

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承载能力极限状态计算;6正常使用极限状态计算;7构造要求;8施工。

本标准由住房和城乡建设部负责管理,由深圳市市政设计研究院有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见建议,请寄送深圳市市政设计研究院有限公司(地址:深圳市福田区笋岗西路3007号市政设计大厦,邮政编码:518029)。

本标准主编单位:深圳市市政设计研究院有限公司
河南大建桥梁钢构股份有限公司

本标准参编单位:河南海威工程咨询有限公司

重庆大学

东南大学

福州大学

上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司

河南省交通规划设计研究院股份有限公司

广东省交通规划设计研究院股份有限公司

中交第二公路工程局有限公司

中建交通建设集团有限公司
上海城建市政工程（集团）有限公司
深圳市尚智工程技术咨询有限公司

本标准主要起草人员：陈宜言 姜瑞娟 王用中 吴启明
盖卫明 董桔灿 王 健 陈夏春
田 丰 周 良 常兴文 陈宝春
汤 意 狄 谨 梁立农 万 水
杜会民 雷昌龙 陈永宏 陈立生
刘界鹏 李雪峰 卢绍鸿 林世发
严 盛 陈华利 胡方健 肖玉凤
涂 俊 徐添华 于 芳 何晓晖
易小纬 代 亮 孟 磊 张建勋
本标准主要审查人员：徐恭义 蒋中贵 刘玉擎 姬同庚
刘永健 宗 昕 杜官民 张建东
陶慕轩

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	6
3.1	一般规定	6
3.2	作用及作用效应的计算	7
3.3	结构设计	8
4	材料	12
4.1	混凝土	12
4.2	钢筋	12
4.3	钢材	15
5	承载力极限状态计算	18
5.1	一般规定	18
5.2	波形钢腹板受剪承载力计算	19
5.3	连接件水平受剪承载力计算	21
5.4	连接件抗角隅弯矩计算	24
6	正常使用极限状态计算	27
6.1	体外预应力钢绞线的计算	27
6.2	连接件抗滑移与应力计算	27
6.3	挠度计算	30
7	构造要求	32
7.1	波形钢腹板	32
7.2	体外预应力束	33
7.3	支点节段及组合腹板段	33

7.4 跨间横隔板	34
7.5 连接件	34
8 施工	36
8.1 一般规定	36
8.2 波形钢腹板施工	37
8.3 连接件施工	39
本标准用词说明	41
引用标准名录	42

住房城乡建设部信息公开
浏览专用

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	6
3.1	General Requirements	6
3.2	Calculation of Structure	7
3.3	Design of Structure	8
4	Materials	12
4.1	Concrete	12
4.2	Steel Reinforcement	12
4.3	Structural Steel	15
5	Ultimate Limit States Design	18
5.1	General Requirements	18
5.2	Calculation of Corrugated Steel Webs' Shear Capacity	19
5.3	Calculation of Connectors' Horizontal Shear Capacity	21
5.4	Checking of Connectors' Corner Moment Resistance	24
6	Serviceability Limit States Design	27
6.1	Calculation of External Prestressing Steel Strands	27
6.3	Calculation of Connectors' Slip Resistance and Stress	27
6.4	Calculation of Deflection	30
7	Detailing Requirements	32
7.1	Corrugated Steel Webs	32
7.2	External Prestressing Tendons	33
7.3	Segments at Supports and Segments with Composite Webs	33

7.4 Inner Diaphragms	34
7.5 Connectors	34
8 Construction	36
8.1 General Requirements	36
8.2 Construction of Corrugated Steel Webs	37
8.3 Construction of Shear Connectors	39
Explanation of Wording in This Standard	41
List of Quoted Standards	42

住房和城乡建设部信息公开
浏览专用

1 总 则

1.0.1 为规范波形钢腹板组合梁桥的设计和施工，做到安全、耐久、适用、环保、经济和美观，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于道路工程中波形钢腹板组合梁桥的设计和施工。

1.0.3 波形钢腹板组合梁桥设计和施工除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

住房城乡建设部信息中心
浏览专用

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 波形钢腹板组合梁桥 composite girder bridges with corrugated steel webs

腹板为波形钢板并通过抗剪连接件使腹板与混凝土顶板、底板共同受力的钢-混凝土组合梁桥。

2.1.2 局部屈曲 local buckling

波形钢腹板在一个平板条内（折痕与折痕之间）屈曲的形式。

2.1.3 整体屈曲 global buckling

波形钢腹板在两个及以上连续的平板条内（折痕与折痕之间）屈曲的形式。

2.1.4 组合屈曲 combined buckling

局部屈曲与整体屈曲复合形成的屈曲形式。

2.1.5 角隅弯矩 corner moment

恒载与活载作用下，在波形钢腹板与箱梁顶板、底板连接处产生的绕该处纵轴线的弯矩。

2.1.6 连接件 connector

用于连接波形钢腹板与混凝土顶板、底板并传递两者之间的纵向剪力、角隅弯矩，抵抗两者相对滑移、分离，保证两者共同工作的部件。

2.1.7 开孔钢板连接件 plate shear connector with openings

通过开孔钢板与孔内横向贯穿钢筋使混凝土顶板或底板与波形钢腹板共同受力的连接部件。

2.1.8 角钢连接件 angle iron shear connector

通过角钢、U形钢筋、纵向贯穿钢筋使混凝土顶板或底板

与波形钢腹板共同受力的连接部件。

2.1.9 埋入式连接件 embedded shear connector

在波形钢腹板上缘或下缘焊接纵向接合钢筋，开孔，设横向贯穿钢筋并埋入混凝土中一定深度，形成使波形钢腹板与混凝土顶板或底板共同受力的连接部件。

2.1.10 混凝土剪力销 concrete shear pin

把混凝土注入开孔的钢板，使孔中填充的混凝土与横向贯穿钢筋共同起抗剪作用的部件。

2.1.11 贯穿钢筋 steel bar through pin-hole

穿过开孔钢板或角钢竖肢销孔的钢筋。

2.1.12 纵向接合钢筋 longitudinal bonding steel bar

埋入式连接件中焊于波形钢腹板直幅段上的纵向钢筋。

2.1.13 钢翼缘板 flange plate

通过焊缝将连接件与波形钢腹板顶部或底部连接的平钢板。

2.1.14 内衬混凝土 concrete liner

在波形钢腹板组合梁桥支点附近一定范围内的波形钢腹板内侧设置的，并用连接件与波形钢腹板紧密连接的钢筋混凝土构件。

2.1.15 组合腹板段 girder segment with composite webs

设置内衬混凝土的波形钢腹板组合梁桥节段。

2.2 符 号

2.2.1 材料性能

E ——钢材的弹性模量；

E_c ——混凝土的弹性模量；

E_s ——普通钢筋的弹性模量；

E_p ——预应力钢筋的弹性模量；

f_{ck} ——混凝土轴心抗压强度标准值；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；

f_{cd}^w ——对接焊缝抗压强度设计值；

f_d —— 钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；
 f_{fd}^w —— 角焊缝的抗拉、抗压和抗剪强度设计值；
 f_{pd} —— 预应力钢筋抗拉强度设计值；
 f'_{pd} —— 预应力钢筋抗压强度设计值；
 f_{pk} —— 预应力钢筋抗拉强度标准值；
 f_{sd} —— 普通钢筋抗拉强度设计值；
 f'_{sd} —— 普通钢筋抗压强度设计值；
 f_{sk} —— 普通钢筋抗拉强度标准值；
 f_{stk} —— 普通钢筋极限强度标准值；
 f_{td} —— 混凝土轴心抗拉强度设计值；
 f_{td}^w —— 对接焊缝抗拉强度设计值；
 f_{tk} —— 混凝土轴心抗拉强度标准值；
 f_u —— 栓钉材料的极限强度设计值；
 f_{vd} —— 钢材抗剪强度设计值；
 f_{vd}^w —— 对接焊缝抗剪强度设计值；
 f_y —— 钢材屈服强度；
 G —— 钢材的剪切变形模量；
 G_c —— 混凝土的剪切变形模量。

2.2.2 作用效应和抗力

M_d —— 弯矩设计值；
 Q_d^e —— 连接件单位长度水平剪力设计值；
 Q_k^e —— 作用标准组合下连接件的单位长度水平剪力设计值；
 T_d —— 扭矩设计值；
 V_d —— 剪力设计值；
 V_p —— 预应力的竖向分力；
 V_{sa} —— 单个开孔钢板连接件混凝土剪力销的水平剪力限值；
 V_u —— 连接件水平受剪承载力设计值；
 σ_{pe} —— 体外预应力束的有效预应力；
 σ_{pu} —— 体外预应力束的极限应力设计值；
 τ_{cr} —— 组合屈曲临界剪应力；

$\tau_{cr,G}$ —— 整体屈曲临界剪应力；

$\tau_{cr,L}$ —— 局部屈曲临界剪应力。

2.2.3 几何参数

a_w —— 波形钢腹板直幅段长度；

b_w —— 波形钢腹板斜幅段投影长度；

c_w —— 波形钢腹板斜幅段长度；

d_w —— 波形钢腹板波高；

h_w —— 波形钢腹板高度；

I_x —— 单位长度波形钢腹板绕顺桥向形心轴的惯性矩；

I_y —— 单位宽度波形钢腹板的抗弯惯性矩；

J_t —— 扭转惯性矩；

t_w —— 波形钢腹板厚度。

2.2.4 计算系数及其他

k —— 波形钢腹板剪切屈曲系数；

β —— 波形钢腹板整体嵌固系数；

γ —— 内衬混凝土的剪切分担率；

δ —— 波形钢腹板波高板厚比；

η —— 波形钢腹板形状系数。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 波形钢腹板组合梁桥主体结构的设计使用年限应按现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 确定。

3.1.2 波形钢腹板组合梁桥应按下列极限状态进行设计：

1 承载能力极限状态：对应于桥梁结构或其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态。

2 正常使用极限状态：对应于桥梁结构或其构件达到正常使用或耐久性的某项限值的状态。

3.1.3 波形钢腹板组合梁桥应根据下列设计状况进行相应的极限状态设计：

1 持久状况：桥梁建成后承受结构自重、车辆荷载等持续时间较长的状况，该状况应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计。

2 短暂状况：在波形钢腹板制作、运送和桥梁架设过程中承受临时荷载的状况，该状况应进行承载能力极限状态设计，必要时进行正常使用极限状态设计。

3 地震状况：在桥梁使用过程中遭受地震时的状况，该状况应进行承载能力极限状态设计。

4 偶然状况：在桥梁使用过程中偶然出现的状况，该状况只需进行承载能力极限状态设计。

3.1.4 波形钢腹板组合梁桥设计安全等级的划分应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的规定。

3.1.5 波形钢腹板组合梁桥的工程质量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 的规定。

3.1.6 波形钢腹板成型、制造、试验、检验等技术要求应符

合现行行业标准《组合结构桥梁用波形钢腹板》JT/T 784 的规定。

3.1.7 波形钢腹板的防腐涂装应符合现行行业标准《城镇桥梁钢结构防腐蚀涂装工程技术规程》CJJ/T 235 的规定。

3.2 作用及作用效应的计算

3.2.1 波形钢腹板组合梁桥设计时采用的作用及作用效应组合应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的规定。

3.2.2 波形钢腹板和连接件的承载能力极限状态计算应采用作用的基本组合，连接件的正常使用极限状态计算应采用作用的标准组合。

3.2.3 波形钢腹板组合梁桥温度梯度效应计算时可仅计入顶板的温度变化。

3.2.4 波形钢腹板组合梁桥汽车荷载冲击力的计算可按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 执行，桥梁竖向基频的计算可计入剪切变形的影响。

3.2.5 桥面板车辆荷载效应的计算应符合下列规定：

1 当桥面板的计算跨径不大于 6m 时，桥面板可根据支撑情况按单向板、悬臂板或双向板进行计算，也可使用平面框架模型进行分析。车辆荷载的分布宽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 的规定。

2 当采用平面框架模型进行分析时，截面的宽度可取 1 个波形钢腹板波长，波形钢腹板与顶板、底板结合部可作刚接处理，波形钢腹板截面可根据一个波长的面积和抗弯刚度等效成工字形截面。

3 当箱内桥面板按简支板计算时，汽车荷载作用下其跨中弯矩宜取相同计算跨径的简支板跨中弯矩的 90%。

4 对于多室截面、多箱截面、桥面板计算跨径超过 6m 的单箱单室截面以及带有横梁的桥面板，宜采用三维有限元方法计算。

3.3 结构设计

3.3.1 波形钢腹板组合梁宜按全预应力或 A 类预应力构件进行设计。

3.3.2 波形钢腹板组合梁桥应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定进行组合梁和混凝土构件的承载能力极限状态计算和正常使用极限状态计算。

3.3.3 波形钢腹板应按本标准第 5 章进行抗剪强度和剪切稳定验算。连接件应按本标准第 5、6 章进行水平受剪承载力、抗角隅弯矩和抗滑移与应力计算。

3.3.4 波形钢腹板组合梁桥可按下列假定进行结构整体分析：

1 波形钢腹板与顶板、底板共同工作，不会发生相对滑移或连接件破坏；

2 波形钢腹板不承受顺桥向轴向力，弯曲时弯矩仅由顶板与底板承担；

3 组合梁弯曲时符合平截面假定；

4 剪力由波形钢腹板承担且波形钢腹板剪应力沿高度方向均匀分布。

3.3.5 波形钢腹板组合梁桥应根据结构形式、断面类型以及荷载状况选用合适的分析理论和计算模型进行结构分析。

3.3.6 当波形钢腹板组合梁桥采用杆系模型进行结构分析时，组合梁截面面积和绕形心轴的惯性矩计算可仅计入顶板与底板组成的有效截面（图 3.3.6）。

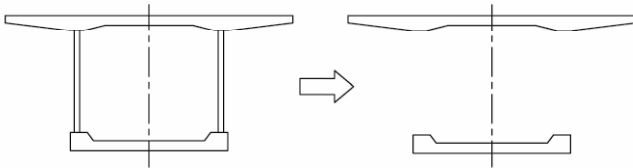


图 3.3.6 波形钢腹板组合梁截面面积、绕形心轴惯性矩计算图示

3.3.7 扭转效应计算时，多室截面可仅计入顶板、底板和最外侧波形钢腹板的抗扭作用，按单箱单室截面计算扭转惯性矩。单箱单室波形钢腹板组合梁的扭转惯性矩（图 3.3.7）可按式计算：

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\frac{h_0}{n_s t_1 (1 + \alpha)} + \frac{h_0}{n_s t_2 (1 + \alpha)} + \frac{b_0}{t_3 (1 - \alpha)} + \frac{b_0}{t_4 (1 - \alpha)}} \quad (3.3.7)$$

式中： J_t ——扭转惯性矩（ mm^4 ）；
 A_m ——箱形薄壁中心线所围面积（ mm^2 ）；
 n_s ——波形钢腹板和混凝土的剪切变形模量比；
 t_1 、 t_2 ——波形钢腹板厚度（ mm ）；
 t_3 、 t_4 ——顶板、底板厚度（ mm ）；
 α ——修正系数， $\alpha = 0.4h_0/b_0 - 0.06$ ，且当 $h_0/b_0 \leq 0.2$ 时 $\alpha = 0$ ；
 h_0 ——顶板、底板中线间的距离（ mm ）；
 b_0 ——波形钢腹板中线间的距离（ mm ）。

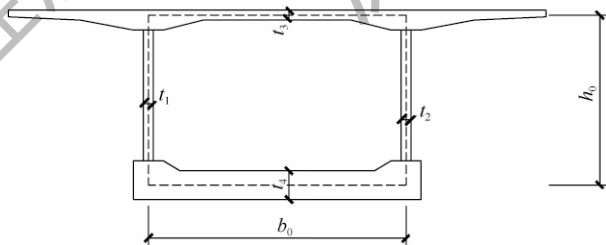


图 3.3.7 单箱单室波形钢腹板组合梁扭转惯性矩计算图示

3.3.8 当用单梁进行受力分析时，除组合腹板段和墩顶节段之外的其他节段的顶板、底板有效宽度的计算可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 执行。

3.3.9 中支点墩顶节段及与之相邻的组合腹板段宜采用三维有限元模型进行局部分析。三维有限元模型中,采用的作用与作用组合应根据极限状态设计的类别按现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 采用。

3.3.10 对于弯、斜、宽波形钢腹板组合梁桥,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 的规定进行顶板、底板的斜截面抗裂验算,验算时顶板、底板斜截面主拉应力应计入剪切剪应力和扭转剪应力,扭转剪应力的计算应采用作用的标准组合。

3.3.11 内衬混凝土应满足斜截面抗裂要求以及受剪承载力要求,验算时其所受的剪力可根据剪切分担率按下列公式计算:

$$V_n = \gamma V \quad (3.3.11-1)$$

$$\gamma = G_c A_c / (G_c A_c + G A_w) \quad (3.3.11-2)$$

$$A_w = h_w t_w \eta \quad (3.3.11-3)$$

$$\eta = (a_w + b_w) / (a_w + c_w) \quad (3.3.11-4)$$

式中: V_n ——内衬混凝土剪力设计值 (N);

γ ——内衬混凝土的剪切分担率;

V ——截面剪力设计值 (N);

G_c ——混凝土剪切变形模量 (MPa);

G ——波形钢腹板剪切变形模量 (MPa);

A_c ——内衬混凝土面积 (mm^2);

A_w ——波形钢腹板的等效面积 (mm^2);

h_w ——波形钢腹板垂直方向的高度 (mm);

t_w ——波形钢腹板的厚度 (mm);

η ——波形钢腹板形状系数;

a_w ——波形钢腹板直幅段长度 (mm), 见图 3.3.11;

b_w ——波形钢腹板斜幅段投影长度 (mm), 见图 3.3.11;

c_w ——波形钢腹板斜幅段长度 (mm), 见图 3.3.11。

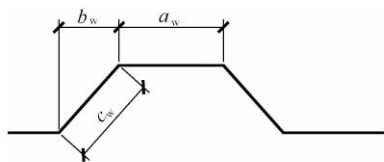


图 3.3.11 波形钢腹板形状图示

3.3.12 波形钢腹板剪应力计算时，宜按承受 100% 截面剪力进行设计，可不考虑顶板、底板对剪力的分担作用。

3.3.13 波形钢腹板组合梁桥中混凝土构件的构造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。

3.3.14 波形钢腹板间的焊接连接可采用焊透的对接焊缝或角焊缝，其质量等级不应低于二级。波形钢腹板与钢翼缘板的焊接连接应采用焊透的 T 形对接与角接组合焊缝，其质量等级应为一级。连接件开孔钢板与翼缘板的焊接连接可采用角焊缝或部分焊透的 T 形对接与角接组合焊缝。

3.3.15 埋入式连接件中接合钢筋与波形钢腹板的连接焊缝的质量等级应为二级。

3.3.16 大跨径波形钢腹板组合梁桥采用悬臂施工法施工时，其节段划分长度宜为波形钢腹板波形长度的整数倍。

4 材 料

4.1 混 凝 土

4.1.1 混凝土的材料参数应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中的规定取值。

4.1.2 波形钢腹板组合梁桥上部结构混凝土强度等级不宜低于 C50。

4.2 钢 筋

4.2.1 波形钢腹板组合梁桥中所用的普通钢筋及预应力钢筋应按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 的规定采用。

4.2.2 普通钢筋的抗拉强度标准值 f_{sk} 、极限强度标准值 f_{stk} 和预应力钢筋的抗拉强度标准值 f_{pk} ，应分别按表 4.2.2-1、表 4.2.2-2 采用。

表 4.2.2-1 普通钢筋强度标准值

钢筋种类	符号	公称直径 d (mm)	f_{sk} (MPa)	f_{stk} (MPa)
HPB300	Φ	6~22	300	420
HRB400、HRBF400、RRB400	Φ 、 Φ^E 、 Φ^R	6~50	400	540
HRB500、HRBF500	Φ 、 Φ^E	6~50	500	630

表 4.2.2-2 预应力钢筋抗拉强度标准值

种类		符号	公称直径 d (mm)	f_{pk} (MPa)
钢绞线	1×2 (两股)	Φ^S	8、10	1470
				1570
				1720
				1860
				1960

续表 4.2.2-2

种类		符号	公称直径 d (mm)	f_{pk} (MPa)	
钢绞线	1×2 (两股)	ϕ^s	12	1470	
				1570	
				1720	
	1×3 (三股)		8.6、10.8、12.9	1860	
				1470	
				1570	
				1720	
				1860	
	1×7 (七股)		9.5、12.7	1960	
				1720	
				1860	
				1960	
				15.2	1470
					1570
					1670
1720					
1860					
1960					
17.8		1720			
		1860			
精轧螺纹钢		ϕ^T	18、25、32、40、50	785	
				930	
				1080	

4.2.3 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 4.2.3-1 采用；预应力钢筋的抗拉强度设计值 f_{pd} 和抗压强度设计值 f'_{pd} 应按表 4.2.3-2 采用。

表 4.2.3-1 普通钢筋抗拉与抗压强度设计值 (MPa)

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

注：1 钢筋混凝土轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于 330MPa 时，仍按 330MPa 取用；在斜截面受剪承载力、受扭承载力和受冲切承载力计算中，垂直于纵向受力钢筋的箍筋或间接钢筋等横向钢筋的抗拉强度设计值大于 330MPa 时，仍应取 330MPa；

2 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。

表 4.2.3-2 预应力钢筋抗拉与抗压强度设计值 (MPa)

钢筋种类		f_{pd}	f'_{pd}
钢绞线 1×2 (两股) 1×3 (三股) 1×7 (七股)	$f_{pk} = 1470$	1000	390
	$f_{pk} = 1570$	1070	
	$f_{pk} = 1670$	1140	
	$f_{pk} = 1720$	1170	
	$f_{pk} = 1860$	1260	
	$f_{pk} = 1960$	1330	
精轧螺纹钢	$f_{pk} = 785$	650	400
	$f_{pk} = 930$	770	
	$f_{pk} = 1080$	890	

4.2.4 普通钢筋的弹性模量 E_s 和预应力钢筋的弹性模量 E_p 应按表 4.2.4 采用。

表 4.2.4 钢筋的弹性模量 (MPa)

钢筋种类	E_s	钢筋种类	E_p
HPB300	2.10×10^5	钢绞线	1.95×10^5
HRB400、RRB400、HRB500、 HRBF400、HRBF500	2.00×10^5	精轧螺纹钢	2.00×10^5

4.3 钢 材

4.3.1 钢材应满足强度、塑性、韧性和可焊性的要求，选用时应综合根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、应力状态、连接方法、钢材厚度及工作环境等因素确定。

4.3.2 波形钢腹板和钢翼缘板宜采用碳素结构钢或低合金高强度结构钢，其质量应分别符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 的规定。对耐腐蚀有特殊要求时，宜采用耐候结构钢，其质量应符合现行国家标准《耐候结构钢》GB/T 4171、《桥梁用结构钢》GB/T 714 的规定。

4.3.3 当焊接结构的板厚较厚或承受沿板厚方向拉力作用时，焊接结构应采用 Z 向钢，其质量应符合现行国家标准《厚度方向性能钢板》GB/T 5313 的规定。

4.3.4 钢材的冲击韧性与质量等级应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定。

4.3.5 钢板（材）的主要强度指标应按表 4.3.5 采用。

表 4.3.5 钢板（材）强度指标（MPa）

牌号	板厚 (mm)	屈服强度 f_y	强度设计值	
			抗压、抗拉和抗弯 f_d	抗剪 f_{vd}
Q235	≤ 16	235	190	110
	(16, 40]	225	180	105
	(40, 100]	215	170	100
Q345	≤ 16	345	275	160
	(16, 40]	335	270	155
	(40, 63]	325	260	150
	(63, 80]	315	250	145
	(80, 100]	305	245	140

续表 4.3.5

牌号	板厚 (mm)	屈服强度 f_y	强度设计值	
			抗压、抗拉和抗弯 f_d	抗剪 f_{vd}
Q390	≤ 16	390	310	180
	(16, 40]	370	295	170
	(40, 63]	350	280	160
	(63, 100]	330	265	150
Q420	≤ 16	420	335	195
	(16, 40]	400	320	185
	(40, 63]	380	305	175
	(63, 100]	360	290	165

4.3.6 钢板(材)的物理性能指标可按表 4.3.6 采用。

表 4.3.6 钢板(材)的物理性能指标

弹性模量 E (MPa)	剪切变形模量 G (MPa)	线膨胀系数 α ($1/^\circ\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	泊松比 ν
2.06×10^5	7.90×10^4	1.20×10^{-5}	7.85×10^3	0.31

4.3.7 焊缝强度设计值应按表 4.3.7 采用。

表 4.3.7 焊缝强度设计值 (MPa)

焊接方法和 焊条型号	构件钢材		对接焊缝				角焊缝
	牌号	厚度 (mm)	抗压 f_{cd}^w	焊缝质量为下列 等级时抗拉 f_{td}^w		抗剪 f_{vd}^w	抗拉、抗压和抗剪 f_{td}^w
				一级、二级	三级		
自动焊、半自动焊和 E43 型焊条的手工焊	Q235	≤ 16	190	190	160	110	140
		(16, 40]	180	180	155	105	
		(40, 100]	170	170	145	100	

续表 4.3.7

焊接方法和 焊条型号	构件钢材		对接焊缝				角焊缝	
	牌号	厚度 (mm)	抗压 f_{cd}^w	焊缝质量为下列 等级时抗拉 f_{td}^w			抗剪 f_{vd}^w	抗拉、抗 压和抗剪 f_{td}^w
				一级、二级	三级			
自动焊、半自 动焊和 E50 型焊 条的手工焊	Q345	≤ 16	275	275	235	160	175	
		(16, 40]	270	270	230	155		
		(40, 63]	260	260	220	150		
		(63, 80]	250	250	215	145		
		(80, 100]	245	245	210	140		
自动焊、半自 动焊和 E55 型焊 条的手工焊	Q390	≤ 16	310	310	265	180	200	
		(16, 40]	295	295	250	170		
		(40, 63]	280	280	240	160		
		(63, 100]	265	265	225	150		
	Q420	≤ 16	335	335	285	195	200	
		(16, 40]	320	320	270	185		
		(40, 63]	305	305	260	175		
		(63, 100]	290	290	245	165		

4.3.8 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合现行国家标准《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228、《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229、《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230、《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231、《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632 的规定。

4.3.9 栓钉连接件的材料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。

4.3.10 高强度螺栓的预拉力与摩擦面抗滑移系数可按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 采用。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.1 波形钢腹板组合梁桥结构重要性系数应根据结构设计安全等级采用，对应于设计安全等级一级、二级、三级应分别取 1.1、1.0、0.9。

5.1.2 当采用波形钢腹板工字梁作为施工承重构件的工法施工时，应对波形钢腹板工字梁施工阶段的强度和稳定性进行计算。

5.1.3 当弯桥采用波形钢腹板组合梁时，应进行受扭承载力验算。

5.1.4 波形钢腹板组合梁弯桥和独墩桥上部结构应按式(5.1.4)进行抗倾覆计算，同时在作用标准组合下单向受压支座不应处于脱空状态：

$$\gamma_{qf} = S_{Gk}/S_{Qk} \geq 2.5 \quad (5.1.4)$$

式中： γ_{qf} ——抗倾覆稳定系数；

S_{Gk} ——自重作用标准值对桥梁倾覆轴产生的抗倾覆力矩 (kN·m)，倾覆轴可取最不利支座的连线；

S_{Qk} ——汽车荷载 (含冲击作用) 标准值对桥梁倾覆轴产生的倾覆力矩 (kN·m)。

5.1.5 波形钢腹板组合梁桥的体内、体外预应力钢筋应作为抗拉钢筋进行截面抗力计算，其中体外预应力钢筋的极限应力设计值应采用有效预应力与应力增量之和，且不得超过材料强度设计值。

5.1.6 波形钢腹板间的角焊缝连接、高强螺栓连接以及连接件开孔钢板与翼缘板间的角焊缝连接、部分焊透的 T 形对接与角接组合焊缝连接，应按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定进行强度验算。

5.1.7 波形钢腹板与钢翼缘板间的对接与角接组合焊缝连接应按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定进行疲劳验算。

5.2 波形钢腹板受剪承载力计算

5.2.1 波形钢腹板的剪应力应同时计入剪力、扭矩以及预应力的竖向分力产生的效应。其中剪力应包括预应力的二次效应，扭矩可取汽车荷载最大剪力、最不利偏载情况下的组合设计值。预应力的分项系数：当预应力效应对波形钢腹板受剪承载力不利时应取 1.2，有利时应取 1.0。

5.2.2 波形钢腹板的承载能力极限状态抗剪强度应按下列公式计算：

$$\gamma_0 (\tau_{\text{md}} + \tau_{\text{td}}) \leq f_{\text{vd}} \quad (5.2.2-1)$$

$$\tau_{\text{md}} = \frac{V_{\text{d}} - V_{\text{p}}}{h_{\text{w}} t_{\text{w}}} \quad (5.2.2-2)$$

$$\tau_{\text{td}} = \frac{T_{\text{d}}}{2A_{\text{m}} t_{\text{w}} (1 + \alpha)} \quad (5.2.2-3)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数；

f_{vd} ——波形钢腹板抗剪强度设计值（MPa）；

τ_{md} ——剪力与预应力的竖向分力产生的剪应力设计值（MPa）；

τ_{td} ——扭矩产生的剪应力设计值（MPa）；

V_{d} ——计算截面单块波形钢腹板的剪力设计值（N）；

V_{p} ——计算截面单块波形钢腹板的预应力一次效应的竖向分力标准值（N）；

T_{d} ——计算截面的扭矩设计值（N·mm）；

A_{m} ——箱形薄壁中心线所围面积（mm²）；

t_{w} ——波形钢腹板的厚度（mm）；

h_{w} ——波形钢腹板垂直方向的高度，对于高强度螺栓连接应考虑螺栓孔的削弱；

α ——修正系数, $\alpha = 0.4h_0/b_0 - 0.06$, 当 $h_0/b_0 \leq 0.2$ 时 $\alpha = 0$;

h_0 ——顶板、底板中线间的距离 (mm);

b_0 ——波形钢腹板中线间的距离 (mm)。

5.2.3 波形钢腹板的承载能力极限状态剪切稳定应按下列公式计算:

$$\gamma_0(\tau_{\text{md}} + \tau_{\text{td}}) \leq \tau_{\text{cr}} \quad (5.2.3-1)$$

$$\tau_{\text{cr}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_{\text{cr,L}}^4} + \frac{1}{\tau_{\text{cr,G}}^4}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad (5.2.3-2)$$

式中: τ_{cr} ——波形钢腹板组合屈曲临界剪应力 (MPa);

$\tau_{\text{cr,L}}$ ——波形钢腹板局部屈曲临界剪应力 (MPa);

$\tau_{\text{cr,G}}$ ——波形钢腹板整体屈曲临界剪应力 (MPa)。

5.2.4 波形钢腹板局部屈曲临界剪应力应按下列公式计算:

$$\begin{cases} \tau_{\text{cr,L}} = f_{\text{vd}} & \lambda_{\text{s,L}} \leq 0.6 \\ \tau_{\text{cr,L}} = [1 - 0.614 \times (\lambda_{\text{s,L}} - 0.6)] \cdot f_{\text{vd}} & 0.6 < \lambda_{\text{s,L}} \leq \sqrt{2} \end{cases} \quad (5.2.4-1)$$

$$\lambda_{\text{s,L}} = \sqrt{f_{\text{vd}}^e / \tau_{\text{cr,L}}^e} \quad (5.2.4-2)$$

$$\tau_{\text{cr,L}}^e = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \quad (5.2.4-3)$$

$$k = 4 + 5.34 (h_w/e_w)^2 \quad (5.2.4-4)$$

式中: f_{vd} ——波形钢腹板抗剪强度设计值 (MPa);

$\lambda_{\text{s,L}}$ ——局部屈曲参数, 应小于 $\sqrt{2}$;

$\tau_{\text{cr,L}}^e$ ——弹性局部屈曲临界剪应力 (MPa);

k ——波形钢腹板的局部屈曲系数;

E ——波形钢腹板的弹性模量 (MPa);

ν ——波形钢腹板的泊松比;

t_w ——波形钢腹板的厚度 (mm);

h_w ——波形钢腹板垂直方向的高度 (mm);

e_w ——波形钢腹板直幅段长度与斜幅段长度的较大值

(mm), 应小于 h_w 。

5.2.5 波形钢腹板整体屈曲临界剪应力应按下列公式计算:

$$\begin{cases} \tau_{cr,G} = f_{vd} & \lambda_{s,G} \leq 0.6 \\ \tau_{cr,G} = [1 - 0.614 \times (\lambda_{s,G} - 0.6)] \cdot f_{vd} & 0.6 < \lambda_{s,G} \leq \sqrt{2} \end{cases} \quad (5.2.5-1)$$

$$\lambda_{s,G} = \sqrt{f_{vd} / \tau_{cr,G}^e} \quad (5.2.5-2)$$

$$\tau_{cr,G}^e = \frac{36\beta (EI_y)^{1/4} (EI_x)^{3/4}}{h_w^2 t_w} \quad (5.2.5-3)$$

$$I_x = t_w^3 (\delta^2 + 1) / (6\eta) \quad (5.2.5-4)$$

$$I_y = \frac{t_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5.2.5-5)$$

式中: $\lambda_{s,G}$ ——整体屈曲参数, 应小于 $\sqrt{2}$;

$\tau_{cr,G}^e$ ——弹性整体屈曲临界剪应力 (MPa);

β ——波形钢腹板整体嵌固系数, 取 1.0;

I_x ——单位长度波形钢腹板绕顺桥向形心轴的惯性矩 (mm^3);

I_y ——单位宽度波形钢腹板的抗弯惯性矩 (mm^3);

δ ——波形钢腹板波高板厚比, 取 $\delta = d_w / t_w$, d_w 为波形钢腹板波高;

η ——波形钢腹板形状系数。

5.3 连接件水平受剪承载力计算

5.3.1 对于单箱单室或多箱单室截面, 波形钢腹板与顶板、底板连接处的单位长度水平剪力可按下式计算:

$$Q_d^e = \frac{(V_d - V_p)S}{2I} \quad (5.3.1)$$

式中: Q_d^e ——波形钢腹板与顶板、底板连接处的单位长度水平剪力设计值 (N/mm);

V_d ——一个箱的截面竖向剪力设计值 (N);

V_p ——预应力一次效应的竖向分力标准值 (N);

S ——顶板或底板对截面中性轴的面积矩 (mm^3);

I ——截面的惯性矩 (mm^4)。

5.3.2 波形钢腹板与顶板、底板的连接件的受剪承载力应符合下式要求:

$$\gamma_0 Q_d^c \leq V_u / s \quad (5.3.2)$$

式中: V_u ——连接件的水平受剪承载力设计值 (N), 按本标准第 5.3.3 条~第 5.3.7 条计算;

s ——连接件顺桥向间距 (mm), 对于埋入式连接件取 0.5 倍波形钢腹板波长; 对于开孔钢板连接件取开孔钢板顺桥向孔间距, 对于栓钉连接件取栓钉顺桥向间距, 对于角钢连接件取角钢顺桥向间距。

5.3.3 栓钉连接件的水平受剪承载力设计值可按下式计算:

$$V_u = \min\{0.43nA_s \sqrt{E_c f_{cd}}, 0.7nA_s f_u\} \quad (5.3.3)$$

式中: n ——栓钉连接件的排数, $n \leq 4$;

A_s ——栓钉截面面积 (mm^2);

E_c ——混凝土弹性模量 (MPa);

f_u ——栓钉材料的极限强度设计值 (MPa)。

5.3.4 双开孔钢板连接件的水平受剪承载力设计值 V_u 应取混凝土剪力销受剪承载力设计值、混凝土剪力销受劈裂承载力设计值以及开孔钢板孔间受剪承载力设计值的最小值, 并应符合下列规定:

1 混凝土剪力销受剪承载力设计值应按下式计算:

$$V_{ul} = n[1.38(d_p^2 - d_s^2)f_{cd} + 1.24d_s^2 f_{sd}] \quad (5.3.4-1)$$

式中: V_{ul} ——混凝土剪力销受剪承载力设计值 (N);

d_p ——开孔钢板孔径 (mm);

d_s ——贯穿钢筋直径 (mm);

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值 (MPa);

f_{sd} ——贯穿钢筋抗拉强度设计值 (MPa);

n ——系数, 当开孔钢板间距大于其高度的 1.5 倍时取 2。

2 混凝土剪力销受劈裂承载力设计值应按下式计算：

$$V_{u2} = 7.5n\gamma_c f_{cd} d_p t \quad (5.3.4-2)$$

式中： V_{u2} ——混凝土剪力销受劈裂承载力设计值（N）；

γ_c ——混凝土强度系数，取 1.3；

t ——开孔钢板厚度（mm）。

3 开孔钢板孔间受剪承载力设计值应按下式计算：

$$V_{u3} = \frac{5}{3} n f_{vd} d_j t \quad (5.3.4-3)$$

式中： V_{u3} ——开孔钢板孔间受剪承载力设计值（N）；

f_{vd} ——开孔钢板抗剪强度设计值（MPa）；

d_j ——开孔钢板的孔净距（mm）。

5.3.5 单开孔钢板与栓钉组合连接件的水平受剪承载力设计值 V_u 可取单个开孔钢板连接件与栓钉受剪承载力设计值之和，其中单个开孔钢板连接件的承载力应按本标准式（5.3.4-1）～式（5.3.4-3）计算；三个公式中 n 应取 1.0，承载力结果应取 V_{u1} 、 V_{u2} 、 V_{u3} 的最小值；栓钉受剪承载力应按本标准式（5.3.3）计算。

5.3.6 埋入式连接件应分别满足混凝土齿键和混凝土剪力销的受剪承载力要求，混凝土齿键的受剪承载力应按下式计算，混凝土剪力销的受剪承载力应按本标准式（5.3.4-1）计算：

$$V_u = f_{cd} A_1 + \mu f_{sd} A_s \quad (5.3.6)$$

式中： A_1 ——波形钢腹板斜幅段在横桥向的投影面积（mm²）；

μ ——系数，取 1.0；

f_{sd} ——接合钢筋的抗拉强度设计值（MPa）；

A_s ——接合钢筋的截面面积（mm²）。

5.3.7 角钢连接件的水平受剪承载力可按下式计算：

$$V_u = \gamma_c f_{cd} A_c / 1.5 \quad (5.3.7)$$

式中： A_c ——角钢承压面积（见图 5.3.7）（mm²）。

5.3.8 角钢连接件中，角钢与钢翼缘板的连接焊缝应进行水平受剪承载力验算，连接焊缝承受的水平剪力可按下式计算：

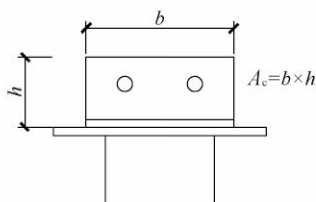


图 5.3.7 角钢连接件承压面积计算示意

$$F_h = sQ_d^c \quad (5.3.8)$$

式中： F_h ——角钢与钢翼缘板的连接焊缝承受的水平剪力设计值 (N)；

s ——角钢连接件顺桥向间距 (mm)。

5.4 连接件抗角隅弯矩计算

5.4.1 当采用双开孔钢板连接件、单开孔钢板与栓钉组合连接件、栓钉连接件或角钢连接件时，应进行抗角隅弯矩计算。

5.4.2 双开孔钢板连接件承受的角隅弯矩 (图 5.4.2) 应符合下式要求：

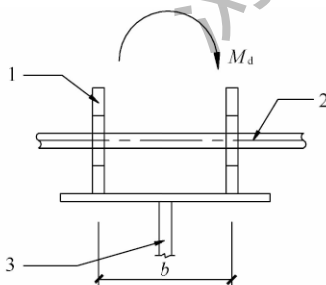


图 5.4.2 作用于双开孔钢板连接件的角隅弯矩

1—开孔钢板；2—贯穿钢筋；3—波形钢腹板

$$M_d \leq nbV_u \quad (5.4.2)$$

式中： M_d ——角隅弯矩设计值 ($N \cdot mm$)；

n ——与 M_d 对应板宽内的单排开孔钢板的孔数量；

b ——开孔板的间距 (mm);

V_u ——单个开孔钢板连接件受剪承载力设计值, 取 V_{u1} 、 V_{u2} 的较小值, V_{u1} 、 V_{u2} 按本标准式 (5.3.4-1)、式 (5.3.4-2) 计算, n 取 1.0。

5.4.3 单开孔钢板与栓钉组合连接件、栓钉连接件承受的角隅弯矩 (图 5.4.3) 应符合下列公式要求:

$$M_d \leq nbT_d \quad (5.4.3-1)$$

$$T_d = 1.283H^2 \sqrt{f_{cd}} \leq \frac{\pi}{4} d_s^2 f_u \quad (5.4.3-2)$$

式中: M_d ——角隅弯矩设计值 ($N \cdot mm$);

n ——与 M_d 对应板宽内的单排栓钉数量;

b ——栓钉间距 (mm);

T_d ——栓钉受拉承载力设计值 (N);

H ——栓钉长度 (mm);

d_s ——栓钉直径 (mm)。

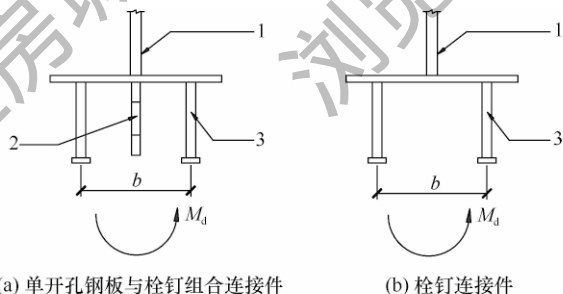


图 5.4.3 作用于单开孔钢板与栓钉组合连接件、栓钉连接件的角隅弯矩
1—波形钢腹板; 2—开孔钢板; 3—栓钉

5.4.4 角钢连接件承受的角隅弯矩 (图 5.4.4) 应符合下列规定:

1 当 U 形钢筋不与角钢焊接时, 角隅弯矩应符合下式要求:

$$M_d \leq \frac{2}{\sqrt{3}} A_s f_{sd} B_s \quad (5.4.4-1)$$

2 当 U 形钢筋与角钢焊接时，角隅弯矩应符合下列公式要求：

$$M_d \leq 2A_u f_{sd}^u B_u \quad (5.4.4-2)$$

$$M_d \leq 2u_u L_u R_u B_u \quad (5.4.4-3)$$

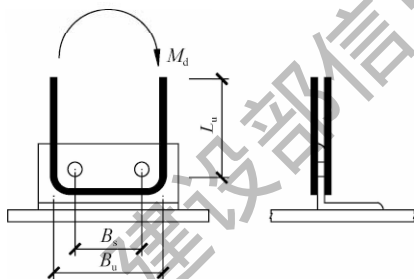


图 5.4.4 角钢连接件抗角隅弯矩计算图示

式中： A_s —— 一个孔内贯穿钢筋的截面面积 (mm^2)；

f_{sd} —— 贯穿钢筋抗拉强度设计值 (MPa)；

B_s —— 贯穿钢筋间距 (mm)；

A_u —— 单根 U 形钢筋截面面积 (mm^2)；

B_u —— U 形钢筋的轴间距 (mm)；

f_{sd}^u —— U 形钢筋抗拉强度设计值 (MPa)；

u_u —— U 形钢筋截面周长 (mm)；

L_u —— U 形钢筋直线锚固段长度 (mm)；

R_u —— U 形钢筋与混凝土粘结强度设计值 (MPa)，应根据试验确定。

6 正常使用极限状态计算

6.1 体外预应力钢绞线的计算

6.1.1 体外预应力钢绞线的预应力损失可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 中关于体内预应力钢筋的规定计算，但计算摩擦损失的位置仅为转向装置和锚固装置管道；管道壁摩擦系数与管道每米局部偏差对摩擦的影响系数宜根据试验确定。

6.1.2 体外预应力钢绞线的张拉控制应力不宜超过 $0.6f_{pk}$ ，且不应小于 $0.4f_{pk}$ 。当需超张拉时，张拉控制应力不应超过 $0.65f_{pk}$ 。

6.1.3 持久状况体外预应力钢绞线的最大拉应力应符合下式要求：

$$\sigma_{pe} + \sigma_p \leq 0.6f_{pk} \quad (6.1.3)$$

式中： σ_{pe} ——体外预应力钢绞线的有效预应力（MPa）；

σ_p ——作用标准组合下体外预应力钢绞线的拉应力增量（MPa），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 中关于体内预应力钢筋的规定计算。

6.2 连接件抗滑移与应力计算

6.2.1 波形钢腹板与顶板、底板连接处单位长度水平剪力 Q_k^c 应按本标准式（5.3.1）计算，并应采用作用的标准组合。

6.2.2 栓钉连接件的抗滑移应符合下列公式要求：

$$Q_k^c \leq nV_{sa}^c/s \quad (6.2.2-1)$$

$$V_{sa}^c = 8.408d^2 \sqrt{f_{cu,k}} \quad (H/d \geq 5.5) \quad (6.2.2-2)$$

$$V_{sa}^c = 1.538dH \sqrt{f_{cu,k}} \quad (H/d < 5.5) \quad (6.2.2-3)$$

式中: V_{sa}^c ——单个栓钉的抗滑移水平剪力限值 (N);

$f_{cu,k}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度标准值 (MPa);

s ——栓钉顺桥向间距 (mm);

n ——栓钉的排数, $n \leq 4$;

d ——栓钉直径 (mm);

H ——栓钉长度 (mm)。

6.2.3 双开孔钢板连接件抗滑移应按下列公式计算:

$$Q_k^c \leq 2V_{sa}^c/s \quad (6.2.3-1)$$

$$V_{sa} = 0.484[0.677f_{cu,k}(d_p^2 - d_s^2) + d_s^2 f_{stk}] - 35367 \quad (6.2.3-2)$$

式中: V_{sa} ——单个开孔钢板连接件混凝土剪力销的抗滑移水平剪力限值 (N);

s ——连接件开孔钢板顺桥向的孔间距 (mm);

f_{stk} ——贯穿钢筋极限强度标准值 (MPa)。

6.2.4 单开孔钢板与栓钉组合连接件抗滑移应符合下式要求:

$$Q_k^c \leq (V_{sa} + nV_{sa}^c)/s \quad (6.2.4)$$

式中: s ——开孔钢板顺桥向孔间距或栓钉顺桥向间距 (mm);

n ——栓钉的排数, $n \leq 4$ 。

6.2.5 埋入式连接件混凝土齿键的应力应符合下式要求:

$$\frac{Q_k^c s - 0.5f_{sk}A_s}{0.25A_1 + 0.05A} \leq 0.8f_{cu,k} \quad (6.2.5)$$

式中: s ——埋入式连接件纵桥向间距 (mm), 取波形钢腹板波长的 0.5 倍;

A ——板腋有效承压面积 (mm^2);

A_1 ——波形钢腹板斜幅段在横桥向的投影面积 (mm^2),

$A_1/A \geq 1/5$;

f_{sk} —— 接合钢筋的抗拉强度标准值 (MPa);

A_s —— 接合钢筋的截面面积 (mm^2)。

6.2.6 埋入式连接件应按下列要求对混凝土剪力销剪切力限值 V_{sa1} 、混凝土剪力销挤压力限值 V_{sa2} 、孔间钢板孔间剪切力限值 V_{sa3} 及贯穿钢筋剪切力限值 V_{sa4} 进行验算:

1 混凝土剪力销剪切力限值:

$$Q_k s \leq V_{sa1} = 1.824\pi \frac{d_v^2}{4} f_{cu,k} \quad (6.2.6-1)$$

2 混凝土剪力销挤压力限值:

$$V_{sa1} \leq V_{sa2} = 6d_p t_w f_{cu,k} \quad (6.2.6-2)$$

3 孔间钢板孔间剪切力限值:

$$V_{sa1} \leq V_{sa3} = \frac{5}{3} d_j t_w \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (6.2.6-3)$$

4 贯穿钢筋剪切力限值:

$$V_{sa1} \leq V_{sa4} = 1.25 f_{sk} A_s \quad (6.2.6-4)$$

式中: s —— 销孔的纵桥向间距 (mm);

t_w —— 波形钢腹板厚度 (mm);

d_j —— 销孔净距 (顺桥向投影长度) (mm);

d_p —— 销孔孔径 (mm);

f_y —— 波形钢腹板屈服强度 (MPa);

f_{sk} —— 贯穿钢筋抗拉强度标准值 (MPa);

A_s —— 贯穿钢筋截面面积 (mm^2)。

6.2.7 双开孔钢板连接件在角隅弯矩作用下, 应按下列式进行抗滑移计算:

$$M_k \leq nbV_{sa} \quad (6.2.7)$$

式中: M_k —— 作用标准组合下连接件承受的角隅弯矩设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$);

n —— 与 M_k 对应板宽内的单排开孔钢板的孔数量;

b —— 开孔板的间距 (mm)。

6.3 挠度计算

6.3.1 波形钢腹板组合梁桥挠度计算时应计入剪切变形与荷载长期效应的挠度影响。

6.3.2 波形钢腹板组合梁桥挠度限值及预拱度的设置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。

6.3.3 全预应力混凝土及 A 类预应力混凝土受弯构件的短期弯曲刚度 B 可按下式计算：

$$B = 0.95E_c I_0 \quad (6.3.3)$$

式中： E_c ——混凝土弹性模量（MPa）；

I_0 ——换算截面惯性矩（ mm^4 ）。

6.3.4 波形钢腹板组合梁桥的弯曲变形产生的挠度应为荷载频遇组合下按短期弯曲刚度计算的挠度值乘以挠度长期增长系数。挠度长期增长系数可按现行行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 执行。

6.3.5 波形钢腹板组合梁桥剪切变形产生的挠度可按下列公式计算：

$$\Delta = \int_L \frac{k_v V(x) \beta_i \bar{V}(x)}{GA_w} dx \quad (6.3.5-1)$$

$$\beta_i = h_w/h \quad (6.3.5-2)$$

式中： Δ ——剪切变形产生的挠度（mm）；

k_v ——剪切修正系数，可取 1.0；

$V(x)$ ——剪力设计值（N）；

β_i ——波形钢腹板与组合梁截面的高度比值；

$\bar{V}(x)$ ——由挠度计算位置施加单位荷载（1N）产生的剪力（N）；

A_w ——所有波形钢腹板的等效面积（ mm^2 ），单块波形钢腹

板的等效面积按本标准式 (3.3.11-3)、式 (3.3.11-4) 计算;

L ——组合梁长度 (mm);

h_w ——波形钢腹板垂直方向的高度 (mm);

h ——梁高 (mm);

x ——纵桥向坐标 (mm)。

住房和城乡建设部信息公开
浏览专用

7 构造要求

7.1 波形钢腹板

7.1.1 波形钢腹板宜采用 1600 型、1200 型、1000 型三种型号(图 7.1.1)。小跨径桥宜用小型号波形钢腹板,大跨径桥宜用大型号波形钢腹板。主跨跨径 40m~150m 的连续梁桥和连续刚构桥,宜用 1600 型波形钢腹板。

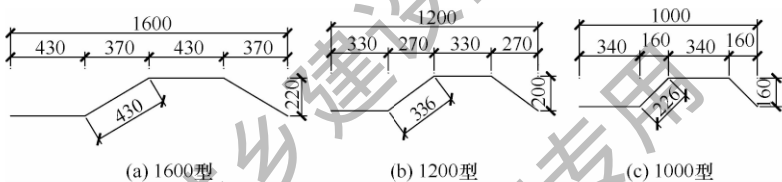


图 7.1.1 波形钢腹板型号示意

注:图中尺寸以 mm 计。

7.1.2 波形钢腹板的厚度宜为 9mm~40mm。

7.1.3 波形钢腹板之间的连接可采用高强度螺栓连接、对接焊缝连接或角焊缝搭接连接(图 7.1.3),构造上应符合国家现行有关标准的规定。

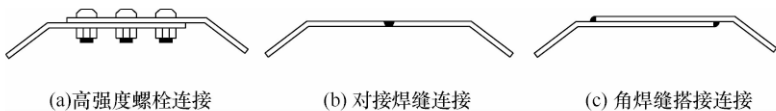


图 7.1.3 波形钢腹板之间的连接方式

7.1.4 波形钢腹板组合箱梁桥宜在波形钢腹板上设置通风孔,通风孔应避开波形钢腹板弯曲部位,顺桥向间距可为 4m~6m,通风孔处箱梁内侧应采用等厚钢板补强。

7.2 体外预应力束

7.2.1 体外预应力锚具的选用应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370 的规定。

7.2.2 当有更换或多次张拉需求时，体外预应力束应预留能再次张拉的工作长度。

7.2.3 体外预应力束锚固块与转向块之间或两个转向块之间的自由长度应确保体外预应力束与梁体不发生共振，过长时应设置减振装置。

7.2.4 体外预应力束在转向块处的弯折转角不宜大于 15° ，转向块鞍座处最小曲率半径应符合现行行业标准《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92 的相关规定。

7.3 支点节段及组合腹板段

7.3.1 波形钢腹板组合梁桥支点处应采用混凝土腹板并设置横隔板，与混凝土腹板紧邻的波形钢腹板应设置内衬混凝土。

7.3.2 内衬混凝土的长度不应小于支点处梁高，内衬混凝土的厚度应根据受剪承载力和斜截面抗裂计算确定，但最薄处不宜小于 20cm。

7.3.3 波形钢腹板和支点横隔板的连接可采用波形钢腹板端部开孔并设置贯穿钢筋后直接埋入的方式（图 7.3.3），开孔的行数和列数应根据传递剪力的需要设置。

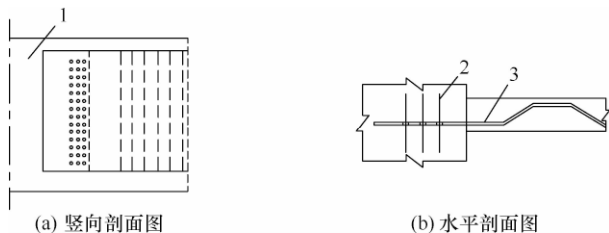


图 7.3.3 波形钢腹板和支点横隔板的连接方式

1—支点横隔板；2—贯穿钢筋；3—波形钢腹板

7.4 跨间横隔板

- 7.4.1 波形钢腹板组合梁桥跨间应设置一定数量的横隔板。
- 7.4.2 跨间横隔板可作为转向构件设置于体外预应力束的纵向折线转角处，但构造上应满足体外预应力束的张拉、锚固与更换要求。
- 7.4.3 横隔板可采用混凝土板墙式、钢-混凝土横撑式或钢横撑式。混凝土板墙式横隔板可与体外预应力束的锚固块、转向块设为一体。
- 7.4.4 混凝土板墙式横隔板与波形钢腹板可不连接或在波形钢腹板平幅段采用栓钉连接。
- 7.4.5 当波形钢腹板组合梁桥采用顶推施工或波形钢腹板工字梁作为施工承重构件的工法施工时，波形钢腹板工字梁的横隔板宜采用钢-混凝土横撑式。

7.5 连接件

- 7.5.1 波形钢腹板与桥面板的连接宜采用栓钉连接件、双开孔钢板连接件、埋入式连接件以及角钢连接件。波形钢腹板与组合梁底板的连接宜采用栓钉连接件、单开孔钢板与栓钉组合连接件、埋入式连接件以及角钢连接件。当采用其他连接方式，应经试验验证其可靠性和抗疲劳性能。
- 7.5.2 波形钢腹板与内衬混凝土的连接宜采用栓钉连接件。
- 7.5.3 波形钢腹板与底板的连接区域应采用弹性密封材料进行封闭处理，并应设置排水横坡。
- 7.5.4 埋入式连接中波形钢腹板斜幅段的投影面积不应小于板腋有效承压面积的 $1/5$ (图 7.5.4)。

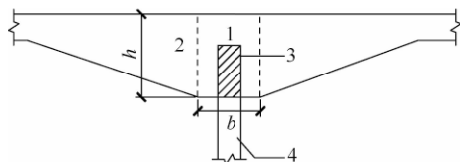


图 7.5.4 埋入式连接斜幅段投影面积示意

- 1—板腋有效承压面积 $A=bh$ ；2—板腋；3—斜幅段在横桥向的投影面积 A_1 ；
4—波形钢腹板

7.5.5 开孔钢板连接件应符合下列规定：

- 1 开孔钢板厚度不宜小于 12mm，双开孔钢板连接件开孔钢板间距应大于其高度的 1.5 倍；
- 2 贯穿钢筋宜位于开孔钢板孔的中心；
- 3 开孔钢板孔径应大于贯穿钢筋直径与骨料最大粒径之和，可取 60mm~80mm；
- 4 孔与孔的中心间距不宜大于 500mm，可取 150mm~250mm；
- 5 孔与钢板边缘的净距不宜小于孔半径的 1.5 倍；
- 6 贯穿钢筋直径不宜小于 12mm。

7.5.6 栓钉连接件应符合下列规定：

- 1 栓钉的长度不应小于 4 倍栓钉直径，有拉拔作用时不宜小于 10 倍栓钉直径；
- 2 栓钉纵桥向的中心间距不应小于 5 倍栓钉直径且不应小于 100mm，横桥向的中心间距不应小于 4 倍栓钉直径且不应小于 50mm；
- 3 栓钉连接件沿主要受力方向的中心间距不应超过 300mm；
- 4 栓钉连接件的外侧边缘距翼缘板边缘的距离不应小于 25mm。

7.5.7 钢翼缘板应符合下列规定：

- 1 钢翼缘板的厚度不宜小于 16mm，宽度可取波形钢腹板波高加 100mm；
- 2 当波形钢腹板与底板的连接采用有钢翼缘板的连接件时，钢翼缘板应埋入底板混凝土中；
- 3 当波形钢腹板与顶板的连接采用有钢翼缘板的连接件时，钢翼缘板上表面宜与顶板下表面紧贴；
- 4 钢翼缘板宜沿组合梁桥纵向断开布置，断开的位置宜与波形钢腹板之间接头的位置一致。

7.5.8 当波形钢腹板与底板的连接采用有钢翼缘板的连接件时，宜在钢翼缘板上设置出气孔。

8 施 工

8.1 一 般 规 定

8.1.1 波形钢腹板组合梁的安装质量应符合表 8.1.1 的规定。

表 8.1.1 波形钢腹板组合梁安装质量标准

项次	检查项目	允许偏差 (mm)	检查方法
1	波形钢腹板中心距	±3	检查每一安装节段断面
2	两块波形钢腹板对角线长度差	±4	检查每一安装节段断面

8.1.2 吊装设备应根据施工场地情况、起吊能力、施工周期等要求配备。

8.1.3 安装前，应验算临时支架、支撑、挂篮等临时结构构件在不同受力状态下的强度、刚度和稳定性。

8.1.4 安装前，应核对波形钢腹板设计编号，并应查验产品出厂合格证及材料的质量证明书。

8.1.5 安装前，应对桥梁的墩台顶面高程、中线及各孔跨径进行复测。

8.1.6 当采用挂篮悬臂施工时，应针对锚固件对组合梁顶板的削弱影响采取措施。

8.1.7 波形钢腹板安装过程中，不得进行临时性的焊接和切割作业。

8.1.8 波形钢腹板涂装材料应具有良好的附着性、耐蚀性，应具有出厂合格证和检验资料，并应符合耐久性要求。

8.1.9 焊接完毕且待焊缝冷却至室温后，应对所有焊缝进行外观检查，外观检查合格后方可进行无损检测，无损检测应在焊接 24h 后进行。

- 8.1.10 波形钢腹板现场焊接区域修复涂装应在焊接检验合格一周内完成。
- 8.1.11 波形钢腹板的二次涂装应在桥梁主体施工完成后及时进行。
- 8.1.12 当波形钢腹板组合梁桥采用悬臂法施工时，应进行施工监控。

8.2 波形钢腹板施工

- 8.2.1 波形钢腹板安装应制定施工方案，并宜进行施工过程控制。
- 8.2.2 波形钢腹板外观质量和加工质量应符合现行行业标准《组合结构桥梁用波形钢腹板》JT/T 784 的规定。
- 8.2.3 波形钢腹板运输过程中，应采取支撑和固定措施，并应对栓钉采取避免因触碰而脱落的保护措施。
- 8.2.4 波形钢腹板运输安装过程中表面不得损伤、不得有锈蚀。
- 8.2.5 波形钢腹板安装可采用支架上分段安装、整孔安装、分段顶推或挂篮悬臂拼装等方式。
- 8.2.6 波形钢腹板吊装前，应对波形钢腹板定形加固，单元件不得变形，如有变形应矫正后再吊装。
- 8.2.7 波形钢腹板吊装、定位、焊接各环节应符合下列规定：
- 1 吊具的刚度应满足吊装需要，吊点应均匀布置；
 - 2 应轻吊轻放、平稳支垫，并对连接件进行防护；
 - 3 拼装过程中，应减少相邻钢腹板接缝偏差，贴合错口不宜超过 2mm；
 - 4 波形钢腹板的定位质量应符合表 8.2.7 的规定。

表 8.2.7 波形钢腹板定位标准

项次	项目	规定值或允许偏差	备注
1	波形钢腹板轴线偏位 (mm)	±5	内外侧波形钢腹板分别测量并间隔 2m 量 3 处

续表 8.2.7

项次	项目	规定值或允许偏差	备注
2	内外侧波形钢腹板间距 (mm)	±5	间隔 2m 量 3 处
3	内外侧波形钢腹板高差 (mm)	±5	间隔 2m 量 3 处
4	波形钢腹板横桥向垂直度	1/500	间隔 2m 量 3 处
5	波形钢腹板纵桥向坡度	1/500	间隔 2m 量 3 处

8.2.8 波形钢腹板的悬臂安装可按下列步骤进行：

- 1 测量首段或复测前一节段波形钢腹板的相关线形和坐标；
- 2 吊装下一节段的波形钢腹板并临时定位；
- 3 设置临时支撑固定内外侧波形钢腹板并精调；
- 4 经检查符合设计要求后，与前一节段波形钢腹板连接并固定位置，进入下一道工序。

8.2.9 波形钢腹板在合龙段的安装可按下列步骤进行：

- 1 根据设计尺寸留有余量制造合龙段波形钢腹板单元件；
- 2 选择合适温度环境反复观测合龙口实际尺寸，确定合龙段长度和标高；
- 3 调整合龙口的标高；
- 4 临时锁定合龙口；
- 5 合龙段波形钢腹板吊装就位，检测满足要求后连接。

8.2.10 波形钢腹板现场焊接前，应进行焊接工艺评定试验并确定焊接焊材、方法和参数。

8.2.11 波形钢腹板节段之间的连接焊缝施焊应在其就位、固定并经检查合格后进行。检查内容应包括接头坡口、焊缝间隙和焊接板面高低差、锈蚀情况等，如存在锈蚀，应对焊接区域进行除锈并在之后 24h 内施焊。

8.2.12 波形钢腹板节段之间的现场对接焊缝连接应采用平焊。

8.2.13 波形钢腹板施工质量检验应符合下列规定：

- 1 波形钢腹板的内外表面不得有凹陷、划痕、焊疤、电弧

擦伤等缺陷，边缘应无毛刺；

2 焊缝应平滑，无裂纹、未熔合、夹渣、未填满弧坑、焊瘤等外观缺陷。

8.2.14 波形钢腹板施工时，不宜开孔，如因设置排水管等的需要而开孔时，应叠焊等厚的钢板进行补强。

8.2.15 工地焊接时应采取防风 and 防雨措施，遮盖全部焊接处；工地焊接的环境要求为：风力应小于 5 级，温度应高于 5℃，相对湿度应小于 85%；在组合箱梁内焊接时应有通风措施。

8.2.16 波形钢腹板安装之前应在工厂进行涂装预处理，其外侧与下翼缘板相接的 10cm 高度范围内，应在原有底漆上再增涂一层底漆。

8.2.17 波形钢腹板涂装面可采用喷涂、粘贴薄膜等方法进行保护。混凝土浇筑时，不得将水泥浆及混凝土粘附到涂层上。

8.2.18 波形钢腹板喷铝摩擦面现场修复可采用涂刷有机富锌底漆的方式，各层修复厚度宜为原设计厚度的 1.2 倍，修复范围应包括焊接施工的影响区域。

8.3 连接件施工

8.3.1 连接件安装前，外观应平整、无裂缝、无毛刺、无凹坑、无变形。

8.3.2 连接件固定前，应对连接件安装精度进行检查验收，固定后尚应检查连接件焊接质量及临时固定措施，当混凝土浇筑振捣时，不得发生偏移。

8.3.3 浇筑混凝土时，应通过工艺试验确定施工参数，验证混凝土性能及浇筑振捣工艺。

8.3.4 在浇筑上翼缘板混凝土之前，应清除钢翼缘板上的铁锈、焊渣、泥土和其他杂物。

8.3.5 栓钉连接件表面不应有锈蚀、氧化皮、油脂和毛刺等缺陷，杆部表面不得有影响使用的裂缝。

8.3.6 连接件施工前，应进行焊接工艺试验与评定，评定规则

宜符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50 的规定。

8.3.7 开孔钢板成型及翼缘板与开孔钢板焊接应在专业钢结构加工厂进行，加工后孔径偏差不得大于 1mm，孔位偏差不得大于 2mm，外形尺寸偏差不得大于 2mm。

8.3.8 贯穿钢筋应顺直，其表面至孔边的距离不应小于混凝土骨料最大粒径。

8.3.9 贯穿钢筋安装定位应符合下列规定：

1 对于不设承托的混凝土板，可在模板安装完成后穿入贯穿钢筋，并利用普通钢筋进行精确定位；

2 对于设置承托的混凝土板，可在穿入贯穿钢筋后安装模板，并利用普通钢筋进行精确定位；

3 贯穿钢筋宜居中于预留孔，安装偏差不应超过 5mm，且应垂直于开孔板并定位牢固。

8.3.10 采用开孔钢板连接件的组合梁，其顶板、底板混凝土应具有良好的工作性，必要时可采用自密实混凝土；混凝土振捣应选择较小功率和直径的插入式振动棒，振捣时振动棒不得触碰连接件，且孔内与连接件周边混凝土应振捣密实。

8.3.11 当组合梁顶板、底板与波形钢腹板之间采用开孔钢板连接件时，混凝土粗骨料宜采用 5mm~20mm 连续级配碎石，最大粒径不应超过 25mm。

8.3.12 埋入式连接的接合钢筋与波形钢腹板的焊接连接应在工厂内完成。

本标准用词说明

1 为了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时，写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《碳素结构钢》GB/T 700
- 2 《桥梁用结构钢》GB/T 714
- 3 《钢结构用高强度大六角头螺栓》GB/T 1228
- 4 《钢结构用高强度大六角螺母》GB/T 1229
- 5 《钢结构用高强度垫圈》GB/T 1230
- 6 《钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件》GB/T 1231
- 7 《低合金高强度结构钢》GB/T 1591
- 8 《钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副》GB/T 3632
- 9 《耐候结构钢》GB/T 4171
- 10 《厚度方向性能钢板》GB/T 5313
- 11 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433
- 12 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370
- 13 《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2
- 14 《城市桥梁设计规范》CJJ 11
- 15 《城镇桥梁钢结构防腐蚀涂装工程技术规程》CJJ/T 235
- 16 《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92
- 17 《公路桥涵设计通用规范》JTG D60
- 18 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62
- 19 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64
- 20 《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50
- 21 《组合结构桥梁用波形钢腹板》JT/T 784