

UDC

掌握桥梁计算，手算、桥博MIDAS计算软件实操<https://edu.zhulong.com/lesson/5543-1.html>  
桥梁临时结构设计（挂篮盖梁支架围堰平台栈桥）<https://edu.zhulong.com/lesson/4032-1.html>  
钢结构桥梁设计<https://edu.zhulong.com/lesson/9271-1.html>

中华人民共和国行业标准



P

CJJ/T 276 – 2018

备案号 J 2479 – 2018

---

# 预弯预应力组合梁桥技术标准

Technical standard for preflexed composite beam bridges

2018 – 02 – 14 发布

2018 – 10 – 01 实施

---

中华人民共和国住房和城乡建设部 发布

# 中华人民共和国行业标准

## 预弯预应力组合梁桥技术标准

Technical standard for preflexed composite beam bridges

**CJJ/T 276 – 2018**

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2 0 1 8 年 1 0 月 1 日



中国建筑工业出版社

2018 北 京

# 中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

第 1846 号

---

## 住房城乡建设部关于发布行业标准 《预弯预应力组合梁桥技术标准》的公告

现批准《预弯预应力组合梁桥技术标准》为行业标准，编号为 CJJ/T 276-2018，自 2018 年 10 月 1 日起实施。

住房和城乡建设部门户网站 ([www.moh.gov.cn](http://www.moh.gov.cn))  
住房和城乡建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部

2018 年 2 月 14 日

## 前 言

根据住房和城乡建设部《关于印发〈2015年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标[2014]189号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,编制了本标准。

本标准的主要技术内容是:1 总则;2 术语和符号;3 基本规定;4 材料;5 施工阶段计算;6 承载能力极限状态计算;7 正常使用极限状态计算;8 栓钉连接件;9 构造要求;10 施工设备;11 施工及验收。

本标准由住房和城乡建设部负责管理,由东南大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送东南大学(九龙湖校区)交通学院桥梁与隧道工程研究所(地址:南京市江宁区东南大学路2号,邮政编码:211189)。

本标准主编单位:东南大学

北京市市政工程设计研究总院有限公司

本标准参编单位:哈尔滨市政建设投资集团有限责任公司

上海市城建设计研究总院(集团)有限公司

吉林大学

南通大学

北京市市政一建设工程有限责任公司

北京市市政四建设工程有限责任公司

南通路桥工程有限公司



本标准主要起草人员：黄 侨 包琦玮 周 良 王今朝  
郑一峰 包 华 惠 斌 杨 明  
李照明 李雪峰 任 远 陈雪枫  
陈维生 尹 杉 马少军 田延华  
史亚军 王 渭 彭亚东 白 伟  
李 雪 高秀美  
本标准主要审查人员：马 翥 张 汎 钱寅泉 李国平  
赵君黎 李 正 张少青 靳林生  
张海龙 李建国

目 次

1 总则 ..... 1

2 术语和符号 ..... 2

2.1 术语 ..... 2

2.2 符号 ..... 3

3 基本规定 ..... 10

3.1 一般规定 ..... 10

3.2 结构形式 ..... 11

3.3 作用及作用组合 ..... 12

4 材料 ..... 13

4.1 钢材 ..... 13

4.2 混凝土 ..... 14

4.3 钢筋 ..... 15

5 施工阶段计算 ..... 17

5.1 一般规定 ..... 17

5.2 应力计算 ..... 17

5.3 钢梁预拱度计算 ..... 19

5.4 钢梁的稳定性计算 ..... 20

6 承载能力极限状态计算 ..... 24

6.1 一般规定 ..... 24

6.2 截面受弯承载力计算 ..... 24

6.3 截面受剪承载力计算 ..... 27

7 正常使用极限状态计算 ..... 29

7.1 一般规定 ..... 29

7.2 成桥拱度及活载变形计算 ..... 29

7.3 抗裂性计算 ..... 31

7.4 应力计算 ..... 32

8	栓钉连接件	34
8.1	一般规定	34
8.2	连接件设计	34
8.3	连接件构造要求	36
9	构造要求	38
9.1	钢梁	38
9.2	一期混凝土	39
9.3	二期混凝土	39
10	施工设备	42
10.1	一般规定	42
10.2	防侧倾装置	43
10.3	加载装置	43
10.4	翻转架	44
10.5	施工设备的安全性检查	45
11	施工及验收	47
11.1	一般规定	47
11.2	施加预弯力	47
11.3	一期混凝土施工及释放预弯力	48
11.4	翻转预弯梁	49
11.5	存放和吊装	49
11.6	二期混凝土施工	50
11.7	质量验收	50
附录 A	变截面预弯预应力组合梁	51
附录 B	预弯预应力组合连续梁	53
附录 C	几何参数及计算系数	58
附录 D	变形计算	63
附录 E	截面应力计算	66
	本标准用词说明	76
	引用标准名录	77
附：	条文说明	79

## Contents

1	General Provisions .....	1
2	Terms and Symbols .....	2
2.1	Terms .....	2
2.2	Symbols .....	3
3	Basic Requirements .....	10
3.1	General Requirements .....	10
3.2	Structure Forms .....	11
3.3	Actions and Actions of Combination .....	12
4	Material .....	13
4.1	Structional Steel .....	13
4.2	Concrete .....	14
4.3	Steel Bar .....	15
5	Calculation of Construction Stage .....	17
5.1	General Requirements .....	17
5.2	Calculation of Stress .....	17
5.3	Calculation of Steel Beam Pre-camber .....	19
5.4	Calculation of Steel Beam Stability .....	20
6	Design of Untimate Limit States .....	24
6.1	General Requirements .....	24
6.2	Calculation of Section Bending Resistance .....	24
6.3	Calculation of Section Shearing Resistance .....	27
7	Design of Service Ability Limit States .....	29
7.1	General Requirements .....	29
7.2	Calculation of Finished Bridge Camber and Live Load Deformation .....	29



7.3	Calculation of Crack Resistance .....	31
7.4	Calculation of Stress .....	32
8	Stud Connectors .....	34
8.1	General Requirements .....	34
8.2	Design of Connectors .....	34
8.3	Detailing Requirement of Stud Connectors .....	36
9	Detailing Requirments .....	38
9.1	Steel Beams .....	38
9.2	First-stage Concrete .....	39
9.3	Second-stage Concrete .....	39
10	Construction Equipment .....	42
10.1	General Requirements .....	42
10.2	Anti-roll Device .....	43
10.3	Loading Reaction Frame and Load Platform .....	43
10.4	Rotatable Frame .....	44
10.5	Checking of Construction Equipment Security .....	45
11	Construction and Acceptance .....	47
11.1	General Requirements .....	47
11.2	Apply Pre-bending Force .....	47
11.3	First Stage Concrete Construction and Release Prestress .....	48
11.4	Flip Preflex Beam .....	49
11.5	Storage and Hoisting .....	49
11.6	Second Stage Concrete Construction .....	50
11.7	Quality Acceptance .....	50
Appendix A	Preflexed Composite Beam with Variable Sections .....	51
Appendix B	Preflexed Composite Continuous Beam .....	53
Appendix C	Geometric Parameters and Calculation Factors .....	58
Appendix D	Calculation of Deformation .....	63



Appendix E Calculation of Section Stress .....	66
Explanation of Wording in This Standard .....	76
List of Quoted Standards .....	77
Addition: Explanation of Provisions .....	79

## 1 总 则

- 1.0.1** 为使预弯预应力组合梁桥的设计、施工及验收符合安全可靠、适用耐久、技术先进、经济合理的要求，制定本标准。
- 1.0.2** 本标准适用于预弯预应力组合梁桥的设计、施工及验收。
- 1.0.3** 预弯预应力组合梁桥的设计、施工及验收除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 预弯预应力组合梁 preflexed composite beam

在预弯梁上浇筑腹板、上翼缘板等二期混凝土所形成的组合梁。

#### 2.1.2 预弯梁 preflexed beam

以预弯曲的钢梁作为预加应力的工具，以预弯力将其压至预设零点并浇筑一期混凝土；卸除预弯力后利用钢梁的反弹作用对一期混凝土施加预压应力，以此形成的半成品梁。

#### 2.1.3 栓钉连接件 stud connector

用于连接钢梁与一期混凝土、二期混凝土，使三者共同工作的栓钉。

#### 2.1.4 一期混凝土 first-stage concrete

钢梁在预弯状态下，浇筑在钢梁下翼板周围的混凝土。

#### 2.1.5 二期混凝土 second-stage concrete

在预弯梁上浇筑的混凝土，包括腹板混凝土、桥面板混凝土以及横隔板混凝土。

#### 2.1.6 钢梁预拱度 pre-camber

钢梁加工成形时的上拱值。

#### 2.1.7 控制预拱度 control pre-camber

在设计预拱度的基础上考虑钢梁焊接残余变形影响的，用于控制钢梁加工的上拱值。

#### 2.1.8 成桥拱度 completed bridge camber

桥梁建成时，在全部永久作用下预弯预应力组合梁桥的剩余上拱值。

#### 2.1.9 预弯力 preflex force

为将具有预拱度的钢梁压至预设零点而施加的一对竖向荷载。

### 2.1.10 拼接施工法 method of fabricated construction on pre-flexed beam segments

将预弯梁沿长度方向拆分成若干预弯梁段进行运输，在施工现场再将各预弯梁段重新连接，并在连接部下翼板浇筑混凝土，使其形成预弯梁整体的施工方法。

### 2.1.11 变截面预弯预应力组合梁 variable cross-section of preflexed composite beam

对钢梁变高度、变厚度的预弯预应力组合梁的总称。

### 2.1.12 预弯预应力组合连续梁 preflexed composite continuous beam

由按照永久作用剪跨划分的预弯梁段、中支点组合梁段以及连接段共同构成的纵桥向连续的预弯预应力组合梁。

### 2.1.13 剪跨 shear span

梁上零弯矩作用截面与相邻的最大弯矩作用截面之间的距离。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 材料性能

$E_c$ ——混凝土弹性模量；

$E_r$ ——普通钢筋弹性模量；

$E_s$ ——钢材弹性模量；

$f_{cd}$ 、 $f_{ck}$ ——分别为混凝土轴心抗压强度设计值和标准值；

$f_d$ ——钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

$f'_{sd}$ ——普通钢筋抗压强度设计值；

$f_{sk}$ 、 $f_{sd}$ ——分别为普通钢筋抗拉强度标准值和设计值；

$f_{su}$ ——栓钉材料的抗拉强度最小值；

$f_{tk}$ 、 $f_{td}$ ——分别为混凝土轴心抗拉强度标准值和设计值；

$f_{vd}$ ——钢材抗剪强度设计值；



$f_y$ ——钢材屈服强度;  
 $G_c$ ——混凝土剪切模量;  
 $G_s$ ——钢材剪切模量;  
 $\nu_c$ ——混凝土的泊松比;  
 $\nu_s$ ——钢材的泊松比;  
 $\alpha_c$ ——混凝土的线膨胀系数;  
 $\alpha_s$ ——钢材的线膨胀系数;  
 $\rho_s$ ——钢材的质量密度。

### 2.2.2 作用与作用效应

$F$ ——侧向支撑承受的水平力;  
 $M_{cr}$ ——截面一期混凝土下缘消压后的开裂弯矩;  
 $M_d$ ——基本组合的弯矩设计值;  
 $M_{d1}$ ——由钢梁自重引起的跨中截面弯矩标准值;  
 $M_{d2}$ ——由二期混凝土自重引起的跨中截面弯矩标准值;  
 $M_{d3}$ ——由桥梁二期结构重力引起的跨中截面弯矩标准值;  
 $M_f$ ——预弯预应力组合梁一期混凝土下缘的抗裂弯矩;  
 $M_{fd}$ ——可变作用(或荷载)频遇值引起的跨中弯矩;  
 $M_l$ ——作用准永久组合的跨中截面弯矩设计值;  
 $M_m$ ——由模板的自重集度引起的跨中截面弯矩;  
 $M_0$ ——截面一期混凝土下缘的消压弯矩;  
 $M_p$ ——由两个对称点(如四分点或三分点)作用设计预弯力引起的跨中截面预弯矩;  
 $M_q$ ——汽车作用引起的跨中弯矩标准值;  
 $M_r$ ——人群作用引起的跨中弯矩标准值;  
 $M_s$ ——钢梁自重引起的跨中截面弯矩;  
 $M_S$ ——作用频遇组合的跨中截面弯矩设计值;  
 $M_u$ ——按材料强度标准值计算的截面极限受弯承载力;  
 $M_{ud}$ ——截面受弯承载力设计值;  
 $M_x$ ——施工阶段由预弯力和钢梁自重引起的绕  $x$  轴作用的最大弯矩标准值;



- $P_{\text{con}}$ ——预弯力的施工控制值;  
 $P_d$ ——高强螺栓的预拉力设计值;  
 $P_0$ ——设计预弯力;  
 $q_s$ ——钢梁的自重集度;  
 $R$ ——构件承载力设计值;  
 $S_d$ ——作用(或荷载)效应的基本组合设计值;  
 $V_c$ ——钢梁顶面以上混凝土的极限压应力之和;  
 $V_d$ ——承载能力极限状态下基本组合的支点剪力设计值;  
 $V_{\text{max}}$ ——施工阶段预弯钢梁支点截面作用的最大剪力标准值;  
 $V_{\text{su}}$ ——栓钉连接件的极限受剪承载力设计值;  
 $[V_{\text{su}}]$ ——预弯阶段栓钉连接件的弹性受剪承载力设计值;  
 $V_{\text{ud}}$ ——基本组合的剪力设计值;  
 $w_{\text{cr}}$ ——正常使用极限状态下, 作用效应频遇组合(不计冲击)引起的一期混凝土下缘的裂缝宽度;  
 $[w_{\text{cr}}]$ ——裂缝宽度限值;  
 $\sigma_{\text{con}}$ ——预弯钢梁的控制应力;  
 $\sigma'_{\text{cu}}$ ——正常使用极限状态下二期混凝土上缘的压应力;  
 $\sigma_{cl}$ ——预弯梁反弹时一期混凝土下缘的最大压应力;  
 $\sigma_p$ ——一期混凝土下缘的有效预压应力;  
 $\sigma_{\text{sb}}$ ——正常使用极限状态下钢梁下缘的拉应力;  
 $\sigma_{\text{su}}$ ——正常使用极限状态下钢梁上缘的压应力;  
 $\sigma_w$ ——施工过程中, 钢梁上缘的最大弯曲压应力;  
 $\sigma_z$ ——钢梁自重引起的跨中截面最大弯曲应力。

### 2.2.3 几何参数

- $A_c$ ——一期混凝土的截面面积;  
 $A'_c$ ——二期混凝土的截面面积;  
 $A_s$ ——钢梁的全截面面积;  
 $A_1$ ——预弯梁的换算截面面积;  
 $A_2$ ——预弯预应力组合梁的换算截面面积;

- $A_3$ ——二期混凝土与钢梁的换算截面面积；
- $I_0$ ——变高度梁支点截面抗弯惯性矩；
- $I_1$ ——预弯梁换算截面绕其自身重心轴的惯性矩；
- $I_2$ ——预弯预应力组合梁换算截面绕其自身重心轴的惯性矩；
- $I_3$ ——不计一期混凝土的换算截面惯性矩；
- $I_{1y}$ 、 $I_{2y}$ ——分别为钢梁的受压、受拉翼板对钢梁重心（y）轴的惯性矩；
- $I_c$ ——一期混凝土截面绕自身形心轴的惯性矩，或变高度梁跨中截面抗弯惯性矩；
- $I'_c$ ——二期混凝土截面绕自身形心轴的惯性矩；
- $I_e$ ——折算截面惯性矩；
- $I_m$ ——变厚度钢梁跨中段的截面抗弯惯性矩；
- $I_n$ ——变厚度钢梁端部段的截面抗弯惯性矩；
- $I_s$ ——工字形钢梁绕其重心轴的惯性矩；
- $I_{sy}$ ——钢梁全截面对 y 轴的惯性矩；
- $L$ ——钢梁的计算跨径；
- $L_1$ ——两个支承台之间的中心距；
- $S$ ——钢梁下翼板以下混凝土换算截面绕预弯梁换算截面重心轴的静矩；
- $a$ ——钢梁腹板上横向加劲肋的间距；
- $b$ ——受压翼板的悬臂长度或混凝土工字形梁的腹板厚度；
- $b_1$ ——工字形钢梁受压翼板的宽度；
- $b'_i$ ——二期混凝土上翼缘板的有效宽度；
- $b_{sl}$ ——钢梁下翼板的宽度；
- $b_{su}$ ——钢梁上翼板的宽度；
- $b_w$ ——钢梁腹板宽度；
- $c$ ——钢梁上翼板混凝土保护层厚度；
- $d$ ——钢梁截面形心至一期混凝土截面形心的距离；

- $d'$ ——钢梁截面形心至二期混凝土截面形心的距离；
- $d_{c1}$ ——一期混凝土截面形心至预弯梁截面形心的距离；
- $d_{c2}$ ——一期混凝土截面形心至预弯预应力组合梁截面形心的距离；
- $d'_{c2}$ ——二期混凝土截面形心至预弯预应力组合梁截面形心的距离；
- $d'_{e3}$ ——形心  $G$  至二期混凝土截面形心的距离；
- $d_{ec3}$ ——形心  $G_e$  至一期混凝土截面形心的距离；
- $d'_{ec3}$ ——形心  $G_e$  至二期混凝土截面形心的距离；
- $d_{es}$ ——形心  $G_e$  至钢梁截面形心的距离；
- $d_{s1}$ ——钢梁截面形心至预弯梁截面形心的距离；
- $d_{s2}$ ——钢梁截面形心至预弯预应力组合梁截面形心的距离；
- $d_{s3}$ ——形心  $G$  至钢梁截面形心的距离；
- $f_{con}$ ——钢梁施工控制预拱度；
- $f_0$ ——钢梁设计预拱度；
- $f_{1-11}$ ——各受力阶段钢梁、预弯梁或预弯预应力组合梁跨中计算变形值；
- $f_q$ ——可变作用（或荷载）频遇值引起的跨中挠度；
- $h'_i$ ——二期混凝土上翼缘板的厚度；
- $h_s$ ——钢梁高度；
- $h_u$ ——钢腹板塑性区高度；
- $h_w$ ——钢梁的腹板高度；
- $h_y$ ——钢腹板弹性区高度；
- $l_1$ ——受压翼板侧向支承点的间距；
- $m$ ——支承台与同侧反力架的中心距，或跨中截面抗弯惯性矩与支点截面抗弯惯性矩之比；
- $r_y$ ——钢梁截面对  $y$  轴的回转半径；
- $t$ ——钢梁受拉翼板（下翼板）的厚度；
- $t'$ ——钢梁受压翼板（上翼板）的厚度；



- $t_w$ ——钢梁的腹板厚度；
- $u$ ——按纵桥向每排一个栓钉连接件考虑的栓钉间距；
- $x$ ——截面中性轴位置；
- $y_{cu}$ ——一期混凝土截面形心到一期混凝土上缘的距离；
- $y_{cu1}$ ——预弯梁截面形心到一期混凝土上缘的距离；
- $y_{cu2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心至一期混凝土上缘的距离；
- $y'_{cu2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心至二期混凝土上缘的距离；
- $y'_{cu3}$ ——形心  $G$  至二期混凝土上缘的距离；
- $y_{cl}$ ——一期混凝土截面形心到一期混凝土下缘的距离；
- $y_{cl1}$ ——预弯梁截面形心到一期混凝土下缘的距离；
- $y_{cl2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心至一期混凝土下缘的距离；
- $y'_{cl2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心至二期混凝土下缘的距离；
- $y'_{cl3}$ ——形心  $G$  至二期混凝土下缘的距离；
- $y'_{ecu}$ ——预弯预应力组合梁折算截面形心到二期混凝土上边缘的距离；
- $y_{ecl}$ ——预弯预应力组合梁折算截面形心到一期混凝土下边缘的距离；
- $y_{esu}$ ——预弯预应力组合梁折算截面形心到钢梁上缘的距离；
- $y_{esl}$ ——预弯预应力组合梁折算截面形心到钢梁下缘的距离；
- $y_{su}$ ——钢梁截面中性轴到钢梁上边缘的距离；
- $y_{su1}$ ——预弯梁截面形心到钢梁上缘的距离；
- $y_{su2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心至钢梁上缘的距离；
- $y_{su3}$ ——形心  $G$  至钢梁上缘的距离；
- $y_{sl}$ ——钢梁截面中性轴到钢梁下边缘的距离；

- $y_{sl1}$ ——预弯梁截面形心到钢梁下缘的距离；  
 $y_{sl2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心至钢梁下缘的距离；  
 $y_{sl3}$ ——形心  $G$  至钢梁下缘的距离；  
 $\lambda_y$ ——截面对  $y$  轴的长细比；  
 $\delta$ ——每一个垫板间隙的压密值。

#### 2.2.4 计算系数及其他

- $k$ ——钢梁焊接残余变形的影响系数；  
 $n$ ——对锚螺杆中螺帽与垫板间隙总数；  
 $n_1$ ——钢梁与一期混凝土的弹性模量比值；  
 $n_2$ ——钢梁与二期混凝土的弹性模量比值；  
 $\alpha$ ——连接件受剪承载力折减系数；  
 $\alpha_b$ ——钢梁绕  $y$  轴的惯性矩之比；  
 $\beta_b$ ——侧向支承点的影响系数；  
 $\eta_b$ ——截面对称性影响系数；  
 $\varphi_b$ ——钢梁的整体稳定系数；  
 $\phi_t$ ——混凝土徐变系数；  
 $\gamma_0$ ——桥梁结构的重要性系数；  
 $\xi_{bs}$ ——截面界限受压区高度系数。



## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 预弯预应力组合梁桥的设计计算应符合下列规定：

- 1 应按短暂状况进行钢梁及预弯梁的应力及稳定性验算；
- 2 应按持久状况及偶然状况进行预弯组合梁的承载能力极限状态的计算；
- 3 应按持久状况进行预弯组合梁正常使用极限状态的抗裂性、变形及裂缝宽度验算；并对使用阶段进行截面应力验算。

**3.1.2** 预弯预应力组合梁桥主体结构的设计使用年限应按表 3.1.2 采用。

表 3.1.2 预弯预应力组合梁桥的设计使用年限

类别	设计使用年限（年）	桥梁类型
1	50	小桥、中桥
2	100	特大桥、大桥、重要中桥

注：对有特殊要求结构的设计使用年限，可在上述规定的基础上经经济技术论证后予以调整。

**3.1.3** 预弯预应力组合梁桥可采用简支梁结构或连续梁结构，可用于多肋式直梁桥，以直代曲的弯梁桥和斜梁桥，不宜用于曲线桥梁。单跨跨径不宜大于 50m。

**3.1.4** 预弯预应力组合梁桥可采用等截面形式或变截面形式，其成桥竖曲线形应与道路纵断面线形相匹配。

**3.1.5** 当预弯预应力组合梁桥采用现场拼接施工方法时，简支梁桥的钢梁拼接点应选在梁跨的两个四分点以外不超过 1m 的范围内；连续梁桥的拼接段应选在永久作用弯矩零点截面附近。

**3.1.6** 预弯预应力组合简支梁的桥面板有效宽度应按国家现行标





**3.2.2** 预弯预应力组合简支梁桥的高跨比宜为  $1/32 \sim 1/28$ ，主梁间距宜为  $1100\text{mm} \sim 1900\text{mm}$ 。主梁宽与主梁高之比宜为  $1.0 \sim 1.6$ 。边梁悬臂板的长度应满足其根部截面的受弯承载力要求。

**3.2.3** 预弯预应力组合梁桥的主梁之间应设置横隔板（梁），横隔板（梁）可采用钢筋混凝土板或钢构件的形式。在梁端支座处、预应力加载点和跨中截面应设置横隔板（梁）。横隔板（梁）的间距不宜大于  $8\text{m}$ ，且每跨不应少于 5 道。混凝土横隔板尚应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的构造要求。

**3.2.4** 当采用变截面预弯预应力组合梁时，应符合本标准附录 A 的相关规定。

**3.2.5** 当采用预弯预应力组合连续梁时，应符合本标准附录 B 的相关规定。

### 3.3 作用及作用组合

**3.3.1** 预弯预应力组合梁桥的作用、作用组合及结构重要性系数，均应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 或《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

**3.3.2** 预弯预应力组合梁桥在进行短暂状况下的应力和稳定计算时，应采用作用的标准值。

**3.3.3** 在进行持久状况或偶然状况下承载能力极限状态计算时，作用组合应采用现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的基本组合。

**3.3.4** 在进行持久状况下正常使用极限状态计算时，应采用现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的频遇组合和准永久组合。截面应力验算应采用作用标准值组合，其中汽车荷载应计入冲击效应。

**3.3.5** 预弯预应力组合梁桥的温度作用可按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的混凝土桥梁取值。

## 4 材 料

### 4.1 钢 材

**4.1.1** 预弯预应力组合梁桥的钢梁应根据结构形式、受力特点、连接方式及所处环境条件合理选用钢材。

**4.1.2** 预弯组合梁桥的钢材应采用 Q345 钢、Q390 钢和 Q420 钢，其质量应分别符合现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 和《桥梁用结构钢》GB/T 714 的相关规定。钢材强度设计值应按表 4.1.2 采用。

**表 4.1.2 钢材的强度设计值 (MPa)**

钢 材		抗拉、抗压 和抗弯 $f_d$	抗剪 $f_{vd}$	屈服强度 $f_y$
牌 号	钢板厚度 (mm)			
Q345 钢	$\leq 16$	275	160	345
	16~40	270	155	335
	40~63	260	150	325
Q390 钢	$\leq 16$	310	180	390
	16~40	295	170	370
	40~63	280	160	350
Q420 钢	$\leq 16$	335	195	420
	16~40	320	185	400
	40~63	305	175	380

注：表中厚度系指计算点的钢材厚度，预弯钢梁的钢板厚度不宜超过 40mm。

**4.1.3** 钢梁材料的物理性能指标应按表 4.1.3 的规定采用。



**表 4.1.3 钢梁材料的物理性能指标**

弹性模量 $E_s$ (MPa)	剪切模量 $G_s$ (MPa)	泊松比 $\nu_s$	线膨胀系数 $\alpha_s$ (以每℃计)	质量密度 $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
$2.06 \times 10^5$	$7.9 \times 10^4$	0.31	$1.2 \times 10^{-5}$	7850

**4.1.4** 栓钉连接件的材料应采用 ML15 和 ML15A1 钢材，栓钉连接件的最小屈服强度应满足  $\sigma_s \geq 320\text{MPa}$ 、最小极限强度  $\sigma_b \geq 400\text{MPa}$ 、延伸率  $\delta_s \geq 14\%$  的技术要求。材料其他性能应符合现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的规定。

**4.1.5** 高强螺栓应采用 20MnTiB 或 35VB 钢制作，其力学性能应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件》GB/T 3632 的要求。高强螺栓预拉力设计值  $P_d$  应按表 4.1.5 的规定采用。

**表 4.1.5 高强螺栓预拉力设计值  $P_d$  (kN)**

性能等级	螺纹规格				
	M20	M22	M24	M27	M30
8.8S	125	150	175	230	280
10.9S	155	190	225	290	355

**4.1.6** 钢梁及连接件的焊接材料应符合下列规定：

1 手工焊接采用的焊接材料应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117 或《热强钢焊条》GB/T 5118 的规定。选用的焊条型号应与主体母材金属性能相适应。

2 自动焊接或半自动焊接采用的焊丝和焊剂，应与主体母材金属性能相适应，并应符合国家现行相关标准的规定。

## 4.2 混 凝 土

**4.2.1** 预弯预应力组合梁桥混凝土强度等级宜为 C40~C60。其中一期混凝土强度等级不应低于 C50，应采用低收缩、低徐变的早强混凝土；二期混凝土的强度等级不应低于 C40，当跨径超过



35m 时，强度等级不应低于 C50。

**4.2.2 混凝土的轴心抗压强度设计值  $f_{cd}$ 、轴心抗拉强度设计值  $f_{td}$ 、轴心抗压强度标准值  $f_{ck}$ 、轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$  应按表 4.2.2 采用。**

**表 4.2.2 混凝土的强度设计值和强度标准值 (MPa)**

混凝土强度等级	C40	C45	C50	C55	C60
$f_{cd}$	18.4	20.5	22.4	24.4	26.5
$f_{td}$	1.65	1.74	1.83	1.89	1.96
$f_{ck}$	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5
$f_{tk}$	2.40	2.51	2.65	2.74	2.85

**4.2.3 混凝土受压或受拉时的弹性模量  $E_c$  应按表 4.2.3 采用。**

**表 4.2.3 混凝土的弹性模量 (MPa)**

混凝土强度等级	C40	C45	C50	C55	C60
$E_c$	$3.25 \times 10^4$	$3.35 \times 10^4$	$3.45 \times 10^4$	$3.55 \times 10^4$	$3.60 \times 10^4$

注：当采用引气剂及较高砂率的泵送混凝土且无实测数据时，表中 C50~C60 的  $E_c$  值应乘以折减系数 0.95。

**4.2.4 混凝土的剪切模量  $G_c$  可按混凝土弹性模量数值的 0.4 倍采用；混凝土的泊松比  $\nu_c$  可采用 0.2；混凝土的温度线膨胀系数  $\alpha_c$  可取为  $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。**

## 4.3 钢 筋

**4.3.1 预弯组合梁桥中的普通钢筋宜选用 HPB300、HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500 和 RRB400 钢筋，并应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 1 部分：热轧光圆钢筋》GB/T 1499.1 或《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB/T 1499.2 的规定。**

**4.3.2 预弯预应力组合梁桥使用的普通钢筋除桥面板内的横桥向钢筋外，均应视为构造钢筋。钢筋的抗拉强度标准值应具有不**

小于 95% 的保证率。钢筋的抗拉强度标准值  $f_{sk}$  应按表 4.3.2 的规定采用。

**表 4.3.2 钢筋抗拉强度标准值 (MPa)**

钢筋种类	符号	公称直径 $d$ (mm)	$f_{sk}$
HPB300	$\Phi$	6~22	300
HRB400 HRBF400 RRB400	$\Phi$ $\Phi^F$ $\Phi^R$	6~50	400
HRB500 HRBF500	$\Phi$ $\Phi^F$	6~50	500

**4.3.3 普通钢筋的抗拉强度设计值  $f_{sd}$  和抗压强度设计值  $f'_{sd}$  应按表 4.3.3 采用。**

**表 4.3.3 钢筋抗拉、抗压强度设计值 (MPa)**

钢筋种类	$f_{sd}$	$f'_{sd}$
HPB300	250	250
HRB400 HRBF400 RRB400	330	330
HRB500 HRBF500	415	400

注：构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自的强度设计值。

**4.3.4 普通钢筋的弹性模量  $E_r$  应按表 4.3.4 采用。**

**表 4.3.4 普通钢筋的弹性模量 (MPa)**

钢筋种类	$E_r$
HPB300	$2.1 \times 10^5$
HRB400、HRB500 HRBF400、HRBF500 RRB400	$2.0 \times 10^5$

## 5 施工阶段计算

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 预弯预应力组合梁桥的施工阶段包括施加钢梁预弯力、预弯梁反弹、浇筑二期混凝土及施加二期结构重力等四个主要受力阶段。

**5.1.2** 各施工阶段的计算内容应包括跨中截面钢梁上下缘、一期混凝土下缘、二期混凝土上缘的应力以及跨中变形。

**5.1.3** 在钢梁预弯阶段，应验算钢梁的侧向稳定性并采取必要的防侧倾措施。

**5.1.4** 在计算预弯预应力组合梁施工过程中截面各控制点的应力时，应计入一、二期混凝土的收缩和徐变的影响。

**5.1.5** 钢梁预弯力的加载点可选在计算跨径的两个四分点或两个三分点。

### 5.2 应力计算

**5.2.1** 设计钢梁预弯力时，钢梁跨中截面的控制应力应按下式计算：

$$\sigma_{\text{con}} \leq 0.75f_y \quad (5.2.1)$$

式中： $f_y$ ——钢材的屈服强度（MPa），按本标准表 4.1.2 采用；

$\sigma_{\text{con}}$ ——预弯钢梁的控制应力（MPa）。

**5.2.2** 对等截面预弯钢梁的设计预弯力应按下列方法确定：

1 当加载点选在计算跨径的两个四分点，由预弯力和钢梁自重共同引起的跨中截面上缘（或下缘）最大应力达到控制应力时：

$$P_0 = \frac{4(\sigma_{\text{con}} - \sigma_z)I_s}{Ly_{\text{su}}} \quad (5.2.2-1)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{8I_s} q_s L^2 y_{\text{su}} \quad (5.2.2-2)$$



式中:  $P_0$ ——四分点的设计预弯力 (N);

$\sigma_{\text{con}}$ ——预弯钢梁的控制应力 (MPa);

$I_s$ ——工字形钢梁绕其重心轴的惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$L$ ——钢梁的计算跨径 (mm);

$\sigma_z$ ——钢梁自重引起的跨中截面最大应力 (MPa);

$q_s$ ——钢梁的自重荷载集度 (N/mm);

$y_{\text{su}}$ ——钢梁截面中性轴到钢梁上边缘的距离 (mm)。

2 当预弯力的加载点选在两个三分点时, 由式 (5.2.2-1) 计算的预弯力  $P_0$  应乘以 0.75 的折减系数。

5.2.3 施工中的预弯力控制值应在设计预弯力的基础上计入其损失量, 按下列方法计算:

1 对单梁加载工艺, 根据加载装置的锁定及变形影响, 预弯力的施工控制值可按下式计算:

$$P_{\text{con}} = 1.03P_0 \quad (5.2.3-1)$$

式中:  $P_{\text{con}}$ ——预弯力的施工控制值 (N);

$P_0$ ——设计预弯力 (N)。

2 对双梁加载工艺 (图 5.2.3), 应计入拉杆的螺帽和垫板间的间隙压密等引起的预弯力损失。预弯力的施工控制值可按下列公式计算:

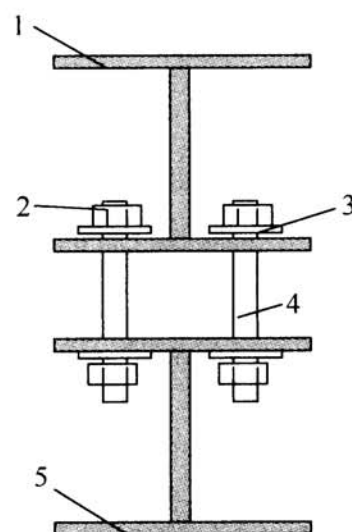


图 5.2.3 双梁加载锚固构造

1—上钢梁; 2—螺帽; 3—垫板; 4—拉杆; 5—下钢梁

$$P_{\text{con}} = P_0 + \Delta P \quad (5.2.3-2)$$

$$\Delta P = n\delta \frac{3E_s I_s}{2m^2(m + \frac{3}{2}L_1)} \quad (5.2.3-3)$$

式中:  $\Delta P$ ——锚杆及锚具变形引起的预弯力损失量 (N);

$n$ ——对锚螺杆中螺帽与垫板间隙总数,  $n=4$ ;

$\delta$ ——按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土



土桥涵设计规范》JTG D62 确定的每一个垫板间隙的压密值 (mm);

$I_s$ ——工字形钢梁的截面惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$E_s$ ——钢材的弹性模量 (MPa);

$L_1$ ——两个支承台中心之间的距离 (mm);

$m$ ——支承台与同一段反力架中心之间的距离 (mm)。

#### 5.2.4 预弯梁反弹阶段, 一期混凝土下缘应力应满足下式要求:

$$\sigma_{cl} \leq 0.56 f'_{cu,k} \quad (5.2.4)$$

式中:  $\sigma_{cl}$ ——预弯梁反弹时一期混凝土下缘的最大压应力 (MPa);

$f'_{cu,k}$ ——反弹时实测的一期混凝土的立方体抗压强度标准值 (MPa), 不小于混凝土设计强度等级的 90%。

### 5.3 钢梁预拱度计算

#### 5.3.1 当采用单梁预弯工艺时, 等截面钢梁的设计预拱度的计算应符合下列规定:

1 当预弯力作用点设在两个四分点时, 由设计预弯力和钢梁自重作用引起的钢梁设计预拱度可按下式计算:

$$f_0 = \frac{11P_0L^3}{384E_sI_s} + \frac{5q_sL^4}{384E_sI_s} \quad (5.3.1-1)$$

式中:  $f_0$ ——钢梁设计预拱度 (mm);

$P_0$ ——设计预弯力 (N), 应按本标准式 (5.2.2-1) 计算;

$L$ ——预弯 (钢) 梁的计算跨径 (mm);

$E_s$ ——钢材的弹性模量 (MPa);

$I_s$ ——钢梁绕其水平重心轴的截面惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$q_s$ ——钢梁的自重集度标准值 (N/mm)。

2 当预弯力作用点设在两个三分点时, 可按下式计算:

$$f_0 = \frac{23P_0L^3}{648E_sI_s} + \frac{5q_sL^4}{384E_sI_s} \quad (5.3.1-2)$$

**5.3.2 钢梁加工控制预拱度应在设计预拱度  $f_0$  的基础上计入钢梁焊接残余变形的影响，并应按下式计算：**

$$f_{\text{con}} = kf_0 \quad (5.3.2)$$

式中： $f_{\text{con}}$ ——钢梁施工控制预拱度（mm）；

$f_0$ ——钢梁设计预拱度（mm）；

$k$ ——钢梁焊接残余变形的影响系数，宜根据实测结果取值；缺少实测数据时取  $k=1.06$ 。

**5.3.3 对等截面简支预弯梁，释放预弯力后跨中的剩余拱度值不宜小于钢梁设计预拱度的 55%。**

## 5.4 钢梁的稳定性计算

**5.4.1 在施工阶段，等截面工字形钢梁的受压翼板的自由长度与其宽度之比不宜大于表 5.4.1 的限值。**

**表 5.4.1 工字形截面钢梁不需计算整体稳定性的最大  $l_1/b_1$  值**

钢种	跨中无侧向支承点的工字形钢梁	跨中有侧向支承点的工字形钢梁
Q345 钢	10.5	13.0
Q390 钢	10.0	12.5
Q420 钢	9.5	12.0

注：1 对跨中无侧向支承点的钢梁， $l_1$  为其跨度；对跨中有侧向支承点的钢梁， $l_1$  为受压翼板侧向支承点间的距离（梁的支座和横隔梁可视为侧向支承点）；

2  $b_1$  为工字形钢梁受压翼板的宽度。

**5.4.2 在施加预弯力过程中，等截面的工字形钢梁不满足本标准表 5.4.1 中的最大限值时应进行整体稳定性验算，并应符合下列规定：**

**1 预弯钢梁的整体稳定性可按下式验算：**

$$\sigma_w = \frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f_d \quad (5.4.2-1)$$

式中： $\sigma_w$ ——施工过程中，钢梁上缘的最大弯曲压应力（MPa）；

- $M_x$ ——在施工阶段由预弯力和钢梁自重引起的绕  $x$  轴（图 5.4.2）作用的最大弯矩标准值（ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ）；  
 $W_x$ ——按受压边计算的钢梁截面抗弯模量（ $\text{mm}^3$ ）；  
 $\varphi_b$ ——钢梁的整体稳定系数；  
 $f_d$ ——钢梁的材料强度设计值（ $\text{MPa}$ ）。

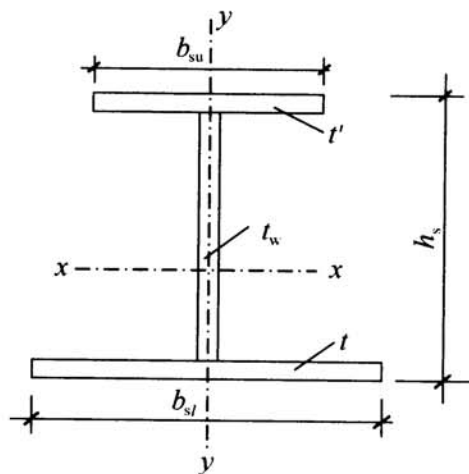


图 5.4.2 工字形钢梁的截面

2 等截面预弯钢梁的整体稳定系数可按下列公式计算：

$$\varphi_b = \beta_b \frac{4320}{\lambda_y^2} \cdot \frac{A_s h_s}{W_{x, \text{eff}}} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_y t'}{4.4 h_s} \right)^2} + \eta_b \right] \frac{235}{f_y} \quad (5.4.2-2)$$

$$\alpha_b = \frac{I_{1y}}{I_{sy}} \approx \frac{I_{1y}}{I_{1y} + I_{2y}} \quad (5.4.2-3)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_{sy}}{A_s}} \quad (5.4.2-4)$$

$$\lambda_y = \frac{l_1}{r_y} \quad (5.4.2-5)$$

式中： $\beta_b$ ——侧向支承点的影响系数，当有两个或两个以上侧向支承点时，取  $\beta_b = 1.2$ ；

$A_s$ 、 $h_s$ ——分别为钢梁的全截面面积（ $\text{mm}^2$ ）和高度（ $\text{mm}$ ）（图 5.4.2）；

$t'$ ——钢梁受压翼板的厚度（ $\text{mm}$ ）；



$f_y$ ——钢材的屈服强度（MPa）；

$\eta_b$ ——截面对称性影响系数：当  $b_{su}=b_{sl}$  时， $\eta_b=0$ ；当  $b_{su}<b_{sl}$  时， $\eta_b=2\alpha_b-1$ ；

$\alpha_b$ ——钢梁绕  $y$  轴的惯性矩之比；

$I_{1y}$ 、 $I_{2y}$ ——分别为受压、受拉翼板对  $y$  轴的惯性矩（mm<sup>4</sup>）；

$I_{sy}$ ——钢梁全截面对  $y$  轴的惯性矩（mm<sup>4</sup>）；

$\lambda_y$ ——截面对  $y$  轴的长细比；

$l_1$ ——受压翼板侧向支承点的间距（mm）；

$r_y$ ——钢梁截面对  $y$  轴的回转半径（mm）。

**3** 当按式（5.4.2-2）算得的  $\varphi_b > 0.6$  时，应按下式计算  $\varphi'_b$ ，并取代  $\varphi_b$  值：

$$\varphi'_b = 1.07 - 0.282/\varphi_b \leq 1.0 \quad (5.4.2-6)$$

**5.4.3** 当预弯钢梁时，应在钢梁两侧的受压区设置侧向支撑。侧向支撑承担的水平力可按下式计算，并可依此设计侧向支顶杆的截面面积：

$$F = \frac{A_{sl} f_d}{85} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (5.4.3)$$

式中： $A_{sl}$ ——钢梁受压翼板的面积（mm<sup>2</sup>）；

$F$ ——侧向支撑承受的水平力（N）；

$f_y$ ——钢材的屈服强度（MPa）；

$f_d$ ——钢材的强度设计值（MPa）。

**5.4.4** 当预弯钢梁时，应验算受压翼板和腹板的局部稳定性。钢梁的局部稳定应符合下列规定：

**1** 钢梁受压翼板板的局部稳定可通过其宽厚比按下列公式计算：

$$\frac{b}{t'} \leq 12 \sqrt{\frac{345}{f_y}} \quad (5.4.4-1)$$

$$b = \frac{1}{2}(b_{su} - t_w) \quad (5.4.4-2)$$

式中： $b$ ——受压翼板的悬臂长度（mm）；



$t'$ ——受压翼板的厚度 (mm);

$f_y$ ——钢材的屈服强度 (MPa)。

2 一般情况下, 预弯工字形钢梁腹板上可不设纵向加劲肋, 其横向加劲肋间距  $a$  应满足下式要求:

$$\left(\frac{h_w}{100t_w}\right)^4 \left[ \left(\frac{\sigma}{345}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{77 + 58(h_w/a)^2}\right)^2 \right] \leq 1 \quad (a > h_w)$$

(5.4.4-3)

式中:  $h_w$ ——钢梁的腹板高度 (mm);

$t_w$ ——钢梁的腹板厚度 (mm);

$a$ ——钢梁腹板上横向加劲肋的间距 (mm), 应满足  $a \leq 2.5h_w$  且  $a \leq L/8$ ;

$\sigma$ ——预弯力和钢梁自重弯矩作用标准值引起的钢梁腹板上边缘的正应力 (MPa);

$\tau$ ——预弯力和钢梁自重弯矩作用标准值引起的钢梁腹板上边缘的剪应力 (MPa)。

3 在预弯钢梁的支点截面及预弯力作用截面均应设置横向加劲肋。钢梁腹板高度与腹板厚度的比值  $h_w/t_w$  不应超过 165。

## 6 承载能力极限状态计算

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 预弯预应力组合梁桥应按承载能力极限状态的要求，对构件进行受弯及受剪承载力验算。在进行承载能力极限状态计算时，应采用作用的基本组合，组合中汽车荷载应计入冲击系数；结构材料应采用强度设计值。

**6.1.2** 桥梁构件承载能力极限状态计算中应采用下列表达式：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (6.1.2-1)$$

$$R_d = R(f_d, a_d) \quad (6.1.2-2)$$

式中： $\gamma_0$ ——桥梁结构的重要性系数；

$S_d$ ——作用（或荷载）效应的基本组合设计值；

$R_d$ ——构件承载力设计值；

$R(f_d, a_d)$ ——构件承载力函数；

$f_d$ ——材料强度设计值；

$a_d$ ——几何参数设计值。

### 6.2 截面受弯承载力计算

**6.2.1** 对等截面的预弯预应力组合简支梁，应对跨中截面受弯承载力进行验算。钢梁的钢板厚度变化截面应进行受弯承载力验算。

**6.2.2** 预弯预应力组合梁正截面的界限受压区高度系数可按表 6.2.2 采用。

表 6.2.2 界限受压区高度系数  $\xi_{bs}$

钢 种	C50 及以下	C55	C60
Q345 钢材	0.57	0.56	0.55
Q390 钢材	0.56	0.54	0.53
Q420 钢材	0.54	0.53	0.52

### 6.2.3 预弯预应力组合梁的正截面受弯承载力应按下列方法计算：

1 当中性轴在混凝土上翼缘板内，即  $x \leq h'_i$  时，应以宽度为  $b'_i$  的矩形截面按下式计算截面受弯承载力  $M_{ud}$ （图 6.2.3-1）：

$$\begin{aligned} \gamma_0 M_d \leq M_{ud} = & f_d \left[ tb_{su} \left( \frac{x}{0.8} - c - \frac{t}{2} \right) + tb_{sl} \left( h_s + c - \frac{x}{0.8} - \frac{t}{2} \right) \right. \\ & \left. + t_w h_u \left( \frac{h_u}{2} + \frac{x}{0.8} - c - t \right) + \frac{2}{3} t_w \left( \frac{x}{0.8} - c - t \right)^2 \right] \\ & + f_{cd} b'_i x \left( \frac{x}{0.8} - \frac{x}{2} \right) \end{aligned} \quad (6.2.3-1)$$

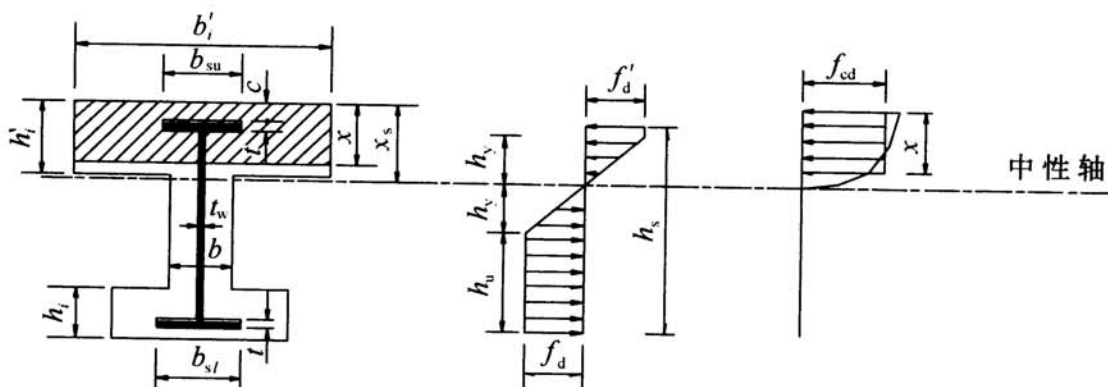


图 6.2.3-1 中性轴位于混凝土翼缘板中的截面抗弯计算图式

混凝土受压区高度  $x$  应按下列公式计算：

$$f_{cd} b'_i x = f_d h_u t_w + f_d \Delta b_s t \quad (6.2.3-2)$$

$$h_y = x_s - c - t = \frac{x}{0.8} - c - t \quad (6.2.3-3)$$

$$h_u = h_s - 2h_y - 2t = h_s - \frac{2x}{0.8} + 2c \quad (6.2.3-4)$$

$$\Delta b_s = b_{sl} - b_{su} \quad (6.2.3-5)$$

式中： $x$ ——截面中性轴位置（mm）；

$b_{su}$ ——钢梁上翼板的宽度（mm）；

$b_{sl}$ ——钢梁下翼板的宽度（mm）；

$\Delta b_s$ ——钢梁上、下翼板宽度之差（mm）；

$h_y$ ——钢腹板弹性区高度（mm）；

$h_u$ ——钢腹板塑性区的高度（mm）；

$t$ ——钢梁翼板厚度 (mm);  
 $t_w$ ——钢梁腹板厚度 (mm);  
 $c$ ——钢梁上翼板混凝土保护层厚度 (mm);  
 $h_s$ ——钢梁高度 (mm);  
 $h'_i$ ——二期混凝土上翼缘板的厚度 (mm);  
 $b'_i$ ——二期混凝土上翼缘板的有效宽度 (mm);  
 $M_d$ ——基本组合的弯矩设计值 (N·mm);  
 $f_{cd}$ ——混凝土抗压强度设计值 (MPa);  
 $f_d$ ——钢材抗拉强度设计值 (MPa);  
 $f'_d$ ——钢材抗压强度设计值 (MPa)。

2 当中性轴在混凝土腹板内, 即  $x > h'_i$  时, 计算中应计入截面腹板受压的作用, 其受弯承载力应按下式计算 (图 6.2.3-2):

$$\begin{aligned}
 \gamma_0 M_d \leq M_{ud} = & f_d \left[ tb_{su} \left( \frac{x}{0.8} - c - \frac{t}{2} \right) + tb_{sl} \left( h_s + c - \frac{x}{0.8} - \frac{t}{2} \right) \right. \\
 & \left. + t_w h_u \left( \frac{h_u}{2} + \frac{x}{0.8} - c - t \right) + \frac{2}{3} t_w \left( \frac{x}{0.8} - c - t \right)^2 \right] \\
 & + f_{cd} \left[ (b'_i - b) h'_i \left( \frac{x}{0.8} - \frac{h'_i}{2} \right) + bx \left( \frac{x}{0.8} - \frac{x}{2} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (6.2.3-6)$$

$$f_{cd} (b'_i - b) h'_i + f_{cd} bx = f_d h_u t_w + f'_d \Delta b_s t \quad (6.2.3-7)$$

式中:  $b$ ——混凝土工字形梁的腹板厚度 (mm)。

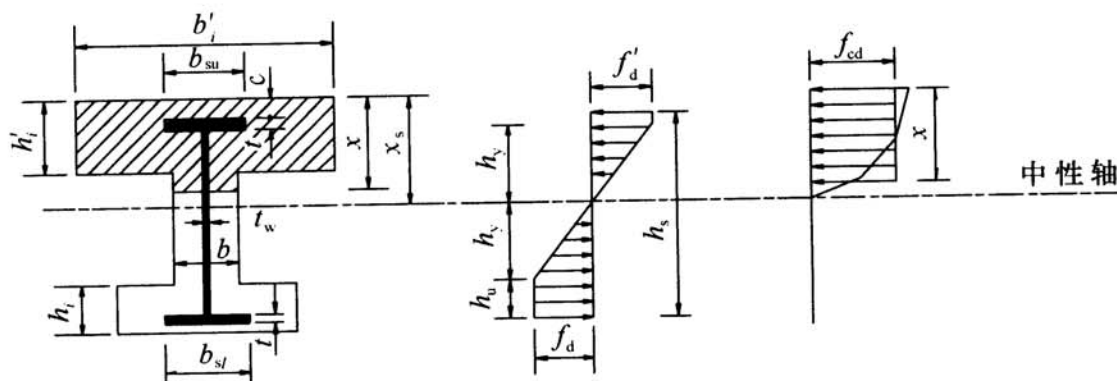


图 6.2.3-2 中性轴位于混凝土腹板中的截面抗弯计算图式



**6.2.4** 当预弯预应力组合梁进行受弯承载力计算时, 截面受压区高度  $x$  应满足下列公式要求:

$$x \leq \xi_{bs}(h_s + c) \quad (6.2.4-1)$$

$$x > c + t \quad (6.2.4-2)$$

式中:  $x$ ——截面中性轴位置 (mm);

$h_s$ ——钢梁高度 (mm);

$\xi_{bs}$ ——截面界限受压区高度系数;

$t$ ——钢梁翼板厚度 (mm);

$c$ ——钢梁上翼板混凝土保护层厚度 (mm)。

### 6.3 截面受剪承载力计算

**6.3.1** 预弯预应力组合梁的截面受剪承载力可按下式计算:

$$\gamma_0 V_d \leq V_{ud} \approx f_{vd} h_w t_w \quad (6.3.1)$$

式中:  $V_d$ ——承载能力极限状态下基本组合的支点剪力设计值或预弯施工阶段的支点剪力设计值 (N), 取两者中的较大者;

$\gamma_0$ ——桥梁结构的重要性系数;

$V_{ud}$ ——预弯预应力组合梁支点截面的受剪承载力设计值 (N);

$f_{vd}$ ——钢材的抗剪强度设计值 (MPa);

$h_w$ 、 $t_w$ ——分别为支点截面钢梁的腹板高度和宽度 (mm)。

**6.3.2** 钢腹板应满足抗剪受力要求, 其最小厚度可按下式确定:

$$t_w = \min \left\{ 3.3 \frac{V_{\max}}{f_d h_w}, \frac{\gamma_0 V_d}{f_{vd} h_w} \right\} \geq t_{w\min} \quad (6.3.2)$$

式中:  $V_{\max}$ ——施工阶段, 预弯钢梁支点截面作用的最大剪力标准值 (N);

$V_d$ ——承载能力极限状态下基本组合的支点剪力设计值 (N);

$\gamma_0$ ——桥梁结构的重要性系数;

$f_d$ 、 $f_{vd}$ ——分别为钢材的抗拉压强度设计值和抗剪强度设计值（MPa）；

$t_{wmin}$ ——按构造要求的钢腹板最小板厚（mm），不应小于8mm；

$h_w$ 、 $t_w$ ——分别为支点截面钢梁的腹板高度和宽度（mm）。

## 7 正常使用极限状态计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 在持久状况正常使用极限状态下应采用作用（或荷载）的频遇组合验算跨中截面一期混凝土下缘的抗裂性。当其不满足要求时，应对其裂缝宽度进行验算和控制。汽车作用效应可不计冲击系数。

**7.1.2** 正常使用极限状态下，应根据可变作用（或荷载）频遇弯矩计算跨中挠度。挠度计算时可不计冲击系数。

**7.1.3** 在正常使用阶段，应进行作用（或荷载）标准值组合下预弯预应力组合梁控制截面一期混凝土下缘，二期混凝土上缘以及钢梁上下缘的应力验算。汽车作用效应应计入冲击系数。

**7.1.4** 在截面抗裂性、变形及应力计算时，梁各受力阶段的截面几何性质应按本标准附录 C 计算。

**7.1.5** 对变截面预弯预应力组合简支梁桥，尚应对变截面的控制点进行应力及抗裂性验算。

### 7.2 成桥拱度及活载变形计算

**7.2.1** 在持久状况正常使用极限状态下，应对全部永久作用及一、二期混凝土收缩、徐变共同作用下的预弯预应力混凝土组合梁桥的长期上拱值进行计算，计算方法应符合本标准附录 D 的规定。

**7.2.2** 可变作用（或荷载）下，跨中挠度应按可变作用频遇弯矩值  $M_{fd}$  计算，并应符合下列规定：

1 截面一期混凝土下缘的消压弯矩和消压后的开裂弯矩应按下列公式计算：

$$M_0 = n_1 \sigma_p I_2 / y_{cl2} \quad (7.2.2-1)$$



$$M_{cr} = n_1 f_{tk} I_2 / y_{cl2} \quad (7.2.2-2)$$

$$n_1 = E_s / E_{cl} \quad (7.2.2-3)$$

式中： $M_0$ ——截面一期混凝土下缘的消压弯矩（N·mm）；

$M_{cr}$ ——截面一期混凝土下缘消压后的开裂弯矩（N·mm）；

$\sigma_p$ ——一期混凝土下缘的有效预压应力（MPa），其中应包含结构重力以及混凝土收缩、徐变的影响，应按本标准式（E.0.5-1）或式（E.0.5-2）计算；

$f_{tk}$ ——一期混凝土的抗拉强度标准值（MPa）；

$I_2$ ——预弯预应力组合梁跨中截面惯性矩（mm<sup>4</sup>），由本标准式（C.0.3-2）计算；

$y_{cl2}$ ——预弯预应力组合梁截面形心到一期混凝土下缘的距离（mm）；

$n_1$ ——钢梁与一期混凝土的弹性模量比值；

$E_s$ 、 $E_{cl}$ ——分别为钢梁和一期混凝土的弹性模量（MPa）。

**2** 当  $M_{fd} \leq M_0 + M_{cr}$  时，可按一期混凝土不开裂，组合梁全截面参与工作计算。截面上由可变作用频遇弯矩值引起的跨中挠度可按下列公式计算：

$$f_q = \frac{5M_{fd}L^2}{48E_sI_2} \quad (7.2.2-4)$$

$$M_{fd} = 0.7M_q + 0.4M_r \quad (7.2.2-5)$$

式中： $f_q$ ——可变作用（或荷载）频遇弯矩值引起的跨中挠度（mm）；

$M_{fd}$ ——可变作用频遇值引起的跨中弯矩（N·mm）；

$M_q$ ——汽车作用引起的跨中弯矩标准值（不计冲击）（N·mm）；

$M_r$ ——人群作用引起的跨中弯矩标准值（N·mm）；

$L$ ——简支预弯预应力组合梁的计算跨径（mm）；

$E_s$ ——钢梁材料的弹性模量（MPa）；

$I_2$ ——预弯预应力组合梁的截面惯性矩（mm<sup>4</sup>），按本标

准式 (C. 0. 3-2) 计算。

3 当  $M_{fd} > M_0 + M_{cr}$  时, 则一期混凝土开裂, 应分别按本标准第 C. 0. 3 条和第 C. 0. 5 条计算截面惯性矩  $I_2$  和  $I_e$ 。由可变作用频遇组合弯矩  $M_{fd}$  引起的跨中截面挠度由两部分组成, 应按下列下式计算:

$$f_q = \frac{5M_0L^2}{48E_sI_2} + \frac{5(M_{fd} - M_0)L^2}{48E_sI_e} \quad (7.2.2-6)$$

式中:  $I_e$ ——折算截面惯性矩 ( $\text{mm}^4$ ), 由本标准式 (C. 0. 5-3) 计算确定。

7.2.3 正常使用极限状态下, 预弯预应力混凝土组合梁桥的可变作用频遇组合弯矩  $M_{fd}$  引起的跨中挠度不应超过计算跨径的  $1/600$ 。

### 7.3 抗裂性计算

7.3.1 在正常使用极限状态下, 进行抗裂性计算时应取作用的频遇组合, 并计入混凝土的收缩、徐变效应影响。对预弯预应力组合连续梁桥尚应计入温度梯度效应影响。

7.3.2 当预弯预应力组合梁按全预应力混凝土构件设计时, 在可变作用频遇组合弯矩作用下, 跨中截面的一期混凝土下缘的抗裂性应按下列公式验算:

$$M_{fd} \leq M_f \quad (7.3.2-1)$$

$$M_f = M_0 + M_{cr} \quad (7.3.2-2)$$

式中:  $M_f$ ——预弯预应力组合梁一期混凝土下缘的截面抗裂弯矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ )。

7.3.3 当预弯预应力组合梁按预应力混凝土 A 类构件设计时, 由作用效应频遇组合引起的跨中截面弯矩作用下, 一期混凝土下缘应力应满足下列下式要求:

$$\sigma_{cl} \leq 0.7f_{tk} \quad (7.3.3)$$

式中:  $f_{tk}$ ——混凝土抗拉强度标准值 ( $\text{MPa}$ );

$\sigma_{cl}$ ——由作用频遇组合 (不计冲击) 引起的一期混凝土



下缘的拉应力 (MPa), 按本标准附录 E 计算。

**7.3.4** 当预弯预应力组合梁按预应力混凝土 B 类构件设计时, 跨中截面在作用效应频遇组合弯矩作用下, 一期混凝土下缘的裂缝宽度可按下式估算:

$$w_{cr} = 0.0011\sigma_{sl} - 0.0825 \quad (7.3.4)$$

式中:  $\sigma_{sl}$  ——作用的频遇组合弯矩 (不计冲击) 引起的跨中截面钢梁下缘的拉应力 (MPa), 按本标准式 (E.0.6-4) 计算。

**7.3.5** 在作用频遇组合下, 一期混凝土下缘的最大裂缝宽度应满足下式要求:

$$w_{cr} \leq [w_{cr}] \quad (7.3.5)$$

式中:  $w_{cr}$  ——正常使用极限状态下作用效应频遇组合弯矩 (不计冲击) 引起的一期混凝土下缘的裂缝宽度 (mm);

$[w_{cr}]$  ——一期混凝土下缘的裂缝宽度限值,  $[w_{cr}] = 0.25\text{mm}$ 。

## 7.4 应力计算

**7.4.1** 在预弯预应力组合梁桥的正常使用阶段应验算截面法向应力。法向应力验算时, 应取结构永久作用和可变作用的标准值进行组合, 各作用的分项系数均应取为 1.0。计算中应计入混凝土收缩、徐变的影响。预弯预应力混凝土组合梁各阶段的截面几何参数应按本标准附录 C 的规定计算, 预弯预应力混凝土组合梁各阶段的截面应力应按本标准附录 E 的规定计算。

**7.4.2** 正常使用极限状态下截面法向应力计算应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的相关规定计入汽车荷载的冲击作用。

**7.4.3** 应力计算结果应满足下列要求:

1 钢梁上、下缘应力应满足下列公式要求:

$$\sigma_{su} \leq 0.7f_y, \sigma_{sb} \leq 0.7f_y \quad (7.4.3-1)$$

式中:  $f_y$  ——钢材屈服强度 (MPa);

$\sigma_{su}$  ——正常使用极限状态下钢梁上缘的压应力 (MPa);



$\sigma_{sb}$ ——正常使用极限状态下钢梁下缘的拉应力（MPa）。

**2 二期混凝土上缘压力应满足下式要求：**

$$\sigma'_{cu} \leq 0.6 f_{ck} \quad (7.4.3-2)$$

式中： $f_{ck}$ ——二期混凝土轴心抗压强度标准值（MPa）；

$\sigma'_{cu}$ ——正常使用极限状态下二期混凝土上缘的压应力（MPa）。

## 8 栓钉连接件

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 预弯钢梁的上翼板顶面和下翼板底面应设置连接件。连接件的形式宜选用栓钉连接件, 其数量应由计算确定。

**8.1.2** 简支钢梁上缘与二期混凝土粘结的连接件应按承载能力极限状态设计, 其数量可按连接件的受剪承载力设计值计算确定, 并应满足本标准第 8.3 节规定的构造要求。

**8.1.3** 简支钢梁下缘与一期混凝土粘结的连接件, 宜按弹性状态确定栓钉的数量。

### 8.2 连接件设计

**8.2.1** 预弯预应力组合简支梁的钢梁上缘栓钉连接件的数量可按下列方法确定:

1 在承载能力极限状态下, 一个栓钉连接件的极限受剪承载力设计值  $V_{su}$  应由下式确定:

$$V_{su} = \min\{0.43A_s\sqrt{E_c f_{cd}}, 0.7A_s f_{su}\} \quad (8.2.1-1)$$

式中:  $V_{su}$ ——栓钉连接件的极限受剪承载力设计值 (N);

$A_s$ ——栓钉杆的截面面积 ( $\text{mm}^2$ );

$f_{su}$ ——栓钉材料的抗拉强度最小值 (MPa);

$f_{cd}$ 、 $E_c$ ——分别为混凝土的抗压强度设计值和弹性模量 (MPa)。

2 一个剪跨范围内钢梁顶面所需连接件总个数应由下式求出:

$$n = \frac{V_c}{\alpha V_{su}} \quad (8.2.1-2)$$

$$V_c = 1.1b_{su}c f_{cd} \quad (8.2.1-3)$$

式中： $n$ ——一个剪跨范围内的栓钉连接件个数（个）；  
 $V_c$ ——钢梁顶面以上混凝土的极限压应力之和（N）；  
 $b_{su}$ ——钢梁上翼板宽度（mm）；  
 $c$ ——钢梁顶面到预弯预应力组合梁顶面的距离（mm）；  
 $f_{cd}$ ——二期混凝土的抗压强度设计值（MPa）；  
 $\alpha$ ——连接件受剪承载力折减系数，正弯矩区段  $\alpha=1.0$ ；  
 负弯矩区段  $\alpha=0.9$ 。

**8.2.2 短暂状况下预弯预应力组合简支梁的钢梁下缘栓钉连接件的数量可按下列方法确定：**

**1** 一个栓钉的弹性受剪承载力设计值  $[V_{su}]$  可按下式计算：

$$[V_{su}] = 0.75V_{su} \quad (8.2.2-1)$$

式中： $[V_{su}]$ ——预弯阶段栓钉连接件的弹性受剪承载力设计值（N）；

$V_{su}$ ——栓钉连接件的极限受剪承载力设计值（N），按本标准式（8.2.1-1）计算。

**2** 预弯梁反弹阶段的受力状态及剪力分布（图 8.2.2）中， $P_0$  应为设计预弯力， $V_s$  应为钢梁和一期混凝土自重引起的剪力。反弹计算时可忽略  $V_s$  的影响。

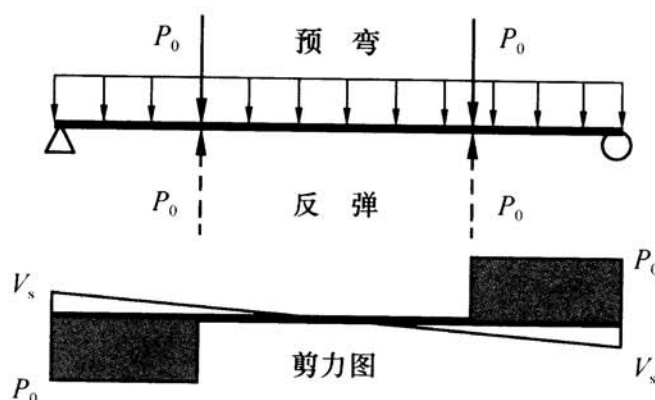


图 8.2.2 预弯梁反弹阶段剪力

**3** 在支点与加载点之间的栓钉连接件可按下式设计：

$$\frac{P_0 S_u}{I_1} \leq [V_{su}] \quad (8.2.2-2)$$



式中:  $P_0$ ——设计预弯力 (N), 按本标准式 (5.2.2-1) 计算;

$u$ ——按纵桥向每排一个栓钉连接件考虑的栓钉间距 (mm);

$S$ ——钢梁下翼板以下的混凝土换算截面绕预弯梁换算截面重心轴的静矩 ( $\text{mm}^3$ );

$I_1$ ——预弯梁换算截面绕其自身重心轴的惯性矩 ( $\text{mm}^4$ ), 应按本标准式 (C.0.2-2) 计算。

4 在梁的中部即两个加载点之间, 可取支点与加载点之间的栓钉连接件间距的一半, 或按构造要求布置栓钉连接件。

**8.2.3** 连接件的设计方法可用于变截面预弯预应力组合简支梁桥。

### 8.3 连接件构造要求

**8.3.1** 预弯预应力组合梁栓钉连接件的一般构造应符合下列规定:

1 连接件的外侧边缘与钢梁翼板边之间的距离不应小于 50mm;

2 栓钉直径不得大于钢梁上下翼板厚度的 1.5 倍;

3 连接件剪力作用方向的中心距不应小于栓钉直径的 6 倍, 且不得小于 100mm;

4 与剪力作用垂直方向的连接件中心距不应小于栓钉直径的 4 倍, 且不得小于 80mm;

5 钢梁上下缘的栓钉连接件可在相应的剪跨区段内均匀布置, 且横向不宜少于两排。

**8.3.2** 钢梁上缘栓钉连接件的构造应符合下列规定:

1 连接件抗掀起端头的底面位置应高于底部钢筋以上 30mm;

2 栓钉的长径比不应小于 4;

3 连接件的最大间距不得大于 400mm;

4 连接件的长度可伸入到桥面铺装混凝土中, 但不宜超

过 30mm。

### 8.3.3 钢梁下缘栓钉连接件的构造应符合下列规定：

- 1 栓钉的直径宜为 10mm；当采用直径为 13mm 的栓钉时，其长径比不应小于 3；
- 2 钢梁下缘栓钉头的混凝土净保护层不得小于 10mm；
- 3 连接件的最大间距不得大于 300mm；
- 4 一期混凝土中的栓钉连接件宜采用梅花形平面布置，净保护层厚度不得小于 10mm；
- 5 当焊接在钢梁下翼板上的栓钉位置不正对钢梁腹板时，则栓钉直径不应大于钢梁下翼板厚度的 1.5 倍。

## 9 构造要求

### 9.1 钢 梁

**9.1.1** 钢梁的翼板厚度不应小于 16mm；腹板厚度不应小于 12mm，亦不宜大于翼板的厚度。

**9.1.2** 钢梁上下翼板宽度不宜小于 400mm，且不应大于 800mm，也不应大于其受压翼板厚度的 25 倍。对变板厚预弯梁应以较厚的受压翼板加以控制。

**9.1.3** 钢梁加劲肋可采用 Q345 钢材，厚度宜为 12mm～24mm。钢梁设计时，应根据桥梁跨径、现场施工条件，选择预压方式并预留预压设施。

**9.1.4** 钢梁上下翼板与腹板的焊接宜采用部分熔透的角焊缝。位于受压区的加劲肋与翼板结构可采用双面贴角焊缝，位于受拉区的加劲肋不得与受拉翼板直接焊连，可留有 50mm～80mm 的间隙。在支承处加劲肋宜延伸到翼板的外边缘，应采用磨光并与下翼板焊连。

**9.1.5** 钢梁的腹板应设置竖向加劲肋，加劲肋可分为 A 型和 B 型两种形式。其中 A 型加劲肋的数量与位置应与预弯预应力混凝土主梁的横隔板对应。预弯钢梁构造形式见图 9.1.5。

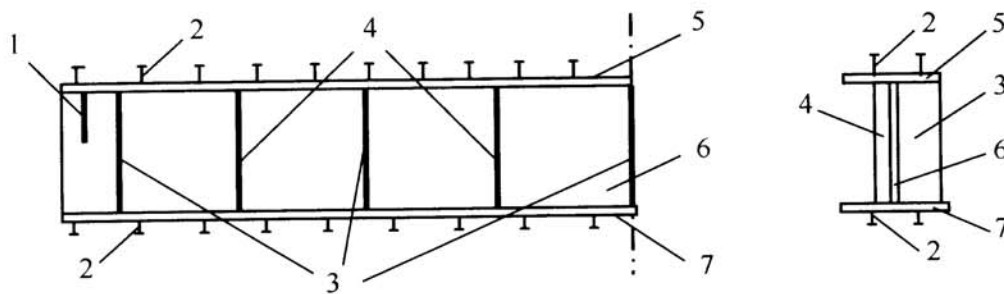


图 9.1.5 钢梁构造形式

1—端板；2—栓钉剪力键；3—A 型加劲肋；  
4—B 型加劲肋；5—顶板；6—腹板；7—底板



## 9.2 一期混凝土

**9.2.1** 一期混凝土(图 9.2.1)内应设纵向钢筋, 箍筋应闭合。

**9.2.2** 一期混凝土内钢筋的构造应符合下列规定:

**1** 沿梁纵向设置上下两层纵向钢筋, 纵向钢筋数量不应少于 8 根, 钢筋直径不宜小于 16mm, 间距不宜大于 150mm;

**2** 一期混凝土中应布置不小于 10mm 直径的闭合箍筋, 间距不应大于 250mm, 闭合箍筋的端部应与钢梁腹板焊接;

**3** 构造钢筋保护层厚度应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的要求。

**9.2.3** 钢梁下翼板至梁底的净距不得小于 50mm, 钢梁下翼板至一期混凝土两侧边缘的距离不得小于 75mm。一期混凝土的厚度范围宜为 150mm~250mm, 宽度范围宜为 550mm~950mm。对 Q345 钢材, 一期混凝土截面积宜为钢梁下翼板面积的 10 倍。

**9.2.4** 单梁预弯施工时, 梁端混凝土内应设局部构造钢筋, 或采取其他有效措施。

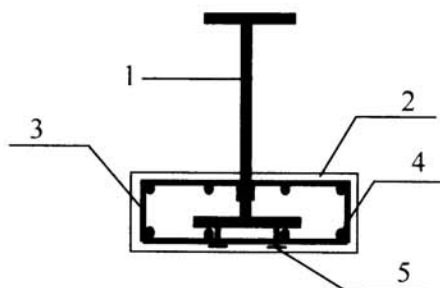


图 9.2.1 一期混凝土构造示意

1—T 字形钢梁; 2—一期混凝土;

3—箍筋; 4—纵向钢筋;

5—连接件

## 9.3 二期混凝土

**9.3.1** 混凝土上翼缘板厚度不宜小于 140mm。根据需要可设置承托, 加腋部分的承托斜率宜小于 1:3, 板底承托处的钢梁距二期混凝土桥面板底的最小净距不得小于 70mm。

**9.3.2** 二期混凝土钢筋构造(图 9.3.2)应符合下列规定:

**1** 桥面板配筋应满足现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的构造要求, 宜采用直径不小于 12mm 的螺纹钢筋, 间距不得大于 250mm;

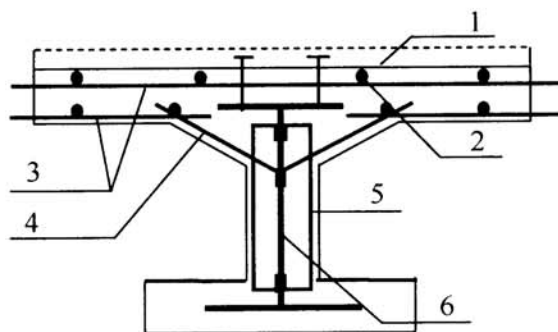


图 9.3.2 二期混凝土构造示意

1—桥面混凝土；2—纵向钢筋；3—桥面板横桥向钢筋；  
4—加腋钢筋；5—槽形箍筋；6—工字形钢梁

**2** 桥面板横桥向钢筋直径不宜小于 14mm，间距不大于 200mm；

**3** 构造钢筋保护层厚度应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中梁、板钢筋的相关规定进行控制。

**9.3.3** 腹板混凝土的最小厚度不宜小于 180mm，也不宜大于 220mm，应随主梁跨径的增加而增加。腹板单侧混凝土厚度不宜小于 80mm，腹板混凝土的水平分布钢筋直径不宜小于 10mm，间距不宜大于 200mm。钢腹板两侧均设置直径不小于 10mm 的竖向槽形箍筋，端部应设弯钩并与钢梁腹板采用双面焊接，且焊缝长度不宜小于  $2.5d$ 。箍筋的间距不宜大于 300mm。

**9.3.4** 当主梁高度大于 1.2m 时应在混凝土腹板上设置防收缩钢筋，其间距不宜大于 150mm，应布置在槽形箍筋的外侧。腹板混凝土的净保护层厚度可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的防收缩钢筋控制。

**9.3.5** 横隔板混凝土应与二期混凝土同等级且同时浇筑。横隔板混凝土的厚度不宜小于 160mm。纵向钢筋与钢梁竖向加劲肋焊接，应满足现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中横隔板的受力及配筋要求。混凝土横

隔板中的钢筋直径不宜小于 10mm，两侧均应设置直径小于 10mm 的箍筋，其钢筋的间距不宜小于 150mm。

**9.3.6** 横隔板混凝土的净保护层厚度应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的箍筋控制。

**9.3.7** 当环境条件容许且对钢梁腹板采取足够的防腐措施，可取消腹板混凝土及相应的腹板钢筋。当采用钢板做横隔板时，在有防腐措施的情况下可不做外包混凝土。



## 10 施工设备

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 钢梁的预弯施工可采用单梁预弯和双梁对弯两种施工方法。施工前，应根据预弯梁的断面形式、预弯施工方法、设计规定的预弯力及施工场地等因素，设计并制作工装设备。

**10.1.2** 钢梁预弯时所需工装设备的材料要求、布置方式、构造规定和计算方法等应按钢结构进行设计，其各部件的强度、刚度及稳定性等要求应满足国家现行相关标准的规定。

**10.1.3** 双梁对弯每次可对两片钢梁施加预弯力，所需的主要施工设备应为加载反力架、支承台、加载千斤顶、防侧倾装置和翻转架等（图 10.1.3）；单梁预弯每次应仅对一片钢梁施加预弯力，所需的主要施工设备为地锚、加载反力架、加载千斤顶和防侧倾装置。

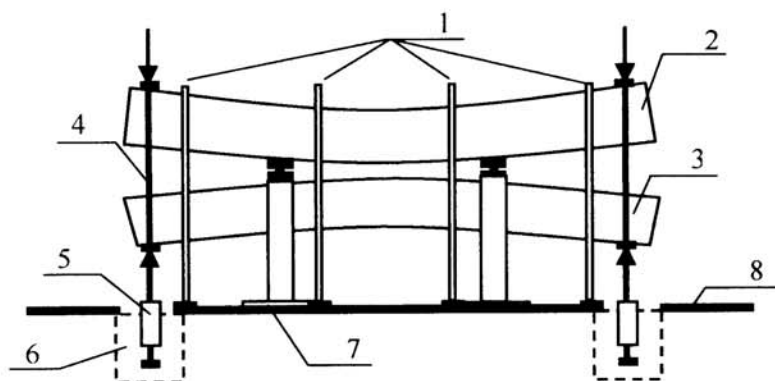


图 10.1.3 双梁对弯布置

1—横向稳定支撑；2—上钢梁（反位）；3—下钢梁（正位）；  
4—加载反力架；5—千斤顶；6—工作坑；7—支承台；8—地面

**10.1.4** 预弯施工中的各种工装设备的地基基础承载力应满足施工使用要求。

**10.1.5** 工装设备制造所用的材料、构件和配件等，应满足工程安全和使用要求。

**10.1.6** 采用的千斤顶或其他加力设备应满足设计预弯力的要求。当同组预弯钢梁两点加载时，千斤顶应加力均衡、行程同步。

**10.1.7** 预弯梁施工采用的其他机械设备、电气设备、安全设备等应符合同类设备的国家有关安全及防护规定。

## 10.2 防侧倾装置

**10.2.1** 防侧倾装置（图 10.2.1）的形式、尺寸、功能应与预弯梁的结构形式、外形尺寸、加载施工方法相适应。防侧倾装置不应妨碍钢梁的就位及预弯加载施工。

**10.2.2** 防侧倾装置应满足钢梁加载时竖向变位的需要，防侧倾装置与钢梁接触点应始终处于钢梁腹板受压区的有效工作范围内。

**10.2.3** 防侧倾装置与钢梁接触端，应具备竖向滑（滚）动功能。

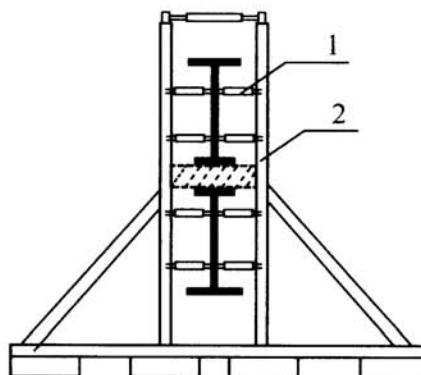


图 10.2.1 防侧倾装置  
1—防侧倾装置；2—架体

## 10.3 加载装置

**10.3.1** 加载反力架（图 10.3.1）的形式、尺寸及功能应满足钢梁预弯施工方法的要求，并应与钢梁的预拱度相适应。

**10.3.2** 当加载反力架采用拉杆传递预弯力时，拉杆及螺纹的强度应满足使用要求。

**10.3.3** 加载反力架的强度和刚度应满足预弯施工的要求。

**10.3.4** 加载反力架中的千斤顶工作区，应设置千斤顶防护装置。

**10.3.5** 当采用单梁加载工艺时，加载反力架应设置地锚，地锚承载力应满足施工的要求。

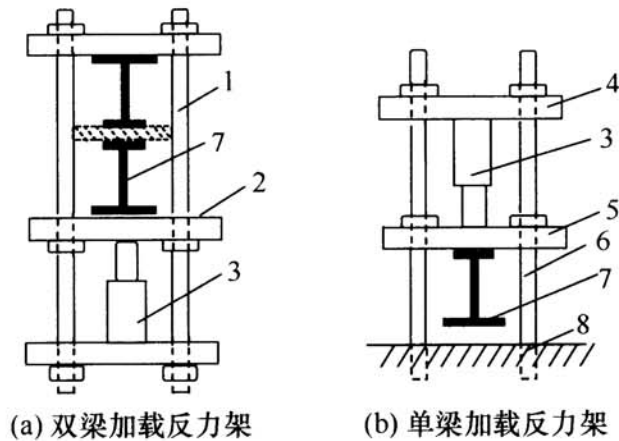


图 10.3.1 加载反力架

1—拉杆；2—反力架；3—千斤顶；4—固定横梁；  
5—加载横梁；6—支架立柱；7—钢梁；8—地锚

**10.3.6** 加载完成后应对变形后的钢梁进行锁定。宜采用机械锁定装置，锁定装置应满足强度、刚度的要求。

**10.3.7** 双梁预弯施工中，支承台（图 10.3.7）的强度、刚度和稳定性应满足预弯梁自重作用和钢梁预弯施工的要求。

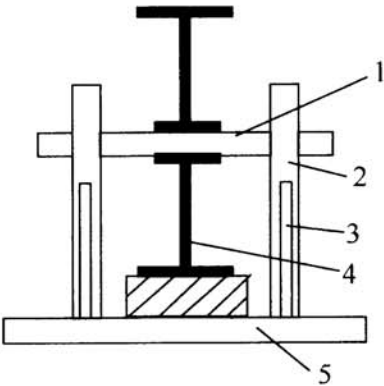


图 10.3.7 支承台

1—横梁；2—立柱；3—斜撑；4—T字钢梁；5—锚固地基

## 10.4 翻 转 架

**10.4.1** 翻转架（图 10.4.1）的形式、尺寸、功能应与预弯梁的翻转荷载、翻转方法相适应。翻转架的转动可采用人力或机械



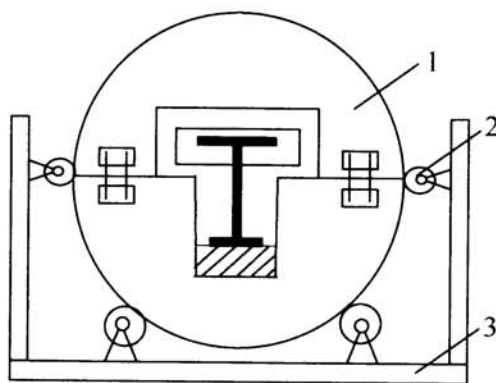


图 10.4.1 翻转架

1—翻转盘；2—滚轮；3—架体

传动方式进行。

**10.4.2** 翻转架滚轮的承载力及安装精度，应满足钢梁翻转施工的要求。

**10.4.3** 翻转架与钢梁（或预弯梁）间应采用可靠的紧固装置。

**10.4.4** 翻转架应设置地锚，或采用扩大基台的方法。

## 10.5 施工设备的安全性检查

**10.5.1** 施工工装设备制造采用的原材料、构件、配件应经进场检验。当原材料指标不确定时应进行材料性能测试。

**10.5.2** 工装设备加工完成后，应按设计图纸对焊缝、螺栓、装配尺寸等进行检查。

**10.5.3** 钢梁加载前应检查防侧倾装置的可靠性，并应符合下列规定：

1 双梁对弯时，反位钢梁的防侧倾装置应处于腹板中心偏下，正位钢梁防侧倾装置应处于腹板中心偏上，偏移量应根据钢梁截面尺寸、防侧倾装置的形式确定；

2 钢梁预弯加载前应检查和标定千斤顶，并应检查已安装的防侧倾装置。双梁预弯加载后应检查梁端传力拉杆的锁定装置。

**10.5.4** 加载过程中，防侧倾装置应可靠。当钢梁不能竖向滑动时应暂停预弯加载，待防侧倾装置调整后再重新加载。

**10.5.5** 加载完成后，应将锁定装置锁紧并检查锁紧质量。

## 11 施工及验收

### 11.1 一般规定

**11.1.1** 钢梁、预弯梁及预弯预应力组合梁的制作、现场安装及施工除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行相关标准的规定。

**11.1.2** 预弯预应力组合梁桥的主要施工工艺流程应包括：钢梁加工、检验，焊接连接件，矫正钢梁预拱度，钢梁运输，加载设备制作与现场安装，钢梁就位，安装防侧倾装置，施加预弯力并锚固，绑扎钢筋、浇筑一期混凝土，养生、拆模及释放预弯力，预弯梁复位及吊装就位，绑扎钢筋、浇筑二期混凝土，浇筑桥面混凝土及沥青混凝土，安装人行道栏杆等。

**11.1.3** 预弯预应力组合梁桥的各施工阶段验收及竣工验收均应按现行《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 或《公路工程质量检验评定标准 土建工程》JTG F80/1 中的相关规定进行。

### 11.2 施加预弯力

**11.2.1** 钢梁施加预弯力时，应设置防侧倾装置，防侧倾装置应符合下列规定：

1 宜在支点、跨中、四分点共计 5 处对称设置防侧倾装置。防侧倾装置的间距不宜大于 6.5m。

2 防侧倾装置中的水平顶杆应顶在钢梁腹板的受压区内，防侧倾装置应对钢梁侧倾进行约束。

**11.2.2** 预弯力应分期加载，首次加载达到施工控制吨位后，应持荷 5min 后卸载；再次加载达到施工控制吨位，此时预弯力实测值与施工控制值相差不应超过 3%，即可锁定加载装置。



**11.2.3** 施加预弯力过程中, 加载速度宜为 20kN/min ~ 50kN/min。

**11.2.4** 钢梁施工中的跨中拱度变化量应符合下列规定:

1 当不计钢梁自重及加载反力架自重引起的变形, 单梁在两个四分点预弯加载时, 钢梁跨中拱度宜按下式计算:

$$f_{\text{con}} = kf_0 = k \frac{11P_0L^3}{384E_sI_s} \quad (11.2.4-1)$$

式中:  $f_{\text{con}}$  ——由设计预弯力引起并考虑焊接残余变形的钢梁施工预拱度控制值 (mm);

$f_0$  ——仅由设计预弯力  $P_0$  引起的钢梁预拱度 (mm);

$k$  ——钢梁焊接残余变形的影响系数, 应根据实测结果取值, 缺少实测数据时可取 1.06;

$P_0$  ——按本标准式 (5.2.2-1) 计算的设计预弯力, 计算时不应计入钢梁自重 (N);

$L$  ——预弯 (钢) 梁的计算跨径 (mm);

$E_s$  ——钢材的弹性模量 (MPa);

$I_s$  ——钢梁绕水平轴的截面惯性矩 (mm<sup>4</sup>)。

2 对单梁在四分点预弯加载的情况, 或双梁对弯加载的下钢梁, 计入钢梁自重影响的加工控制拱度变化量应按本标准式 (5.3.1-1) 和式 (5.3.2) 计算。

3 对双梁四分点对弯加载情况的上钢梁, 当计入钢梁自重及加载反力架自重时, 上钢梁施工控制拱度应按下式计算:

$$f_{\text{con}} = k \left( \frac{11P_0L^3}{384E_sI_s} - \frac{5q_sL^4}{384E_sI_s} + \Delta f_1 \right) \quad (11.2.4-2)$$

式中:  $\Delta f_1$  ——为加载反力架 (含千斤顶重量) 产生的上钢梁跨中挠度值 (mm), 应根据支承台的位置按双悬臂梁计算确定;

$q_s$  ——钢梁的自重集度标准值 (N/mm)。

### 11.3 一期混凝土施工及释放预弯力

**11.3.1** 浇筑一期混凝土前, 应将钢梁下翼板周边混凝土板内的

钢筋焊接固定。

**11.3.2** 一期混凝土施工时，应采取措施减小混凝土收缩、徐变的不良影响。

**11.3.3** 当浇筑一期混凝土时，应同时采用板式振动器与振捣棒进行振捣，使混凝土包裹住钢梁下翼板且振捣密实。

**11.3.4** 预弯梁反弹时，一期混凝土养生时间不得少于 6d，当环境温度持续在 30℃ 以上时，养生天数可减少到 5d；但释放预弯力时，混凝土强度均应达到设计强度的 90% 以上。

**11.3.5** 释放预弯力的速度不宜大于 25kN/min。

## **11.4 翻转预弯梁**

**11.4.1** 当采用双梁对弯法施工时，上梁应处于反位（倒置）的状态。应对钢梁或预弯梁采用两个专用的翻转架进行翻转，预弯梁和预弯组合梁不得发生扭转变形。

**11.4.2** 钢梁或预弯梁翻转时，两个翻转架应同步、同向转动。

## **11.5 存放和吊装**

**11.5.1** 预弯梁的吊装应符合下列规定：

- 1 钢梁和预弯梁运输中的抗倾覆安全系数不应小于 1.5；
- 2 在吊装时，预弯梁应满足梁的受力及稳定性的要求。在起吊钢索与混凝土翼缘板或钢梁上、下翼板的接触点处均宜采用柔性垫层，混凝土表面或钢梁翼板不得受损。

**11.5.2** 预弯梁的存放应符合下列规定：

- 1 存放台座应坚固稳定，且宜高出地面 200mm 以上，存放场地应有相应的防排水设施，梁板等构件在存放期间不得因支点沉陷而受到损坏。预弯梁实际支点应与理论支撑位置一致。
- 2 预弯梁应按其安装的先后顺序编号存放，预弯预应力组合梁的存放时间不宜超过 60d，超过 60d 时应采取配重措施。
- 3 在预弯梁或钢梁的存放期间，应采取有效措施防止梁发生变形、扭曲和倾覆。



**11.5.3** 当预弯梁分阶段存放时, 应对梁段的分段进行编号、标记和记录。

## **11.6 二期混凝土施工**

**11.6.1** 浇筑二期混凝土前, 腹板及桥面板中的钢筋应已完成安装, 钢筋安装应符合现行行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 或《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 的相关要求。

**11.6.2** 预弯预应力组合梁二期混凝土浇筑应符合下列规定:

- 1 应采取减少二期混凝土收缩、徐变的措施;
- 2 浇筑二期混凝土时, 纵桥向应由跨中向两端对称浇筑, 预弯梁的拱度应对称; 横桥向应由中梁向两侧边梁对称浇筑。

**11.6.3** 二期混凝土的模板可直接架设在吊装后的预弯梁一期混凝土上。

## **11.7 质量验收**

**11.7.1** 钢梁加工和质量验收, 应按设计图纸的要求进行。当设计图纸无要求时, 应符合国家现行相关标准的规定。

**11.7.2** 钢梁加工预拱度应在正位并支承在两个理论支点的情况下进行测量。实测值与施工控制预拱度的相对误差不宜超过5%, 绝对误差不宜超过+8mm 和-3mm。

**11.7.3** 一期混凝土、二期混凝土施工中涉及的钢筋、模板与支架、混凝土质量及成桥拱度验收应符合现行行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2 或《公路工程质量检验评定标准 土建工程》JTG F80/1 的相关规定。

**11.7.4** 桥面铺装施工, 桥梁支座、伸缩缝、栏杆及照明等安装工程的施工及验收方法应符合国家现行相关标准的规定。



## 附录 A 变截面预弯预应力组合梁

**A.0.1** 预弯预应力组合梁桥可根据道路线形和受力需求将主梁设计为变截面预弯预应力组合梁。变截面预弯预应力组合梁可采用工字形钢梁翼板变厚度或腹板变高度等方式进行设计。变高度预弯预应力梁可拟合道路线形将钢梁上缘纵向线形设计为抛物线或圆曲线。

**A.0.2** 变截面预弯预应力组合梁桥的设计预弯力和预弯阶段的整体稳定性可按有限元方法计算。

**A.0.3** 变高度预弯预应力组合梁宜采用钢腹板上缘加高的方式形成钢梁，其截面高度可按抛物线或圆曲线变化。

**A.0.4** 变钢板厚度的预弯预应力组合梁可用于跨径大于 30m 的情况，可采用改变钢梁的顶板、底板或腹板厚度的方式设计。变板厚预弯预应力组合梁的构造应满足下列规定：

1 钢板厚度变化点宜选在跨中  $L/2$  梁段向支座方向的 1.0m 之外；

2 由钢板厚度变化引起的跨中截面与支点截面惯性矩比值  $I_m/I_n$  不宜大于 1.25；

3 当满足上述规定时，变钢板厚度的钢梁的设计预弯力  $P_0$  仍可按本标准式 (5.2.2-1) 计算，其中的钢梁自重应力  $\sigma_z$  计算时可计入钢板厚度变化的影响。

**A.0.5** 当满足比值  $I_m/I_n$  小于 1.25 时，可按截面抗弯惯性矩为  $I_m$  的等截面钢梁计算钢梁的设计预拱度  $f_0$ 。该方法也可适用于变钢板厚度的预弯预应力组合简支梁各阶段的跨中变形计算。

**A.0.6** 由本标准附录 C 可计算梁在各受力阶段的跨中截面和支点截面惯性矩  $I_s$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  和  $I_e$ ，由本标准附录 D 可求出变高度预弯预应力组合梁各受力阶段的跨中变形值。

**A. 0. 7** 由各阶段的跨中截面抗弯惯性矩  $I_c$  和本标准附录 E，可验算变高度预弯预应力组合简支梁各受力阶段的跨中截面各控制点的应力值。

**A. 0. 8** 变钢板厚度的变截面预弯预应力组合简支梁各受力阶段的控制截面变形及应力，仍可按本标准附录 D 和附录 E 中等截面预弯预应力组合简支梁的方法计算。

## 附录 B 预弯预应力组合连续梁

### B.1 一般规定

**B.1.1** 预弯预应力组合连续梁宜根据剪跨进行分段，中跨跨中及边跨跨径内梁段应为预弯梁段，中支点组合梁段应为普通钢-混凝土组合梁段。各梁段经连接后浇筑二期混凝土形成预弯预应力混凝土连续梁（图 B.1.1）。

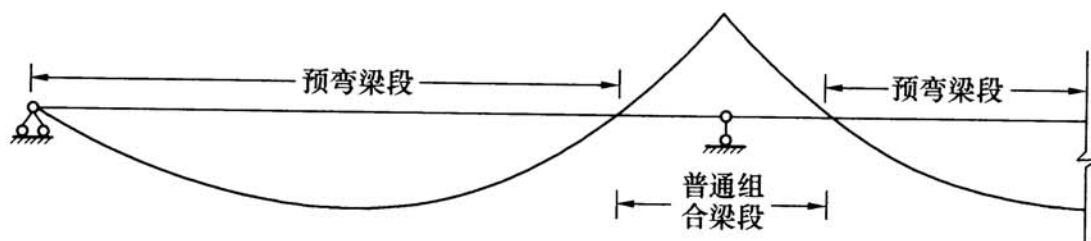


图 B.1.1 预弯预应力组合连续梁分段

**B.1.2** 预弯预应力组合连续梁的各组成梁段以连接段相连接，连接段的长度可取 1.0m~1.5m。

**B.1.3** 连续梁的整体作用（或荷载）效应可采用有限元数值分析方法进行计算。

**B.1.4** 预弯预应力组合连续梁桥的预弯梁段（即正弯矩区段）可按简支梁的规定对短暂状况下预弯钢梁和反弹后的预弯梁进行应力及变形计算。

**B.1.5** 对连续梁桥的中支点组合梁段，可按传统钢-混凝土组合梁的方法计算短暂状况和持久状况下的应力与抗裂性，并应配置抗裂构造钢筋。

**B.1.6** 预弯预应力组合连续梁的跨中正弯矩区段的受弯承载力应按本标准第 6.2 节的方法计算，同时应按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的作用基本组合进行控制截面的应力验算。



**B. 1. 7** 连续梁的钢梁上缘连接件应根据剪跨进行分段计算。负弯矩区段的连接件宜按钢-混凝土组合梁的连接件的计算方法确定。

## **B. 2 连续梁设计**

**B. 2. 1** 负弯矩区段的混凝土桥面板可配置体内或体外预应力束，也可采用普通钢筋混凝土桥面板结构。当混凝土桥面板配置预应力钢束时，应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的全预应力构件或部分预应力 A 类构件进行设计。

**B. 2. 2** 当负弯矩区采用预应力混凝土 B 类构件或钢筋混凝土构件时，应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的相关规定验算正常使用极限状态下混凝土桥面板的裂缝宽度。

**B. 2. 3** 由作用频遇组合引起的负弯矩区开裂截面纵向受拉钢筋的应力可按现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64 - 01 的相关规定进行计算。

**B. 2. 4** 当负弯矩区采用全预应力混凝土或部分预应力 A 类混凝土桥面板的应力计算时，应根据平截面假定按组合梁全截面（扣除腹板混凝土面积）进行计算；对 B 类构件及普通钢筋混凝土桥面板的应力计算时，可仅计入下缘受压区翼缘板混凝土截面以及上缘受拉区钢筋的面积，可不计上缘受拉区混凝土面积。

**B. 2. 5** 采用普通钢筋或体内预应力束的负弯矩区抗弯承载力计算方法可按钢-混凝土组合梁桥负弯矩区的计算方法。当配置无粘结预应力或体外预应力钢束的负弯矩区受弯承载力计算时，应计入预应力钢束的应力增量的影响。

**B. 2. 6** 当预弯预应力组合连续梁桥采用预应力钢筋（束）时，钢筋（束）的种类和力学性能应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的要求。

**B. 2. 7** 预弯预应力组合梁负弯矩区段的截面受剪承载力可按本标准第 6. 3. 1 条的方法计算。

**B. 2. 8** 当预弯预应力组合连续梁负弯矩区段承受弯矩和剪力共同作用时，应按下式验算钢梁腹板的最大折算应力：

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1f_d \quad (\text{B. 2. 8})$$

式中： $\sigma$ 、 $\tau$ ——钢梁腹板计算高度边缘同一点上同时产生的正应力、剪应力（MPa）；

$f_d$ ——钢材抗拉强度设计值（MPa）。

### B. 3 连续梁的施工

**B. 3. 1** 预弯预应力组合连续梁桥应采用分段拼接施工法，拼接段应选在永久作用弯矩为零的截面附近。

**B. 3. 2** 连续梁（图 B. 3. 2）应按下列步骤施工：

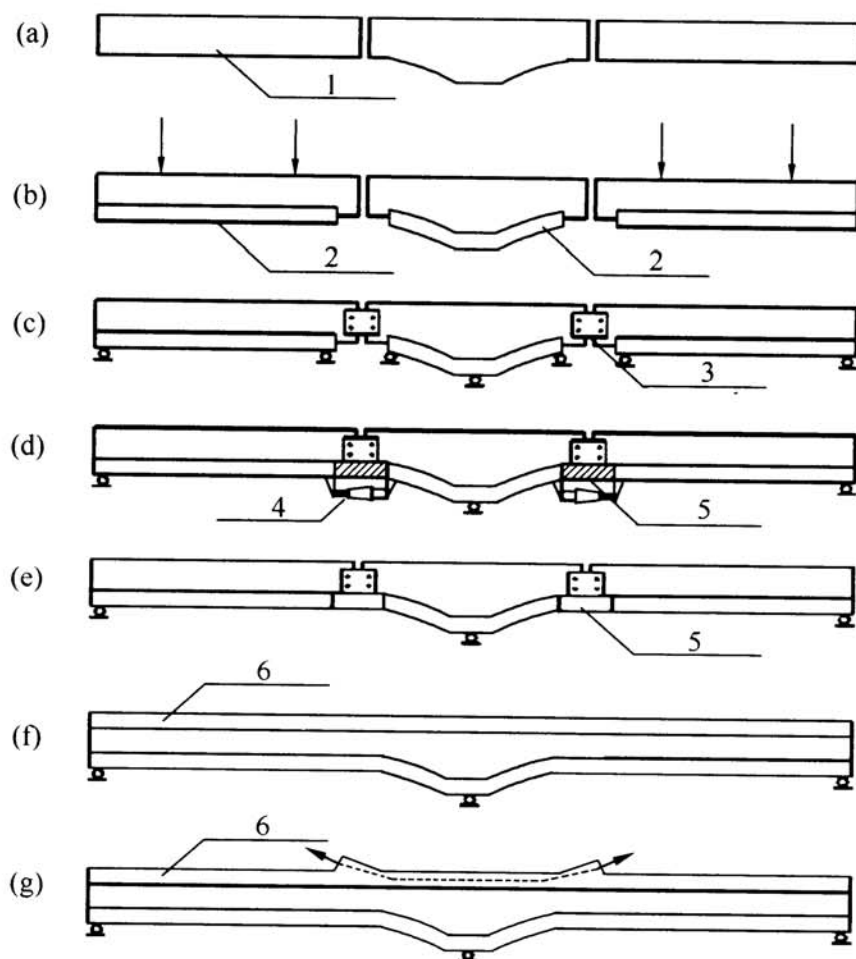


图 B. 3. 2 施工工艺流程

1—预弯钢梁；2—混凝土；3—连接件；4—千斤顶；  
5—拼接处一期混凝土；6—二期混凝土



- 1 钢梁预制：钢梁分节段制作，根据预弯梁部分的钢梁段设置预拱度，中支点组合梁的钢梁段不设预拱度；
- 2 钢梁段施加预弯力，浇筑一期混凝土，释放预弯力；
- 3 梁段的吊装及连接：设置跨径内的临时墩，各梁段吊装就位，拼接钢梁段；
- 4 补浇连接段的一期混凝土：对其施加预压力，或采用微膨胀混凝土作为一期混凝土；
- 5 体系转换：形成预弯预应力连续梁；
- 6 浇筑二期混凝土：在预弯梁上支模，浇筑腹板、横隔板及桥面板混凝土；
- 7 张拉预应力钢束：对负弯矩区段或全梁上缘张拉预应力钢束，并进行锚固和灌浆；
- 8 浇筑桥面铺装，安装栏杆、灯杆等：与传统桥梁一样进行成桥或竣工验收。

**B.3.3** 当预弯钢梁的下翼板面积大于上翼板面积时，应对连接截面进行正常使用极限状态的应力验算，或进行承载能力极限状态的受弯承载力验算。

**B.3.4** 预弯预应力组合连续梁的钢梁连接段可采用高强螺栓连接（图 B.3.4），连接截面的强度和刚度不应小于原预弯钢梁截

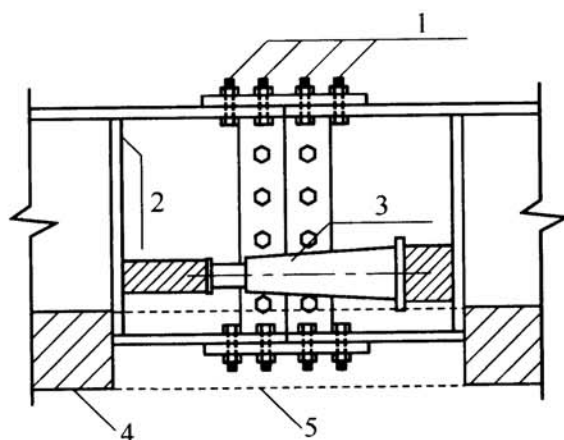


图 B.3.4 拼接处一期混凝土补浇工艺

- 1—高强螺栓；2—加劲板；3—千斤顶；  
4—一期混凝土；5—补浇一期混凝土



面的强度和刚度。连接段的高强螺栓数量应通过计算确定。在连接段变形协调的情况下亦可采用焊接连接。

**B. 3. 5** 连接部位的一期混凝土可采用配重法或施加预加力方法对其施加预压力。

**B. 3. 6** 预弯预应力组合连续梁桥可采用简支转连续的施工方法，在中支点负弯矩区段应施加体内或体外预应力束。可采用高性能混凝土做成桥面连续结构。

## 附录 C 几何参数及计算系数

**C.0.1** 钢梁预弯阶段截面几何参数（图 C.0.1）宜按下列公式计算：

$$A_s = b_{su}t' + h_w t_w + b_{sl}t \quad (C.0.1-1)$$

$$I_s = \frac{1}{12}(b_{su}t'^3 + t_w h_w^3 + b_{sl}t^3) + b_{su}t'(y_{su} - 0.5t')^2 + t_w h_w (0.5h_w + t' - y_{su})^2 + b_{sl}t(0.5t + h_w + t' - y_{su})^2 \quad (C.0.1-2)$$

$$y_{su} = [0.5b_{su}t'^2 + h_w t_w (0.5h_w + t') + b_{sl}t(t' + h_w + 0.5t)]/A_s \quad (C.0.1-3)$$

式中： $A_s$ 、 $I_s$ ——钢梁截面的面积（ $\text{mm}^2$ ）和惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；

$y_{su}$ ——钢梁截面形心至上边缘的距离（mm）。

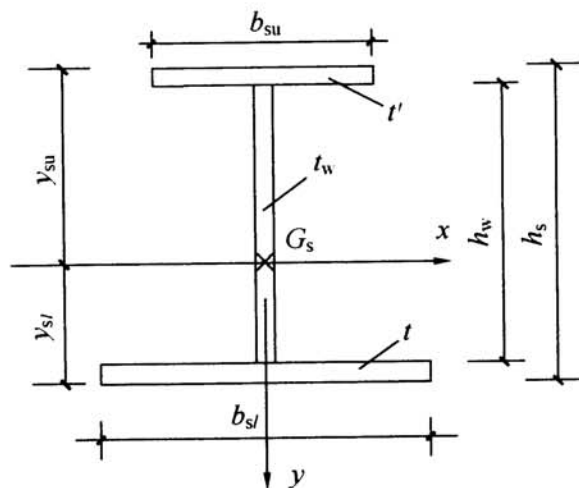


图 C.0.1 钢梁截面参数

$G_s$ —钢梁截面形心； $b_{sl}$ 、 $t$ —钢梁下翼板的宽度和厚度； $b_{su}$ 、 $t'$ —钢梁上翼板的宽度和厚度； $h_w$ 、 $t_w$ —钢梁腹板的高度和厚度； $y_{sl}$ —钢梁截面形心至下边缘的距离； $h_s$ —钢梁的高度

**C.0.2** 预弯梁反弹阶段截面几何参数计算（图 C.0.2）应符合

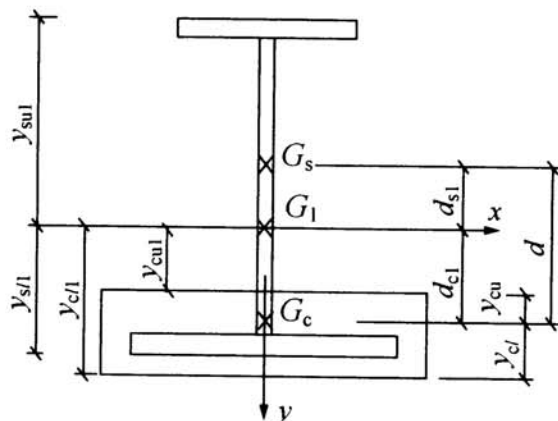


图 C. 0. 2 预弯梁截面参数

$G_l$ —预弯梁截面形心； $G_c$ ——期混凝土截面形心； $d$ —钢梁截面形心至一期混凝土截面形心的距离； $y_{cul}$ 、 $y_{cll}$ —预弯梁截面形心到一期混凝土上、下缘的距离； $y_{sul}$ 、 $y_{sl}$ —预弯梁截面形心到钢梁上、下缘的距离； $y_{cu}$ 、 $y_{cl}$ ——期混凝土截面形心到其上、下缘的距离； $d_{sl}$ 、 $d_{cl}$ —预弯梁截面形心至钢梁截面形心和一期混凝土截面形心的距离

下列规定：

- 1 预弯梁截面应由钢梁和一期混凝土组成。
- 2 预弯梁的换算截面面积和换算截面惯性矩应按下列公式计算：

$$A_l = A_s + A_c/n_1 \quad (C. 0. 2-1)$$

$$I_l = I_s + d_{sl}^2 A_s + d_{cl}^2 A_c/n_1 + I_c/n_1 \quad (C. 0. 2-2)$$

$$n_1 = E_s/E_{cl} \quad (C. 0. 2-3)$$

式中： $A_l$ ——预弯梁的换算截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$A_c$ ——一期混凝土的截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$I_l$ ——预弯梁的换算截面惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；

$I_c$ ——一期混凝土绕自身形心轴的惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；

$n_1$ ——钢梁与一期混凝土的弹性模量比值；

$E_s$ 、 $E_{cl}$ ——钢材和一期混凝土的弹性模量（MPa），在反弹阶段计算时应取  $E_{cl}$  为反弹时一期混凝土的实际模量（MPa）。

**C. 0. 3** 预弯组合梁截面计算（图 C. 0. 3）应符合下列规定：

- 1 预弯组合梁截面应由钢梁、一期混凝土和二期混凝土



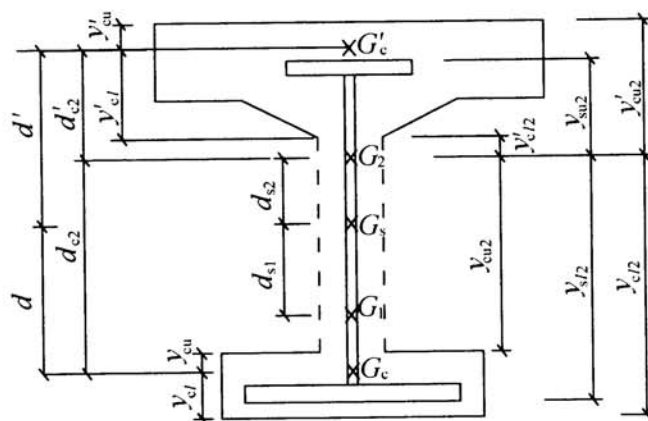


图 C.0.3 预弯组合梁截面参数

$G'_c$ —二期混凝土截面形心； $G_2$ —预弯预应力组合梁截面形心； $d_{c2}$ 、 $d'_{c2}$ —预弯预应力组合梁截面形心至一、二期混凝土截面形心的距离； $d$ 、 $d'$ —钢梁截面形心至一、二期混凝土截面形心的距离； $d_{s1}$ 、 $d_{s2}$ —钢梁截面形心至预弯梁截面形心和预弯预应力组合梁截面形心的距离； $y_{su2}$ 、 $y_{sl2}$ —预弯预应力组合梁截面形心至钢梁上、下缘的距离； $y'_{cu2}$ 、 $y'_{cl2}$ —预弯预应力组合梁截面形心至二期混凝土上、下缘的距离； $y_{cu2}$ 、 $y_{cl2}$ —预弯预应力组合梁截面形心至一期混凝土上、下缘的距离

组成。

**2 预弯预应力组合梁的换算截面面积和换算截面惯性矩应按下列公式计算：**

$$A_2 = A_s + A_c/n_1 + A'_c/n_2 \quad (C.0.3-1)$$

$$I_2 = I_s + I_c/n_1 + I'_c/n_2 + A_s d_{s2}^2 + d_{c2}^2 A_c/n_1 + d_{c2}'^2 A'_c/n_2 \quad (C.0.3-2)$$

$$n_2 = E_s/E_{c2} \quad (C.0.3-3)$$

式中： $A_2$ ——预弯组合梁的换算截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$I_2$ ——预弯组合梁的截面惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；

$n_2$ ——钢梁与二期混凝土的弹性模量比值；

$E_s$ 、 $E_{c2}$ ——钢材和二期混凝土的弹性模量（MPa）；

$A'_c$ ——二期混凝土截面面积（ $\text{mm}^2$ ）；

$I'_c$ ——二期混凝土截面绕其自身形心轴的惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）。

**C.0.4** 不计一期混凝土的截面计算（图 C.0.4）应符合下列规定：

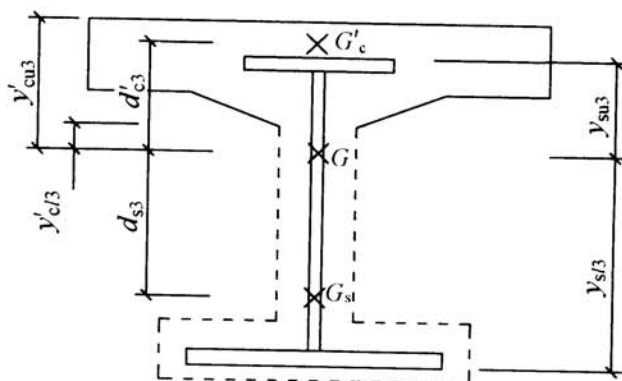


图 C.0.4 不计一期混凝土的截面几何参数

$G$ —二期混凝土(不含腹板)与钢梁的截面形心;  $d_{s3}$ 、 $d'_{c3}$ — $G$ 至钢梁截面形心和二期混凝土截面形心的距离;  $y_{su3}$ 、 $y_{sl3}$ —形心  $G$ 至钢梁上、下缘的距离;  $y'_{cu3}$ 、 $y'_{cl3}$ —形心  $G$ 至二期混凝土上、下缘的距离

1 在活载作用阶段, 当一期混凝土完全开裂, 或作为截面开裂的判断依据时, 预弯预应力组合梁的截面应由二期混凝土中的桥面板混凝土和钢梁组成。

2 各参数应按下列公式计算:

$$A_3 = A_s + A'_c/n_2 \quad (\text{C.0.4-1})$$

$$I_3 = I_s + I'_c/n_2 + A_s d_{s3}^2 + A'_c d_{c3}'^2/n_2 \quad (\text{C.0.4-2})$$

式中:  $A_3$ ——二期混凝土与钢梁的换算截面面积 ( $\text{mm}^2$ );

$I_3$ ——不计一期混凝土的换算截面惯性矩 ( $\text{mm}^4$ )。

**C.0.5** 当一期混凝土为 B 类构件时, 折算截面几何参数计算(图 C.0.5)应符合下列规定:

1 距离参数  $y_{esu}$ 、 $y_{esl}$  和  $y'_{ecu}$  可按下列近似方法计算确定:

$$y_{esl} = \left( \frac{I_2}{I_c} \right)^m y_{sl2}, y_{esu} = -(h_s - y_{esl}) \quad (\text{C.0.5-1})$$

$$m = \frac{\ln(y_{sl3}/y_{sl2})}{\ln(I_2/I_3)}, y'_{ecu} = -(h_s + c - y_{esl}) \quad (\text{C.0.5-2})$$

式中:  $c$ ——钢梁上翼板混凝土保护层厚度 ( $\text{mm}$ )。

2 截面折算惯性矩  $I_c$  可由下式计算:

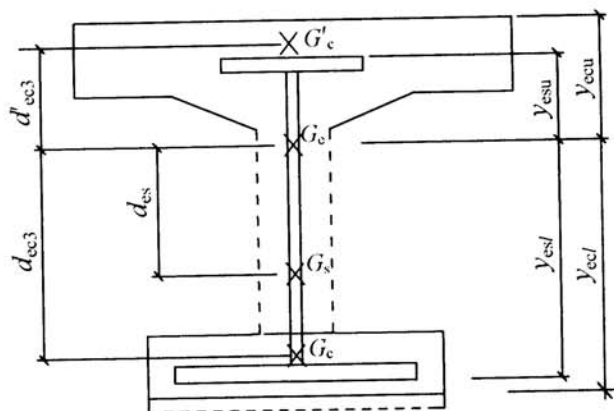


图 C.0.5 折算截面几何参数

$G_e$ —预弯组合梁的折算面积形心； $d_{es}$ —形心  $G_e$  至钢梁截面形心的距离；  
 $d_{ec3}$ 、 $d'_{ec3}$ —形心  $G_e$  至一、二期混凝土截面形心的距离；  
 $y_{esu}$ 、 $y_{esc}$ —预弯预应力组合梁折算截面形心到钢梁上、下缘的距离；  
 $y'_{ecu}$ 、 $y'_{ecb}$ —预弯预应力组合梁折算截面形心到二期混凝土上边缘和一期混凝土下边缘的距离

$$I_e = \begin{cases} I_2, & M_{\max} < M_0 + M_{cr} \\ \left( \frac{M_{cr}}{M_{\max} - M_0} \right)^2 I_2 + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{\max} - M_0} \right)^2 \right] I_3, & M_{\max} \geq M_0 + M_{cr} \end{cases} \quad (C.0.5-3)$$

式中： $I_e$ ——一期混凝土开裂后的折算惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；

$I_2$ ——预弯组合梁跨中截面惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；由本标准式（C.0.3-2）计算；

$I_3$ ——不计一期混凝土时跨中截面惯性矩（ $\text{mm}^4$ ）；由本标准式（C.0.4-2）计算；

$M_{\max}$ ——预弯组合梁曾经承担过的最大弯矩（ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ），可取正常使用阶段跨中截面活载弯矩作用标准值  $M_q$ ，并应计入冲击作用；

$M_0$ ——消压弯矩（ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ），即使一期混凝土下缘预压应力为零时的弯矩；

$M_{cr}$ ——截面一期混凝土下缘消压后的开裂弯矩（ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ），即使一期混凝土下缘由零应力到其抗拉强度标准值  $f_{tk}$  的弯矩。



## 附录 D 变 形 计 算

**D. 0. 1** 预弯预应力梁的变形计算应符合下列规定:

1 预弯预应力组合梁变形计算应采用基于弹性理论的方法。可将钢梁的变形计算分解为不同的受力阶段和计算步骤, 并将变形计算结果叠加。在预弯前, 钢梁已有预拱度  $f_0$  存在。

2 在挠度计算中, 梁在水平状态的挠度为零, 上拱为负, 下挠为正。

**D. 0. 2** 预弯钢梁阶段, 在设计预弯力  $P_0$  和钢梁自重集度  $q_s$  共同作用下钢梁应处于压平状态。钢梁截面几何特性应按本标准附录第 C. 0. 1 条确定。若设计预弯力  $P_0$  在两  $L/4$  点加载, 由预弯力和钢梁自重引起的跨中截面竖向变形  $f_1$  可按下列公式计算:

$$f_1 = -f_0 \quad (\text{D. 0. 2-1})$$

$$f_0 = \frac{11P_0L^3}{384E_sI_s} + \frac{5q_sL^4}{384E_sI_s} \quad (\text{D. 0. 2-2})$$

式中:  $f_1$ ——设计预弯力作用下梁的挠度 (mm);

$f_0$ ——钢梁设计预拱度 (mm)。

**D. 0. 3** 预弯梁反弹阶段的截面几何特性应按本标准附录第 C. 0. 2 条计算, 计算应符合下列步骤:

1 一期混凝土自重作用产生的挠度  $f_2$  应按下列公式计算:

$$f_2 = \frac{5M_{d1}L^2}{48E_sI_1} \quad (\text{D. 0. 3-1})$$

式中:  $M_{d1}$ ——一期混凝土自重引起的跨中弯矩 (N·mm), 其他符号意义同前。

2 卸除预弯力时, 预弯梁的回弹拱度相当于在预弯梁上作用一对反向预弯力  $-P_0$ , 此时预弯梁的反拱值  $f_3$  应按下列公式计算:

$$f_3 = -\frac{11P_0L^3}{384E_sI_1} \quad (\text{D. 0. 3-2})$$

3 一期混凝土初期徐变产生的上拱度  $f_4$  可按下式计算:

$$f_4 = \frac{5M_{st1}L^2}{48E_sI_s} \quad (D.0.3-3)$$

其中  $M_{st1}$  按本标准式 (E.0.3-10) 计算。

4 一期混凝土收缩产生的拱度  $f_5$  可按下式计算:

$$f_5 = \frac{5M_{s1}L^2}{48E_sI_s} \quad (D.0.3-4)$$

其中  $M_{s1}$  按本标准式 (E.0.3-20) 计算。

5 在二期混凝土浇筑后及结硬前, 由二期混凝土自重  $M_{d2}$  和模板自重  $M_m$  产生的挠度  $f'_6$  应按下式计算:

$$f'_6 = \frac{5(M_{d2} + M_m)L^2}{48E_sI_1} \quad (D.0.3-5)$$

**D.0.4** 全截面参与工作阶段的截面形式及几何性质应由本标准附录第 C.0.3 条给出, 变形计算应符合以下步骤:

1 二期混凝土结硬后拆除模板, 形成预弯预应力组合梁。拆除模板后组合梁的回弹挠度  $f''_6$  可按式 (D.0.4-1) 计算。将式 (D.0.3-5) 和式 (D.0.4-1) 的计算结果叠加后, 可得二期混凝土结硬后由二期混凝土自重所产生的挠度  $f_6$ , 可按式 (D.0.4-2) 计算:

$$f''_6 = -\frac{5M_mL^2}{48E_sI_2} \quad (D.0.4-1)$$

$$f_6 = f'_6 + f''_6 \quad (D.0.4-2)$$

2 二期结构重力产生的挠度  $f_7$  应按下式计算:

$$f_7 = \frac{5M_{d3}L^2}{48E_sI_2} \quad (D.0.4-3)$$

3 二期混凝土收缩产生的挠度  $f_8$  可按下式计算:

$$f_8 = \frac{5M_{s2}L^2}{48E_sI_s} \quad (D.0.4-4)$$

其中  $M_{s2}$  按本标准式 (E.0.4-11) 计算。

4 二期混凝土徐变引起的挠度  $f_9$  可按下式计算:

$$f_9 = \frac{5M_{st2}L^2}{48E_sI_1} \quad (D.0.4-5)$$

其中  $M_{st2}$  按本标准式 (E. 0. 4-22) 计算。

**5** 一期混凝土后期徐变 ( $t = t_1 \rightarrow \infty$ ) 引起的截面变形  $f_{10}$  可按下式计算:

$$f_{10} = \frac{5M_{st3}L^2}{48E_sI_3} \quad (D. 0. 4-6)$$

其中  $M_{st3}$  按本标准式 (E. 0. 4-31) 计算。

**D. 0. 5** 在成桥阶段一期混凝土应处于受压状态。成桥变形状态应为本标准第 D. 0. 3 条、第 D. 0. 4 条和第 D. 0. 5 条中总计 10 项变形计算结果的叠加。计算时应符合下列规定:

**1** 在桥梁建成时, 不计混凝土收缩、徐变长期影响的成桥上拱值  $f_p$  可由下式计算:

$$f_p = \sum_{i=1}^{1,2,3,6,7} f_i \quad (D. 0. 5-1)$$

**2** 在结构重力长期作用下, 预弯预应力组合简支梁桥梁跨中剩余上拱值  $f_p$  应按下式计算:

$$f_p = \sum_{i=1}^{10} f_i \quad (D. 0. 5-2)$$

计算成桥阶段上拱值  $f_p$  时, 可根据成桥状态计算的时间要求选取本标准式 (D. 0. 5-1) 或式 (D. 0. 5-2) 进行计算。

**3** 在正常使用极限状态下, 由可变作用频遇弯矩  $M_{fd}$  引起的跨中挠度计算方法见本标准第 7. 2. 2 条。预弯预应力组合梁桥跨中截面由可变作用引起的挠度应满足本标准第 7. 2. 3 条的规定。

**D. 0. 6** 计算挠度  $f_4$ 、 $f_9$  和  $f_{10}$  时, 可直接采用下列简化公式, 其精度可满足工程计算的要求:

$$f_4 = \frac{5M_{st1}L^2}{48E_sI_s}, f_9 = \frac{5M_{st2}L^2}{48E_sI_1}, f_{10} = \frac{5M_{st3}L^2}{48E_sI_3} \quad (D. 0. 6)$$

式中:  $M_{st1}$ 、 $M_{st2}$  和  $M_{st3}$  应分别由本标准式 (E. 0. 3-10)、式 (E. 0. 4-22) 和式 (E. 0. 4-31) 计算。



## 附录 E 截面应力计算

### E.0.1 应力计算应符合下列规定:

1 预弯预应力组合截面的应力计算宜采用基于弹性理论的换算截面法。

2 根据结构的受力过程, 预弯预应力组合梁的截面应力可采用分阶段计算并将各项计算结果叠加的方法确定。

3 符号约定: 应力以拉为正, 以压为负; 梁上、下翼板边缘至中性轴的距离 ( $y$ ) 以上侧为负, 下侧为正; 挠度计算时以梁体下挠为正, 上拱为负。

4 脚标规定: 计算中所有符号的第一脚标  $s$  表示钢,  $c$  表示混凝土; 上标 “ $'$ ” 表示二期混凝土; 计算中第二脚标  $u$  表示上翼 (缘) 板位置,  $l$  表示下翼 (缘) 板位置; 变量中第三脚标数字表示计算步骤或受力阶段。

E.0.2 钢梁预弯阶段, 钢梁截面几何参数计算应符合本标准附录第 C.0.1 条的规定。当设计预弯力  $P_0$  作用在钢梁的  $L/4$  点时, 钢梁上、下缘由预弯力  $P_0$  和钢梁自重集度  $q_s$  引起的应力应按下列公式计算:

$$\sigma_{sul} = \frac{M_p + M_s}{I_s} y_{su}, \sigma_{sl} = \frac{M_p + M_s}{I_s} y_{sl} \quad (\text{E.0.2-1})$$

$$M_p = \frac{P_0 L}{4}, M_s = \frac{q_s L^2}{8} \quad (\text{E.0.2-2})$$

式中:  $M_p$ ——由两个四分点作用设计预弯力引起的跨中截面预弯矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );

$M_s$ ——钢梁自重引起的跨中截面弯矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );

$P_0$ ——设计预弯力;

$q_s$ ——钢梁自重集度 ( $\text{N/mm}$ );

$I_s$ ——为钢梁的截面惯性矩（ $\text{mm}^4$ ），由本标准式（C.0.1-2）计算。

**E.0.3** 预弯梁反弹阶段，一期混凝土已达到规定的强度，卸除预弯力，预弯梁反弹。同时，一期混凝土开始发生收缩和徐变。预弯梁的截面几何参数应符合本标准附录第 C.0.2 条的规定。本阶段的计算步骤如下：

**1** 一期混凝土达到要求的强度后，卸除预弯力  $P$ ，梁体反弹，一期混凝土受压形成预弯梁。卸除预弯力在预弯梁上产生的应力应按下列公式计算：

$$\text{钢梁上、下缘应力：}\sigma_{su2} = -\frac{M_p}{I_1}y_{su1}, \sigma_{sl2} = -\frac{M_p}{I_1}y_{sl1} \quad (\text{E.0.3-1})$$

$$\text{一期混凝土上、下缘应力：}\sigma_{cu2} = -\frac{M_p}{n_1 I_1}y_{cu1}, \sigma_{cl2} = -\frac{M_p}{n_1 I_1}y_{cl1} \quad (\text{E.0.3-2})$$

**2** 一期混凝土自重引起预弯梁的截面应力应按下列公式计算：

$$\text{钢梁上、下缘应力：}\sigma_{su3} = \frac{M_{dl}}{I_1}y_{su1}, \sigma_{sl3} = \frac{M_{dl}}{I_1}y_{sl1} \quad (\text{E.0.3-3})$$

$$\text{一期混凝土上、下缘应力：}\sigma_{cu3} = \frac{M_{dl}}{n_1 I_1}y_{cu1}, \sigma_{cl3} = \frac{M_{dl}}{n_1 I_1}y_{cl1} \quad (\text{E.0.3-4})$$

式中： $M_{dl}$ ——由一期混凝土的自重集度产生的跨中弯矩（ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ）， $M_{dl} = q_1 L^2 / 8$ ；

**3** 一期混凝土初期徐变引起的截面应力按下列方法计算：

当  $t=0$  时，由预弯力和预弯梁自重引起一期混凝土截面内力应按下列公式计算：

$$N_{c0} = (M_y - M_{dl}) \frac{A_c d_{cl}}{n_1 I_1} (\text{压力}) \quad (\text{E.0.3-5})$$

$$M_{c0} = (M_y - M_{dl}) \frac{I_c}{n_1 I_1} \text{(负弯矩)} \quad (\text{E. 0. 3-6})$$

当  $t=t_1$  时, 由一期混凝土徐变产生的内力损失为:

$$\text{一期混凝土: } N_{ct1} = N_{c0} (1 - e^{-\phi_1}) \text{(拉力)} \quad (\text{E. 0. 3-7})$$

$$M_{ct1} = M_{c0} (1 - e^{-\phi_1}) - \frac{N_{c0} d I_c}{n_1 I_s} \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha} (e^{-\phi_1} - e^{-\phi_1}) \text{(正弯矩)} \quad (\text{E. 0. 3-8})$$

$$\text{钢梁: } N_{st1} = -N_{ct1} \text{(压力)} \quad (\text{E. 0. 3-9})$$

$$M_{st1} = -(M_{ct1} + N_{ct1} d) \text{(负弯矩)} \quad (\text{E. 0. 3-10})$$

$$\alpha = \frac{A_s I_s}{A_1 I_1} \quad (\text{E. 0. 3-11})$$

式中:  $\phi_1$ ——混凝土徐变系数, 可取  $\phi_1 = 0.5$  或按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的方法计算;

$\alpha$ ——计算参数;

$d$ ——钢梁截面形心到一期混凝土形心的距离 (mm);

$d_{c1}$ ——预弯梁截面形心到一期混凝土截面形心的距离 (mm)。

一期混凝土初期徐变在钢梁上、下翼板及一期混凝土上、下表面产生的应力可按下列公式计算:

钢梁上、下缘应力:

$$\sigma_{su4} = \frac{N_{st1}}{A_s} + \frac{M_{st1}}{I_s} y_{su}, \sigma_{sl4} = \frac{N_{st1}}{A_s} + \frac{M_{st1}}{I_s} y_{sl} \quad (\text{E. 0. 3-12})$$

一期混凝土上、下缘应力:

$$\sigma_{cu4} = \frac{N_{ct1}}{A_c} + \frac{M_{ct1}}{I_c} y_{cu}, \sigma_{cl4} = \frac{N_{ct1}}{A_c} + \frac{M_{ct1}}{I_c} y_{cl} \quad (\text{E. 0. 3-13})$$

式中:  $y_{cu}$ 、 $y_{cl}$ ——一期混凝土截面形心到一期混凝土上、下表面的距离 (mm)。

4 一期混凝土收缩引起的钢梁和一期混凝土中的应力应按



下列公式计算:

钢梁上、下缘应力:

$$\sigma_{su5} = \frac{N_{s1}}{A_s} + \frac{M_{s1}}{I_s} y_{su}, \sigma_{sl5} = \frac{N_{s1}}{A_s} + \frac{M_{s1}}{I_s} y_{sl} \quad (\text{E. 0. 3-14})$$

一期混凝土上、下缘应力:

$$\sigma_{cu5} = \frac{N_{c1}}{A_c} + \frac{M_{c1}}{I_c} y_{cu}, \sigma_{cl5} = \frac{N_{c1}}{A_c} + \frac{M_{c1}}{I_c} y_{cl} \quad (\text{E. 0. 3-15})$$

$$n_\phi = n_1 \left( 1 + \frac{2\phi_{t=\infty}}{2} \right) \quad (\text{E. 0. 3-16})$$

$$f' = \frac{1}{1 + \frac{A_c}{n_\phi A_s} + \frac{A_c d^2}{I_c + n_\phi I_s}} \quad (\text{E. 0. 3-17})$$

$$N_{cl} = -N_{s1} = E_s A_c \epsilon_s f' / n_\phi \quad (\text{E. 0. 3-18})$$

$$M_{cl} = N_{cl} d \frac{-I_c}{I_c + n_\phi I_s} \quad (\text{E. 0. 3-19})$$

$$M_{s1} = N_{cl} d \frac{-n_\phi I_s}{I_c + n_\phi I_s} \quad (\text{E. 0. 3-20})$$

5 在二期混凝土结硬前, 由二期混凝土和模板自重 在钢梁上、下缘及一期混凝土上、下表面产生的应力可按下列公式计算:

钢梁上、下缘应力:

$$\sigma_{su6} = \frac{M_{d2} + M_m}{I_1} y_{su1}, \sigma_{sl6} = \frac{M_{d2} + M_m}{I_1} y_{sl1} \quad (\text{E. 0. 3-21})$$

一期混凝土上、下缘应力:

$$\sigma_{cu6} = \frac{M_{d2} + M_m}{n_1 I_1} y_{cu1}, \sigma_{cl6} = \frac{M_{d2} + M_m}{n_1 I_1} y_{cl1} \quad (\text{E. 0. 3-22})$$

式中:  $M_{d2}$ ——由二期混凝土的自重集度 (含腹板混凝土的重量) 引起的弯矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );

$M_m$ ——由模板的自重集度引起的跨中截面弯矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ )。

**E. 0. 4** 二期混凝土达到设计强度后, 预弯预应力组合梁全截面参与工作。计算中不计入腹板混凝土对截面几何特性的影响, 截面几何特性按本标准附录 C. 0. 3 计算。本阶段应包括 5 个计算

步骤：

1 拆除二期混凝土模板后，预弯预应力组合梁截面已形成。

截面应力应按下列公式计算：

$$\text{钢梁上、下缘应力: } \sigma_{su6} = \frac{M_{d2} + M_m}{I_1} y_{su1} - \frac{M_m}{I_2} y_{su2} \quad (\text{E. 0. 4-1})$$

$$\sigma_{sl6} = \frac{M_{d2} + M_m}{I_1} y_{sl1} - \frac{M_m}{I_2} y_{sl2} \quad (\text{E. 0. 4-2})$$

$$\text{一期混凝土上、下缘应力: } \sigma_{cu6} = \frac{M_{d2} + M_m}{n_1 I_1} y_{cu1} - \frac{M_m}{n_1 I_2} y_{cu2} \quad (\text{E. 0. 4-3})$$

$$\sigma_{cl6} = \frac{M_{d2} + M_m}{n_1 I_1} y_{cl1} - \frac{M_m}{n_1 I_2} y_{cl2} \quad (\text{E. 0. 4-4})$$

二期混凝土上、下缘应力：

$$\sigma'_{cu6} = -\frac{M_m}{n_2 I_2} y'_{cu2}, \sigma'_{cl6} = -\frac{M_m}{n_2 I_2} y'_{cl2} \quad (\text{E. 0. 4-5})$$

2 二期结构重力产生的钢梁和一、二期混凝土中的应力应按下列公式计算：

$$\text{钢梁上、下缘应力: } \sigma_{su7} = \frac{M_{d3}}{I_2} y_{su2}, \sigma_{sl7} = \frac{M_{d3}}{I_2} y_{sl2} \quad (\text{E. 0. 4-6})$$

$$\text{一期混凝土上、下缘应力: } \sigma_{cu7} = \frac{M_{d3}}{n_1 I_2} y_{cu2}, \sigma_{cl7} = \frac{M_{d3}}{n_1 I_2} y_{cl2} \quad (\text{E. 0. 4-7})$$

$$\text{二期混凝土上、下缘应力: } \sigma'_{cu7} = \frac{M_{d3}}{n_2 I_2} y'_{cu2}, \sigma'_{cl7} = \frac{M_{d3}}{n_2 I_2} y'_{cl2} \quad (\text{E. 0. 4-8})$$

式中： $M_{d3}$ ——由二期结构重力集度引起的跨中截面弯矩（N·mm）。

3 由二期混凝土收缩引起并分配给一期混凝土、二期混凝土及钢梁上的内力可按下列公式计算：

$$\text{一期混凝土: } N_{c2} = \frac{\lambda \epsilon'_s}{\mu \mu' - \lambda^2} E_s, M_{c2} = \frac{I_c}{n_\phi I_t} M_1 \quad (\text{E. 0. 4-9})$$

$$\text{二期混凝土: } N'_{c2} = \frac{\mu \epsilon'_s}{\mu \mu' - \lambda^2} E_s, M'_{c2} = \frac{I'_c}{n'_\phi I_t} M_1 \quad (\text{E. 0. 4-10})$$

$$\text{钢梁: } N_{s2} = -(N_{c2} + N'_{c2}), M_{s2} = \frac{I_s}{I_t} M_1 \quad (\text{E. 0. 4-11})$$

$$M_1 = -dN_{c2} + d'N'_{c2} \quad (\text{E. 0. 4-12})$$

$$I_t = \frac{I_c}{n_\phi} + I_s + \frac{I'_c}{n'_\phi}, \lambda = \frac{dd'}{I_t} - \frac{1}{A_s} \quad (\text{E. 0. 4-13})$$

$$\mu = \frac{d^2}{I_t} + \frac{n_\phi}{A_c} + \frac{1}{A_s}, \mu' = \frac{d'^2}{I_t} + \frac{n'_\phi}{A'_c} + \frac{1}{A_s} \quad (\text{E. 0. 4-14})$$

$$n_\phi = n_1 \left(1 + \frac{2\phi_{t=\infty}}{2}\right), n'_\phi = n_2 \left(1 + \frac{2\phi_{t=\infty}}{2}\right) \quad (\text{E. 0. 4-15})$$

由二期混凝土收缩引起钢梁、一期混凝土及二期混凝土中的应力应按下列公式计算：

$$\sigma_{su8} = \frac{N_{s2}}{A_s} + \frac{M_{s2}}{I_s} y_{su}, \sigma_{sl8} = \frac{N_{s2}}{A_s} + \frac{M_{s2}}{I_s} y_{sl} \quad (\text{E. 0. 4-16})$$

$$\sigma_{cu8} = \frac{N_{c2}}{A_c} + \frac{M_{c2}}{I_c} y_{cu}, \sigma_{cl8} = \frac{N_{c2}}{A_c} + \frac{M_{c2}}{I_c} y_{cl} \quad (\text{E. 0. 4-17})$$

$$\sigma'_{cu8} = \frac{N'_{c2}}{A'_c} + \frac{M'_{c2}}{I'_c} y'_{cu}, \sigma'_{cl8} = \frac{N'_{c2}}{A'_c} + \frac{M'_{c2}}{I'_c} y'_{cl} \quad (\text{E. 0. 4-18})$$

式中：\$A'\_c\$、\$I'\_c\$——二期混凝土截面面积（mm<sup>2</sup>）及二期混凝土对自身形心的截面惯性矩（mm<sup>4</sup>）；

\$y'\_{cu}\$、\$y'\_{cl}\$——二期混凝土截面形心到二期混凝土上、下表面的距离（mm）。

**4** 二期混凝土徐变引起的截面内力可按下列方法计算：

$$\text{二期混凝土内力: } N'_{ct2} = N'_{c0} (1 - e^{-\alpha_1 \phi'_t}) \quad (\text{E. 0. 4-19})$$

$$M'_{ct2} = - \left\{ M'_{c0} (1 - e^{-\phi'_t}) - \frac{N'_{c0} (d'_{c2} + d_{s2} + d_{s1}) I'_c}{n_2 I_1} \right. \\ \left. \times \frac{\alpha_1}{1 - \alpha_1} (e^{-\alpha_1 \phi'_t} - e^{-\phi'_t}) \right\} \quad (\text{E. 0. 4-20})$$

$$\text{预弯梁内力: } N_{st2} = -N'_{ct2} \quad (\text{E. 0. 4-21})$$



$$M_{st2} = -M'_{ct2} + N'_{ct2}(d'_{c2} + d_{s2} + d_{s1}) \quad (\text{E. 0. 4-22})$$

$$\alpha_1 = \frac{A_1 I_1}{A_2 I_2} \quad (\text{E. 0. 4-23})$$

式中  $N'_{c0}$ 、 $M'_{c0}$  是在二期混凝土产生徐变前 ( $t=0$ )，作用在预弯预应力组合梁二期混凝土上的轴力和弯矩，应按下式计算：

$$N'_{c0} = \frac{A'_c d'_{c2}}{n_2 I_2} M_{d3}, M'_{c0} = \frac{I'_c}{n_2 I_2} M_{d3} \quad (\text{E. 0. 4-24})$$

由二期混凝土徐变引起的钢梁和一、二期混凝土中的应力应按下列公式计算：

$$\text{二期混凝土: } \sigma'_{cu9} = \frac{N'_{ct2}}{A'_c} + \frac{M'_{ct2}}{I'_c} y'_{cu}, \sigma'_{cl9} = \frac{N'_{ct2}}{A'_c} + \frac{M'_{ct2}}{I'_c} y'_{cl} \quad (\text{E. 0. 4-25})$$

$$\text{钢梁: } \sigma_{su9} = \frac{N_{st2}}{A_1} + \frac{M_{st2}}{I_1} y_{su1}, \sigma_{sl9} = \frac{N_{st2}}{A_1} + \frac{M_{st2}}{I_1} y_{sl1} \quad (\text{E. 0. 4-26})$$

$$\text{一期混凝土: } \sigma_{cu9} = \frac{N_{st2}}{n_1 A_1} + \frac{M_{st2}}{n_1 I_1} y_{cu1}, \sigma_{cl9} = \frac{N_{st2}}{n_1 A_1} + \frac{M_{st2}}{n_1 I_1} y_{cl1} \quad (\text{E. 0. 4-27})$$

**5 一期混凝土后期徐变 ( $t = t_1 \rightarrow \infty$ ) 引起的截面内力变化可按下列方法计算：**

$$N_{ct3} = N_{c3} [1 - e^{-\alpha_2 (\phi_{\infty} - \phi_1)}] \quad (\text{E. 0. 4-28})$$

$$M_{ct3} = M_{c3} [1 - e^{-\alpha_2 (\phi_{\infty} - \phi_1)}] - \frac{N_{c3} (d_{s3} + d) I_c}{n_1 I_3} \cdot \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} [e^{-\alpha_2 (\phi_{\infty} - \phi_1)} - e^{-(\phi_{\infty} - \phi_1)}] \quad (\text{E. 0. 4-29})$$

$$N_{st3} = -N_{ct3} \quad (\text{E. 0. 4-30})$$

$$M_{st3} = -[M_{ct3} + N_{ct3} (d_{s3} + d)] \quad (\text{E. 0. 4-31})$$

$$\alpha_2 = \frac{A_3 I_3}{A_2 I_2} \quad (\text{E. 0. 4-32})$$

$$N_{c3} = N_{c0} - N_{ct1} - N_{cl} - N_{c2} - \frac{A_c d_{c1}}{n_1 I_1} M_{d2} - \frac{A_c d_{c2}}{n_1 I_2} M_{d3} - \frac{A_c}{n_1 A_1} N_{st2} - \frac{A_c d_{cl}}{n_1 I_1} M_{st2} \quad (\text{E. 0. 4-33})$$

$$M_{c3} = M_{co} - M_{ct1} - M_{c1} - M_{c2} - \frac{I_c}{n_1 I_1} M_{d2} - \frac{I_c}{n_1 I_2} M_{d3} - \frac{I_c}{n_1 I_1} M_{st2} \quad (\text{E. 0. 4-34})$$

式中：\$N\_{ct3}\$、\$M\_{ct3}\$——一期混凝土后期徐变引起的一期混凝土内的轴力（N）和弯矩（N·mm）；

\$N\_{st3}\$、\$M\_{st3}\$——一期混凝土后期徐变引起的二期混凝土上的轴力（N）和弯矩（N·mm）；

\$\alpha\_2\$——计算参数；

\$N\_{c3}\$、\$M\_{c3}\$——\$t\$时刻作用在一期混凝土上的轴力（N）和弯矩（N·mm）。

一期混凝土后期徐变引起的截面应力变化可按下列公式计算：

钢梁应力：

$$\sigma_{su10} = \frac{N_{st3}}{A_3} + \frac{M_{st3}}{I_3} y_{su3}, \sigma_{sl10} = \frac{N_{st3}}{A_3} + \frac{M_{st3}}{I_3} y_{sl3} \quad (\text{E. 0. 4-35})$$

一期混凝土应力：

$$\sigma_{cu10} = \frac{N_{ct3}}{A_c} + \frac{M_{ct3}}{I_c} y_{cu}, \sigma_{cl10} = \frac{N_{ct3}}{A_c} + \frac{M_{ct3}}{I_c} y_{cl} \quad (\text{E. 0. 4-36})$$

二期混凝土应力：

$$\sigma'_{cu10} = \frac{N_{st3}}{A_3 n_2} + \frac{M_{st3}}{I_3 n_2} y'_{cu3}, \sigma'_{cl10} = \frac{N_{st3}}{A_3 n_2} + \frac{M_{st3}}{I_3 n_2} y'_{cl3} \quad (\text{E. 0. 4-37})$$

**E. 0. 5** 在结构重力作用下的成桥状态，一期混凝土应处于受压状态。成桥应力状态应为上述第 E. 0. 2 条～第 E. 0. 4 条中各项应力计算结果的叠加，可按下列规定计算：

1 在结构重力长期作用下，一期混凝土下缘的应力应由下式计算：

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{cli} \quad (\text{E. 0.5-1})$$

**2** 在桥梁建成时, 不计混凝土收缩、徐变影响的一期混凝土下缘的应力可近似由下式计算:

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^{1,2,3,6,7} \sigma_{cli} \quad (\text{E. 0.5-2})$$

式中  $\sigma_p$  为用于一期混凝土消压弯矩  $M_0$  计算的成桥状态一期混凝土下缘压应力。计算  $\sigma_p$  时, 可根据成桥状态需要的计算时间选取式 (E. 0.5-1) 或 (E. 0.5-2) 进行计算, 与之相应的一期混凝土消压弯矩  $M_0$  应按本标准式 (7.2.2-1) 计算。

**E. 0.6** 活荷载作用阶段, 由汽车 (或其他可变) 作用引起的截面应力应按下列方法计算:

**1** 如果  $M_q \leq M_0 + M_{cr}$ , 则预弯预应力组合梁的一期混凝土不开裂, 其中  $M_{cr}$  为一期混凝土的抗裂弯矩, 按本标准式 (7.2.2-2) 计算。截面上由汽车 (或其他可变) 作用引起的各点应力增量应按下列公式计算:

$$\sigma_{su1} = \frac{M_q}{I_2} y_{su2}, \sigma_{sl1} = \frac{M_q}{I_2} y_{sl2} \quad (\text{E. 0.6-1})$$

$$\sigma_{cu1} = \frac{M_q}{n_1 I_2} y_{cu2}, \sigma_{cl1} = \frac{M_q}{n_1 I_2} y_{cl2} \quad (\text{E. 0.6-2})$$

$$\sigma'_{cu1} = \frac{M_q}{n_2 I_2} y'_{cu2}, \sigma'_{cl1} = \frac{M_q}{n_2 I_2} y'_{cl2} \quad (\text{E. 0.6-3})$$

式中:  $M_q$ ——汽车 (或其他可变) 作用引起的截面弯矩标准值。

其他符号意义同前。

预弯应力组合梁截面上六个控制点的最终应力值应按下列公式计算:

$$\sigma_{su} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{sui} + \sigma_{su1}, \sigma_{sl} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{sli} + \sigma_{sl1} \quad (\text{E. 0.6-4})$$

$$\sigma_{cu} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{cui} + \sigma_{cu1}, \sigma_{cl} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{cli} + \sigma_{cl1} \quad (\text{E. 0.6-5})$$

$$\sigma'_{cu} = \sum_{i=1}^{10} \sigma'_{cui} + \sigma'_{cu1}, \sigma'_{cl} = \sum_{i=1}^{10} \sigma'_{cli} + \sigma'_{cl1} \quad (\text{E. 0.6-6})$$



**2** 如果  $M_q > M_0 + M_{cr}$ ，预弯预应力组合梁的一期混凝土已开裂。由汽车（或其他可变）作用引起的截面上各点应力应按下列公式计算：

$$\sigma_{su1} = \frac{M_0 + M_{cr}}{I_2} y_{su2} + \frac{(M_q - M_0 - M_{cr})}{I_e} y_{esu} \quad (\text{E. 0. 6-7})$$

$$\sigma_{sl1} = \frac{M_0 + M_{cr}}{I_2} y_{sl2} + \frac{(M_q - M_0 - M_{cr})}{I_e} y_{esl} \quad (\text{E. 0. 6-8})$$

$$\sigma'_{cu1} = \frac{M_0}{n_2 I_2} y'_{cu2} + \frac{(M_q - M_0 - M_{cr})}{n_2 I_e} y'_{ecu} \quad (\text{E. 0. 6-9})$$

式中： $y_{esu}$ 、 $y_{esl}$ 、 $y'_{ecu}$ ——预弯组合梁折算截面形心到钢梁上、下缘，以及二期混凝土上边缘的距离（mm）（本标准图 C. 0. 5），应按本标准式（C. 0. 5-1）和式（C. 0. 5-2）计算。

按式（E. 0. 6-7）、式（E. 0. 6-8）和式（E. 0. 6-9）计算汽车（或其他可变）作用引起的各应力增量时，截面几何性质  $I_2$  应按本标准附录第 C. 0. 3 条计算， $I_e$  应按本标准附录第 C. 0. 5 条计算。

**E. 0. 7** 预弯预应力组合梁的应力计算结果应包括第 E. 0. 2 条～第 E. 0. 6 条所述的各项应力的叠加。应力计算结果应满足本标准第 7. 4. 3 条的相关规定。

## 本标准用词说明

**1** 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 1 《钢-混凝土组合桥梁设计规范》 GB 50917
- 2 《桥梁用结构钢》 GB/T 714
- 3 《钢筋混凝土用钢 第 1 部分：热轧光圆钢筋》 GB/T 1499.1
- 4 《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》 GB/T 1499.2
- 5 《低合金高强度结构钢》 GB/T 1591
- 6 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件》 GB/T 3632
- 7 《非合金钢及细晶粒钢焊条》 GB/T 5117
- 8 《热强钢焊条》 GB/T 5118
- 9 《电弧螺栓焊用圆柱头焊钉》 GB/T 10433
- 10 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》 CJJ 2
- 11 《城市桥梁设计规范》 CJJ 11
- 12 《公路桥涵设计通用规范》 JTG D60
- 13 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 JTG D62
- 14 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》 JTG/T D64 - 01
- 15 《公路工程质量检验评定标准 土建工程》 JTG F80/1
- 16 《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T F50



掌握桥梁计算，手算、桥博MIDAS计算软件实操<https://edu.zhulong.com/lesson/5543-1.html>  
桥梁临时结构设计（挂篮盖梁支架围堰平台栈桥<https://edu.zhulong.com/lesson/4032-1.html>  
钢结构桥梁设计<https://edu.zhulong.com/lesson/9271-1.html>

掌握桥梁计算，手算、桥博MIDAS计算软件实操<https://edu.zhulong.com/lesson/5543-1.html>  
桥梁临时结构设计（挂篮盖梁支架围堰平台栈桥<https://edu.zhulong.com/lesson/4032-1.html>  
钢结构桥梁设计<https://edu.zhulong.com/lesson/9271-1.html>

## 中华人民共和国行业标准

# 预弯预应力组合梁桥技术标准

**CJJ/T 276 - 2018**

条文说明

## 编制说明

《预弯预应力组合梁桥技术标准》CJJ/T 276-2018，经住房和城乡建设部2018年2月14日以1846号公告批准、发布。

《预弯预应力组合梁桥技术标准》是国内首次编制。在本标准编制前，编制组曾先后对预弯预应力组合梁开展过力学性能及计算理论的相关研究；结合实际工程开展过钢梁加工、制造，施工技术以及工装设备方面的研究。本标准编制过程中，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，对已建成桥梁开展了运行状况的现场调查，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求专家意见的基础上编制了本标准。

为便于广大工程技术人员、科研单位及高校研究人员正确理解和执行条文规定，《预弯预应力组合梁桥设计标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。



## 目 次

1	总则	83
2	术语和符号	84
3	基本规定	85
3.1	一般规定	85
3.2	结构形式	86
3.3	作用及作用组合	87
4	材料	88
4.1	钢材	88
4.2	混凝土	89
4.3	钢筋	89
5	施工阶段计算	91
5.1	一般规定	91
5.2	应力计算	92
5.3	钢梁预拱度计算	93
5.4	钢梁的稳定性计算	94
6	承载能力极限状态计算	96
6.1	一般规定	96
6.2	截面受弯承载力计算	96
6.3	截面受剪承载力计算	98
7	正常使用极限状态计算	100
7.1	一般规定	100
7.2	成桥拱度及活载变形计算	101
7.3	抗裂性计算	101
7.4	应力计算	104
8	栓钉连接件	106

8.1	一般规定 .....	106
8.2	连接件设计 .....	106
8.3	连接件构造要求 .....	107
9	构造要求 .....	109
9.1	钢梁 .....	109
9.2	一期混凝土 .....	110
9.3	二期混凝土 .....	110
10	施工设备 .....	112
10.1	一般规定 .....	112
10.2	防侧倾装置 .....	112
10.3	加载装置 .....	113
10.4	翻转架 .....	113
10.5	施工设备的安全性检查 .....	114
11	施工及验收 .....	115
11.1	一般规定 .....	115
11.2	施加预弯力 .....	115
11.3	一期混凝土施工及释放预弯力 .....	117
11.4	翻转预弯梁 .....	117
11.5	存放和吊装 .....	118
11.6	二期混凝土施工 .....	118
11.7	质量验收 .....	118
附录 A	变截面预弯预应力组合梁 .....	120
附录 B	预弯预应力组合连续梁 .....	125
附录 C	几何参数及计算系数 .....	127
附录 D	变形计算 .....	129
附录 E	截面应力计算 .....	131

## 1 总 则

**1.0.1** 预弯预应力组合梁桥具有刚度大、承载能力大的技术特点，适用于中小跨径桥梁。20 世纪 90 年代开始在我国的城市立交桥及公路桥梁建设中推广应用，取得了较好的经济效益和社会效益。为使该类桥梁的设计、施工规范化，确保工程建设质量，在已有理论研究和建设经验的基础上，编制了本标准。

**1.0.2** 预弯预应力组合梁桥的高跨比可达到  $1/30$  左右，在城镇道路及公路工程尤其是立交桥建设中可有效降低桥梁的结构高度，减小引桥长度，降低工程总造价，具有较高的经济效益、社会效益和环境效益。本标准的制定对这类桥梁的设计、施工具有指导意义。当预弯预应力组合梁桥用于轨道交通时，设计荷载及作用组合等相关规定尚应符合相应的规范要求。轨道交通中的轨道梁结构可参考执行。

**1.0.3** 预弯预应力组合梁桥的设计与施工除应符合本标准外，在作用及其组合、材料及强度取值、钢结构加工及施工技术等方面，尚应符合国家现行有关标准的规定。预弯预应力组合梁桥应根据设计状况、作用组合进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算，设计状况、作用组合亦应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。



## 2 术语和符号

本标准的基本术语和符号主要依据现行国家标准《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083、《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132 和《道路工程术语标准》GBJ 124 的规定采用。

本章对专用技术术语作出了必要的解释，并给出了相应的推荐性英文术语，可供引用时参考。本章同时列出了标准中涉及的主要符号，并解释了各符号的物理意义。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.3** 由于曲线钢梁在预弯阶段存在弯扭耦合作用, 钢梁的整体稳定性不易控制, 因此预弯预应力组合梁桥不宜用于曲线桥梁。当预弯预应力组合简支梁桥用于斜梁桥时, 梁的混凝土端面应与斜交角度保持一致, 以便于梁端伸缩装置的安装。目前日本简支预弯预应力组合梁桥的理论跨径可达 55m, 已建成的最大简支跨径 52.8m (妙见 2 号桥, 2007 年), 我国目前建成的最大跨径已达到 40m (上海春申路桥, 2005 年)。因此本标准上限跨径暂定为 50m。本标准中没有给出适用的跨径下限值, 原则上 8m 以上的桥梁均可采用。但对于跨径较小的桥梁, 预弯组合梁桥高跨比小的优势已不明显, 需对比其经济性和施工难易程度。

**3.1.5** 工字形钢梁采用现场拼接施工时, 为避免由其带来的截面抗弯能力的削弱, 对简支梁应将拼接点选在弯矩包络值明显减小的位置, 因此选择了两个四分点以外不超过 1m 的范围内, 且宜拼装后施加预弯力; 对于连续梁则将拼接点选在永久作用下弯矩零点附近, 以减小因拼接带来的受弯承载力降低, 在此“附近”一词主要考虑给现场施工条件留有余地, 宜控制在弯矩零点左右不超过 1.0m 的范围。

**3.1.6** 从结构角度而言, 预弯预应力组合梁桥的单梁受力应介于混凝土梁桥和组合结构桥梁之间, 其有效宽度取值并无明显区别。分析表明, 对于常用的多梁式 T 形或工字形截面简支梁桥, 由于预弯预应力组合梁的单梁宽度 (主梁中心距) 较小, 因此按照国家现行标准《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 两本规范的有效宽度计算结果多由单梁板宽 (或相邻主梁中心距) 控



制, 两者的有效宽度取值是一样的。对于预弯预应力组合连续梁桥, 建议按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中 T 形梁、工字形梁受压翼缘有效宽度计算方法取用控制截面的有效宽度。

**3.1.7** 混凝土桥面板的设计和验算应符合现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定。预弯预应力组合简支梁桥各梁间的横向分布系数宜采用刚接梁法计算。

## 3.2 结构形式

**3.2.1** 当简支梁跨径大于 30m 或有特殊需要时, 预弯预应力组合梁可采用变截面钢梁制作, 包括变化钢板厚度或变化钢梁高度。一期混凝土的预制是指在工厂预弯钢梁后即浇筑混凝土, 并以预弯梁的形式进行运输; 二期混凝土的现浇是指钢梁运输到工地现场进行预弯施工并浇筑二期混凝土。二期混凝土的现浇通常是指在桥位上浇筑混凝土, 支架、模板可支承在预弯梁上。从国内目前的应用情况来看, 钢梁顶面或底面常用的连接件多为栓钉。为保证钢梁底面的混凝土浇筑质量, 可以考虑采用角钢连接件, 但目前国内各行业标准中尚缺少角钢连接件受剪承载力的计算方法。其他能保证可靠连接的连接件也可应用于预弯预应力组合梁, 但应通过实验等方式确保其可靠性。

**3.2.3** 为获得较好的美学效果, 横隔板(梁)与主梁腹板宜采用相同材质。为便于主梁与横隔板(梁)的连接, 当主梁钢腹板有外包混凝土时, 宜采用钢筋混凝土横隔板(梁); 当主梁腹板为裸钢板时, 宜采用钢质横隔板, 但应做好防腐措施。对于连续梁负弯矩区, 通常采用设置预应力筋的方式提高其抗裂性, 预应力锚固点位置宜与横隔板(梁)位置统一考虑。横隔板(梁)的间距不宜大于 8m 且每跨不应少于 5 道的规定, 主要考虑桥跨结构的整体性和横向抗弯能力的要求; 间距过大, 对钢梁预弯时的整体稳定性也是不利的。当桥梁简支跨径小于 15m 时, 横隔板



（梁）的间距可适当减小，但不宜少于 4 道。

### 3.3 作用及作用组合

**3.3.3** 本节中未提到的作用及作用组合问题，原则上可按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定执行。当预弯预应力组合梁桥用于铁路或轨道交通时，可参考相关标准的规定。

**3.3.4** 预弯预应力组合梁桥正常使用极限状态的挠度验算、抗裂性及裂缝宽度验算应参照现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的相关规定。在预弯预应力组合梁桥各阶段的截面应力验算时，应采用永久作用标准值和可变作用的标准值，并作为承载能力验算的补充。

**3.3.5** 预弯预应力组合梁的钢梁包裹在温度敏感性较差的混凝土内，其截面上温度梯度的变化规律目前尚缺少相关的实测数据，建议仍按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的相应条款计算。

## 4 材 料

### 4.1 钢 材

**4.1.2** 抗拉、抗压和抗弯强度设计值  $f_d$  以钢材的屈服强度为基础除以材料抗力分项系数  $\gamma_R = 1.25$  并取 5 的整倍数而得。钢材的抗剪强度设计值以  $f_d$  为基础,  $f_{vd} = \sqrt{3}f_d = 0.577f_d$ 。表 4.1.2 中各种钢材的强度设计值取值与现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 相同, 其中“屈服强度  $f_y$ ”一列是指考虑了钢板厚度折减后的屈服强度值, 引自现行国家标准《低合金高强度结构钢》GB/T 1591。当需要考虑低温和振动冲击的影响时, 特别是在铁路桥梁以及北方寒冷地区的公路、城市桥梁工程中应考虑钢材的低温冲击韧性, 宜采用 Q345D、Q390D 或 Q420D 钢材。预弯钢梁的钢板厚度不宜超过 40mm, 否则会明显降低预弯预应力组合梁桥的经济性。对于常用跨径的预弯预应力混凝土简支梁桥, 预弯钢梁的常用牌号为 Q345, 对于北方寒冷地区可考虑 Q345q, 以增加低温下桥梁钢的抗冲击韧性。次要构件如加劲板等可采用 Q235 钢材, 其质量应符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 的相关要求。

**4.1.3** 物理性能是钢材的基本指标, 在温度作用下预弯预应力组合梁的钢梁与混凝土两种材料的线膨胀系数略有差异, 会引起截面内的约束内应力。可近似采用与混凝土一致的线膨胀系数来简化计算温度作用的效应。

**4.1.4** 栓钉连接件的材料及机械性能要求需满足现行国家标准《电弧螺栓焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的要求。

**4.1.5** 高强螺栓的材料要求引自现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角头螺母、垫圈技术条件》GB/T 3632; 其张拉力设计值引自现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》



JTG D64。

**4.1.6** 焊接材料及相应的焊接工艺, 直接影响焊接接头的性能, 选择经过工艺评定所确认的、与主体钢材匹配的焊接材料及工艺是保证焊接质量的基本要求。

## 4.2 混 凝 土

**4.2.1** 根据当前国内混凝土材料的使用及施工的特点, 以及预弯预应力组合梁的受力特性, 规定了一、二期混凝土强度等级选用范围。一期混凝土只在预弯阶段受力最大, 因此强度过高没有意义且造成浪费。一期混凝土的低收缩、徐变特性有利于减小预弯梁反弹后一期混凝土的预压应力损失。一期混凝土的早强特性可减少预弯梁阶段的养护时间, 缩短工期。二期混凝土强度等级的下限主要出于桥梁耐久性的考虑。

**4.2.2** 表中混凝土强度设计值和强度标准值参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的取值。

**4.2.3** 表中混凝土弹性模量数值参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的取值。在进行桥面板混凝土浇筑前的变形和应力校核计算时, 因混凝土尚未达到设计强度, 其早期弹性模量较低, 故一期混凝土的计算弹性模量可取表 4.2.3 中数值的 90%。

**4.2.4** 混凝土的其他物理力学指标(剪切模量、泊松比、线膨胀系数等)参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的取值。从释放预弯力至桥面板混凝土浇筑完成期间内, 一期混凝土的剪切弹性模量可取其受压弹性模量的 90%。

## 4.3 钢 筋

**4.3.1** 钢筋材料的选用, 原则上应与国家现行标准一致, 并按新版国家标准选材原则取消了 HRB235 钢筋。本条中的普通钢



筋种类引自现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62。

**4.3.2** 普通钢筋的强度标准值取自相应国家标准的钢筋屈服点（具有不小于 95% 的保证率）。预弯预应力组合梁桥使用的钢筋除混凝土桥面板内的横桥向钢筋外均为构造钢筋，在承载力计算中可不计入。预弯组合梁的一期混凝土为预应力结构，建议其中的钢筋采用带肋钢筋。

**4.3.3** 普通钢筋的强度设计值为强度标准值除以材料分项系数 1.2 并取整，满足目标可靠度指标的要求。

**4.3.4** 普通钢筋的弹性模量取值与现行有关行业标准取值一致。

## 5 施工阶段计算

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 简支预弯预应力组合梁的施工过程应包括钢梁制作、钢梁预弯、浇筑一期混凝土、预弯梁反弹和浇筑二期混凝土等五个主要阶段，见图1。在形成预弯预应力组合梁的基础上再施加桥梁二期结构重力作用。

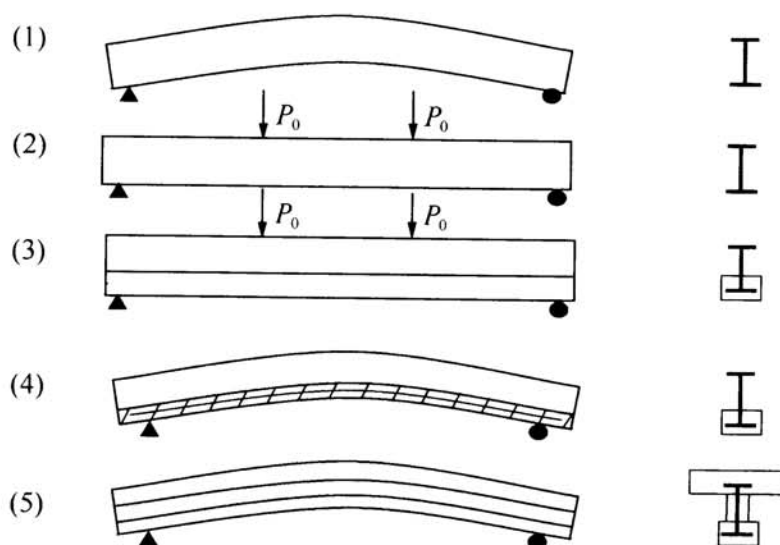


图1 预弯预应力组合梁制作工艺

在上述工艺过程中，梁的截面几何形状和参数不断变化。根据其截面的形成过程又可划分为钢梁预弯、预弯梁反弹、浇筑二期混凝土及施加二期结构重力作用等四个主要受力阶段。

**5.1.2** 在预弯预应力组合简支梁桥的施工过程中，随着施工进程的发展，截面几何参数分阶段发生变化。根据结构的受力特点，控制截面应选在跨中，主要的应力控制点应选在钢梁上下缘、一期混凝土下缘及二期混凝土上缘。

**5.1.3** 钢梁预弯施工中，由于工字型钢梁在两个主轴方向的截面惯性矩相差较大，易发生侧倾而失去整体稳定性。为保证预弯

施工中钢梁的侧向稳定, 应在钢梁的两侧对称设置支撑, 并对钢梁的侧向稳定性进行验算。

**5.1.4** 在预弯预应力组合梁的材料构成中, 一、二期混凝土通常为强度等级不同的混凝土, 且其浇筑、结硬及受荷的时间均不相同。两种不同强度等级混凝土的收缩、徐变特性也不同。理论研究表明, 两种混凝土的材性差异和时间效应将对预弯预应力组合梁的应力和变形计算产生不可忽略的影响, 因此计算中应予以考虑。

**5.1.5** 对于简支钢梁, 加载点不同将引起不同的预弯矩效应。当钢梁的材料及截面确定后, 预弯力作用在两个四分点时预弯矩的影响范围大, 但所需的预弯力也会大一些; 预弯力作用在两个三分点时则情况相反。在实际工程中多选在四分点。只有当跨径很大, 选择四分点可能导致预弯力过大或现场预弯施工较困难时, 也可选在两个三分点。

## 5.2 应力计算

**5.2.1** 日本《预弯组合梁道路桥标准设计集》(2011年)中预弯钢梁的控制应力可取 1.35 倍容许应力值或 0.8 倍的钢材屈服强度值。我国目前的公路桥梁设计规范中已取消了容许应力的概念, 且考虑到前者通常不控制设计, 故将钢梁的预弯控制应力取为  $\sigma_{\text{con}} \leq 0.75f_y$ , 并由此控制应力确定设计预弯力  $P_0$ 。在此, 认为不同厚度钢板的屈服强度是不同的, 因此钢材屈服强度  $f_y$  取值时应考虑钢板厚度折减的影响。

**5.2.2** 实际工程计算表明, 当简支预弯预应力组合梁桥的跨径较小时(小于 20m), 钢梁自重引起的跨中截面应力通常小于 20MPa, 与预弯钢梁的控制应力  $0.75f_y$  相比较小。因此, 当钢梁的跨径小于 20m 且采用手工计算时, 为简化计算可忽略钢梁自重作用效应。当钢梁上下翼板面积不等时, 通常是钢板下翼板面积大于上翼板面积, 钢梁截面重心下移, 尤其上缘应力控制设计。本标准中设计预弯力  $P_0$  的作用效应是按两个四分点加载导



出的。若按两个三分点加载时, 则设计预弯力  $P_0$  应按下式计算:

$$P_0 = \frac{3(\sigma_{\text{con}} - \sigma_z) I_s}{L y_s} \quad (1)$$

对比式 (1) 和式 (5.2.2-1) 可以发现两者的比值是 0.75。对于设计预弯力在其他点加载时需要另行推导。

**5.2.3** 在简支钢梁的预弯施工中, 设计预弯力  $P_0$  会因预弯加载装置的变形及锚固装置的变形而有所损失, 因此施工中的预弯力控制值  $P_c$  应大于设计值  $P_0$ 。预弯力的损失量与加载工艺有关。根据试验研究, 对于单梁加载情况损失量约为设计预弯力的 1.0 倍~1.03 倍; 根据哈尔滨某桥 42 片预弯梁的施工经验, 对于双梁对弯加载情况, 忽略对锚杆本身的变形影响, 锚固装置变形损失量可按式 (5.2.3-3) 计算。在有条件的情况下, 预弯力的损失量也可根据预弯现场的加载试验确定。

**5.2.4** 预弯梁反弹时, 对一期混凝土下缘压应力控制是为了避免预弯梁反弹阶段一期混凝土出现非线性徐变而发生突然压碎。我国已施工的十几座预弯预应力组合梁桥的一期混凝土反弹压应力均按  $0.54R$  进行控制, 效果良好, 其中  $R$  为早期规范中的混凝土标号。日本《预弯组合梁设计施工指南》(第三版) 中规定的相应限值为  $1/1.7=0.588$ 。考虑到我国混凝土强度的变异性相对较大应从严要求, 故将限值系数取为 0.56。在不发生混凝土非线性徐变的前提下, 适当提高该值有利于一期混凝土留存较大的有效预压应力以抵抗外荷载引起的拉应力。大量的试算表明, 该值可以满足工程设计的要求。

### 5.3 钢梁预拱度计算

**5.3.1** 钢梁的拱度由设计预弯力  $P_0$  和钢梁自重集度  $q_s$  引起的两部分变形组成。式 (5.3.1-1) 是根据两个四分点施加预弯力的情况而导出的。对比式 (5.3.1-2) 和式 (5.3.1-1) 可知, 公式中第一项的系数由 0.0287 变为 0.0355, 即增加了约 1.24 倍, 而相对较小的第二项不变。当预弯力  $P_0$  作用点设在其他位置时,

设计预拱度需另行计算。

**5.3.2 预拱度的大小**意味着预加力的大小。在我国用于制作预弯预应力组合梁桥的钢梁通常是由上下翼板和腹板三块钢板焊接而成的, 因此存在焊接残余变形并使得设计预拱度  $f_0$  减小。在哈尔滨某桥的建设中, 曾对 42 片采用热变形法制作的预弯钢梁的残余变形做过统计, 钢梁残余变形影响系数  $k$  的变化范围大致在 1.06~1.13。日本《预弯梁组合梁设计施工指南》中给出的该值范围为 1.03~1.06。 $k$  值与钢梁的焊接质量有关, 当钢梁的加工数量较多时可对其进行统计分析。在无进一步实测数据时, 可参考国内外的已有数据。在此建议采用  $k=1.06$ , 并在钢梁施工的控制预拱度  $f_{\text{con}}$  中予以考虑。通过对预加载的方法可基本消除钢梁焊接变形的不利影响。

**5.3.3 预弯梁反弹后的上拱状态**意味着一期混凝土中预压应力水平, 反弹后跨中剩余拱度的大小意味着一期混凝土中的预压应力的大小。国内的工程实践表明, 由于一期混凝土的作用, 预弯梁的剩余反拱值要明显小于钢梁预拱度, 对于哈尔滨某桥 42 片预弯梁反弹后的剩余拱度的测试结果表明, 大多为原钢梁拱度的 0.55 倍~0.65 倍。当钢梁计算剩余拱度小于钢梁设计预拱度的 0.55 倍时, 意味着一期混凝土中的预压应力不足, 并可能导致其抗裂性降低。

## 5.4 钢梁的稳定性计算

**5.4.1** 表 5.4.1 中, 预弯中的工字形钢梁可视为典型的钢结构受弯构件, 不需进行整体稳定性计算的限值直接引用国家现行标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 或《钢结构设计标准》GB 50017 中的相关规定。其中第 3 列对跨中有侧向支承点的工字形钢梁不需计算整体稳定性的限制条件为  $16\sqrt{235/f_y}=13.0$ 。对于 Q345 钢材, 若取屈服强度为 345MPa, 且钢梁受压翼板宽度为 50cm, 可求得 not 计算整体稳定性的最大横向支顶距离为 6.6m, 该值可作为工字形钢梁预弯时横向支顶间距  $l_1$  的最大



限值。

**5.4.2** 预弯中的工字形钢梁整体稳定性计算方法可参照现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 或《钢结构设计规范》GB 50017-2003 中的相关计算方法, 且两种方法的结果相近。前者可以考虑作用于对称工字形钢梁的两个弯矩平面的作用效应, 而后者仅考虑竖向平面的弯矩作用效应。考虑到预弯钢梁时仅有竖平面内的预弯矩作用, 为便于应用, 本标准引用了现行国家标准《钢结构设计规范》GB 50017-2003 中的钢梁整体稳定计算方法。对比分析结果表明, 本标准式(5.4.2-2)的计算结果相对于《钢结构设计标准》GB 50017-2017 相关规定的计算结果是偏于安全的。

**5.4.3** 侧向支顶与钢腹板的接触点应保证能够沿着竖向滑动。无论是滑动前还是滑动后, 侧向支顶必须位于钢梁腹板两侧的受压区域。式(5.4.3)出自魏明钟教授针对《钢结构设计规范》GBJ 17-88 编著的《钢结构设计新规范应用讲评》一书, 主要用于楼盖钢结构中为防止主梁侧向整体失稳而增设的次梁对主梁的侧向支顶力的计算。支顶杆承受的压力可按式(5.4.3)确定, 该值可用于确定支顶杆件的截面面积。

**5.4.4** 预弯钢梁受压翼板的局部稳定性可借助于钢梁受压翼板的宽厚比予以控制。《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 中采用的计算公式为  $\frac{b}{t'} \leq 12\sqrt{\frac{345}{f_y}}$ , 与《钢结构设计标准》GB 50017-2017 中采用的 I 形截面宽厚比等级的 S4 级的取值结果相近, 故本标准采用了前者的形式。工字形钢梁的腹板上只设置横向加劲肋, 可通过控制其间距控制钢腹板的局部稳定性。横向加劲肋的间距  $a$  应按式(5.4.4-3)试算, 且应满足  $a \leq 2.5h_w$  和  $a \leq L/8$  并取整的构造要求。 $h_w/t_w$  的限值 165 参照了《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 表 5.3.3 中的 Q345 钢的腹板最小厚度确定。取折减参数  $\eta=0.85$ , 计算得  $h_w/t_w=140/\eta \approx 165$ , 即取为 165。



## 6 承载能力极限状态计算

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 预弯预应力组合梁的极限受弯承载力和极限受剪承载力是保证预弯预应力组合梁在承载能力极限状态下安全性的必要条件。

### 6.2 截面受弯承载力计算

**6.2.2** 为确保工字形钢梁下翼板能够在混凝土达到极限压应变之前先达到其强度设计值，利用平截面假设，并参照钢筋混凝土梁的控制条件，可近似有如下界限受压区高度系数的计算表达式：

$$\xi_{bs} = \frac{\beta \epsilon_u}{\frac{f_d}{E_s} + \epsilon_u} \quad (2)$$

式中： $\xi_{bs}$ ——截面界限受压区高度系数；

$\epsilon_u$ ——受压边缘混凝土极限压应变，C50 及以下取  $\epsilon_u = 3300\mu\epsilon$ ，C55 时取  $\epsilon_u = 3250\mu\epsilon$ ；

$\beta$ ——受压区矩形应力块的高度与中性轴高度（实际受压区高度） $x_s$  的比值，C50 及以下取  $\beta = 0.8$ ；

$E_s$ ——钢材弹性模量（MPa）， $E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$ ；

$f_d$ ——钢材抗拉强度设计值（MPa）。

表 6.2.2 中数据按式（2）计算，其中钢材强度值按表 4.1.2 中厚度为 16mm~40mm 钢板取值，计算时考虑了混凝土强度等级对参数  $\epsilon_u$  和  $\beta$  的影响。

**6.2.3** 本节中基于弹塑性理论的计算方法建立在原哈尔滨建筑大学完成的 7 片抗弯试验梁和由同济大学完成的 1 片抗弯试验梁

的试验结果基础上，而且还得到了 6 片变截面预弯预应力简支试验梁的检验。计算模型中的钢梁考虑中性轴附近客观存在的弹性区域和钢梁上、下缘及腹板下部的塑性区，混凝土则按矩形应力块考虑为塑性状态。与试验结果的对比分析中，不计钢材和混凝土的材料安全系数，并取各种材料的实测强度平均值进行计算。针对等截面试验梁抗弯破坏时的实际受压区高度  $x_s$  和极限受弯承载力  $M_u$  的检验结果见表 1。

表 1 实测与计算的  $x_s$  和  $M_u$  值对比表

试验梁号	受压区高度 $x_s$ (cm)			受弯承载力 $M_u$ (N·m)		
	实测值	计算值	实测值/计算值	实测值	计算值	实测值/计算值
W3-3	5.5	4.7	1.17	65750	63745	1.03
W3-4	5.1	5.7	0.89	68130	58277	1.17
W5-1	—	5.9	—	148600	132502	1.12
W5-3	7.2	6.2	1.16	135400	134092	1.01
W5-4	7.5	7.6	0.99	146200	126283	1.15
W7-2	10.4	9.7	1.07	270550	259214	1.04
W7-3	8.4	7.0	1.2	276400	273810	1.01
同济-1	5.5	5.1	1.08	61000	59074	1.03

对比结果表明，本条给出的受弯承载力公式的计算结果与实测结果吻合很好，8 根不同尺寸试验梁的实测值与计算值比值的平均值为  $\bar{x} = 1.069$ ，均方差为  $\sigma_n = 0.062$ ，离散系数  $C_v = 0.0587$ 。由此可见本条的预弯预应力组合梁的受弯承载力计算方法是安全、可行的，并在工程实践中取得了很好的应用效果。

基于上述实验研究结果，预弯预应力组合梁正截面受弯承载力计算时建议引入下列基本假定：1) 截面变形符合平截面假设，钢梁与混凝土之间无滑移，混凝土极限压应变可取为  $\epsilon_u = 3500\mu\epsilon$ ；2) 一期混凝土及二期混凝土的受拉区均退出工作，全部拉力均由钢梁承担；3) 钢梁上、下翼板厚度相等且极限状态下均可达到屈服，认为中性轴以上的钢梁腹板处于弹性状态，中



性轴以下钢梁腹板部分处于弹性状态、部分达到屈服, 进入屈服状态的钢梁应力分别取钢材抗拉强度设计值  $f_d$  和抗压强度设计值  $f'_d$ ; 弹性状态的钢材应力等于钢材应变与其弹性模量的乘积, 但不大于其强度设计值; 4) 二期混凝土的受压应力图形为矩形, 其应力达到混凝土轴心抗压强度设计值  $f_{cd}$ 。

在上述假设的基础上建立了本条的计算方法。对于常用的钢种, 为简化公式的表达式, 取钢材的抗拉强度设计值和抗压强度设计值相等, 即有  $f'_d = f_d$ 。

**6.2.4** 式 (6.2.4-1) 是为确保工字形钢梁下翼板能够达到钢材抗拉强度设计值  $f_d$ ; 式 (6.2.4-2) 是为保证工字形钢梁上翼板的应力能够达到其抗压设计强度  $f'_d$ 。在实际工程设计中应尽可能  $x > h'_i$ , 即本标准图 6.2.3-2 的计算图式, 中性轴位于混凝土腹板内。

### 6.3 截面受剪承载力计算

**6.3.1** 根据原哈尔滨建筑大学完成的预弯组合梁的受剪承载力试验研究结果, 可以得到以下两个基本结论: 当预弯钢梁的腹板厚度与上、下翼板厚度相等时, 可以不验算预弯组合梁的截面受剪承载力, 即  $V_d \leq V_{ud}$  基本能满足要求; 当预弯钢梁的腹板厚度小于上、下翼板厚度时, 在保证钢腹板抗剪要求的最小厚度且满足施工阶段的稳定性要求的条件下, 预弯组合梁的受剪承载力亦不会控制设计。考虑上述研究结论和国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017、《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 和《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D 64-01 中基于塑性理论的受剪承载力计算方法, 本标准引入以下三点假设: 1) 由于钢梁上、下翼板中的剪应力很小, 因此忽略其抗剪作用; 2) 在极限状态下偏安全地忽略混凝土的抗剪作用, 认为全部剪力均由钢梁腹板承担; 3) 钢梁腹板上的剪应力均匀分布, 其应力达到钢材的抗剪强度设计值  $f_{vd}$ 。在此基础上建立了预弯预应力组合梁的受剪承载力计算式 (6.3.1), 由于忽略了混凝土的受剪承载



力, 该公式的计算结果是偏于安全的。

**6.3.2** 式(6.3.2)中包括两项: 第一项基于短暂状况和正常使用阶段钢梁弹性受力的考虑, 其中系数 3.3 考虑了原钢桥规范《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》JTJ 025-86 中的钢材容许应力与《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 中的钢材抗拉强度设计值的对比关系, 并取为  $[\tau] = 0.45f_d$ , 同时还考虑了截面最大剪应力系数 1.5 的影响, 即  $1.5/0.45 = 3.3$ 。 $V_{\max}$  中应包括预弯钢梁施工阶段的预弯力和钢梁自重之和与运营阶段预弯预应力组合梁的全部永久作用、可变作用引起的支点截面剪力标准值之和, 并取两者中的最大值。第二项是承载能力极限状态下基于塑性理论计算的所需钢梁腹板的厚度。

## 7 正常使用极限状态计算

### 7.1 一般规定

**7.1.1** 在正常使用极限状态下，由于预弯力的反弹效应主要作用于一期混凝土和钢梁内，预弯预应力组合梁的二期混凝土的腹板下部是开裂的，而且在计算截面几何性质时并不考虑腹板混凝土参与工作。抗裂性计算是针对预弯预应力组合梁的一期混凝土下缘。参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定，预弯预应力组合梁的一期混凝土下缘状态应与设计要求有关。若按全预应力混凝土结构设计时一期混凝土下缘不得消压；若按预应力混凝土结构 A 类构件设计时一期混凝土下缘不得开裂；若按预应力混凝土结构 B 类构件设计时一期混凝土下缘的裂缝宽度不得超过容许值。通常情况下，预弯预应力组合梁桥宜按预应力混凝土 A 类构件或 B 类构件进行设计。

**7.1.2** 本条参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62，规定了应对预弯预应力组合梁进行挠度验算，及其验算作用的取值。

**7.1.3** 本条规定了正常使用阶段预弯预应力组合梁控制截面上应进行应力验算的截面和位置。正常阶段的应力验算可作为对承载能力计算的补充。对于简支梁桥，控制截面是指跨中截面，当简支跨径超过 35m 时，可同时验算四分点截面。设计经验表明，在正常使用极限状态下，一期混凝土上缘应力通常不控制设计，一期混凝土的下缘则可能处于受拉或开裂状态；二期混凝土下缘通常容许处于受拉或竖向开裂状态，无需进行应力或裂缝宽度的验算；二期混凝土上缘则需进行压应力验算。

**7.1.4** 规定了组合梁各阶段截面几何性质的计算图式和计算



方法。

**7.1.5** 对于变截面预弯预应力组合简支梁桥, 对于刚度突变的截面也应验算持久状况正常使用极限状态下变形、裂缝和应力等内容。

## 7.2 成桥拱度及活载变形计算

**7.2.1** 在正常使用极限状态下, 预弯预应力组合梁桥因一、二期混凝土分阶段浇筑、分阶段受力, 两者间存在混凝土的收缩、徐变差。两种混凝土收缩差和徐变差的作用将导致预弯预应力组合梁桥产生长期上拱, 这种长期上拱是收敛的。

**7.2.2** 对于预弯预应力组合梁桥, 由可变作用频遇弯矩值引起的跨中挠度可基于换算截面并按弹性理论计算。挠度计算中, 预弯预应力组合梁的截面惯性矩  $I_2$  和折算截面惯性矩  $I_e$  计算时均认为二期混凝土的腹板部分开裂并退出工作。截面一期混凝土开裂后的挠度参考日本《预弯组合梁设计施工指南》(第三版) 中的计算方法。按该方法得到的计算挠度与实桥成桥试验得到的实测挠度基本吻合。式(7.2.2-5)中第二项结果为负时, 只考虑第一项; 对人群荷载为主的桥梁应取人群作用的频遇值系数为 0.7, 汽车作用取其准永久值系数为 0.4。

**7.2.3** 本条参照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 对受弯构件挠度限值的规定。考虑到混凝土的收缩、徐变已在各阶段的变形计算模型中考虑, 故挠度计算中不再考虑挠度长期增长系数的影响。

## 7.3 抗裂性计算

**7.3.1** 一期混凝土的收缩、徐变对其抗裂性的影响较大, 在抗裂性计算时应予以考虑。对于预弯预应力组合简支梁桥, 整体温度变化将引起梁体纵向变形, 但不产生截面应力; 非线性的温度梯度将引起梁体弯曲变形及截面应力。对于预弯预应力组合连续梁桥, 温度梯度会同时引起梁体的弯曲变形效应和内力效应。



**7.3.2** 当预弯预应力组合梁按全预应力混凝土设计时, 由最不利可变作用频遇组合引起的跨中弯矩作用下, 一期混凝土下缘不得消压。式(7.3.2-2)中, 消压弯矩  $M_0$  是指使一期混凝土下缘预压应力为零时的弯矩, 其中  $\sigma_p$  已包含了永久作用及混凝土收缩、徐变效应的影响; 开裂弯矩  $M_{cr}$  是指使一期混凝土下缘应力由零到一期混凝土的抗拉强度标准值  $f_{tk}$  时的弯矩。用于确定消压弯矩  $M_0$  的一期混凝土下缘有效预压应力  $\sigma_p$  的计算方法应参见本标准附录 E 中的式(E.0.5-1)或式(E.0.5-2)。式(7.3.2-1)左端仅采用可变作用(或荷载)频遇组合引起的弯矩设计值  $M_{fd}$ 。

**7.3.3** 预弯预应力混凝土组合梁按预应力混凝土 A 类构件设计时, 一期混凝土下缘的应力限值  $0.7f_{tk}$  参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中预应力混凝土 A 类构件取用。在按混凝土 A 类构件验算时, 可考虑一期混凝土中的纵向钢筋的影响。一期混凝土下缘的拉应力  $\sigma_{cl}$  中可包括一、二期混凝土收缩、徐变的时效影响。

**7.3.4** 当预弯预应力混凝土组合梁按预应力混凝土 B 类构件设计时, 容许一期混凝土下缘开裂。目前国内外针对预弯预应力组合梁的裂缝宽度实验数据不多。在此采用了原哈尔滨建筑大学 1995 年进行的相关试验建立的经验公式, 即式(7.3.4), 该式以影响裂缝宽度的主要因素即钢梁下缘的拉应力  $\sigma_{sl}$  为变量。该应力值中已包含了组合梁自重、二期结构重力作用、可变作用频遇值引起的跨中截面弯矩, 以及混凝土保护层的综合影响, 也包含了一、二期混凝土收缩、徐变作用, 故不再考虑长期效应影响系数  $C$ 。该式形式简单, 可用于估算简支梁一期混凝土下缘的裂缝宽度。裂缝宽度计算时, 钢梁下缘拉应力  $\sigma_{sl}$  应参考本标准附录 E 式(E.0.6-4)计算, 计算中应以汽车作用引起的跨中弯矩频遇值  $M_{fd}$  代替其标准值  $M_q$ , 必要时尚应计入人群作用弯矩准永久值  $0.4M_r$  的影响。

研究表明, 工程计算中亦可采用以实际作用弯矩与截面极限

受弯承载力之比  $K$  作为统计变量的裂缝宽度计算式 (3)。该方法认为截面极限受弯承载力是其截面受弯承载力设计值的 1.27 倍, 即近似认为钢材和混凝土材料的截面加权安全系数均为 1.27。确定该值时, 根据实例计算结果近似认为截面上由混凝土提供的受弯承载力占截面总承载力的 10%, 由钢梁承担的受弯承载力占比约为 90%, 并以此确定加权安全系数。试验表明, 预弯预应力梁的弹性工作阶段占破坏阶段的比例约在 0.65 之内, 故式 (3) 中的弯矩比例系数应满足  $K \leq 0.65$  的要求。超出此范围的裂缝宽度已不具有工程意义, 计算结果可能失真。考虑长期作用影响时的一期混凝土下缘裂缝宽度可按下列方法估算:

$$w_{\max} = 0.0011 C e^{4K} \left( \frac{M_s}{M_f} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$M_L = M_{d1} + M_{d2} + M_{d3} + 0.4M_q + 0.4M_r \quad (4)$$

$$M_s = M_{d1} + M_{d2} + M_{d3} + 0.7M_q + 0.4M_r \quad (5)$$

$$K = M_s / M_u \quad (6)$$

式中:  $C$ ——准永久作用的长期效应影响系数, 按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》

JTG D62 取  $C = 1 + 0.5M_L / M_s$ ;

$M_L$ ——作用准永久组合引起的跨中截面弯矩设计值 ( $N \cdot mm$ );

$M_s$ ——作用频遇组合引起的跨中截面弯矩设计值 ( $N \cdot mm$ );

$K$ ——弯矩比例系数,  $0.35 < K \leq 0.65$ ;

$M_u$ ——按材料强度标准值计算的截面极限受弯承载力 ( $N \cdot mm$ ), 可近似取  $M_u = 1.27M_{ud}$ ;

$M_{ud}$ ——截面受弯承载力设计值, 按本标准式 (6.2.3-1) 或式 (6.2.3-6) 计算;

$M_{d1}$ ——由钢梁自重引起的跨中截面弯矩标准值 ( $N \cdot mm$ );

$M_{d2}$ ——由二期混凝土自重引起的跨中截面弯矩标准值 ( $N \cdot mm$ );



$M_{d3}$ ——由桥梁二期结构重力引起的跨中截面弯矩标准值  
( $N \cdot mm$ );

$M_I$ ——预弯组合梁一期混凝土下缘的抗裂弯矩:  $M_I = M_0 + M_{cr}$ , 分别按本标准中式(7.2.2-1)和式(7.2.2-2)计算。

按式(6)计算  $K$  值, 当  $K < 0.35$  时, 可近似认为一期混凝土下缘不开裂或裂缝宽度很小, 不进行裂缝宽度验算; 当  $K > 0.65$  时, 已超出了试验公式的适用范围, 且已失去工程意义。

本标准中给出的两个裂缝计算公式的精度均可满足工程设计的要求。根据东南大学实测的 4 片预弯预应力试验梁的 37 个裂缝宽度数据的拟合, 试验荷载与破坏荷载之比在 0.35~0.73 的范围内, 两个公式(不计  $C$  值影响)的拟合优度分别为: 公式(3)的拟合优度为  $R^2 = 0.90$ ; 式(7.3.4)的拟合优度为  $R^2 = 0.85$ 。上述公式还得到了原哈尔滨建筑大学的预弯预应力组合梁裂缝试验数据的检验。试算结果表明, 式(3)的计算结果通常会大于式(7.3.4)的计算结果, 分析其主要原因在于按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 确定长期效应影响系数  $C$  的取值偏大。因此, 建议当计算活载作用频遇组合下的裂缝宽度时, 不计入长期效应影响系数  $C$  的影响, 只在准永久组合时考虑  $C$  值的影响。

**7.3.5 裂缝宽度限值**主要出于结构耐久性的考虑。预弯预应力组合梁的一期混凝土下缘至少会有 50mm 的混凝土保护层, 而且下缘钢板的耐腐蚀能力远高于普通钢筋。基于上述考虑, 可以适当放宽一期混凝土下缘的裂缝宽度限值。在此建议在一般大气环境下的裂缝宽度限值为 0.25mm。当桥梁所处的环境条件比较恶劣时, 也可根据现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的相关规定取值。

## 7.4 应力计算

**7.4.1** 本条规定了预弯预应力组合梁在正常使用阶段截面法向



应力验算时各项作用取值的要求。法向应力验算时的控制截面通常是指简支梁桥的跨中截面,当简支梁跨径较大时亦可包括四分点截面;对于连续梁桥除跨中截面外还应验算中支点截面。截面应力验算应作为截面承载力验算的补充。

**7.4.2** 参考现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中有关预应力混凝土结构法向应力验算的相关规定。截面的法向应力应包括一期混凝土下缘应力、二期混凝土上缘应力和钢梁上、下缘的压、拉应力。其他点的法向应力只作为参考。

**7.4.3** 本条的应力限值参考了国内相关工程的设计经验。同时考虑了如下因素:钢梁上、下缘的应力限值均定为  $0.7f_y$ , 该值均小于现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 - 2015 中规定的钢材强度设计值  $f_d$ , 约为  $0.8f_d \sim 0.9f_d$ , 以体现是正常使用极限状态的控制应力。其中钢材的屈服强度  $f_y$  取值时,应考虑钢板厚度的折减,见本标准表 4.1.2。二期混凝土上缘压应力的限值参考了《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 - 2013 中的取值  $0.5f_{ck}$ 。考虑预弯预应力梁的应力验算时各项荷载作用均取其标准值进行组合,因此上述限值应大于《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 - 2013 中持久状况下频遇组合的应力限值,故取为  $0.6 f_{ck}$ 。

## 8 栓钉连接件

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 为保证钢梁与一、二期混凝土之间的粘结作用，使得预弯预应力组合梁在弯曲受力时压区混凝土保护层不被掀起，通常在钢梁的顶、底面设置栓钉连接件。连接件的数量应通过计算来确定，计算中不考虑钢梁与混凝土之间的粘结力，在正常使用极限状态下也不考虑界面滑移问题。一期混凝土下缘因混凝土保护层严格受限，当有适当的计算方法时也可考虑采用角钢连接件；二期混凝土与钢梁之间亦可采用开孔板式连接件。

**8.1.2** 简支钢梁上缘的连接件在预弯预应力组合梁桥的持久状况下的正常使用极限状态和承载能力极限状态均发挥作用，并在承载能力极限状况下连接件的受力最大。因此，建议按承载能力极限状态下连接件的受剪承载力设计值确定其数量。

**8.1.3** 简支钢梁下缘的连接件仅在短暂状况下的钢梁反弹阶段发挥主要作用，在此状态下连接件的受力最大。在持久状况下，下缘连接件处于受压应力较小或受拉混凝土中。因此，建议按弹性方法确定连接件的数量。对于连续预弯预应力组合梁桥负弯矩区的连接件目前尚无专属的计算方法，建议可参照钢-混凝土组合连续梁的相关方法计算确定。

### 8.2 连接件设计

**8.2.1** 预弯预应力组合梁的上缘栓钉连接件的计算方法参照钢-混凝土组合梁的计算方法。实际上，预弯预应力组合梁的连接件是完全包裹在混凝土中，其混凝土的粘结力远大于钢-混凝土组合梁结合面上的粘结力，因此计算结果是偏于安全的。其中“剪跨”是指弯矩最大截面（例如跨中截面）至一个弯矩零点（例如



支座截面) 的距离。式 (8.2.1-3) 中的系数 1.1 是考虑对钢梁上翼板范围的放大, 或可理解为对钢梁顶面以上混凝土上翼缘板的极限压力合力的放大。

通常简支梁的连接件设在受压混凝土中。位于预弯预应力组合连续梁桥的负弯矩区段, 钢梁上缘的栓钉连接件处于受拉或压应力较小的混凝土内, 因此连接件的受剪承载力应有所折减。故考虑栓钉连接件受剪承载力折减系数  $\alpha$ 。根据已有对钢-混凝土组合梁连接件的理论及实验研究成果, 该折减系数约为 0.93, 在此偏安全地建议取  $\alpha=0.9$ 。

**8.2.2** 参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917-2013, 式 (8.2.2-1) 中近似认为栓钉连接件的弹性受剪承载力设计值  $[V_{su}]$  取其极限受剪承载力设计值  $V_{su}$  的 0.75 倍, 并认为在此阶段预弯梁及其栓钉连接件均处于弹性工作阶段。在预弯梁反弹阶段, 图 8.2.2 中由钢梁自重引起的剪力  $V_s$  远小于预弯力引起的剪力  $P_0$ , 且两者的符号是相反的。因此在实际工程设计中, 可以忽略  $V_s$  的影响。当栓钉的型号及材料确定后, 式 (8.2.2-2) 可用于计算所需要的栓钉连接件的间距。

**8.2.3** 目前尚无针对变截面预弯预应力组合简支梁连接件设计的专项研究成果, 但从理论上讲, 上述设计方法是适用且偏于安全的。

### 8.3 连接件构造要求

**8.3.1** 对于栓钉的一般构造要求应符合《栓钉焊接技术规程》CECS 226: 2007 中的相关规定。其中第 2 款是为保证栓钉焊接时钢板不会产生较大的焊接变形。

**8.3.2** 钢梁上缘的栓钉构造要求偏安全地采用与钢-混凝土组合梁桥相同的构造要求。可参考现行行业标准《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01 和《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 的相关规定。

**8.3.3** 对钢梁下缘的栓钉连接件构造作出规定。



**1** 在梁高受限情况下, 为挖掘预弯预应力组合梁的受弯承载力, 钢梁的高度应尽可能大些。但钢梁下翼板的混凝土净保护层厚度受混凝土浇筑质量及振捣要求的控制而不宜小于 50mm。因此, 钢梁下缘的栓钉连接件长度受一期混凝土下缘净保护层厚度的限制。当栓钉直径大于 13mm 时难以保证长径比不小于 4 的要求。《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 - 2002 中规定的栓钉直径范围为 10mm~25mm, 而桥梁工程中常用的栓钉直径范围为 16mm~22mm。考虑到一期混凝土中的连接件只有在预弯梁反弹阶段才发挥其主要作用, 结合实际工程经验, 建议采用 10mm 的小直径栓钉连接件, 或将栓钉的长径比的控制条件由 4 降为 3。

**2** 考虑到下翼缘的栓钉在预弯梁反弹后所起的作用有限, 因此其对耐久性的要求也不高, 故规定了下翼缘板栓钉头距混凝土下表面的距离不少于 10mm。目前已建成的预弯预应力组合梁桥基本上是以此条件加以控制的, 效果很好。

**4** 预弯预应力组合梁一期混凝土的构造应便于施工。为保证钢梁和混凝土整体工作, 使预弯预应力组合梁在使用荷载作用下裂缝分散、均匀, 需在钢梁下翼板设置抗剪连接件, 连接件横向宜采用梅花形布置, 以避免一期混凝土底面受拉开裂。连接件底面的净保护层厚度应参照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中防收缩和防裂等表层钢筋的最小保护层控制。钢梁底面到一期混凝土底面的净距不应小于 50mm, 否则难以保证一期混凝土下缘的密实性。

## 9 构造要求

### 9.1 钢 梁

**9.1.1** 对于跨径较大的预弯预应力组合梁桥, 钢梁应采用高强度钢材。钢梁各部位的钢板厚度的下限除应保证一定的强度、刚度和整体合理性外, 尚应考虑在施工阶段的稳定性等。如果焊接板梁的腹板太薄, 容易产生焊接变形, 甚至会引发施工阶段腹板的稳定问题。钢板厚度的上限主要考虑钢材切割、焊接、整形等工艺上的制作难度。因此, 对钢梁板件的厚度需加以限制。

**9.1.2** 预弯钢梁的上、下翼板宽度太小时, 不能满足钢梁与一、二期混凝土的内力传递, 尤其是钢梁上翼板宽度太小时, 亦难保证钢梁预弯施工时的整体稳定; 钢梁的上、下翼板宽度太大时, 翼板中的应力分布不均匀, 且难以满足一、二期混凝土的浇筑施工条件, 尤其是钢梁上翼板宽度太大时, 亦难保证其局部稳定性。因此, 对钢梁板件的宽度提出了要求。对于变板厚的钢梁以顶板宽度为准。

**9.1.3** 设置加劲肋的主要作用是提高钢梁预弯阶段的抵抗整体和局部失稳的能力, 因此对其强度和板厚的要求不高, 可采用 Q345 或 Q235 钢材, 12mm ~ 24mm 的板厚可视钢梁的跨径而定。

钢梁施加预弯力时需要特殊的施工设备。为保证施工方便, 尚应根据选择的预压施工方式预留预压设施, 例如采用双梁对弯施工时, 应预留端板及锁定孔等预压设施。

**9.1.4** 预弯钢梁的上、下翼板与腹板的焊接应考虑内力传递、结构要求及施工条件。参考《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 - 2015 及《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 - 2013 的相关构造要求, 结合预弯预应力组合梁桥设计实践及受力特



点, 提出预弯钢梁上、下翼钢板与腹板、加劲板结构连接等构造要求。

**9.1.5** 钢梁横隔板以及加劲肋的数量、规格和具体布置应根据桥梁跨径、特殊的施工工况和正常使用阶段实际受力情况确定, 简支预弯预应力组合梁桥的横隔板数量不宜少于 5 个。图 9.1.5 中, 钢梁的竖向加劲肋可分为 A、B 两型。A 型加劲肋对钢梁预弯阶段的稳定作用大于 B 型; A 型加劲肋可伸入预弯预应力混凝土主梁横隔板内。B 型主要用于边主梁, 其宽度受混凝土腹板的宽度制约。

## 9.2 一期混凝土

**9.2.2** 设置预弯预应力组合梁的一期混凝土钢筋时, 应结合施工方案, 便于施工。为了保证钢梁和混凝土整体工作, 在一期混凝土中需配置必要的构造钢筋, 例如纵向钢筋和闭合箍筋等。

**9.2.3** 为确保一期混凝土的浇筑质量, 对钢梁下翼板距一期混凝土底面和侧面的净距提出了 50mm 和 75mm 的限值。50mm 主要出于获得预弯预应力组合梁最小梁高的考虑, 75mm 则出于钢梁下翼板下方混凝土浇筑质量及便于振捣的需要。当采用上述净距的下限值时, 施工中宜采用板式振动器振捣一期混凝土。

**9.2.4** 预弯梁反弹时, 为避免反弹时预弯梁两端角点混凝土被挤碎, 可在释放预弯力前, 将两梁端混凝土的下方挖空或设置软性材料。

## 9.3 二期混凝土

**9.3.1** 为尽量减小主梁的梁高, 预弯预应力组合梁桥的主梁间距一般会小于其他多肋式梁桥的主梁间距。根据桥面板的受力要求, 其厚度不宜小于 140mm; 出于方便腹板混凝土浇筑和确保腹板混凝土浇筑质量的需要, 板底承托处的钢梁距二期混凝土桥面板底的最小净距不小于 70mm。

**9.3.2** 预弯预应力组合梁二期混凝土主要用作行车道板, 同时



又作为主梁的一部分参与受力, 因此应满足现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中主梁及混凝土桥面板的计算及构造要求。同时, 应根据预弯预应力组合梁的受力特点、施工要求, 满足断面尺寸、配筋构造、最小保护层厚度等构造要求。

**9.3.3** 腹板混凝土的最小厚度应考虑避免钢腹板锈蚀、方便浇筑、保证浇筑质量等因素。同时根据腹板的受力特点、施工要求, 需满足断面尺寸、配筋构造、最小保护层厚度等要求。考虑到腹板尺寸空间紧张, 可不按箍筋构造控制。预弯预应力组合梁中的腹板中及一期混凝土中的箍筋均为构造钢筋, 而且在高应力状态下的钢梁应减少焊接量, 因此钢筋与钢板的焊接长度取为  $2.5d$ , 且为双面焊。

**9.3.4** 当梁高大于  $1.2\text{m}$  时, 在混凝土腹板上设置防收缩钢筋, 将其放在槽形箍筋的外侧, 以减少腹板混凝土收缩作用, 与纵向钢筋不同。纵向钢筋主要指一期混凝土中的顺桥方向的钢筋, 通常为构造钢筋。

**9.3.5** 横隔板的主要作用是连接主梁, 又作为桥梁的一部分抵抗桥梁的横向弯矩。横隔板的最小厚度应考虑到钢材不生锈、便于浇筑、保证施工质量等因素。同时, 根据横隔板的受力特点、施工要求, 需满足断面尺寸、配筋构造、最小保护层厚度等要求。

**9.3.7** 预弯预应力组合梁的腹板混凝土处于无预应力状态, 因此在正常使用阶段处于开裂状态, 存在由下至上的竖向裂缝。在截面几何参数计算时亦不考虑腹板混凝土的影响。因此, 在环境条件容许且钢腹板有防腐措施的情况下, 为减轻预弯预应力组合梁桥的自重, 可取消二期混凝土中的腹板混凝土。当不设腹板混凝土时, 应对裸露的钢梁腹板、钢横隔板采取必要的防腐措施, 以保证桥梁的耐久性。对于不设混凝土腹板的情况, 宜采用钢横隔板, 钢横隔板的厚度宜取  $14\text{mm} \sim 20\text{mm}$ 。钢横隔板与主梁钢腹板之间应采用  $130\text{mm} \times 130\text{mm}$  角钢焊接或栓接等可靠的连接方式。

## 10 施工设备

### 10.1 一般规定

**10.1.1** 不同工程的预弯梁尺寸、形式及施工方法等可能不同，所以工装设备的尺寸及构造形式等应符合相应的工程需要。在无法替代时应重新设计和制造工装设备。设计预弯力应由设计单位提供，并作为加载装置设计的依据。

**10.1.2** 钢梁预弯所需的工装设备材料要求、计算方法、构造规定、布置方式等应按照国家现行标准《钢结构设计标准》GB 50017 或《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 进行设计计算，可按施工中的临时结构进行。

**10.1.3** 根据国内已有的施工经验，预弯梁加载施工主要有单梁预弯和双梁对弯两种方法。每一种预弯施工方法所需的主要工装设备如条文中所述，其中翻转架主要用于双梁对弯施工时反位预弯梁的复位，见本标准第 10.4.1 条。其他主要施工设备参见本标准图 10.3.1 (a) 和图 10.3.1 (b)。对于各种预弯梁施工装置的设计、计算和构造可按桥梁施工中的钢结构进行。

**10.1.6** 对于双梁对弯施工，预弯钢梁的加载应在梁的两端支点截面进行，两个四分点或两个三分点同步受力。加载千斤顶应可控并保证两端加载同步。使用的千斤顶设计吨位应满足设计预弯力的要求，并应考虑千斤顶的合理顶程。

### 10.2 防侧倾装置

**10.2.2** 工字形钢梁在施加预弯力过程中极易产生侧向扭曲并引起钢梁侧向失稳。因此，预弯梁加载阶段需设置防倾装置。设置防侧倾装置应始终与预弯梁侧面可靠接触，保证预弯梁在加载过程中的稳定。为减小防倾装置与预弯梁接触面的摩擦，防侧倾装



置与预弯钢梁的接触端应具备竖向滑动或转动的多向调节功能。在钢梁预弯过程中, 防侧倾装置的水平向支顶点必须顶在钢梁腹板的纵向弯曲受压区域中, 钢梁腹板的受压区高度与其上下翼板的面积有关, 可根据钢梁的截面重心位置确定。

**10.2.3** 防侧倾装置与钢梁接触端不能阻碍预弯钢梁时的竖向变位, 应有多向调节功能。

### 10.3 加载装置

**10.3.1** 在双梁对弯工艺中, 加载反力架用于一组钢梁两端的预弯加载, 见图 10.3.1 (a)。由设在两端加载反力架中的两个同步千斤顶施加预弯力, 反力架的施力点应设在简支钢梁理论支撑点的位置。预弯梁加载完成后应采用锁定装置将钢梁两端紧固, 以撤出加载装置。推荐采用机械式锁紧。单梁预弯施工采用的反力架形式见图 10.3.1 (b)。单梁预施工加载反力架的地锚应满足预弯施工中的抗拔要求, 其抗拔力应大于预弯力, 并留有安全余地。简支钢梁就位后, 反力架设在两个预弯力加载点上 (通常是两个四分点或三分点), 两台千斤顶需同步加载。

**10.3.7** 双梁对弯施工中的支承台主要用于承受两片钢梁和预弯梁的重量, 其中正位钢梁 (下钢梁) 应吊挂在支承台上, 因此需对其强度和刚度提出要求。支承台同时兼作上下两钢梁之间集中力作用的传力点。

### 10.4 翻转架

**10.4.4** 翻转架应成对设置, 主要用于双梁对弯施工中的反位钢梁 (上钢梁) 或反位预弯梁的复位翻转。为避免滚轮滚动不畅, 应对滚轮安装位置和承载力进行控制。翻转架的翻转可用人工以杠杆方式进行, 也可采用机械装置带动翻转。为保证翻转架在翻转过程中的稳固, 应采用地锚或扩大基础的形式将其底座固定。翻转施工中, 应保证两个翻转架同步转动, 避免预弯钢梁或预弯梁处于受扭状态。



## 10.5 施工设备的安全性检查

**10.5.3** 双梁对弯施工时，上、下两片钢梁同时加载，产生变形的方向不同。为保证防侧倾装置的支顶端始终处于钢梁纵向受压的有效范围内，上、下两片钢梁防侧倾装置的初始位置需要在预弯加载前调节。预弯钢梁加载后会产生变形，可能会与防侧倾装置产生过大摩擦，或预弯钢梁上、下翼板直接碰触防侧倾装置，加载中持续观察，妨碍时及时调整。

## 11 施工及验收

### 11.1 一般规定

**11.1.2** 本条工艺流程是在总结哈尔滨市建造的七座桥梁施工工艺的基础上编制。预弯钢梁施工可分单梁预弯和双梁对弯两种工艺。对单梁预弯工艺, 可省去工艺流程图中翻转上部钢梁和预弯梁的步骤。图 2 仅适用于等截面预弯预应力简支梁桥的施工。当二期混凝土分阶段浇筑时, 或对于变高度、变厚度预弯预应力组合梁桥, 上述工艺流程应作相应的调整。

### 11.2 施加预弯力

**11.2.1** 工字形钢梁在施加预弯力过程中容易产生侧向失稳。为此, 采用防侧倾装置对钢梁施加横向约束, 减小钢梁的横向自由长度, 以增加钢梁的抗失稳能力。每一个侧向支撑应能承担不少于 50kN 的水平顶力。

**11.2.2** 首次加载达到施工控制吨位后, 持荷 5min 后卸载, 其目的是消除钢梁的焊接残余变形, 然后再次加载达到施工控制吨位。当预弯力读值与施工控制值相差不超过 3%, 还应检查钢梁是否处于压平状态, 即其拱度基本为零。当不能满足上述误差要求时应分析原因, 重新加载, 并作出适当处理。当预弯力和预拱度难以同时满足时, 应以预弯力控制为准。

**11.2.3** 预弯加载速度不宜过快, 否则钢梁的焊接塑性变形难以充分释放, 并将影响后期预弯梁和预弯预应力组合梁的变形值。对于预弯加载总吨位较小时, 宜取 20kN/min 的加载速度; 反之, 当预弯加载吨位较大时, 宜取 50kN/min 的加载速度。

**11.2.4** 当简支钢梁的计算跨径小于 20m, 手工计算由预弯力引起的跨中拱度时, 可以忽略钢梁自重的影响。预弯施工中的钢梁

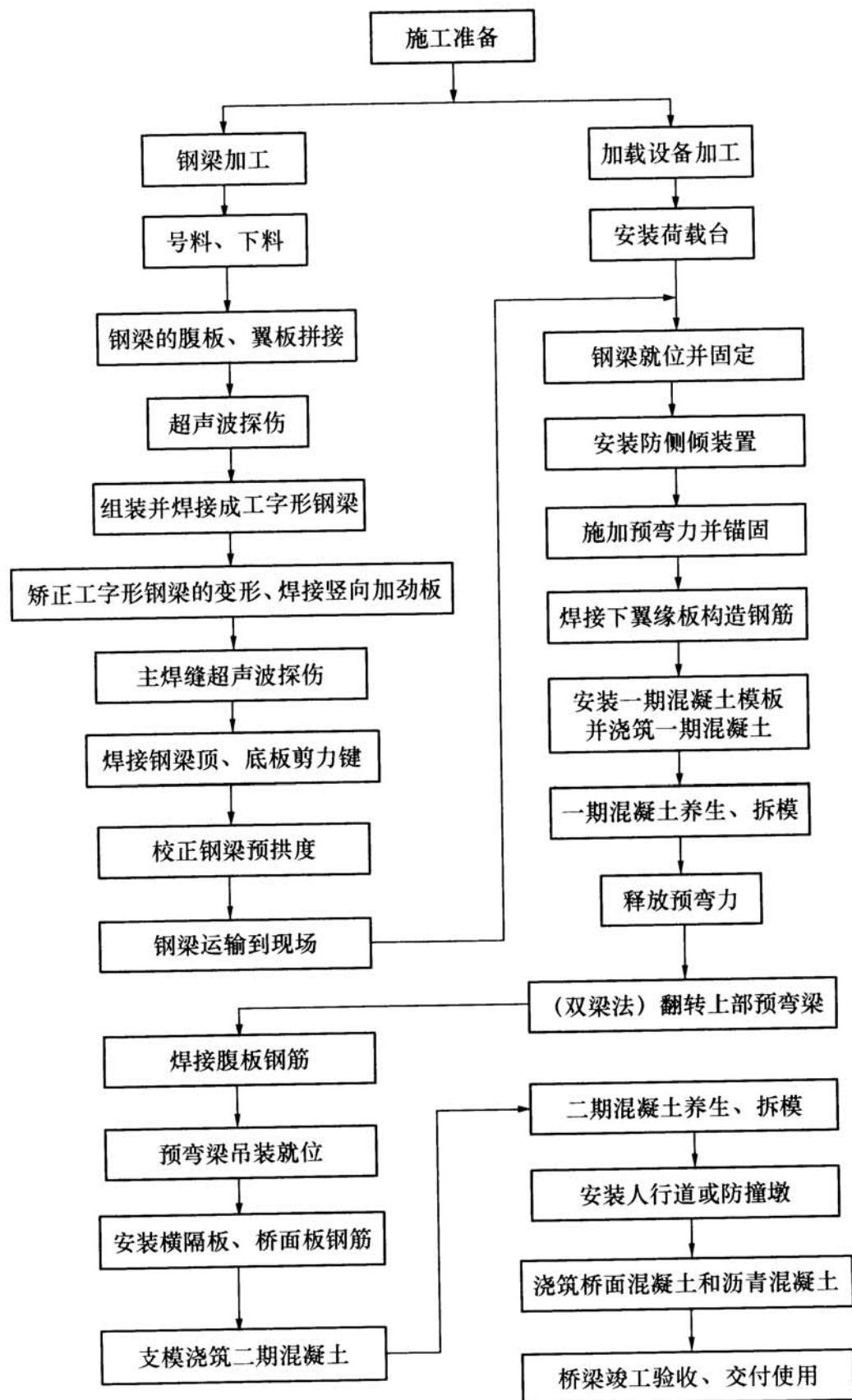


图2 预弯预应力组合梁桥施工工艺流程



的拱度受多种因素的影响, 尤其是双梁对弯施工中的上钢梁(反位钢梁)。因此, 采用叠加的方法计算施工中钢梁的变形更便于理解。上述变形计算公式均由四分区施加预弯力的情况得到, 不适用于三分点加载或变刚度钢梁的变形计算。

### 11.3 一期混凝土施工及释放预弯力

#### 11.3.3 对一期混凝土提出如下要求:

- 1 应选用矾土水泥、高级硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或其他早强水泥;
- 2 骨料应选用石灰石、石英石或花岗石, 粒径不宜大于 20mm;
- 3 应严格控制水灰比和水泥用量, 应采用干硬性混凝土;
- 4 应保持潮湿的养护环境;
- 5 浇筑混凝土所用掺合剂应符合相关规范或标准的规定。

**11.3.4** 预弯梁反弹时, 一期混凝土承受很大的预压应力以抵消自重、二期结构重力作用及可变作用引起的拉应力。当一期混凝土的预压应力过大时, 易引起一期混凝土的非线性徐变而导致其突然压碎。因此反弹时需控制一期混凝土的实测立方体抗压强度标准值及养生时间, 不宜过早实施反弹工艺。待预弯梁反弹后, 应尽快浇筑二期混凝土, 以缩短一期混凝土在较高应力水平下的持荷时间。

**11.3.5** 预弯梁释放预弯力需缓慢进行, 应避免一期混凝土在突加预压应力的情况下压碎。

### 11.4 翻转预弯梁

**11.4.2** 采用双梁对弯工艺制作预弯梁时, 下梁一期混凝土浇筑的位置与运营阶段的梁位相同, 称之为正位; 上梁一期混凝土浇筑的位置与运营阶段的梁位相反, 称之为反位。为保证上梁安全翻转为正位梁, 需采用翻转装置。翻转装置由上翻转盘、下翻转盘、底梁、扶柱及滚轮组成, 其构造形式见本标准图 10.4.1。

翻转架应布设在梁的两个四分点(或三分点), 先将上梁吊入两个翻转装置中, 用垫木固定后将两个翻转盘同步翻转  $180^{\circ}$ 。此时上梁即成为正位梁, 再将预弯梁从翻转装置中吊出, 存放以备吊装。

## 11.5 存放和吊装

**11.5.3** 预弯钢梁的存放可参照钢结构构件的存放要求。预弯梁存放时, 支点需放在理论支撑线上, 否则会改变预弯梁一期混凝土的应力状态, 进而影响一期混凝土徐变的计算结果。当存放期超过 60d 时应在梁顶面施加配重, 配重量不宜超过二期混凝土的重量。在预弯梁的安装过程中不得使其倒伏, 否则一期混凝土可能压碎, 或出现预弯梁扭曲、失稳。对于跨径超过 30m 的预弯梁, 当采用分段运输时, 应对梁段进行编号, 做好记录, 并按编号拼装。

## 11.6 二期混凝土施工

**11.6.3** 二期混凝土中的钢筋施工安装可参照现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 进行, 但腹板内的槽形箍筋应焊接在钢梁腹板上。二期混凝土的浇筑, 可在释放预弯力后先将预弯梁吊装就位, 然后一次浇筑腹板、横隔板以及桥面混凝土。当桥下支架施工有困难时, 可直接将二期混凝土的模板架立在预弯梁的一期混凝土顶面。模板的重量可在计算中予以考虑, 不影响预弯预应力组合梁桥的受弯承载能力。

## 11.7 质量验收

**11.7.1** 钢梁的验收要求通常在“设计图纸”中已有规定。钢梁的验收规范亦有多种版本, 因行业不同而异。为适应多行业的需要, 预弯预应力组合梁桥的质量验收可根据桥梁的功能、工程性质和所处的地理位置, 选用现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 或《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2。

钢梁加工的验收，除上述规范外亦可采用《铁路钢桥制造规范》Q/CR 9211-2015。

**11.7.2 钢梁预拱度加工的相对误差和绝对误差**参考《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50-2011 中第 19.9.2 条给出，并适当地严格了相关要求。钢梁预拱度加工宁大勿小，故选用了 +8mm 和 -3mm 的绝对误差，相对误差则选用了  $0.05f_{\text{con}}$ 。





## 附录 A 变截面预弯预应力组合梁

**A.0.1** 变截面预弯预应力组合简支梁可采用工字形钢梁变截面的方式形成。钢梁变截面可以通过上下翼板变厚度、钢腹板变高度或两者兼有的方式实现。当预弯预应力组合梁桥位于道路竖曲线顶部时,可采用变高度预弯预应力组合梁桥。变高度预弯预应力组合梁可通过钢梁腹板变高度实现。变钢板厚度的预弯预应力组合梁主要用于较大跨径的简支梁桥或连续梁桥,可通过将钢梁顶板、底板或腹板变厚度实现。

理论分析发现,对梁长为 20m~40m 的变高度预弯预应力组合梁,无论是按弹性阶段还是按塑性阶段计算,当跨中截面高度变化量为支点截面梁高的 20%以内时,最不利截面位置均在主梁的跨中。分析发现,虽然从跨中向支点方向弯矩逐渐减小,截面高度也逐渐降低,但弯矩减小的速率较截面惯性矩降低的速率更快,进而导致变高度梁的最不利截面位置始终位于主梁的跨中。

变高度预弯钢梁,因钢梁自重集度  $q_s$  及截面抗弯惯性矩等参数均非定值,引起的跨中截面弯矩及相应的自重应力所需的预弯力以及预拱度不能按本标准第 5.2 节和第 5.3 节的方法确定。可采用有限元数值分析方法确定钢梁跨中截面最大自重应力  $\sigma_z$ 、设计预弯力  $P_0$ 、设计预拱度  $f_0$  及施工阶段的整体稳定性。

采用钢板变厚度预弯预应力组合梁桥主要基于节约钢材的考虑,通常将弯矩作用较大的简支梁跨中  $L/2$  梁段或  $L/3$  梁段内的钢梁底板及顶板的厚度增加,以提高其受弯承载力;而其余弯矩较小的梁段可减小钢板厚度,以此降低预弯预应力组合梁桥的用钢量。变钢板厚度的预弯预应力组合梁可用于 30m 以上的简支梁桥或连续梁桥。

**A.0.3** 道路竖曲线多为大半径的圆曲线。计算表明，当跨径为40m、竖曲线半径2000m时，分别采用二次抛物线和圆曲线计算的梁高增量的相对误差仅为0.5%。因此，当竖曲线半径较大时，用抛物线代替圆曲线所引起梁高增量的变化是很小的，工程上可以接受。变高度梁的截面几何参数可按下列要求确定（图3）：

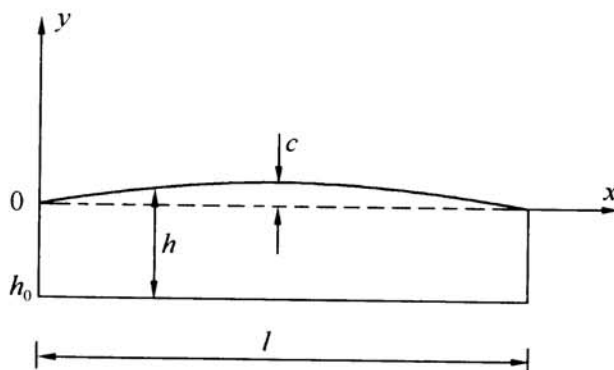


图3 梁高变化示意

1 截面上缘按照抛物线变化的曲线方程及坐标可按下列式计算：

$$y = c - \frac{4c}{L} \left( x - \frac{L}{2} \right)^2 \quad (7)$$

2 任意计算截面的梁高  $h$  可按下列式计算：

$$h = h_0 + c - \frac{4c}{L} \left( x - \frac{L}{2} \right)^2 \quad (8)$$

式中： $y$ ——截面上缘梁高的增量（mm）；

$h$ ——任意截面的梁高（mm）；

$x$ ——任意截面到支点的距离（mm）；

$L$ ——简支梁计算跨径（mm）；

$h_0$ ——支点截面的梁高（mm）；

$c$ ——跨中截面与支点截面梁高的差值（mm）， $c \leq 0.2h_0$ 。

式中的支点截面高度  $h_0$  可以理解为支点钢梁的高度  $h_s$ ；当用于桥面标高计算时，也可理解为预弯预应力组合梁的支点高度  $h$ 。公式中的  $c$  值变化通常限定在  $0 \sim 0.2h_0$  的范围内，超出此范围意味着变高度梁各截面的惯性矩的计算误差将会超过2%。



**3** 工字形截面变高度梁的任意计算截面的抗弯惯性矩可按下列公式确定:

$$I(x) = \frac{I_c}{\left[1 + (m-1)\left(1 - 2\frac{x}{L}\right)^2\right]} \quad (9)$$

$$m = I_c/I_0 \quad (10)$$

式中:  $I_c$  —— 跨中截面抗弯惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$I(x)$  —— 任意计算截面抗弯惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$m$  —— 跨中截面抗弯惯性矩与支点截面抗弯惯性矩之比;

$I_0$  —— 变高度梁支点截面抗弯惯性矩 ( $\text{mm}^4$ )。

**4** 变高度预弯预应力组合梁各受力阶段的截面计算惯性矩可借助已知的各阶段跨中截面惯性矩按下式确定。变高度梁各阶段计算惯性矩可用于相应阶段的变形计算。

$$\bar{I} = \frac{I_c}{\sqrt{m-1}} \tan^{-1} \sqrt{m-1} \quad (11)$$

式中:  $\bar{I}$  —— 变高度梁的计算惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$I_c$  —— 变高度梁跨中截面抗弯惯性矩 ( $\text{mm}^4$ ), 与各受力阶段截面几何性质有关;

$m$  —— 跨中截面抗弯惯性矩与支点截面抗弯惯性矩的比值,

$$m = I_c/I_0;$$

**5** 变高度钢梁的设计预弯力和设计预拱度可基于计算惯性矩按下述方法计算:

1) 设计预弯力仍按本标准式 (5.2.2-1) 计算, 其中钢梁自重应力计算时应计入钢腹板高度变化的影响。

2) 变高度简支钢梁在两个四分点加载时, 由设计预弯力作用引起的跨中挠度可按下式计算:

$$f_0 = \frac{1}{E_s I_c} P_0 L^3 (0.0037m + 0.0249) \quad (12)$$

式中:  $P_0$  —— 对变高度钢梁施加的设计预弯力 (N);

$m$  —— 变截面钢梁跨中截面抗弯惯性矩  $I_c$  与支点截面抗弯惯性矩  $I_0$  的比值;



$I_c$ ——变截面钢梁跨中截面的惯性矩 ( $\text{mm}^4$ );

$L$ ——简支梁计算跨径 ( $\text{mm}$ );

$E_s$ ——钢梁材料的弹性模量 ( $\text{MPa}$ )。

变高度钢梁在四分点预弯力  $P_0$  加载时跨中截面的挠度, 即钢梁设计预拱度  $f_0$  可由式 (12) 计算, 此时参数  $m$  应按变高度钢梁的跨中截面惯性矩  $I_c$  和支点截面惯性矩  $I_0$  计算。当采用两个三分点施加预弯力时, 由设计预弯力  $P_0$  引起的变高度钢梁跨中挠度  $f_0$  可按下式计算:

$$f_0 = \frac{1}{E_s I_c} P L^3 (0.0041m + 0.0314) \quad (13)$$

式中各符号意义同式 (12)。

按上述截面计算刚度求解变高度预弯预应力组合简支梁变形的的方法由原哈尔滨建筑大学提出, 经过了实验室小梁验证和实际工程梁的模拟计算, 效果良好。对 34m 实际工程梁的计算结果比有限元计算结果略大一些, 其误差在 5% 以内, 可以满足工程设计的要求。对于大跨径的变高度预弯预应力组合简支梁桥, 除跨中截面外通常还应验算多个控制截面 (例如  $L/4$  截面) 的应力, 各验算截面的抗弯惯性矩可按本标准式 (C.0.2-2) 确定, 应力计算方法同本标准附录 E。

**A.0.4** 对于简支跨径大于 30m 的预弯预应力组合梁桥, 采用减小两端段的钢梁上、下翼板厚度, 可明显地减少钢材用量。变截面点不宜选在预弯力作用点, 可向梁端方向外延不少于 1.0m 的距离。变板厚钢梁计算图式见图 4, 其中钢梁跨中梁段的截面抗弯惯性矩为  $I_m$ , 端部梁段的截面抗弯惯性矩为  $I_n$ 。

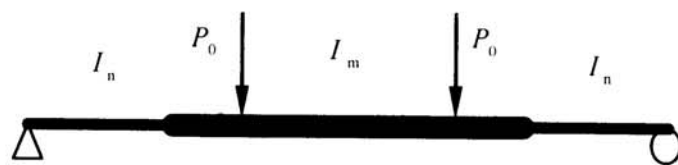


图 4 变厚度梁的截面刚度变化

**A.0.5** 理论分析表明, 当满足两段钢梁的截面惯性矩比值  $I_m/$

$I_n$  小于 1.25 时，改变上、下翼板厚度的钢梁与截面惯性矩为  $I_m$  的等截面钢梁的挠度计算结果接近，其相对误差小于 3.6%。因此，在梁端一定范围内减少钢板厚度对跨中变形的影响较小，可以按照跨中截面的等截面梁惯性矩计算。

**A. 0.8** 对于静定结构的变厚度钢梁组成的预弯预应力组合简支梁，由于钢板厚度的变化带来的截面刚度变化有限，仍可近似按跨中梁段的截面刚度计算钢梁、预弯梁及预弯组合梁的跨中截面变形和应力。

## 附录 B 预弯预应力组合连续梁

### B.1 一般规定

**B.1.3** 目前尚缺少针对预弯预应力组合连续梁桥的理论分析及简化计算方法，因此需要借助有限元分析方法。

**B.1.4** 对于跨径内预弯梁段的计算分析，应参照预弯预应力组合简支梁的方法计算短暂状况下应力与变形。

**B.1.5** 预弯预应力组合连续梁桥的中支点组合梁段目前尚无统一的计算方法。

**B.1.6** 对于预弯预应力组合连续梁的成桥状态，当截面进入极限状态时，材料已进入塑性状态，与截面的应力历程无关，故跨中正弯矩区段的受弯承载力应按本标准第 6.2 节的方法计算。中支点负弯矩截面的受弯承载力目前尚无统一的计算方法，可参考承受负弯矩的钢-混凝土组合梁截面进行计算。

### B.2 连续梁设计

**B.2.7** 具有开口截面的预弯预应力混凝土组合梁的截面受剪承载力与剪应力方向无关。故本标准第 6.3.1 条针对组合简支桥跨的受剪承载力计算公式，可适用于预弯预应力组合连续梁桥负弯矩区段的受剪承载力计算。

**B.2.8** 预弯预应力组合连续梁的中支点负弯矩区段同时承受很大的弯矩和剪力作用。钢梁腹板同时承受弯曲正应力和剪应力作用时，钢梁的受剪承载力随截面所受的弯矩增加而减小。在弹性阶段以折算应力方式考虑组合梁上的弯剪共同作用，式 (B.2.8) 的系数 1.1 是考虑弯、剪应力共同作用下钢材抗拉强度的提高，该计算结果可作为受剪承载力验算的补充。



## B.3 连续梁的施工

**B.3.5** 预弯预应力组合连续梁的连接段通常选择在永久作用弯矩为零的位置, 因此该连接段主要承担相对较小的可变荷载弯矩。本条给出的两种方法旨在通过对钢梁预变形或施加千斤顶的顶力对连接段的一期混凝土施加一定的预压应力。具体方法如下:

1 配重法: 在连接处施加一定大小的荷载, 在带载的情况下浇筑连接处的一期混凝土, 混凝土达到设计强度后释放荷载, 利用钢梁的强迫变形使连接处的一期混凝土受压。

2 施加预加力: 用千斤顶对连接处的钢梁施加顶力, 使钢梁的下缘受拉, 然后浇筑一期混凝土。待混凝土达到设计强度之后, 千斤顶卸载, 钢梁回弹使连接处的一期混凝土受压。

在实际工程中亦可采用微膨胀混凝土浇筑连接段的一期混凝土。

**B.3.6** 采用简支转连续方法施工时, 中墩盖梁上应视其宽度而设置1个~2个支座。当设置2个支座时, 将有明显的负弯矩削峰作用, 但2个支座的受力通常是不均匀的。

## 附录 C 几何参数及计算系数

**C.0.1** 在施加预弯力之前, 简支钢梁处于初始预拱状态。在预弯力和钢梁自重作用下钢梁被压成水平状态, 此过程称为钢梁预弯。钢梁截面几何参数主要用于钢梁预弯阶段的应力和变形计算。

**C.0.2** 卸除预弯力之后, 梁体反弹, 形成预弯梁。在预弯梁的截面几何性质计算中应采用换算截面, 可将一期混凝土面积换算为  $1/n_1$  倍的钢梁面积并作用在其重心处。计算换算截面几何参数时应扣除一期混凝土中相应的钢板面积。预弯梁反弹后承受钢梁和一期混凝土的自重作用, 同时一期混凝土也开始发生徐变和收缩作用。预弯梁截面的几何参数主要用于预弯梁反弹阶段的截面变形及应力计算。

**C.0.3** 二期混凝土浇筑后并达到其强度要求时, 形成预弯组合梁截面。在活载作用下腹板混凝土通常已处于开裂状态, 因此, 预弯组合梁的截面几何参数计算时应忽略腹板混凝土的影响, 但可扣除二期混凝土上翼缘板中相应的钢板截面积。预弯组合梁的截面几何参数主要用于成桥状态下一、二期混凝土收缩、徐变及二期结构重力作用及可变作用的截面应力及变形计算。

**C.0.4** 在正常使用阶段, 当活载较小时, 预弯预应力组合梁可以是全截面工作的, 即一期混凝土为全预应力混凝土或 A 类构件, 其截面几何参数见本标准图 C.0.3。但当活载很大时, 一期混凝土亦可能全部开裂, 此时截面只有钢梁和二期混凝土参与工作, 即一期混凝土为预应力混凝土 B 类构件, 其截面几何参数见图 C.0.4。不计一期混凝土的换算截面惯性矩  $I_3$  主要用于计算一期混凝土部分开裂的截面折算刚度  $I_e$ 。

**C.0.5** 在实际工程中, 活载是变化的。因此, 预弯组合梁的截

面可能处于一期混凝土部分开裂的状态, 相应的截面称之为折算截面, 见图 C.0.5。

试验研究表明, 预弯预应力组合梁的一期混凝土开裂后, 截面惯性矩虽然减小, 但当作用弯矩  $M$  介于消压弯矩  $M_0$  和曾作用过的最大弯矩  $M_{\max}$  之间, 即  $M_0 < M \leq M_{\max}$  时, 截面惯性矩仍基本保持为常数, 且该常数由曾作用过的最大弯矩  $M_{\max}$  决定, 这是因为预弯组合梁内有劲性钢梁存在。在实际工程计算中, 建议将  $M_{\max}$  取为正常使用阶段活载引起的跨中截面弯矩作用标准值  $M_q$ , 并计入冲击作用。此时, 预弯预应力组合梁的自重、二期结构重力作用已包括在消压弯矩  $M_0$  之中。

计算表明, 在预弯预应力组合梁中虽然钢梁提供的惯性矩仅为二期混凝土惯性矩的 0.4 倍左右, 但钢的弹性模量约为混凝土弹性模量的 6 倍。可以证明钢梁提供的刚度  $E_s I_s$  约为一、二期混凝土提供刚度  $E_c I_c$  的 2.5 倍。也就是说, 一、二期混凝土提供的刚度仅为全截面刚度的 30% 不到。因此一期混凝土的部分开裂对截面刚度的影响是有限的。



## 附录 D 变形计算

**D.0.1** 预弯预应力组合梁桥由预弯钢梁制作至成桥过程中的跨中变形应符合图 5 的变化规律。

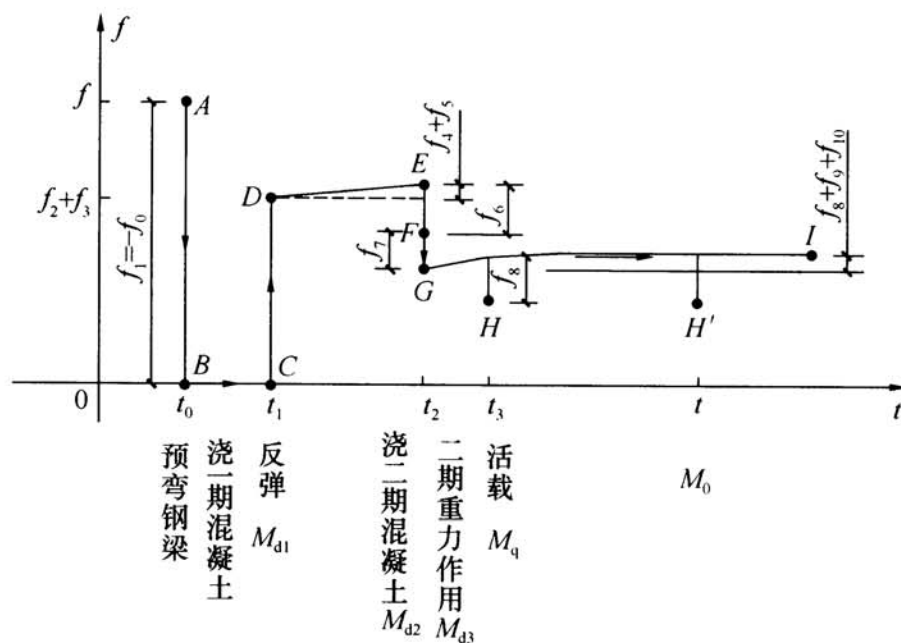


图 5 预弯预应力组合梁桥的变形规律

**D.0.4** 理论研究表明，在模板自重作用过程中，二期混凝土由浇筑到结硬，导致截面惯性矩发生变化。由于模板重量相对较轻，导致的回弹挠度  $f''_6$  一般很小。在不要求精确计算时可以忽略其影响。

根据哈尔滨工业大学针对日本《预弯组合梁设计施工指南》中挠度公式的理论推导，可将其变形项  $f_4$ 、 $f_9$  和  $f_{10}$  的计算方法进行简化。在本标准中给出的挠度  $f_4$ 、 $f_5$ 、 $f_8$ 、 $f_9$  和  $f_{10}$  计算式均为简化公式，其计算结果与日本指南中的计算结果是一致的。上述简化计算的实质是以各阶段钢梁跨中截面承担的弯矩来计算预弯梁或预弯预应力组合梁桥的跨中时效变形。



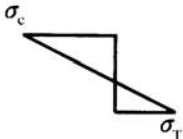
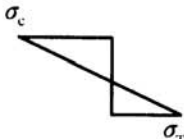

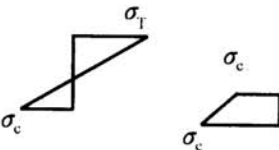
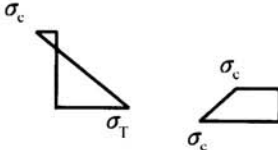
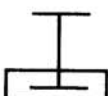
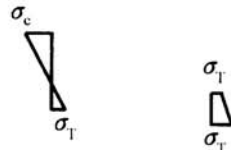
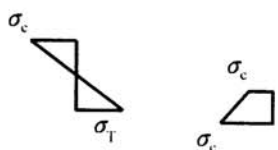
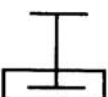

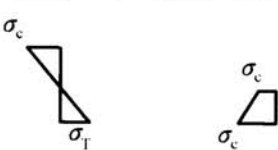
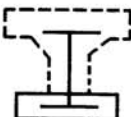

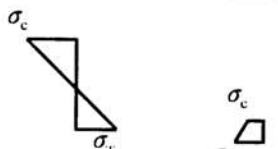
**D. 0. 5** 预弯预应力组合简支梁桥的成桥状态的上拱值大小意味着跨中截面一期混凝土中储存的预压应力大小。利用叠加原理，式（D. 0. 5-1）给出了正常使用阶段预弯组合梁桥长期上拱值  $f_p$  的计算方法。式（D. 0. 5-2）给出了预弯组合梁桥建成时上拱值  $f_p$  的计算方法，为提高计算精度，可考虑一期混凝土初期徐变引起的  $f_4$  的影响。

**D. 0. 6** 理论推导可知，式（D. 0. 6）中挠度简化公式  $f_4$ 、 $f_9$  和  $f_{10}$  时可分别由本标准式（D. 0. 3-3）、式（D. 0. 4-5）和式（D. 0. 4-6）简化得到。

## 附录 E 截面应力计算

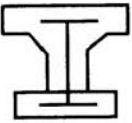

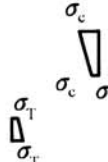
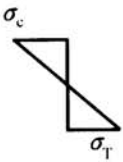
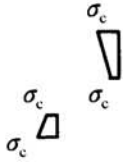
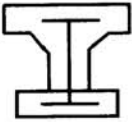


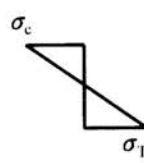
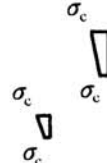
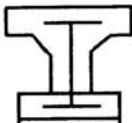

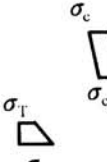
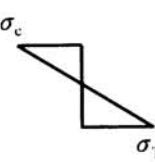
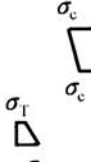
**E.0.1** 应力计算宜采用编程计算的方法，或采用成熟的计算软件进行计算。应力计算过程及结果的正确性可采用表 2 中的应力增量变化趋势进行定性判断或检验。

表 2 预弯预应力组合梁各阶段的计算截面和应力变化趋势

计算 步骤	状态	抵抗截面	发生应力		累计应力	
			钢梁	二期混凝土	钢梁	二期混凝土
				一期混凝土		一期混凝土
1	预弯钢梁		—		—	
2	钢梁加 预弯力					
3	预弯梁卸 预弯力					
4	预弯梁 自重荷载					
5	一期混凝土 收缩及初期 徐变					
6	二期混凝土 自重					



续表 2

计算 步骤	状态	抵抗截面	发生应力		累计应力	
			钢梁	二期混凝土	钢梁	二期混凝土
				一期混凝土		一期混凝土
7	预弯组合梁 上二期结构 重力作用					
8	二期混凝土 收缩、徐变 及一期混凝 土徐变结束					
9	预弯组合梁 上作用使用 荷载及一期 混凝土处于 开裂状态					

注：表中应力“C”表示压应力，“T”表示拉应力。

**E. 0.2** 按照设计预弯力  $P_0$  的定义，预弯力和钢梁自重作用下，钢梁跨中截面的应力  $\sigma_{su1}$  或  $\sigma_{sl}$  应达到控制应力  $\sigma_{con}$ ，并将钢梁预拱度压平。若预弯力  $P_0$  作用在其他位置时，式 (E. 0. 2-2) 中的  $M_p$  需作相应调整。在此受力阶段，截面参数仅为工字形钢梁本身的几何参数，截面几何参数应按本标准第 C. 0. 1 条计算。

**E. 0.3** 二期混凝土浇筑之前一期混凝土在反弹后的压应力作用下将发生徐变。徐变作用将使一期混凝土的预压应力减小，相当于向一期混凝土施加一拉力  $N_{ct1}$  和正弯矩  $M_{ct1}$ 。混凝土徐变在截面内产生内力和应力是自平衡的，因此在钢梁截面上产生压为  $N_{st1}$  和负弯矩  $M_{st1}$ 。混凝土徐变系数可根据反弹时一期混凝土的龄期，按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的混凝土徐变模型取值，亦可参照日本

《预弯梁设计施工指南》近似取为  $\phi_t = 0.5$ 。

一期混凝土自浇筑之后开始发生收缩, 并且这种收缩将一直持续到  $t = \infty$ 。收缩的结果亦将使得一期混凝土中的预压应力降低, 相当于对一期混凝土施加拉力  $N_{c1}$  及正弯矩  $M_{c1}$ , 同时必有反向压力  $N_{s1}$  和弯矩  $M_{s1}$  作用在钢梁上。在计算中, 混凝土收缩应变和徐变系数应按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 取值。初步设计时亦可采用杨氏弹性系数法进行计算, 混凝土的收缩应变可参照日本《预弯梁设计施工指南》近似取  $\epsilon_s = 2.0 \times 10^{-4}$ , 混凝土徐变系数可近似取为  $2\phi_{t=\infty} = 4.0$ 。

二期混凝土浇筑且尚未结硬时, 其自重仍由预弯梁承担。此时的截面几何参数仍由本标准第 C.0.2 条确定。自二期混凝土结硬开始, 梁的截面形式已由预弯梁转变为预弯预应力组合梁, 即一、二期混凝土和钢梁开始共同受力、共同变形。模板可视为临时荷载作用于预弯梁上。当二期混凝土结硬并达到一定的强度时, 需拆除模板。

**E.0.4** 若二期混凝土的模板重量较大, 将其拆除时可使一期混凝土中的预压应力有所增加。为挖掘预弯组合梁在正常使用阶段的承载潜力, 可进行该步骤计算。混凝土模板重量引起的弯矩为  $M_m$ , 对  $M_m$  的卸载相当于对预弯梁卸载, 一期混凝土恢复一部分预压应力, 同时对二期混凝土施加预拉应力。此时二期混凝土参与工作, 截面惯性矩为  $I_2$ 。

二期混凝土结硬后亦将发生收缩现象, 收缩的结果将使二期混凝土中的压应力有所降低, 同时在钢梁的上缘产生压应力, 下缘产生拉应力, 对一期混凝土亦将产生拉、压应力的增量。二期混凝土的收缩应变和徐变系数可按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的收缩模型取值。亦可参照日本《预弯梁设计施工指南》方法近似取混凝土的干缩应变  $\epsilon'_s = 2.0 \times 10^{-4}$ , 计算混凝土干缩时的混凝土徐变系数可近似取为  $2\phi_{t=\infty} = 4.0$ 。



在二期结构重力作用  $M_{d3}$  作用下, 二期混凝土将产生压应力, 同时将引起二期混凝土徐变, 进而引起截面上的应力变化。在计算中二期混凝土的徐变系数可按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的徐变模型取值。初步设计时可按日本《预弯梁设计施工指南》方法近似取  $\phi'_t = 2.0$ 。

二期混凝土浇筑及二期结构重力作用后, 一期混凝土仍将发生徐变, 其时间为  $t = t_1 \sim \infty$ , 一期混凝土徐变系数终值可按照现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的徐变模型计算。初步设计时可参照日本《预弯梁设计施工指南》方法近似取  $\phi_{\infty} = 2.0$ 。

**E. 0.5** 在式 (E. 0.5-2) 中, 去掉了与一、二期混凝土收缩、徐变的作用效应相关的计算步骤。利用式 (E. 0.5-2) 计算的一期混凝土下缘应力  $\sigma_p$  可用于近似计算桥梁建成时的截面抗裂性, 为提高近似程度亦可考虑一期混凝土初期徐变引起的  $\sigma_{ct4}$  的影响。

**E. 0.6** 预弯组合梁在可变作用下的应力计算应根据截面是否开裂分为两种情况进行计算。如果截面不开裂, 即全预应力或部分预应力混凝土 A 类构件, 则截面几何参数按本标准第 C. 0.3 条计算。如果截面开裂, 即部分预应力混凝土 B 类构件, 则应力计算时应考虑结构的分阶段受力特点, 应将可变作用弯矩  $M_q$  分解为消压弯矩与抗裂弯矩之和  $M_0 + M_{cr}$  以及超过  $M_0 + M_{cr}$  之后的弯矩  $M_q - M_0 - M_{cr}$  的两部分, 分别计算这两部分的应力并叠加, 即可得到可变作用弯矩  $M_q$  作用时截面的应力增量。计算消压弯矩与抗裂弯矩之和  $M_0 + M_{cr}$  产生的应力时应采用全组合截面的几何参数, 见本标准第 C. 0.3 条; 计算开裂后弯矩  $M_q - M_0 - M_{cr}$  产生应力时则应采用折算截面几何参数, 见本标准第 C. 0.5 条。在一期混凝土开裂的情况下应计算本标准式 (E. 0.5-5) 中三个控制点的应力, 其他控制点的应力无需计算。但需按本标准第 7.3.4 条的规定, 按可变作用频遇组合验算开裂的一期混凝土下缘裂缝宽度, 以保证结构的耐久性。



上述应力计算中  $M_q$  为汽车作用引起的跨中截面弯矩，必要时亦可计入其他可变作用，例如人群作用引起的跨中弯矩  $M_r$ 。用于截面应力验算时应取弯矩作用的标准值，用于抗裂性计算时应取弯矩作用的频遇值。