.1	40.5	39.0	38.0	36.9	34.9	33.3	31.8	30.8
44.6	51.7	49.6	47.6	45.0	42.4	40.8	39.3	38.3	37.2	35.2	33.6	32.1	31.0
44.8	52.2	50.1	48.0	45.4	42.8	41.2	39.7	38.6	37.6	35.5	33.9	32.4	31.3
45.0	52.7	50.6	48.5	45.8	43.2	41.6	40.1	39.0	37.9	35.8	34.3	32.7	31.6
45.2	53.2	51.1	48.9	46.3	43.6	42.0	40.4	39.4	38.3	36.2	34.6	33.0	31.9
45.4	53.6	51.5	49.4	46.6	44.0	42.3	40.7	39.7	38.6	36.4	34.8	33.2	32.2
45.6	54.1	51.9	49.8	47.1	44.4	42.7	41.1	40.0	39.0	36.8	35.2	33.5	32.5
45.8	54.6	52.4	50.2	47.5	44.8	43.1	41.5	40.4	39.3	37.1	35.5	33.9	32.8
46.0	55.0	52.8	50.6	47.9	45.2	43.5	41.9	40.8	39.7	37.5	35.8	34.2	33.1
46.2	55.5	53.3	51.1	48.3	45.5	43.8	42.2	41.1	40.0	37.7	36.1	34.4	33.3
46.4	56.0	53.8	51.5	48.7	45.9	44.2	42.6	41.4	40.3	38.1	36.4	34.7	33.6
46.6	56.5	54.2	52.0	49.2	46.3	44.6	42.9	41.8	40.7	38.4	36.7	35.0	33.9
46.8	57.0	54.7	52.4	49.6	46.7	45.0	43.3	42.2	41.0	38.8	37.0	35.3	34.2
47.0	57.5	55.2	52.9	50.0	47.2	45.2	43.7	42.6	41.4	39.1	37.4	35.6	34.5
47.2	58.0	55.7	53.4	50.5	47.6	45.8	44.1	42.9	41.8	39.4	37.7	36.0	34.8
47.4	58.5	56.2	53.8	50.9	48.0	46.2	44.5	43.3	42.1	39.8	38.0	36.3	35.1
47.6	59.0	56.6	54.3	51.3	48.4	46.6	44.8	43.7	42.5	40.1	38.4	36.6	35.4

续上表

平均回 弹值 R_m	测区混凝土强度换算值 (MPa)													
	平均碳化深度值 d_m (mm)													
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	≥ 6.0	
47.8	59.5	57.1	54.7	51.8	48.8	47.0	45.2	44.0	42.8	40.5	38.7	36.9	35.7	
48.0	60.0	57.6	55.2	52.2	49.2	47.4	45.6	44.4	43.2	40.8	39.0	37.2	36.0	
48.2	—	58.0	55.7	52.6	49.6	47.8	46.0	44.8	43.6	41.1	39.3	37.5	36.3	
48.4	—	58.6	56.1	53.1	50.0	48.2	46.4	45.1	43.9	41.5	39.6	37.8	36.6	
48.6	—	59.0	56.6	53.5	50.4	48.6	46.7	45.5	44.3	41.8	40.0	38.1	36.9	
48.8	—	59.5	57.1	54.0	50.9	49.0	47.1	45.9	44.6	42.2	40.3	38.4	37.2	
49.0	—	60.0	57.5	54.4	51.3	49.5	47.5	46.2	45.0	42.5	40.6	38.8	37.5	
49.2	—	—	58.0	54.8	51.7	49.8	47.9	46.6	45.4	42.8	41.0	39.1	37.8	
49.4	—	—	58.5	55.3	52.1	50.2	48.3	47.1	45.8	43.2	41.3	39.4	38.2	
49.6	—	—	58.9	55.7	52.5	50.6	48.7	47.4	46.2	43.6	41.7	39.7	38.5	
49.8	—	—	59.4	56.2	53.0	51.0	49.1	47.8	46.5	43.9	42.0	40.1	38.8	
50.0	—	—	59.9	56.7	53.4	51.4	49.5	48.2	46.9	44.3	42.3	40.4	39.1	
50.2	—	—	—	57.1	53.8	51.9	49.9	48.5	47.2	44.6	42.6	40.7	39.4	
50.4	—	—	—	57.6	54.3	52.3	50.3	49.0	47.7	45.0	43.0	41.0	39.7	
50.6	—	—	—	58.0	54.7	52.7	50.7	49.4	48.0	45.4	43.4	41.4	40.0	
50.8	—	—	—	58.5	55.1	53.1	51.1	49.8	48.4	45.7	43.7	41.7	40.3	
51.0	—	—	—	59.0	55.6	53.5	51.5	50.1	48.8	46.1	44.1	42.0	40.7	
51.2	—	—	—	59.4	56.0	54.0	51.9	50.5	49.2	46.4	44.4	42.3	41.0	
51.4	—	—	—	59.9	56.4	54.4	52.3	50.9	49.6	46.8	44.7	42.7	41.3	
51.6	—	—	—	—	56.9	54.8	52.7	51.3	50.0	47.2	45.1	43.0	41.6	
51.8	—	—	—	—	57.3	55.2	53.1	51.7	50.3	47.5	45.4	43.3	41.8	
52.0	—	—	—	—	57.8	55.7	53.6	52.1	50.7	47.9	45.8	43.7	42.3	
52.2	—	—	—	—	58.2	56.1	54.0	52.5	51.1	48.3	46.2	44.0	42.6	
52.4	—	—	—	—	58.7	56.5	54.4	53.0	51.5	48.7	46.5	44.4	43.0	
52.6	—	—	—	—	59.1	57.0	54.8	53.4	51.9	49.0	46.9	44.7	43.3	
52.8	—	—	—	—	59.6	57.4	55.2	53.8	52.3	49.4	47.3	45.1	43.6	
53.0	—	—	—	—	60.0	57.8	55.6	54.2	52.7	49.8	47.6	45.4	43.9	
53.2	—	—	—	—	—	58.3	56.1	54.6	53.1	50.2	48.0	45.8	44.3	
53.4	—	—	—	—	—	58.7	56.5	55.0	53.5	50.5	48.3	46.1	44.6	
53.6	—	—	—	—	—	59.2	56.9	55.4	53.9	50.9	48.7	46.4	44.9	
53.8	—	—	—	—	—	59.6	57.3	55.8	54.3	51.3	49.0	46.8	45.3	
54.0	—	—	—	—	—	—	57.8	56.3	54.7	51.7	49.4	47.1	45.6	
54.2	—	—	—	—	—	—	58.2	56.7	55.1	52.1	49.8	47.5	46.0	
54.4	—	—	—	—	—	—	58.6	57.1	55.6	52.5	50.2	47.9	46.3	
54.6	—	—	—	—	—	—	59.1	57.5	56.0	52.9	50.5	48.2	46.6	

续上表

平均回 弹值 R_n	测区混凝土强度换算值(MPa)												
	平均碳化深度值 d_m (mm)												
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	≥ 6.0
54.8	—	—	—	—	—	—	59.5	57.9	56.4	53.2	50.9	48.5	47.0
55.0	—	—	—	—	—	—	59.9	58.4	56.8	53.6	51.3	48.9	47.3
55.2	—	—	—	—	—	—	—	58.8	57.2	54.0	51.6	49.3	47.7
55.4	—	—	—	—	—	—	—	59.2	57.6	54.4	52.0	49.6	48.0
55.6	—	—	—	—	—	—	—	59.7	58.0	54.8	52.4	50.0	48.4
55.8	—	—	—	—	—	—	—	—	58.5	55.2	52.8	50.3	48.7
56.0	—	—	—	—	—	—	—	—	58.9	55.6	53.2	50.7	49.1
56.2	—	—	—	—	—	—	—	—	59.3	56.0	53.5	51.1	49.4
56.4	—	—	—	—	—	—	—	—	59.7	56.4	53.9	51.4	49.8
56.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	56.8	54.3	51.8	50.1
56.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.2	54.7	52.2	50.5
57.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.6	55.1	52.5	50.8
57.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.0	55.5	52.9	51.2
57.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.4	55.9	53.3	51.6
57.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.9	56.3	53.7	51.9
57.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59.3	56.7	54.0	52.3
58.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59.7	57.0	54.4	52.7
58.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.4	54.8	53.0
58.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.8	55.2	53.4
58.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.2	55.6	53.8
58.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.6	55.9	54.1
59.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59.0	56.3	54.5
59.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59.4	56.7	54.9
59.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59.8	57.1	55.2
59.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.5	55.6
59.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.9	56.0
60.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	58.3	56.4

注:本表系按全国统一曲线制定。

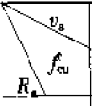
附表 2-1 超声-回弹综合法测区混凝土强度换算表(卵石)

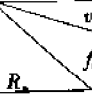
$\frac{V_s}{R_a}$ f_{cu}	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04	4.06	4.08	4.10
24.0					10.0	10.0	10.1	10.2	10.2	10.3	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.7
25.0	10.5	10.6	10.7	10.7	10.8	10.9	10.9	11.0	11.1	11.1	11.2	11.3	11.3	11.4	11.5	11.6
26.0	11.4	11.5	11.5	11.6	11.7	11.7	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5
27.0	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.3	13.4
28.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.1	14.2	14.3	14.4
29.0	14.1	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.1	15.2	15.3	15.4
30.0	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5
31.0	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.5	17.6
32.0	17.0	17.1	17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.5	18.6	18.7
33.0	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.4	19.5	19.6	19.7	19.8
34.0	19.1	19.3	19.4	19.5	19.6	19.8	19.9	20.0	20.1	20.3	20.4	20.5	20.6	20.8	20.9	21.0
35.0	20.3	20.4	20.5	20.7	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.4	21.6	21.7	21.8	22.0	22.1	22.2
36.0	21.4	21.5	21.7	21.8	22.0	22.1	22.2	22.4	22.5	22.7	22.8	22.9	23.1	23.2	23.4	23.5
37.0	22.6	22.7	22.9	23.0	23.2	23.3	23.5	23.6	23.7	23.9	24.0	24.2	24.3	24.5	24.6	24.8
38.0	23.8	23.9	24.1	24.2	24.4	24.6	24.7	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8	25.9	26.1
39.0	25.0	25.2	25.3	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1	26.3	26.5	26.6	26.8	27.0	27.1	27.3	27.5
40.0	26.3	26.5	26.6	26.8	27.0	27.1	27.3	27.5	27.6	27.8	28.0	28.2	28.3	28.5	28.7	28.8
41.0	27.6	27.8	27.9	28.1	28.3	28.5	28.6	28.8	29.0	29.2	29.4	29.5	29.7	29.9	30.1	30.3
42.0	28.9	29.1	29.3	29.5	29.6	29.8	30.0	30.2	30.4	30.6	30.8	31.0	31.2	31.3	31.5	31.7
43.0	30.3	30.5	30.6	30.8	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.0	32.2	32.4	32.6	32.8	33.0	33.2
44.0	31.6	31.8	32.1	32.3	32.5	32.7	32.9	33.1	33.3	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5	34.7
45.0	33.1	33.3	33.5	33.7	33.9	34.1	34.3	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4	35.6	35.9	36.1	36.3
46.0	34.5	34.7	35.0	35.2	35.4	35.6	35.9	36.1	36.3	36.5	36.7	37.0	37.2	37.4	37.7	37.9
47.0	36.0	36.2	36.5	36.7	36.9	37.2	37.4	37.6	37.9	38.1	38.3	38.6	38.8	39.0	39.3	39.5
48.0	37.5	37.7	38.0	38.2	38.5	38.7	39.0	39.2	39.4	39.7	39.9	40.2	40.4	40.7	40.9	41.2
49.0	39.0	39.3	39.5	39.8	40.0	40.3	40.5	40.8	41.1	41.3	41.6	42.8	42.1	42.3	42.6	42.8
50.0	40.6	40.9	41.1	41.4	41.7	41.9	42.2	42.4	42.7	42.3	43.2	43.5	43.8	44.0	44.3	44.6
$\frac{V_s}{R_a}$ f_{cu}	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42
23.0			10.0	10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.7	10.7	10.8
24.0	10.7	10.8	10.9	10.9	11.0	11.1	11.1	11.2	11.2	11.3	11.4	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7
25.0	11.6	11.7	11.8	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7
26.0	12.5	12.6	12.7	12.8	12.8	12.9	13.0	13.1	13.1	13.2	13.3	13.4	13.4	13.5	13.6	13.7
27.0	13.5	13.6	13.7	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.5	14.6	14.7

续上表

$\frac{v_a}{R_a}$ f_{cu}	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42
28.0	14.5	14.6	14.7	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8
29.0	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.1	16.2	16.3	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9
30.0	16.6	16.7	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1
31.0	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.3
32.0	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.3	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0	20.1	20.3	20.4	20.5
33.0	19.9	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7
34.0	21.1	21.3	21.4	21.5	21.6	21.8	21.9	22.0	22.2	22.3	22.4	22.5	22.7	22.8	22.9	23.0
35.0	22.4	22.5	22.6	22.8	22.9	23.0	23.2	23.3	23.3	23.6	23.7	23.8	24.0	24.1	24.2	24.4
36.0	23.6	23.8	23.9	24.1	24.2	24.3	24.5	24.6	24.8	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8
37.0	24.9	25.1	25.2	25.4	25.5	25.7	25.8	26.0	26.1	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2
38.0	26.3	26.4	26.6	26.7	26.9	27.0	27.2	27.4	27.5	27.7	27.8	28.0	28.1	28.3	28.5	28.6
39.0	27.6	27.8	28.0	28.1	28.3	28.4	28.6	28.8	28.9	29.1	29.3	29.4	29.6	29.8	29.9	30.1
40.0	29.0	29.2	29.4	29.5	29.7	29.9	30.1	30.2	30.4	30.6	30.8	30.9	31.1	31.3	31.5	31.6
41.0	30.4	30.6	30.8	31.0	31.2	31.4	31.5	31.7	31.9	32.1	32.3	32.5	32.6	32.8	33.0	33.2
42.0	31.9	32.1	32.3	32.5	32.7	32.9	33.1	33.2	33.4	33.6	33.8	34.0	34.2	34.4	34.6	34.8
43.0	33.4	33.6	33.8	34.0	34.2	34.4	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4	35.6	35.8	36.0	36.2	36.4
44.0	34.9	35.2	35.4	35.6	35.8	36.0	36.2	36.4	36.6	36.8	37.0	37.2	37.5	37.7	37.9	38.1
45.0	36.5	36.7	36.9	37.2	37.4	37.6	37.8	38.0	38.3	38.5	38.7	38.9	39.1	39.4	39.6	39.8
46.0	38.1	38.3	38.6	38.8	39.0	39.2	39.5	39.7	39.9	40.2	40.4	40.6	40.8	41.1	41.3	41.5
47.0	39.7	40.0	40.2	40.4	40.7	40.9	41.2	41.4	41.6	41.9	42.1	42.4	42.6	42.8	43.1	43.3
48.0	41.1	41.7	41.9	42.1	42.4	42.6	42.9	43.1	43.4	43.6	43.9	44.1	44.4	44.6	44.9	45.1
49.0	43.1	43.4	43.6	43.9	44.1	44.4	44.6	44.9	45.2	45.4	45.7	45.9	46.3	46.5	46.7	47.0
50.0	44.8	45.1	45.4	45.6	45.9	46.2	46.4	46.7	47.0	47.2	47.5	47.8	48.1	48.3	48.6	48.9
$\frac{v_a}{R_a}$ f_{cu}	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56	4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74
22.0		10.0	10.0	10.1	10.2	10.2	10.3	10.3	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.6	10.7	10.8
23.0	10.8	10.9	10.9	11.0	11.1	11.1	11.2	11.2	11.3	11.4	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7	11.7
24.0	11.8	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7	12.7
25.0	12.7	12.8	12.9	12.9	13.0	13.1	13.2	13.2	13.3	13.4	13.4	13.5	13.6	13.7	13.7	13.8
26.0	13.7	13.8	13.9	14.0	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.4	14.5	14.6	14.7	14.7	14.8	14.9
27.0	14.8	14.9	15.0	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	15.9	16.0
28.0	15.9	16.0	16.1	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.8	16.9	17.0	17.1	17.2
29.0	17.0	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.4
30.0	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.6	19.7
31.0	19.4	19.5	19.6	19.7	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.8	20.9	21.0

续上表

	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56	4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74
32.0	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	22.0	22.1	22.2	22.3
33.0	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3	22.5	22.6	22.7	22.8	23.0	23.1	23.2	23.3	23.4	23.6	23.7
34.0	23.2	23.3	23.4	23.6	23.7	23.8	23.9	24.1	24.2	24.3	24.5	24.6	24.7	24.8	25.0	25.1
35.0	24.5	24.7	24.8	24.9	25.1	25.2	25.3	25.5	25.6	25.7	25.9	26.0	26.2	26.3	26.4	26.6
36.0	25.9	26.0	26.2	26.3	26.5	26.6	26.8	26.9	27.1	27.2	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1
37.0	27.3	27.5	27.6	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4	28.5	28.7	28.8	29.0	29.1	29.3	29.4	29.6
38.0	28.8	28.9	29.1	29.3	29.4	29.6	29.7	29.9	30.1	30.2	30.4	30.5	30.7	30.9	31.0	31.2
39.0	30.3	30.4	30.6	30.8	30.9	31.1	31.3	31.4	31.6	31.8	32.0	32.1	32.3	32.5	32.6	32.8
40.0	31.8	32.0	32.2	32.3	32.5	32.7	32.9	33.0	33.2	33.4	33.6	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5
41.0	33.4	33.6	33.7	33.9	34.1	34.3	34.5	34.7	34.9	35.0	35.2	35.4	35.6	35.8	36.0	36.2
42.0	35.0	35.2	35.4	35.6	35.8	35.9	36.1	36.3	36.5	36.7	36.9	37.1	37.3	37.5	37.7	37.9
43.0	36.6	36.8	37.0	37.2	37.4	37.6	37.8	38.0	38.2	38.5	38.7	38.9	39.1	39.3	39.5	39.7
44.0	38.3	38.5	38.7	38.9	39.1	39.4	39.6	39.8	40.0	40.2	40.4	40.6	40.9	41.1	41.3	41.5
45.0	40.0	40.2	40.5	40.7	40.9	41.1	41.3	41.6	41.8	42.0	42.2	42.5	42.7	42.9	43.1	43.4
46.0	41.8	42.0	42.2	42.5	42.7	42.9	43.2	43.4	43.6	43.9	44.1	44.3	44.6	44.8	45.0	45.3
47.0	43.6	43.8	44.0	44.3	44.5	44.8	45.0	45.2	45.5	45.7	46.0	46.2	46.5	46.7	47.0	47.2
48.0	45.4	45.5	45.9	46.1	46.4	46.6	46.9	47.1	47.4	47.7	47.9	48.2	48.4	48.7	48.9	49.2
49.0	47.2	47.5	47.8	48.0	48.3	48.6	48.8	49.1	49.3	49.6	49.9					
50.0	49.1	49.4	49.7	50.0												

	4.76	4.78	4.80	4.82	4.84	4.86	4.88	4.90	4.92	4.94	4.96	4.98	5.00
21.0			10.0	10.0	10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.3	10.4	10.4	10.5
22.0	10.8	10.9	10.9	11.0	11.0	11.1	11.2	11.2	11.3	11.3	11.4	11.4	11.5
23.0	11.8	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.3	12.4	12.5	12.5
24.0	12.8	12.9	12.9	13.0	13.1	13.1	13.2	13.2	13.3	13.4	13.5	13.5	13.6
25.0	13.9	13.9	14.0	14.1	14.2	14.2	14.3	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.7
26.0	15.0	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.4	15.5	15.6	15.7	15.7	15.8	15.9
27.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	16.9	17.0	17.1
28.0	17.3	17.4	17.5	17.6	17.6	17.7	17.8	17.9	18.0	18.1	18.2	18.3	18.4
29.0	18.5	18.6	18.7	18.8	18.9	19.0	19.1	19.2	19.3	19.4	19.5	19.6	19.7
30.0	19.8	19.9	20.0	20.1	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0
31.0	21.1	21.2	21.3	21.4	21.5	21.6	21.7	21.8	22.0	22.1	22.2	22.3	22.4
32.0	22.4	22.5	22.7	22.8	22.9	23.0	23.1	23.2	23.4	23.5	23.6	23.7	23.8
33.0	23.8	23.9	24.1	24.2	24.3	24.4	24.5	24.7	24.8	24.9	25.0	25.2	25.3
34.0	25.2	25.4	25.5	25.6	25.8	25.9	26.0	26.1	26.3	26.4	26.5	26.7	26.8
35.0	26.7	26.8	27.0	27.1	27.3	27.4	27.5	27.7	27.8	27.9	28.1	28.2	28.4

续上表

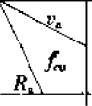
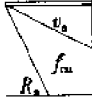
$\begin{matrix} v_n \\ f_{cu} \\ R_a \end{matrix}$	4.76	4.78	4.80	4.82	4.84	4.86	4.88	4.90	4.92	4.94	4.96	4.98	5.00
36.0	28.2	28.4	28.5	28.6	28.8	28.9	29.1	29.2	29.4	29.5	29.7	29.8	30.0
37.0	29.8	29.9	30.1	30.2	30.4	30.5	30.7	30.8	31.0	31.1	31.3	31.5	31.6
38.0	31.3	31.5	31.7	31.8	32.0	32.2	32.3	32.5	32.6	32.8	33.0	33.1	33.3
39.0	33.0	33.1	33.3	33.5	33.7	33.8	34.0	34.2	34.3	34.5	34.7	34.8	35.0
40.0	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4	35.5	35.7	35.9	36.1	36.3	36.4	36.6	36.8
41.0	36.3	36.5	36.7	36.9	37.1	37.3	37.5	37.7	37.9	38.0	38.2	38.4	38.6
42.0	38.1	38.3	38.5	38.7	38.9	39.1	39.3	39.5	39.7	39.9	40.1	40.3	40.5
43.0	39.9	40.1	40.3	40.5	40.7	40.9	41.1	41.3	41.5	41.7	42.0	42.2	42.4
44.0	41.7	41.9	42.1	42.4	42.6	42.8	43.0	43.2	43.4	43.7	43.9	44.1	44.3
45.0	43.6	43.8	44.0	44.3	44.5	44.7	44.9	45.2	45.4	45.6	45.8	46.1	46.3
46.0	45.5	45.7	46.0	46.2	46.4	46.7	46.9	47.1	47.4	47.6	47.8	48.1	48.3
47.0	47.4	47.7	47.9	48.2	48.4	48.7	48.9	49.2	49.4	49.6	49.9		
48.0	49.4	49.7	49.9										

注:表中 R_a 为修正后的测区回弹值, v_n 为修正后的超声声速值, f_{cu} 为测区混凝土强度换算值。

附表 2-2 超声-回弹综合法测区混凝土强度换算表(碎石)

$\begin{matrix} v_n \\ f_{cu} \\ R_a \end{matrix}$	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04	4.06	4.08	4.10
20.0															10.0	10.0
21.0						10.0	10.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.8
22.0	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7
23.0	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5
24.0	11.7	11.8	11.9	12.0	12.4	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.4
25.0	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2
26.0	13.3	13.4	13.5	13.6	13.8	13.9	14.0	14.1	14.3	14.4	14.5	14.6	14.8	14.9	15.0	15.1
27.0	14.1	14.2	14.3	14.5	14.6	14.7	14.9	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5	15.7	15.8	15.9	16.1
28.0	14.9	15.1	15.2	15.3	15.5	15.6	15.7	15.9	16.0	16.2	16.3	16.4	16.6	16.7	16.9	17.0
29.0	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3	16.5	16.6	16.8	16.9	17.1	17.2	17.4	17.5	17.7	17.8	18.0
30.0	16.6	16.8	16.9	17.1	17.2	17.4	17.5	17.7	17.8	18.0	18.1	18.3	18.5	18.6	18.8	18.9
31.0	17.5	17.6	17.8	18.0	18.1	18.3	18.4	18.6	18.8	18.9	19.1	19.3	19.4	19.6	19.8	19.9
32.0	18.4	18.5	18.7	18.9	19.0	19.2	19.4	19.6	19.7	19.9	20.1	20.2	20.4	20.6	20.8	20.9
33.0	19.3	19.5	19.6	19.8	20.0	20.2	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.2	21.4	21.6	21.8	22.0
34.0	20.2	20.4	20.6	20.8	20.9	21.1	21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.3	22.5	22.6	22.8	23.0
35.0	21.1	21.3	21.5	21.7	21.9	22.1	22.3	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.7	23.9	24.1
36.0	22.1	22.3	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.7	23.9	24.1	24.3	24.6	24.8	25.0	25.2
37.0	23.1	23.3	23.5	23.7	23.9	24.1	24.3	24.5	24.8	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.1	26.3

续上表

	3.80	3.82	3.84	3.86	3.88	3.90	3.92	3.94	3.96	3.98	4.00	4.02	4.04	4.06	4.08	4.10
38.0	24.1	24.3	24.5	24.7	24.9	25.1	25.4	25.6	25.8	26.0	26.3	26.5	26.7	27.0	27.2	27.4
39.0	25.0	25.3	25.5	25.7	26.0	26.2	26.4	26.7	26.9	27.1	27.4	27.6	27.8	28.1	28.3	28.5
40.0	26.1	26.3	26.5	26.8	27.0	27.3	27.5	27.7	28.0	28.2	28.5	28.7	29.0	29.2	29.5	29.7
41.0	27.1	27.3	27.6	27.8	28.1	28.3	28.6	28.8	29.1	29.3	29.6	29.8	30.1	30.4	30.6	30.9
42.0	28.1	28.4	28.6	28.9	29.2	29.4	29.7	29.9	30.2	30.5	30.7	31.0	31.3	31.5	31.8	32.1
43.0	29.2	29.5	29.7	30.0	30.3	30.5	30.8	31.1	31.3	31.6	31.9	32.2	32.4	32.7	33.0	33.3
44.0	30.3	30.5	30.8	31.1	31.4	31.6	31.9	32.2	32.5	32.8	33.0	33.3	33.6	33.9	34.2	34.5
45.0	31.3	31.6	31.9	32.2	32.5	32.8	33.1	33.4	33.6	33.9	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.7
46.0	32.4	32.7	33.0	33.3	33.6	33.9	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.7	36.0	36.3	36.7	37.0
47.0	33.5	33.9	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.7	36.0	36.3	36.6	37.0	37.3	37.6	37.9	38.2
48.0	34.7	35.0	35.3	35.6	35.9	36.3	36.6	36.9	37.2	37.5	37.9	38.2	38.5	38.9	39.2	39.5
49.0	35.8	36.1	36.5	36.8	37.1	37.4	37.8	38.1	38.4	38.8	39.1	39.5	39.8	40.1	40.5	40.8
50.0	37.0	37.3	37.6	38.0	38.3	38.7	39.0	39.3	39.7	40.0	40.4	40.7	41.1	41.4	41.8	42.1
	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42
20.0	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.3	11.4
21.0	10.9	11.0	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2	12.3
22.0	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3
23.0	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2
24.0	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	15.0	15.1	15.2
25.0	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	15.0	15.1	15.3	15.3	15.4	15.6	15.7	15.8	15.9	16.1	16.2
26.0	15.3	15.4	15.5	15.6	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3	16.4	16.6	16.7	16.8	17.0	17.1	17.2
27.0	16.2	16.3	16.5	16.6	16.7	16.9	17.0	17.1	17.3	17.4	17.6	17.7	17.8	18.0	18.1	18.3
28.0	17.1	17.3	17.4	17.6	17.7	17.9	18.0	18.2	18.3	18.4	18.6	18.7	18.9	19.0	19.2	19.3
29.0	18.1	18.3	18.4	18.6	18.7	18.9	19.0	19.2	19.3	19.5	19.6	19.8	20.0	20.1	20.3	20.4
30.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.7	19.9	20.1	20.2	20.4	20.5	20.7	20.9	21.0	21.2	21.4	21.5
31.0	20.1	20.3	20.4	20.6	20.8	20.9	21.1	21.3	21.5	21.6	21.8	22.0	22.2	22.3	22.5	22.7
32.0	21.1	21.3	21.5	21.7	21.8	22.0	22.2	22.4	22.6	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.6	23.8
33.0	22.2	22.3	22.5	22.7	22.9	23.1	23.3	23.5	23.7	23.9	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	25.0
34.0	23.2	23.4	23.6	23.8	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	25.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2
35.0	24.3	24.5	24.7	24.9	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4
36.0	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2	26.5	26.7	27.0	27.1	27.3	27.6	27.8	28.0	28.3	28.4	28.7
37.0	26.5	26.7	27.0	27.2	27.4	27.6	27.9	28.1	28.3	28.5	28.8	29.0	29.2	29.5	29.7	29.9
38.0	27.6	27.9	28.1	28.3	28.6	28.8	29.0	29.3	29.5	29.7	30.0	30.2	30.5	30.7	30.9	31.2
39.0	28.8	29.0	29.3	29.5	29.8	30.0	30.2	30.5	30.7	31.0	31.2	31.5	31.7	32.0	32.2	32.5

续上表

$\frac{v_a}{R_a}$ f_{cu}	4.12	4.14	4.16	4.18	4.20	4.22	4.24	4.26	4.28	4.30	4.32	4.34	4.36	4.38	4.40	4.42
40.0	30.0	30.2	30.5	30.7	31.0	31.2	31.5	31.7	32.0	32.2	32.5	32.8	33.0	33.3	33.5	33.8
41.0	31.1	31.4	31.7	31.9	32.2	32.4	32.7	33.0	33.2	33.5	33.8	34.0	34.3	34.6	34.9	35.1
42.0	32.3	32.6	32.9	33.1	33.4	33.7	34.0	34.2	34.5	34.8	35.1	35.4	35.6	35.9	36.2	36.5
43.0	33.5	33.8	34.1	34.4	34.7	35.0	35.2	35.5	35.8	36.1	36.4	36.7	37.0	37.3	37.6	37.9
44.0	34.8	35.1	35.4	35.6	35.9	36.2	36.5	36.8	37.1	37.4	37.7	38.0	38.3	38.6	38.9	39.2
45.0	36.0	36.3	36.6	36.9	37.2	37.5	37.8	38.1	38.5	38.8	39.1	39.4	39.7	40.0	40.3	40.6
46.0	37.3	37.6	37.9	38.2	38.5	38.9	39.2	39.5	39.8	40.1	40.4	40.8	41.1	41.4	41.7	42.1
47.0	38.6	38.9	39.2	39.5	39.9	40.2	40.5	40.8	41.2	41.5	41.8	42.2	42.5	42.8	43.2	43.5
48.0	39.8	40.2	40.5	40.9	41.2	41.5	41.9	42.2	42.6	42.9	43.2	43.6	43.9	44.3	44.6	45.0
49.0	41.2	41.5	41.8	42.2	42.5	42.9	43.2	43.6	43.9	44.3	44.7	45.0	45.4	45.7	46.1	46.5
50.0	42.5	42.8	43.2	43.6	43.9	44.3	44.6	45.0	45.4	45.7	46.1	46.5	46.8	47.2	47.6	47.9
$\frac{v_a}{R_a}$ f_{cu}	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56	4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74
20.0	11.5	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.1	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9
21.0	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9
22.0	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	15.0
23.0	14.3	14.4	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	14.2	15.6	15.6	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0
24.0	15.3	15.4	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.8	16.9	17.0	17.1
25.0	16.3	16.5	16.6	16.7	16.8	17.0	17.1	17.2	17.3	17.5	17.6	17.7	17.9	18.0	18.1	18.3
26.0	17.4	17.5	17.8	17.8	17.9	18.0	18.2	18.3	18.4	18.6	18.7	18.9	19.0	19.1	19.3	19.4
27.0	18.4	18.6	18.7	18.8	19.0	19.1	19.3	19.4	19.6	19.7	19.9	20.0	20.2	20.3	20.5	20.6
28.0	19.5	19.6	19.8	19.9	20.1	20.3	20.4	20.6	20.7	20.9	21.0	21.2	21.3	21.5	21.7	21.8
29.0	20.6	20.7	20.9	21.1	21.2	21.4	21.6	21.7	21.9	22.0	22.2	22.4	22.5	22.7	22.9	23.0
30.0	21.7	21.9	22.0	22.2	22.4	22.6	22.7	22.9	23.1	23.2	23.4	23.6	23.8	23.9	24.1	24.3
31.0	22.9	23.0	23.2	23.4	23.6	23.7	23.9	24.1	24.3	24.5	24.7	24.8	25.0	25.2	25.4	25.6
32.0	24.0	24.2	24.4	24.6	24.8	25.0	25.1	25.3	25.5	25.7	25.9	26.1	26.3	26.5	26.7	26.9
33.0	25.2	25.4	25.6	25.8	26.0	26.2	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.6	27.8	28.0	28.2
34.0	26.4	26.6	26.8	27.0	27.2	27.4	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.1	29.3	29.6
35.0	27.6	27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.2	29.4	29.6	29.8	30.0	30.3	30.5	30.7	30.9
36.0	28.9	29.1	29.3	29.6	29.8	30.0	30.2	30.5	30.7	30.9	31.2	31.4	31.6	31.9	32.1	32.3
37.0	30.1	30.4	30.6	30.9	31.1	31.3	31.6	31.8	32.0	32.3	32.5	32.8	33.0	33.3	33.5	33.7
38.0	31.4	31.7	31.9	32.2	32.4	32.7	32.9	33.2	33.4	33.7	33.9	34.2	34.4	34.7	34.9	35.2
39.0	32.7	33.0	33.2	33.5	33.8	34.0	34.3	34.5	34.8	35.1	35.3	35.6	35.8	36.1	36.4	36.6
40.0	34.1	34.3	34.6	34.9	35.1	35.4	35.7	35.9	36.2	36.5	36.7	37.0	37.3	37.6	37.8	38.1
41.0	35.4	35.7	36.0	36.2	36.5	36.8	37.1	37.4	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8	39.1	39.3	39.6

续上表

$\begin{array}{c} v_a \\ f_{\text{m}} \\ R_a \end{array}$	4.44	4.46	4.48	4.50	4.52	4.54	4.56	4.58	4.60	4.62	4.64	4.66	4.68	4.70	4.72	4.74
42.0	36.8	37.1	37.3	37.6	37.9	38.2	38.5	38.8	39.1	39.4	39.7	40.0	40.3	40.6	40.9	41.2
43.0	38.2	38.4	38.7	39.0	39.3	39.6	39.9	40.2	40.5	40.9	41.2	41.5	41.8	42.1	42.4	42.7
44.0	39.5	39.9	40.2	40.5	40.8	41.1	41.4	41.7	42.0	42.3	42.7	43.0	43.3	43.6	43.9	44.3
45.0	41.0	41.3	41.6	41.9	42.2	42.6	42.9	43.2	43.5	43.9	44.2	44.5	44.9	45.2	45.5	45.8
46.0	42.4	42.7	43.1	43.4	43.7	44.1	44.4	44.7	45.1	45.4	45.7	46.1	46.4	46.8	47.1	47.5
47.0	43.9	44.2	44.5	44.9	45.2	45.6	45.9	46.3	46.6	47.0	47.3	47.7	48.0	48.4	48.7	49.1
48.0	45.3	45.7	46.0	46.4	46.7	47.1	47.5	47.8	48.2	48.5	48.9	49.3	49.6	50.0		
49.0	46.8	47.2	47.5	47.9	48.3	48.6	49.0	49.4	49.8							
50.0	48.3	48.7	49.1	49.4	49.8											

$\begin{array}{c} v_a \\ f_{\text{m}} \\ R_a \end{array}$	4.76	4.78	4.80	4.82	4.84	4.86	4.88	4.90	4.92	4.94	4.96	4.98	5.00
20.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0	14.1
21.0	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2
22.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.1	16.2	16.3	16.4
23.0	16.1	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.9	17.0	17.1	17.2	17.3	17.5	17.6
24.0	17.3	17.4	17.5	17.6	17.8	17.9	18.0	18.1	18.3	18.4	18.5	18.7	18.8
25.0	18.4	18.5	18.7	18.8	18.9	19.1	19.2	19.3	19.5	19.6	19.7	19.9	20.0
26.0	19.6	19.7	19.8	20.0	20.1	20.3	20.4	20.6	20.7	20.9	21.0	21.1	21.3
27.0	20.8	20.9	21.1	21.2	21.4	21.5	21.7	21.8	22.0	22.1	22.3	22.4	22.6
28.0	22.0	22.1	22.3	22.4	22.6	22.8	22.9	23.1	23.3	23.4	23.6	23.7	23.9
29.0	23.2	23.4	23.5	23.7	23.9	24.1	24.2	24.4	24.6	24.7	24.9	25.1	25.3
30.0	24.5	24.6	24.8	25.0	25.2	25.4	25.5	25.7	25.9	26.1	26.3	26.5	26.6
31.0	25.8	25.9	26.1	26.3	26.5	26.7	26.9	27.1	27.3	27.5	27.7	27.8	28.0
32.0	27.1	27.3	27.5	27.7	27.9	28.1	28.3	28.5	28.7	28.9	29.1	29.3	29.5
33.0	28.4	28.6	28.8	29.0	29.2	29.4	29.7	29.9	30.1	30.3	30.5	30.7	30.9
34.0	29.8	30.0	30.2	30.4	30.6	30.9	31.1	31.3	31.5	31.7	32.0	32.2	32.4
35.0	31.2	31.4	31.6	31.8	32.1	32.3	32.5	32.7	33.0	33.2	33.4	33.7	33.9
36.0	32.6	32.8	33.0	33.3	33.5	33.7	34.0	34.2	34.5	34.7	34.9	35.2	35.4
37.0	34.0	34.2	34.5	34.7	35.0	35.2	35.5	35.7	36.0	36.2	36.5	36.7	37.0
38.0	35.4	35.7	35.9	36.2	36.5	36.7	37.0	37.2	37.5	37.8	38.0	38.3	38.6
39.0	36.9	37.2	37.4	37.7	38.0	38.3	38.5	38.8	39.1	39.3	39.6	39.9	40.2
40.0	38.4	38.7	39.0	39.2	39.5	39.8	40.1	40.4	40.6	40.9	41.2	41.5	41.8
41.0	39.9	40.2	40.5	40.8	41.1	41.4	41.7	42.0	42.3	42.5	42.8	43.1	43.4
42.0	41.4	41.7	42.1	42.4	42.7	43.0	43.3	43.6	43.9	44.2	44.5	44.8	45.1
43.0	43.0	43.3	43.6	43.9	44.3	44.6	44.9	45.2	45.5	45.8	46.2	46.5	46.8
44.0	44.6	44.9	45.2	45.6	45.9	46.2	46.5	46.9	47.2	47.5	47.9	48.2	48.5
45.0	46.2	46.5	46.9	47.2	47.5	47.9	48.2	48.5	48.9	49.2	49.6	49.9	
46.0	47.8	48.1	48.5	48.8	49.2	49.5	49.9						
47.0	49.4	49.8											

主要参考书目

- 1 中华人民共和国交通部部标准.公路桥涵设计标准.北京:人民交通出版社,1989
- 2 姚玲森主编.桥梁工程.北京:人民交通出版社,1984
- 3 徐日昶,王博义,赵家奎合编.桥梁检验.北京:人民交通出版社,1984
- 4 张印阁等编.桥梁现场检测技术.哈尔滨:东北林业大学出版社,1998
- 5 唐益群,叶为民主编.土木工程测试技术手册.上海:同济大学出版社,1999
- 6 姚谦峰,陈平编著.土木工程结构试验.北京:中国建筑工业出版社,2001
- 7 胡大琳主编.桥涵工程试验检测技术.北京:人民交通出版社,2000
- 8 四川省建筑科学研究所,成都科技大学,重庆建筑工程学院.电阻应变测试技术.北京:中国建筑工业出版社,1983
- 9 林维,张宏建,乐嘉华.过程检测技术及仪表.北京:化学工业出版社,1999
- 10 徐君兰主编.桥梁施工控制.北京:人民交通出版社,2000
- 11 刘明贵,余诗刚,汪大国编.桩基检测技术指南.北京:科学出版社,1995
- 12 国家建筑工程质量监督检验中心主编.混凝土无损检测技术.北京:中国建材工业出版社,1996
- 13 侯宝隆,蒋之峰编译.混凝土的非破损检测.北京:地震出版社,1992
- 14 余红发著.混凝土非破损测强技术研究.北京:中国建材工业出版社,1999
- 15 赵明华编著.桥梁桩基计算与检测.北京:人民交通出版社,2000
- 16 中华人民共和国建设部部标准.回弹法检测混凝土抗压强度技术规程(JGJ/T23—2001).北京:中国建筑工业出版社,2001
- 17 中国工程建设标准化协会标准.超声法检测混凝土缺陷技术规程(CECS 21:90).北京:中国计划出版社,1992
- 18 中华人民共和国建设部部标准.超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程(CECS 02:88).北京:中国建筑工业出版社,1988
- 19 中华人民共和国建设部部标准.钻芯法检测混凝土强度技术规程(CECS 03:88).北京:中国建筑工业出版社,1988
- 20 中华人民共和国建设部部标准.后装拔出法检测混凝土强度技术规程(CECS 69:94).北京:中国建筑工业出版社,1994