

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 田延安
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 磊 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

住房城乡建设部信息中心
浏览专用

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

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	Structural 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 Ultimate 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

住房和城乡建设部信息公开
浏览专用

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。

住房城乡建设部公告
浏览专用

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 preflexed 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 continues 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；
 ν_c ——混凝土的泊松比；
 ν_s ——钢材的泊松比；
 α_c ——混凝土的线膨胀系数；
 α_s ——钢材的线膨胀系数；
 ρ_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_{fd} ——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_{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_{max} ——施工阶段预弯钢梁支点截面作用的最大剪力标准值；
- V_{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_{ud} ——基本组合的剪力设计值；
- ω_{cr} ——正常使用极限状态下，作用效应频遇组合（不计冲击）引起的一期混凝土上下缘的裂缝宽度；
- $[\omega_{\text{cr}}]$ ——裂缝宽度限值；
- σ_{con} ——预弯钢梁的控制应力；
- σ'_{cu} ——正常使用极限状态下二期混凝土上缘的压应力；
- σ_{cl} ——预弯梁反弹时一期混凝土下缘的最大压应力；
- σ_{p} ——一期混凝土下缘的有效预压应力；
- σ_{sb} ——正常使用极限状态下钢梁下缘的拉应力；
- σ_{su} ——正常使用极限状态下钢梁上缘的压应力；
- σ_{w} ——施工过程中，钢梁上缘的最大弯曲压应力；
- σ_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_c ——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-ii} ——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 ——支平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_{cul} ——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上下缘的距离；
- 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_{ec1} ——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_{es1} ——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_{sul} ——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_{s1} ——预弯梁截面形心到钢梁下缘的距离；
 y_{s2} ——预弯预应力组合梁截面形心至钢梁下缘的距离；
 y_{s3} ——形心 G 至钢梁下缘的距离；
 λ_y ——截面对 y 轴的长细比；
 δ ——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；
 α ——连接件受剪承载力折减系数；
 α_b ——钢梁绕 y 轴的惯性矩之比；
 β_b ——侧向支承点的影响系数；
 η_b ——截面对称性影响系数；
 φ_b ——钢梁的整体稳定系数；
 ϕ_t ——混凝土徐变系数；
 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数；
 ξ_{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之点以外不超过 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

准《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 或《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的相应条款计算；连续梁的桥面板有效宽度宜按现行行业标准《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。

3.1.7 预弯预应力组合梁桥的混凝土桥面板宜采取整体现浇成型。混凝土桥面板的设计和验算应符合国家现行相关标准的规定。

3.1.8 钢梁加工应符合现行行业标准《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 的相关规定。

3.1.9 桥面铺装、防水、排水、伸缩装置、支座及照明、栏杆等桥面系的构造应符合国家现行相关标准的规定。

3.2 结构形式

3.2.1 预弯预应力组合梁桥宜采用预制预弯梁，现场吊装后现浇形成整体桥梁的方法；上翼缘板、腹板、横隔板等二期混凝土宜采用现浇方法；连接件宜采用栓钉连接件。当简支跨径小于或等于 30m 时，预弯预应力组合梁的钢梁宜采用等截面工字形钢梁（图 3.2.1）。

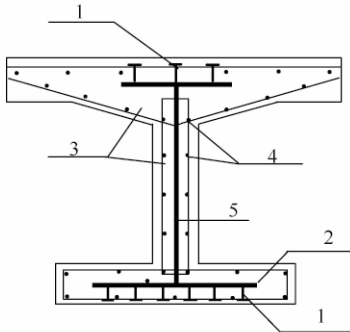


图 3.2.1 预弯预应力组合梁桥的主梁断面示意

1—连接件；2—一期混凝土；3—二期混凝土；4—钢筋；5—钢梁

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 8m ，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_a	抗剪 f_{va}	屈服强度 f_y
牌 号	钢板厚度 (mm)			
Q345 钢	≤ 16	275	160	345
	16~40	270	155	335
	40~63	260	150	325
Q390 钢	≤ 16	310	180	390
	16~40	295	170	370
	40~63	280	160	350
Q420 钢	≤ 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 ν_s	线膨胀系数 α_s (以每℃计)	质量密度 ρ_s (kg/m ³)
2.06×10^5	7.9×10^4	0.31	1.2×10^{-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	1.88	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	3.25×10^4	3.35×10^4	3.45×10^4	3.55×10^4	3.60×10^4

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 ν_c 可采用 0.2；混凝土的温度线膨胀系数 α_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	Φ	6~22	300
HRB400 HRBF400 RRB400	Φ Φ^F Φ^R	6~50	400
HRB500 HRBF500	Φ Φ^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	2.1×10^5
HRB400、HRB500 HRBF400、HRBF500 RRB400	2.0×10^5

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；

σ_{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：

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

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

式中： P_0 ——四分点的设计预弯力 (N)；
 σ_{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 (mm^4)；
 L ——钢梁的计算跨径 (mm)；
 σ_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_{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列方法计算：

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

式中： P_{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紧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：

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

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

式中： ΔP ——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， $n=4$ ；
 δ ——按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土

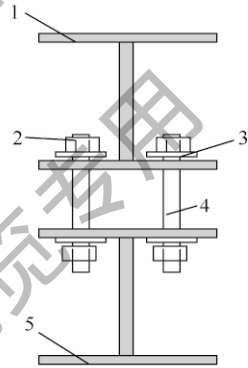


图 5.2.3 双梁加载
锚固构造

1—上钢梁；2—螺帽；3—垫板；4—拉杆；5—下钢梁

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 (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 ——支承台与同一端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: σ_{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 (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，并按下式计算：

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

式中： f_{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： σ_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（ $N \cdot mm$ ）；
- W_x ——按受压边计算的钢梁截面抗弯模量（ mm^3 ）；
- φ_b ——钢梁的整体稳定系数；
- f_d ——钢梁的材料强度设计值（MPa）。

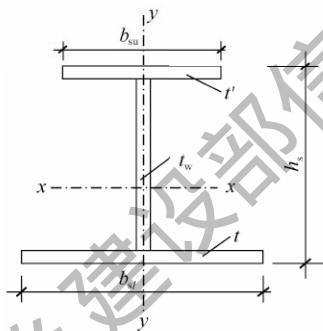


图 5.4.2 工字形钢梁的截面

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： β_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（ mm^2 ）和高度（mm）（图 5.4.2）；

t' ——钢梁受压翼板的厚度（mm）；

f_y ——钢材的屈服强度 (MPa);

η_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, $\eta_b=2\alpha_b-1$;

α_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^4);

I_{sy} ——钢梁全截面对 y 轴的惯性矩 (mm^4);

λ_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 φ'_b , 并取代 φ_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撑杆的截面面积:

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

式中: A_{sl} ——钢梁受压翼板的面积 (mm^2);

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:

$$\left(\frac{h_w}{100t_w}\right)^4 \left[\left(\frac{\sigma}{345}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{77 + 58(h_w/a)^2}\right)^2 \right] \leq 1 \quad (a > h_w) \quad (5.4.4-3)$$

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 $a \leq L/8$;

σ ——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);

τ ——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： γ_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 ξ_{ls}

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）：

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

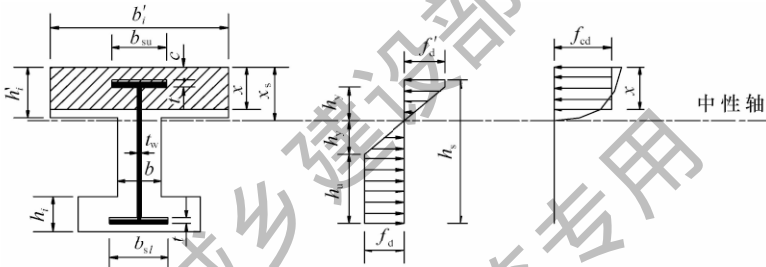


图 6.2.3-1 中性轴位于混凝土翼缘板中的截面抗弯计算图示

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）；

Δb_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列式计算 (图 6.2.3-2):

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

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

式中: b ——混凝土工字形梁的腹板厚度 (mm)。

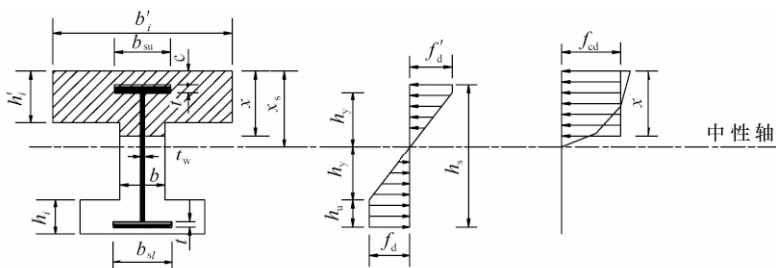


图 6.2.3-2 中性轴位于混凝土腹板中的截面抗弯计算图式

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)；

ξ_{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；

γ_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)；

γ_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：

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

$$M_{cr} = n_1 f_{tk} I_2 / y_{c2} \quad (7.2.2-2)$$

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

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）；

σ_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（mm⁴），由本标准式（C.0.3-2）计算；

y_{c2} ——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（mm⁴），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_c 。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, 应按下式计算:

$$f_q = \frac{5M_0L^2}{48E_sI_2} + \frac{5(M_{fd} - M_0)L^2}{48E_sI_c} \quad (7. 2. 2-6)$$

式中: I_c ——折算截面惯性矩 (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 (MPa);

σ_{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: σ_{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);

σ_{su} ——正常使用极限状态下钢梁上缘的压应力 (MPa);

σ_{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：

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

式中： f_{ck} ——二期混凝土轴心抗压强度标准值 (MPa)；

σ'_{cu} ——正常使用极限状态下二期混凝土上缘的压应力 (MPa)。

住房和城乡建设部信息中心
浏览专用

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 (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）；
 α ——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。

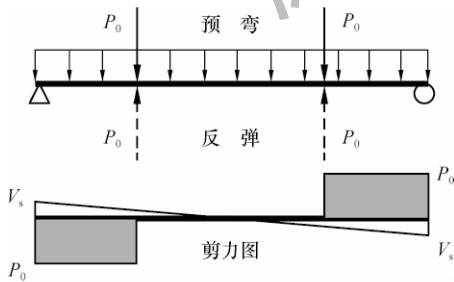


图 8.2.2 预弯梁反弹阶段剪力

3 在支点与加载点之间的栓钉连接件可按式设计：

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

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 (mm^3)；
 I_1 ——预弯梁换算截面绕其自身重心轴的惯性矩 (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。

住房城乡建设部信息中心
浏览专用

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。

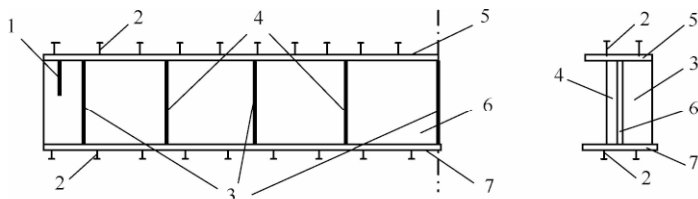


图 9.1.5 钢梁构造形式

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。

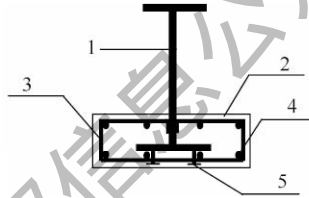


图 9.2.1 一期混凝土构造示意
1—工字形钢梁；2—一期混凝土；
3—箍筋；4—纵向钢筋；
5—连接件

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；

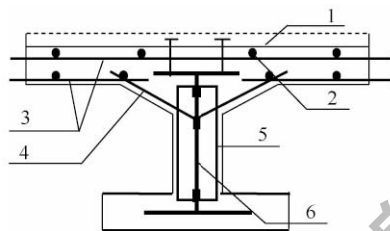


图 9.3.2 二期混凝土构造示意

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作外包混凝土。

住房城乡 建设部信
浏览专用

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。

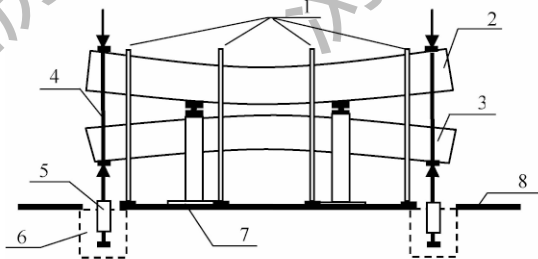


图 10.1.3 双梁对弯布置

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。

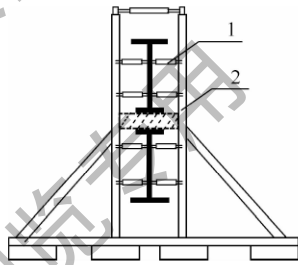


图 10.2.1 防侧倾装置
1—防侧倾装置；2—架体

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。

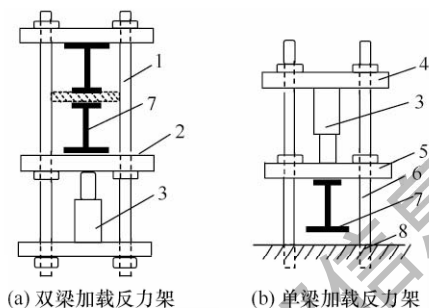


图 10.3.1 加载反力架

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。

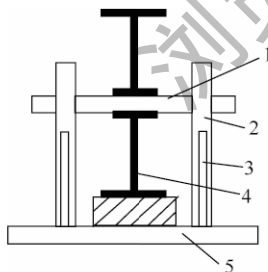


图 10.3.7 支承台

1—横梁；2—立柱；3—斜撑；4—工字钢梁；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

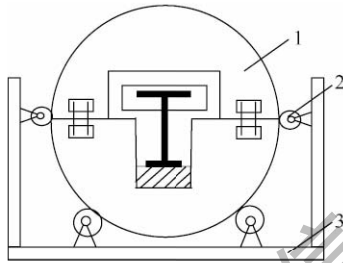


图 10.4.1 翻转架

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。

住房城乡建设部信息公开
浏览专用

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宜符合下列规定：

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_{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（mm⁴）。

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： Δf_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规范《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 σ_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_c ，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跨径进行分段，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）。

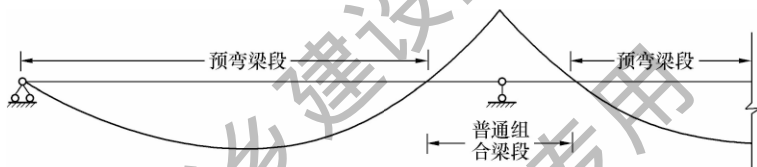


图 B.1.1 预弯预应力组合连续梁分段

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，应按下列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： σ 、 τ ——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：

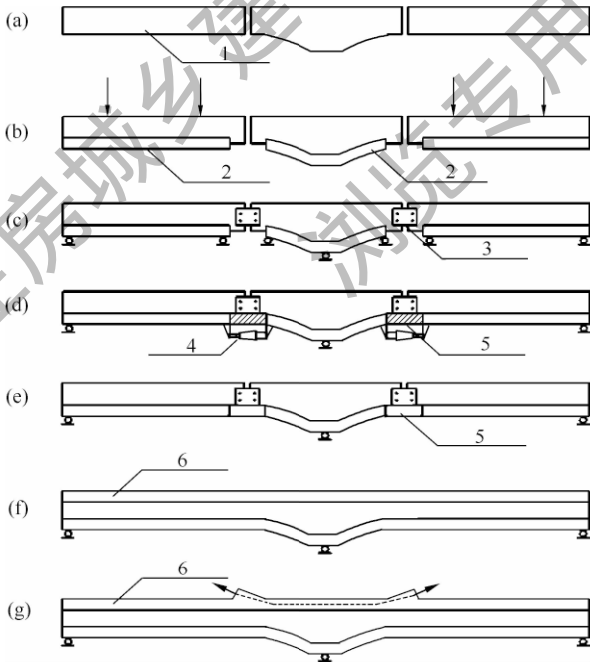


图 B. 3. 2 施工工艺流程

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

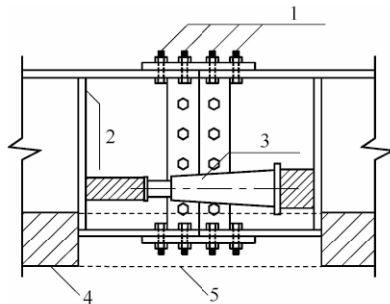


图 B.3.4 拼接处一期混凝土补浇工艺

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。

住房城乡建设部信息中心
浏览专用

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:

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

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

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

式中: A_s 、 I_s ——钢梁截面的面积 (mm^2) 和惯性矩 (mm^4);
 y_{su} ——钢梁截面形心至上边缘的距离 (mm).

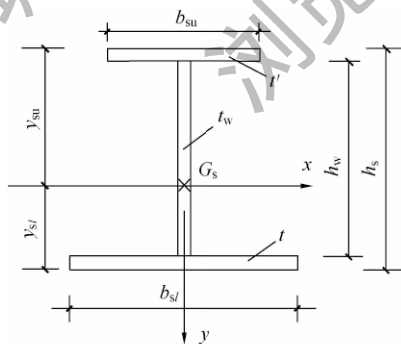


图 C.0.1 钢梁截面参数

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

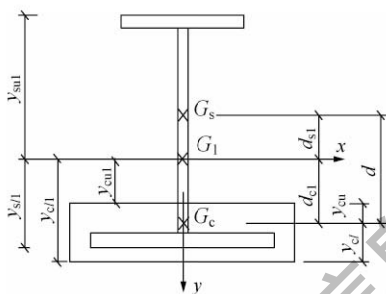


图 C.0.2 预弯梁截面参数

G_1 —预弯梁截面形心； G_c —一期混凝土截面形心； d —钢梁截面形心至一期混凝土截面形心的距离； y_{cu1} 、 y_{cl1} —预弯梁截面形心到一期混凝土上、下缘的距离； y_{su1} 、 y_{sl1} —预弯梁截面形心到钢梁上、下缘的距离； y_{cu2} 、 y_{cl2} —一期混凝土截面形心到其上、下缘的距离； d_{s1} 、 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：

$$A_1 = A_s + A_c/n_1 \quad (\text{C.0.2-1})$$

$$I_1 = I_s + d_{s1}^2 A_s + d_{cl}^2 A_c/n_1 + I_c/n_1 \quad (\text{C.0.2-2})$$

$$n_1 = E_s/E_{cl} \quad (\text{C.0.2-3})$$

式中： A_1 ——预弯梁的换算截面面积 (mm^2)；

A_c ——一期混凝土的截面面积 (mm^2)；

I_1 ——预弯梁的换算截面惯性矩 (mm^4)；

I_c ——一期混凝土绕自身形心轴的惯性矩 (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

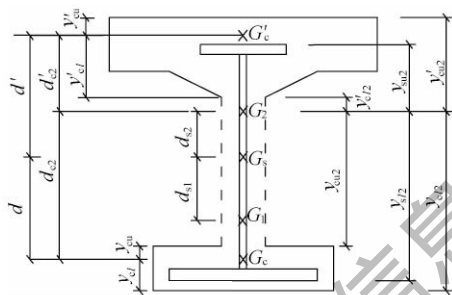


图 C.0.3 预弯组合梁截面参数

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_{s2} 、 y_{s2} —预弯预应力组合梁截面形心至钢梁上、下缘的距离； y'_{c2} 、 y'_{c2} —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_{c2} 、 y_{c2} —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（ mm^2 ）；

I_2 ——预弯组合梁的截面惯性矩（ 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（ mm^2 ）；

I'_c ——二期混凝土截面绕其自身形心轴的惯性矩（ 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：

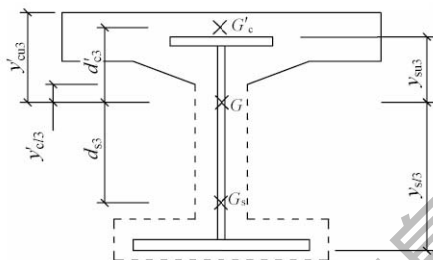


图 C.0.4 不计一期混凝土的截面几何参数

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：

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

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

式中： A_3 ——二期混凝土与钢梁的换算截面面积（ mm^2 ）；

I_3 ——不计一期混凝土的换算截面惯性矩（ 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：

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

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

式中： c ——钢梁上翼板混凝土保护层厚度（ mm ）。

2 截面折算惯性矩 I_e 可由下式计算：

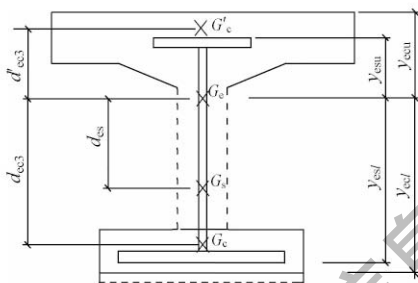


图 C.0.5 折算截面几何参数

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_{es3} 、 d'_{es3} —形心 G_e 至一、二期混凝土截面形心的距离；
 y_{esu} 、 y_{esl} —预弯预应力组合梁折算截面形心到钢梁上、下缘的距离；
 y'_{esu} 、 y'_{esl} —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

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

式中： I_e ——一期混凝土开裂后的折算惯性矩（ mm^4 ）；

I_2 ——预弯组合梁跨中截面惯性矩（ 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（ 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:

$$f_4 = \frac{5M_{s1}L^2}{48E_sI_s} \quad (\text{D. 0. 3-3})$$

其中 M_{s1} 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:

$$f_5 = \frac{5M_{s1}L^2}{48E_sI_s} \quad (\text{D. 0. 3-4})$$

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:

$$f'_6 = \frac{5(M_{d2} + M_m)L^2}{48E_sI_1} \quad (\text{D. 0. 3-5})$$

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:

$$f''_6 = -\frac{5M_mL^2}{48E_sI_2} \quad (\text{D. 0. 4-1})$$

$$f_6 = f'_6 + f''_6 \quad (\text{D. 0. 4-2})$$

2 二期结构重力产生的挠度 f_7 应按下式计算:

$$f_7 = \frac{5M_{d3}L^2}{48E_sI_2} \quad (\text{D. 0. 4-3})$$

3 二期混凝土收缩产生的挠度 f_8 可按下式计算:

$$f_8 = \frac{5M_{s2}L^2}{48E_sI_s} \quad (\text{D. 0. 4-4})$$

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:

$$f_9 = \frac{5M_{s12}L^2}{48E_sI_1} \quad (\text{D. 0. 4-5})$$

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:

$$f_{10} = \frac{5M_{st3}L^2}{48E_s I_3} \quad (\text{D. 0. 4-6})$$

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:

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

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:

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

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:

$$f_4 = \frac{5M_{st1}L^2}{48E_s I_s}, f_9 = \frac{5M_{st2}L^2}{48E_s I_1}, f_{10} = \frac{5M_{st3}L^2}{48E_s I_3} \quad (\text{D. 0. 6})$$

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（ N/mm ）；

I_s ——为钢梁的截面惯性矩 (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：

$$\text{钢梁上、下缘应力: } \sigma_{su3} = \frac{M_{d1}}{I_1} y_{su1}, \sigma_{sl3} = \frac{M_{d1}}{I_1} y_{sl1} \quad (\text{E.0.3-3})$$

$$\text{一期混凝土上、下缘应力: } \sigma_{cu3} = \frac{M_{d1}}{n_1 I_1} y_{cu1}, \sigma_{cl3} = \frac{M_{d1}}{n_1 I_1} y_{cl1} \quad (\text{E.0.3-4})$$

式中： M_{d1} ——由一期混凝土的自重集度产生的跨中弯矩 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)， $M_{d1} = q_1 L^2 / 8$ ；

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：

$$N_{c0} = (M_y - M_{d1}) \frac{A_c d_{cl}}{n_1 I_1} (\text{压力}) \quad (\text{E.0.3-5})$$

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

当 $t=t_1$ 时, 由一期混凝土徐变产生的内力损失为:

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

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

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

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

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

式中: ϕ_t ——混凝土徐变系数, 可取 $\phi_t=0.5$ 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;

α ——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：

$$\sigma_{su5} = \frac{N_{s1}}{A_s} + \frac{M_{s1}}{I_s} y_{su}, \sigma_{st5} = \frac{N_{s1}}{A_s} + \frac{M_{s1}}{I_s} y_{st} \quad (\text{E. 0. 3-14})$$

一期混凝土上、下缘应力：

$$\sigma_{cu5} = \frac{N_{c1}}{A_c} + \frac{M_{c1}}{I_c} y_{cu}, \sigma_{ct5} = \frac{N_{c1}}{A_c} + \frac{M_{c1}}{I_c} y_{ct} \quad (\text{E. 0. 3-15})$$

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

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

$$N_{c1} = -N_{s1} = E_s A_c \epsilon_s f' / n_\phi \quad (\text{E. 0. 3-18})$$

$$M_{c1} = N_{c1} d \frac{-I_c}{I_c + n_\phi I_s} \quad (\text{E. 0. 3-19})$$

$$M_{s1} = N_{c1} d \frac{-n_\phi I_s}{I_c + n_\phi I_s} \quad (\text{E. 0. 3-20})$$

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：

$$\sigma_{su6} = \frac{M_{d2} + M_m}{I_1} y_{su1}, \sigma_{st6} = \frac{M_{d2} + M_m}{I_1} y_{st1} \quad (\text{E. 0. 3-21})$$

一期混凝土上、下缘应力：

$$\sigma_{cu6} = \frac{M_{d2} + M_m}{n_1 I_1} y_{cu1}, \sigma_{ct6} = \frac{M_{d2} + M_m}{n_1 I_1} y_{ct1} \quad (\text{E. 0. 3-22})$$

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:

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

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

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

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

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

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

$$n_\phi = n_1 \left(1 + \frac{2\phi_{1=\infty}}{2}\right), n'_\phi = n_2 \left(1 + \frac{2\phi_{1=\infty}}{2}\right) \quad (\text{E. 0. 4-15})$$

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^2) 及二期混凝土对自身形心的截面惯性矩 (mm^4);

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期、二期混凝土中的应力应按下列公式计算：

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

$$\text{钢梁: } \sigma_{st9} = \frac{N_{st2}}{A_1} + \frac{M_{st2}}{I_1} y_{st1}, \sigma_{s9} = \frac{N_{st2}}{A_1} + \frac{M_{st2}}{I_1} y_{s1} \quad (\text{E. 0. 4-26})$$

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

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：

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

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

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

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

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

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

$$M_{c3} = M_{c0} - M_{ct1} - M_{c1} - M_{c2} - \frac{I_c}{n_1 I_1} M_{d2} - \frac{I_c}{n_1 I_2} M_{d3} - \frac{I_c}{n_1 I_1} M_{st2} \quad (\text{E. 0. 4-34})$$

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)；

α_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：

$$\sigma_{su10} = \frac{N_{st3}}{A_3} + \frac{M_{st3}}{I_3} y_{su3} \cdot \sigma_{s10} = \frac{N_{st3}}{A_3} + \frac{M_{st3}}{I_3} y_{s3} \quad (\text{E. 0. 4-35})$$

一期混凝土应力：

$$\sigma_{cu10} = \frac{N_{ct3}}{A_c} + \frac{M_{ct3}}{I_c} y_{cu} \cdot \sigma_{c10} = \frac{N_{ct3}}{A_c} + \frac{M_{ct3}}{I_c} y_{c1} \quad (\text{E. 0. 4-36})$$

二期混凝土应力：

$$\sigma'_{cu10} = \frac{N_{st3}}{A_3 n_2} + \frac{M_{st3}}{I_3 n_2} y'_{cu3} \cdot \sigma'_{c10} = \frac{N_{st3}}{A_3 n_2} + \frac{M_{st3}}{I_3 n_2} y'_{c3} \quad (\text{E. 0. 4-37})$$

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 σ_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 σ_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:

$$\sigma_{su1} = \frac{M_q}{I_2} y_{su2} \cdot \sigma_{s11} = \frac{M_q}{I_2} y_{s2} \quad (\text{E. 0. 6-1})$$

$$\sigma_{cu1} = \frac{M_q}{n_1 I_2} y_{cu2} \cdot \sigma_{c11} = \frac{M_q}{n_1 I_2} y_{c2} \quad (\text{E. 0. 6-2})$$

$$\sigma'_{cu1} = \frac{M_q}{n_2 I_2} y'_{cu2} \cdot \sigma'_{c11} = \frac{M_q}{n_2 I_2} y'_{c2} \quad (\text{E. 0. 6-3})$$

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:

$$\sigma_{su} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{sui} + \sigma_{su1}, \sigma_{sl} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{sli} + \sigma_{s11} \quad (\text{E. 0. 6-4})$$

$$\sigma_{cu} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{cui} + \sigma_{cu1}, \sigma_{cl} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_{cli} + \sigma_{c11} \quad (\text{E. 0. 6-5})$$

$$\sigma'_{cu} = \sum_{i=1}^{10} \sigma'_{cui} + \sigma'_{cu1}, \sigma'_{cl} = \sum_{i=1}^{10} \sigma'_{cli} + \sigma'_{c11} \quad (\text{E. 0. 6-6})$$

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：

$$\sigma_{su11} = \frac{M_0 + M_{cr}}{I_2} y_{su2} + \frac{(M_q - M_0 - M_{cr})}{I_e} y_{esu} \quad (\text{E. 0. 6-7})$$

$$\sigma_{sl11} = \frac{M_0 + M_{cr}}{I_2} y_{sl2} + \frac{(M_q - M_0 - M_{cr})}{I_e} y_{esl} \quad (\text{E. 0. 6-8})$$

$$\sigma'_{cu11} = \frac{M_0}{n_2 I_2} y'_{cu2} + \frac{(M_q - M_0 - M_{cr})}{n_2 I_e} y'_{ecu} \quad (\text{E. 0. 6-9})$$

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