

UDC

中华人民共和国行业标准



P

CJJ/T 272 - 2017

备案号 J 2467 - 2018

波形钢腹板组合梁桥技术标准

Technical standard for composite girder bridges
with corrugated steel webs

2017 - 11 - 28 发布

2018 - 06 - 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

波形钢腹板组合梁桥技术标准

**Technical standard for composite girder bridges
with corrugated steel webs**

CJJ/T 272 - 2017

**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 6 月 1 日**

中国建筑工业出版社

2017 北 京

中华人民共和国行业标准
波形钢腹板组合梁桥技术标准
Technical standard for composite girder bridges
with corrugated steel webs
CJJ/T 272 - 2017

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
环球东方（北京）印务有限公司印刷

*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：2% 字数：69 千字
2018 年 5 月第一版 2018 年 5 月第一次印刷
定价：**18.00 元**

统一书号：15112·31377

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

本社网址：<http://www.cabp.com.cn>

网上书店：<http://www.china-building.com.cn>

中华人民共和国住房和城乡建设部 公 告

第 1750 号

住房城乡建设部关于发布行业标准 《波形钢腹板组合梁桥技术标准》的公告

现批准《波形钢腹板组合梁桥技术标准》为行业标准，编号为 CJJ/T 272-2017，自 2018 年 6 月 1 日起实施。

本标准在住房城乡建设部门户网站（www.mohurd.gov.cn）公开，并由我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

2017 年 11 月 28 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 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或建议，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

易小伟 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	承载能力极限状态计算	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
附：条文说明	43

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
	Addition; Explanation of Provisions	43

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。

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）。

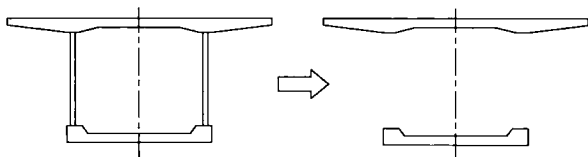


图 3.3.6 波形钢腹板组合梁截面面积、绕形心轴惯性矩计算图示

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）。

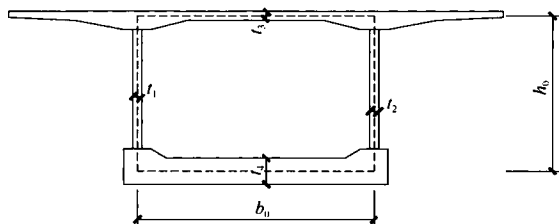


图 3.3.7 单箱单室波形钢腹板组合梁扭转惯性矩计算图示

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 ——波形钢腹板竖直方向的高度 (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。

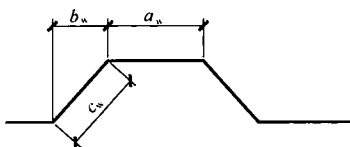


图 3.3.11 波形钢腹板形状图示

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。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
				1860
	1×3 (三股)		8.6、10.8、12.9	1470
				1570
				1720
				1860
				1960
	1×7 (七股)		9.5、12.7	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_{pk}	f'_{pk}
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	
精轧螺纹钢筋	$f_{pk} = 785$	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	精轧螺纹钢筋	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}	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_{cd}^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下式进行抗倾覆计算,同时在作用标准组合下单向受压支座不应处于脱空状态:

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

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 ($\text{kN} \cdot \text{m}$),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 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)。

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：

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

$$\tau_{nd} = \frac{V_d - V_p}{h_w t_w} \quad (5.2.2-2)$$

$$\tau_{td} = \frac{T_d}{2A_m t_w (1 + \alpha)} \quad (5.2.2-3)$$

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_{nd} ——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 ——波形钢腹板竖直方向的高度，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:

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

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

式中: τ_{cr} ——波形钢腹板组合屈曲临界剪应力 (MPa);

$\tau_{cr,L}$ ——波形钢腹板局部屈曲临界剪应力 (MPa);

$\tau_{cr,G}$ ——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:

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

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

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

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

式中: f_{vd} ——波形钢腹板抗剪强度设计值 (MPa);

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

$\tau_{cr,L}^e$ ——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 ——波形钢腹板竖直方向的高度 (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:

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

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：

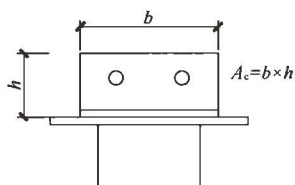


图 5.3.7 角钢连接件承压面积计算示意

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

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:

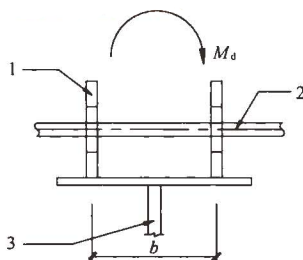


图 5.4.2 作用于双开孔钢板连接件的角隅弯矩

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 · 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:

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

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

式中: M_d —— 角隅弯矩设计值 (N·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)。

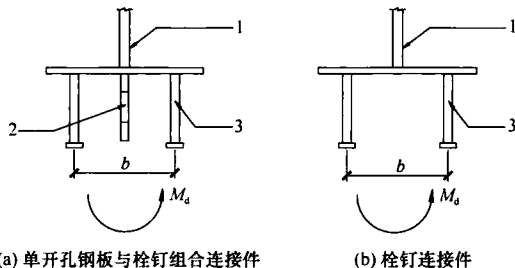


图 5.4.3 作用于单开孔钢板与栓钉组合连接件、栓钉连接件的角隅弯矩
1—波形钢腹板; 2—开孔钢板; 3—栓钉

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:

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

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

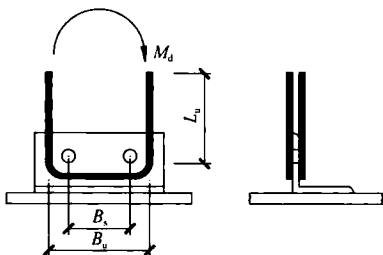


图 5.4.4 角钢连接件抗角隅弯矩计算图示

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_{st}^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:

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

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

式中: V_{st} ——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:

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

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_{s01} 、混凝土剪力销挤压力限值 V_{s02} 、孔间钢板孔间剪切力限值 V_{s03} 及贯穿钢筋剪切力限值 V_{s01} 进行验算:

1 混凝土剪力销剪切力限值:

$$Q_k s \leq V_{s01} = 1.824\pi \frac{d_p^2}{4} f_{cu,k} \quad (6.2.6-1)$$

2 混凝土剪力销挤压力限值:

$$V_{s01} \leq V_{s02} = 6d_p t_w f_{cu,k} \quad (6.2.6-2)$$

3 孔间钢板孔间剪切力限值:

$$V_{s01} \leq V_{s03} = \frac{5}{3} d_j t_w \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (6.2.6-3)$$

4 贯穿钢筋剪切力限值:

$$V_{s01} \leq V_{s04} = 1.25 f_{sk} A_s \quad (6.2.6-4)$$

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, 应按下式进行抗滑移计算:

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

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 —— 波形钢腹板竖直方向的高度 (mm);

h —— 梁高 (mm);

x —— 纵桥向坐标 (mm)。

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。

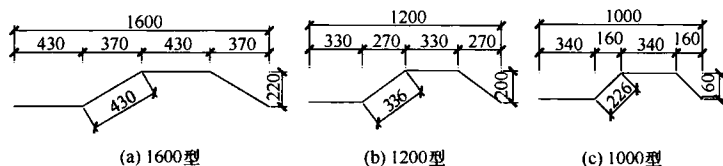


图 7.1.1 波形钢腹板型号示意

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。

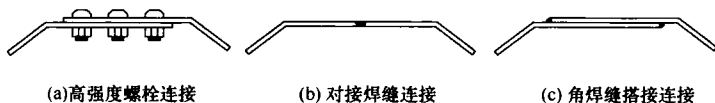


图 7.1.3 波形钢腹板之间的连接方式

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。

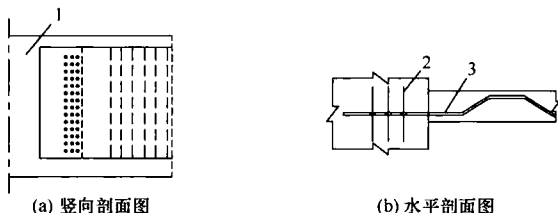


图 7.3.3 波形钢腹板和支点横隔板的连接方式

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)。

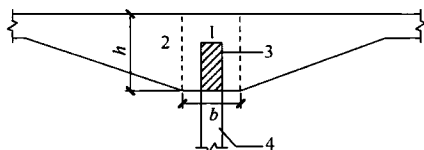


图 7.5.4 埋入式连接斜幅段投影面积示意

- 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后一周内完成。

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

中华人民共和国行业标准

波形钢腹板组合梁桥技术标准

CJJ/T 272 - 2017

条文说明

编 制 说 明

《波形钢腹板组合梁桥技术标准》CJJ/T 272-2017，经住房和城乡建设部 2017 年 11 月 28 日以第 1750 号公告批准、发布。

本标准编制过程中，编制组对国内外波形钢腹板组合梁桥的技术指导文件及工程应用现状进行了广泛的调查研究，认真总结了实践经验，并针对突出问题进行了专题研究。

为便于广大施工、监理、设计、科研、学校等单位有关人员在使⤵用本标准时能正确理解和执行条文规定，《波形钢腹板组合梁桥技术标准》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	47
2	术语和符号	48
2.1	术语	48
2.2	符号	48
3	基本规定	49
3.1	一般规定	49
3.2	作用及作用效应的计算	50
3.3	结构设计	50
4	材料	56
4.2	钢筋	56
4.3	钢材	56
5	承载能力极限状态计算	58
5.1	一般规定	58
5.2	波形钢腹板受剪承载力计算	58
5.3	连接件水平受剪承载力计算	62
5.4	连接件抗角隅弯矩计算	63
6	正常使用极限状态计算	64
6.1	体外预应力钢绞线的计算	64
6.2	连接件抗滑移与应力计算	64
6.3	挠度计算	65
7	构造要求	66
7.1	波形钢腹板	66
7.2	体外预应力束	67
7.3	支点节段及组合腹板段	68
7.4	跨间横隔板	69

7.5 连接件	69
8 施工	72
8.1 一般规定	72
8.2 波形钢腹板施工	73

1 总 则

1.0.1 波形钢腹板组合梁桥由于用波形钢腹板取代了常规的混凝土腹板，具有结构自重轻、混凝土与钢板各自材料强度充分利用、预应力效率高等优点。波形钢腹板组合梁桥的推广，对当今提倡高效、绿色、环保、低能耗发展模式具有积极意义。

1.0.2 本标准适用范围为道路工程中的桥梁，人行桥与轨道交通桥由于其工程特点对结构尚有其他要求可参照使用。

1.0.3 波形钢腹板组合梁桥主要包括混凝土构件、钢构件以及连接件三种构件，其设计、施工、验收除应符合本标准外，尚应符合国家现行混凝土结构、钢结构及组合结构有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

本节根据现行国家标准《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 并结合具体情况,列出了非常用的但在波形钢腹板组合梁桥这一特殊桥型中存在的术语。对于较常用的以及国家现有标准已有的术语,依据《标准化工作导则 第1部分:标准的结构和编写》GB/T 1.1-2009,本标准不再列出。

2.2 符 号

本节符号按材料性能、作用效应和抗力、几何参数、计算系数及其他进行分类,使用习惯与行业标准《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004、《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 基本保持一致,其他特殊的计算参数则根据工程习惯采用。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.2 波形钢腹板组合梁桥设计分为承载能力极限状态和正常使用极限状态。构件和连接的强度破坏、疲劳破坏，结构和构件失稳以及结构倾覆均属于承载能力极限状态，而影响结构、构件正常使用的变形、振动以及影响结构耐久性的局部破坏则属于正常使用极限状态。

承载能力极限状态设计体现了桥梁结构的安全性，正常使用极限状态设计体现了桥梁的适用性和耐久性，这两类极限状态概括了结构的可靠性。

3.1.3 持久状况是指桥梁的使用阶段。这个阶段持续的时间很长，要对结构的所有预定功能进行设计，即必须进行承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算。

短暂状况是指桥梁的施工阶段。这个阶段的持续时间相对于使用阶段是短暂的，结构所承受的荷载与使用阶段也不同，设计时要根据具体情况而定。这个阶段，一般只进行承载能力极限状态计算，必要时才进行正常使用极限状态计算。

偶然状况是指桥梁可能遇到的撞击等状况。这种状况出现的概率极小，且持续的时间极短。按照《公路工程结构可靠度设计统一标准》GB/T 50283 - 1999 的规定，偶然状况的设计原则是：主要承重结构不致因非主要承重结构发生破坏而导致丧失承载能力；允许主要承重结构发生局部破坏，但其剩余部分在一段时间内不发生连续倒塌。显然，偶然状况只需进行承载能力极限状态计算，一般不必考虑正常使用极限状态计算。

3.2 作用及作用效应的计算

3.2.3 波形钢腹板组合梁桥采用与现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 相同的竖向梯度温度曲线,但由于波形钢腹板不抵抗轴向力的特点,其表观弹性模量可视为零,因此如果波形钢腹板在竖向梯度温度曲线范围内,可忽略该范围内梯度温度对波形钢腹板的影响。

3.2.4 剪切变形会产生附加挠度导致结构变柔,因此计入剪切变形影响后,桥梁的竖向基频和汽车冲击系数计算结果会略小一些。

3.2.5 当采用平面框架模型进行桥面板的计算时,车辆荷载取值需根据框架截面的宽度和垂直于板跨径方向的荷载分布宽度进行调整。

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 关于板的计算中规定,与梁肋整体连接的板的跨中弯矩可按相同计算跨径简支板跨中弯矩的 70% (板厚与梁肋高度比 $\geq 1/4$) 或 50% (板厚与梁肋高度比 $< 1/4$) 计算。该规定对于常规混凝土箱梁顶板计算是适用的,但对于波形钢腹板组合箱梁,其腹板刚度较小,跨中弯矩有增大的倾向,约为简支板跨中弯矩的 90%。在实际工程中,由日本道路工团施工的本谷桥,其桥面板跨中弯矩即是按 90% 的简支板跨中弯矩设计的。

对于多室截面、多箱截面以及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,上述方法均不再适用,有必要采用三维有限元方法计算桥面板在车辆荷载作用下的效应。

3.3 结构设计

3.3.1 波形钢腹板组合梁采用连接件使波形钢腹板和顶板、底板形成共同受力的整体,而顶板或底板一旦开裂,连接件的性能可能受到影响甚至失效,进而改变结构的受力体系引发破坏性结果,因此应避免顶板和底板的混凝土发生开裂。

结构形式上,国内波形钢腹板组合梁桥工程实例多为预应力连续箱梁桥,其概念设计与常规预应力混凝土连续箱梁桥总体类似,略有不同。

梁高方面,波形钢腹板组合梁桥因自重减轻较多,其梁高可以比常规混凝土梁桥更小,因此梁高受限的情况下可采用较小的梁高。然而通常情况下梁高不宜过小,因为较大的梁高可在自重增加很少的情况下,提高截面的刚度并减少预应力束的布置,从而在经济和技术上更为合理。

根据国内外统计资料,建议对于连续梁桥,中支点梁高可取为跨径的 $1/15 \sim 1/19$,跨中梁高可取为跨径的 $1/32 \sim 1/50$ 。图1为日本已建波形钢腹板组合梁桥梁高与最大跨径的统计数据 and 拟合的梁高范围。

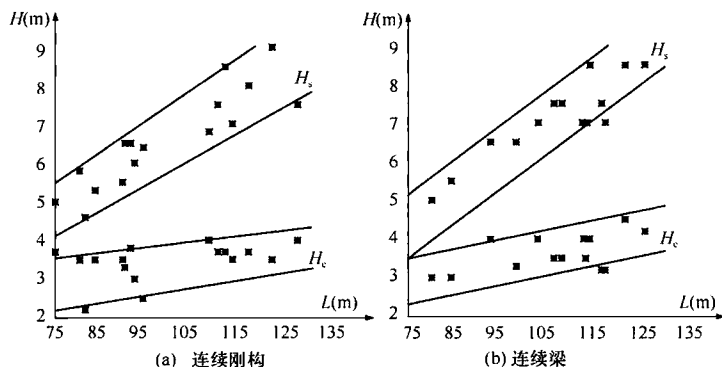


图1 波形钢腹板组合梁桥梁高与最大跨径关系

H —梁高; H_s —支点梁高; H_c —跨中梁高; L —最大跨径

截面设计方面,波形钢腹板组合梁桥多数情况下采用直腹板断面(图2a~d)以减少钢板用量,但有些情况下,为减少桥面板悬挑长度,合理墩台设计,加大组合梁畸变刚度或追求美观,亦可采用斜腹板断面(图2e)。当桥面较宽时,可有三种选择:多箱单室断面(图2d)、单箱双(多)室断面(图2b、

c) 和带斜撑的单箱单室断面 (图 2f、g)。带斜撑的单箱单室断面是近年来应用较多的断面形式, 其缺点是截面扭转刚度不大, 施工较复杂, 优点是结构简单、受力明确, 可分步作业, 施工工艺较合理。而宽桥近年来多室箱梁的应用不少, 但在设计计算时仍存在不少难点, 如各腹板的剪力分配、扭转应力、畸变应力等。

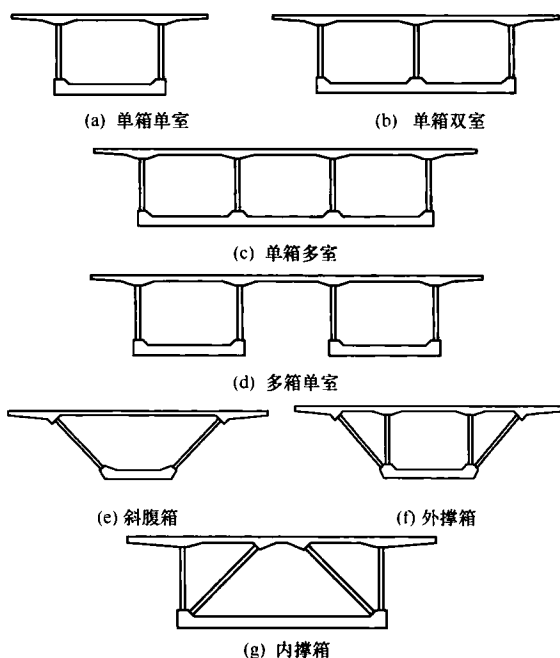


图 2 波形钢腹板组合梁桥典型截面图

为充分发挥波形钢腹板组合梁受力性能好、材料利用率高、施工简便快捷、经济效益显著等特点, 中等跨径桥还可采用图 3 所示的 T 梁、分离多箱等装配式截面形式。

3.3.2 波形钢腹板组合梁桥的整体受弯计算与常规混凝土梁桥



图3 装配式截面形式

相同，但其受弯承载力计算可仅考虑顶板、底板与钢筋。

实际工程中，也有在正弯矩区采用钢底板代替混凝土底板的混合梁实例，比如深圳东宝河新安大桥主桥（88m+156m+88m连续梁桥），其中跨跨中49.6m区域便采用了钢底板。这种混合梁的优点是可减轻上部结构自重并减小支点负弯矩，同时充分发挥正弯矩区底板钢材的受拉性能。这种混合梁可依据相关规范按常规钢-混凝土组合梁进行强度、稳定和应力计算，但截面特性和承载力不计入波形钢腹板的贡献。

3.3.3 波形钢腹板的承载能力极限状态计算包括抗剪强度和剪切稳定两部分内容。波形钢腹板剪切屈曲分为整体屈曲、局部屈曲和组合屈曲三种模式，但控制设计的是组合屈曲。

3.3.4 波形钢腹板与顶板、底板的共同工作依靠连接件来保证，本条第1款假定说明波形钢腹板组合梁桥整体分析时可不考虑连接件的滑移影响。第3款组合梁受弯时符合平截面假定也得到了大量研究的验证，因此应力计算可采用初等梁理论。

3.3.5 目前用于波形钢腹板组合梁桥受力分析的模型除了最常用的单梁模型外，还有三维有限元模型、有限条模型、三明治梁模型、梁格模型、七自由度梁单元模型等。每种分析模型的特点和适用性有很大不同，为了得到准确的结果，有必要根据结构形式、断面形状以及荷载形式选择合适的分析模型。

通常，当桥梁宽跨比小于0.5时，结构形式较简单，采用单梁模型进行计算即可满足精度要求；当桥梁宽跨比在0.5及以上时，宜采用梁格或实体有限元模型进行分析；对于弯桥，扭转效应比较明显，宜采用七自由度梁单元或实体有限元模型进行分析。

3.3.6 由于波形钢腹板不抵抗顺桥向轴向力的特点,当采用单梁模型进行受力分析时,组合梁截面特性的计算可仅计入顶板、底板的贡献。

3.3.8 同等跨径、同等梁高、同等桥宽的常规混凝土箱梁桥与波形钢腹板组合箱梁桥的实体有限元分析结果表明,后者的剪力滞效应大一些,但考虑两种桥型腹板刚度的差异后,翼缘有效宽度系数基本相当。

3.3.9 中支点横隔板为截面突变的部位,为应力扰动区,可按拉压杆模型进行分析。但中支点横隔板往往锚固了较多的体外预应力束同时还与内衬混凝土相连,其受力远比常规混凝土梁的中支点横隔板复杂。另一方面,内衬混凝土通过栓钉与波形钢腹板连接并承受剪力,本身也是受力复杂的构件,因此建议对中支点墩顶节段及与之相邻的组合腹板段采用实体有限元模型进行分析,以获得更为精确的结果。

3.3.10 波形钢腹板组合梁的抗扭刚度小,当用于弯、斜、宽桥时,在扭矩作用下,沿顶板、底板的扭转剪应力不能忽视且会增大顶板、底板的主拉应力,因此斜截面抗裂验算应计入扭转剪应力。

3.3.11 内衬混凝土可按矩形截面的钢筋混凝土或预应力混凝土受弯构件进行计算,矩形截面高度取组合梁高度减去顶板与底板的厚度,矩形截面宽度取波形钢腹板波峰处的最小厚度。

如内衬混凝土难以满足斜截面抗裂验算要求,可根据计算配置竖向预应力钢筋,竖向预应力钢筋建议采用钢绞线。

3.3.12 波形钢腹板实际承担的剪力与梁高、顶板与底板构造、波形钢腹板厚度等有关,通常为截面全部剪力的65%~80%,但当达到极限状态时,顶板与底板可能开裂从而导致波形钢腹板承担的剪力增大,故波形钢腹板偏于安全地按承担全部剪力进行设计。

对于组合腹板段的波形钢腹板,其不仅承受竖向剪力还承受由支座传来的竖向反力,不再是纯剪受力状态,目前仍没有可

靠、优化的设计理论和计算方法，因此也偏于保守地按承担全部剪力进行设计。

需要注意的是，对于变高度梁，截面的剪力为竖直方向，计算时应对应电算结果进行修正。

3.3.13 波形钢腹板组合梁桥的上部结构，混凝土构件主要有顶板、底板、内衬混凝土、横隔板及齿块，如采用箱形截面，顶板、底板、悬臂板的厚度可按如下建议取用：

1 顶板与腹板结合处设置承托时，顶板厚度可为 25cm～30cm，板内有预应力钢束时选较大值，板内无预应力钢束时选较小值。

2 悬臂板端部厚度按满足横向预应力钢束和防撞栏钢筋锚固尺寸要求取值，可为 18cm～25cm，悬臂板根部厚度可与箱内顶板在承托底部处的厚度一致，可为 50cm～90cm。

3 底板内不布置纵向预应力钢束时，最小厚度可为 22cm；底板内布置纵向预应力钢束时，最小厚度可为 25cm。

3.3.16 波形钢腹板组合梁桥采用悬臂浇筑法施工时，因波形钢腹板较轻，为施工方便考虑，悬臂浇筑时的节段长度通常比常规混凝土梁桥大且为波形钢腹板波长的整数倍。

4 材 料

4.2 钢 筋

4.2.3 与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62-2004 表 3.2.3-1 相比,本条依据《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》GB 1499.2-2007 增加了 HRBF400、HRB500、HRBF500 三个牌号的钢筋。新增钢筋的抗拉强度设计值以及 HRBF400 钢筋的抗压强度设计值均根据 1.2 的材料分项系数得到,而 HRB500、HRBF500 强度较高,其抗压强度的发挥受限于混凝土应力达到抗压强度时的应变 ϵ_0 ,因此 HRB500、HRBF500 抗压强度设计值为 $\epsilon_0 E_s = 0.002 \times 2.0 \times 10^5 = 400\text{MPa}$,小于其抗拉强度设计值 415MPa。

HPB235 与 HRB335 钢筋依据《产业结构调整指导目录(2011 年本)》(国家发展和改革委员会令第 9 号)均被淘汰,因此本标准不再列入这两种钢筋的强度数据。

4.3 钢 材

4.3.1 钢材的生产过程,包括熔炼、脱氧、轧制及后期处理等,对钢材的物理力学性能有较大的影响。而钢材的制造安装、加载方式、低温和腐蚀介质环境,则对结构性能有较大影响。

4.3.2 波形钢腹板组合梁桥用的结构钢主要有:碳素结构钢、低合金高强度结构钢、桥梁用结构钢以及耐候钢。其中,碳素结构钢质量等级有 A、B、C 和 D 四种,桥梁结构中通常采用 C 级、D 级;低合金高强度结构钢有 A、B、C、D 和 E 五种,桥梁结构中通常采用 C 级、D 级、E 级。桥梁用结构钢多用于铁路桥梁的主要受力构件。低合金高强度结构钢与同等级的桥梁用结构钢的性能指标差别不大,但价格具有一定的优势,因此在公路

桥梁中应用较多。

耐候钢是通过添加 Cu、P、Cr、Ni 等少量合金元素，使其在金属基体表面形成保护层，以提高耐大气腐蚀性能的钢，分高耐候钢和焊接耐候钢两类。高耐候钢牌号包括 Q295GNH（热轧）、Q355GNH（热轧）、Q265GNH（冷轧）、Q310GNH（冷轧），与焊接耐候钢相比，具有较好的耐大气腐蚀性能。焊接耐候钢牌号包括 Q235NH、Q295NH、Q355NH、Q415NH、Q460NH、Q500NH、Q550NH，生产方式均为热轧，与高耐候钢相比，具有较好的焊接性能。

强度方面，波形钢腹板作为关键受力构件，优先选用 Q345 钢；对于其他受力较小，由最小尺寸或稳定控制设计，或者对整体受力影响不大的次要构件，可选用 Q235 钢。

4.3.3 在钢结构制造中，由于钢材质量和焊接构造等原因，厚板容易出现层状撕裂，为此需要采用 Z 向钢。当波形钢腹板厚度大于 40mm 时，通常采用 Z 向钢。

4.3.8 高强度螺栓有高强度大六角头螺栓和扭剪型高强度螺栓两种，其区别仅在于外形和施工方法，而力学性能和紧固后的连接性能完全一样。高强度大六角头螺栓连接副由一个大六角头螺栓、一个螺母和两个垫圈组成；扭剪型高强度螺栓连接副由一个扭剪高强度螺栓、一个螺母和一个垫圈组成。

4.3.9 钢-混凝土组合结构用焊钉有普通型和穿透型两种。其规格有 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 13\text{mm}$ 、 $\phi 16\text{mm}$ 、 $\phi 19\text{mm}$ 、 $\phi 22\text{mm}$ 和 $\phi 25\text{mm}$ ，波形钢腹板组合梁桥抗剪连接件常采用的规格为 $\phi 19\text{mm}$ 和 $\phi 22\text{mm}$ 。

5 承载能力极限状态计算

5.1 一般规定

5.1.4 由于独柱墩梁桥和弯桥在汽车偏载作用下抗倾覆稳定性差,而波形钢腹板组合梁桥自重轻,恒活载比例较常规混凝土腹板梁桥小,其抗倾覆能力相比混凝土梁桥更为不利,因此应对此类梁桥的抗倾覆验算引起重视。

5.1.5 波形钢腹板组合梁受弯构件受弯承载力计算方法与常规混凝土梁相同,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 的规定进行,但应计入体外预应力钢筋对受弯承载力的贡献。计算时体外预应力钢筋的极限应力 σ_{pu} 为有效预应力 σ_{pe} 与应力增量 $\Delta\sigma_{pe}$ 之和,其中应力增量 $\Delta\sigma_{pe}$ 与混凝土强度、体外预应力钢筋的线形、转向构件的形式与位置、体内与体外预应力钢束的配置比例、结构的跨高比等因素有关,以下为各国规范关于体外预应力钢筋极限应力计算的规定:

美国 AASHTO 规范规定: $\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 103\text{MPa}$ (初步估算)

欧洲 CEB-FIP 1990 规定为: $\sigma_{pu} = \sigma_{pe}$ (预应力束设置在结构外表轮廓线内)

德国 DIN4227 根据不同结构形式规定为:

单跨梁: $\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 110\text{MPa}$

悬臂梁: $\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + 50\text{MPa}$

连续梁: $\sigma_{pu} = \sigma_{pe}$

5.1.6 由于波形钢腹板具有不抵抗顺桥向轴向力的特性,波形钢腹板间的角焊缝连接、高强螺栓连接进行强度计算时,只考虑竖直方向的剪力作用。

5.2 波形钢腹板受剪承载力计算

5.2.2 本条中式 (5.2.2-2) 同时适用于直腹板和斜腹板的箱形

截面。式中关于单块波形钢腹板的剪力设计值，如为单室截面，可认为一个箱的两块腹板平均分担该箱室的剪力；如为多室截面，各腹板的剪力可能不同，计算时可按剪切刚度来分配，如要精确计算，需根据箱梁薄壁微元正应力和剪应力的平衡条件以及环形薄壁截面的变形协调条件联立方程进行求解，方法较繁琐复杂。

式(5.2.2-3)为扭转作用下，单箱单室截面自由扭转剪应力的计算公式，对于单箱多室截面，可按顶板、底板与最外侧腹板组成的单箱单室截面计算。然而，根据薄壁杆件扭转理论，扭转作用下的非圆形截面，其扭转效应包括自由扭转效应和约束扭转效应，后者是由于截面翘曲产生的正应力和剪应力。研究表明，对于直桥，偏载作用下约束扭转效应所占比重很小，波形钢腹板剪应力计算时可仅计入自由扭转剪应力，但对于单箱单室截面弯桥，如考虑约束扭转效应，可根据乌曼斯基第二理论按下式计算波形钢腹板约束扭转剪应力：

$$\tau_w = \frac{E_c \beta'''(z)}{t_w} \left[S_w - \oint S_w \rho ds \right] \quad (1)$$

式中： τ_w ——约束扭转剪应力 (MPa)；

$\beta'(z)$ ——翘曲函数 (1/mm)；

S_w ——广义扇形惯矩 (mm⁴)；

ρ ——截面扭转中心至箱梁任一点的切线垂直距离 (mm)。

相关参数应考虑波形钢腹板不抵抗轴向力的特点，具体计算方法和过程可参考相关文献。

5.2.3~5.2.5 波形钢腹板作为一种主要承受剪力的钢构件，即使抗剪强度满足要求，也可能发生剪切屈曲破坏，因此对波形钢腹板的剪切稳定计算进行了规定。波形钢腹板的剪切屈曲模式分为三种：

1 局部屈曲

是指波形钢腹板在一个平板条内（折痕与折痕之间）屈曲的形式（图 4a）。局部屈曲可视为简支板在均匀剪应力作用下的屈曲稳定问题，其弹性屈曲临界力计算式可依据经典薄板屈曲理论得到。根据结构稳定理论，构件的弹性屈曲属于分支点失稳，该方法由于没有考虑材料的屈服强度，往往会高估构件的承载力。日本波形钢腹板组合结构研究会 1998 年编写的《波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计计算手册》假定波形钢腹板为理想弹塑性，规定了与屈曲参数 $\lambda_{s,L}$ 有关的波形钢腹板局部屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,L}$ 计算式，即本标准式（5.2.4-1）。

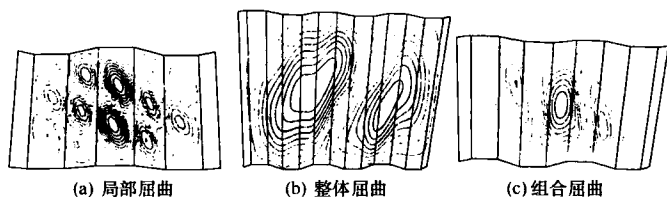


图 4 波形钢腹板的屈曲示意

图 5 为局部（或整体）屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,L}$ （或 $\tau_{cr,G}$ ）与局部（或整体）屈曲参数 $\lambda_{s,L}$ （或 $\lambda_{s,G}$ ）的关系曲线图，图中 $\lambda_{s,L}$ （或 $\lambda_{s,G}$ ） ≤ 0.6 表示非弹性局部（或整体）屈曲临界剪应力位于钢材的屈服域， $0.6 < \lambda_{s,L}$ （或 $\lambda_{s,G}$ ） $\leq \sqrt{2}$ 表示非弹性局部（或整体）屈曲临界剪应力位于钢材的非弹性域， $\lambda_{s,L}$ （或 $\lambda_{s,G}$ ） $> \sqrt{2}$ 表示非弹性局部（或整体）屈曲临界剪应力位于钢材的弹性域。设计时，波形钢腹板剪应力小于非弹性局部屈曲临界剪应力便可满足局部屈曲验算要求。

若要求最有效的发挥波形钢腹板的材料性能，非弹性局部屈曲临界剪应力应处于屈服域，此时 $\lambda_{s,L} \leq 0.6$ 。日本相关统计资料表明，以 $\lambda_{s,L} \leq 0.6$ 为条件，以强度来控制设计的情况比较多，且偏于安全。如将波形钢腹板的相关几何参数和屈服强度代入本标准式（5.2.4-2）～式（5.2.4-4），可得到非弹性局部屈

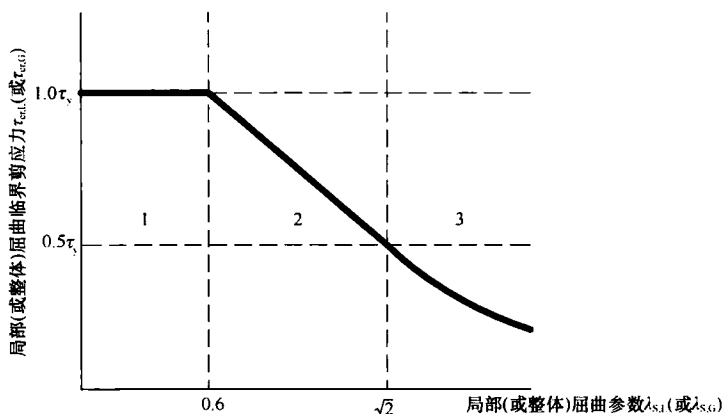


图5 考虑了非弹性的局部(或整体)屈曲临界剪应力

1 屈服域; 2 非弹性域; 3 弹性域

注: τ_y 钢材的剪切屈服强度。

曲临界剪应力控制在屈服域的波幅宽度要求:

$$\begin{cases} e_w \leq h_w & t_w/h_w \geq 1/k_1 \\ e_w \leq \frac{t_w}{0.865\sqrt{1/k_1^2 - \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2}} & t_w/h_w < 1/k_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_1 = 1.088\sqrt{\frac{E}{f_{vd}(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

2 整体屈曲

是指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(图4b)。通常将整个腹板等效为正交异性平板计算其屈曲临界剪应力,本标准采用了美国学者 Easley 提出的计算公式。与局部屈曲一样,如要求整体屈曲强度处于屈服域,则控制条件为: $\lambda_{sG} \leq 0.6$, 将波形钢腹板的相关几何参数和强度设计值代入本标准式(5.2.5-2)~式(5.2.5-5)可得波高要求:

$$d_w \geq t_w \sqrt{[h_w/(k_2 t_w)]^{8/3} - 1} \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{3.6 (E\beta)^{1/2}}{(f_{vd})^{1/2} [12(1-\nu^2)]^{1/8} (6\eta)^{3/8}} \quad (5)$$

3 组合屈曲

是指局部屈曲与整体屈曲复合而成的屈曲形式(图4c)。组合屈曲临界剪应力 τ_{cr} 可由局部屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,L}$ 与整体屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,G}$ 计算得到:

$$\left(\frac{1}{\tau_{cr}}\right)^n = \left(\frac{1}{\tau_{cr,L}}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_{cr,G}}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_y}\right)^n \quad (6)$$

$$\text{或} \left(\frac{1}{\tau_{cr}}\right)^n = \left(\frac{1}{\tau_{cr,L}}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_{cr,G}}\right)^n \quad (7)$$

本标准组合屈曲临界剪应力计算式(5.2.3-2)为式(7),且 n 取4。由该式可知,三种屈曲临界剪应力中,组合屈曲临界剪应力最小,因此只验算组合屈曲。另外有文献认为,已建波形钢腹板组合梁桥中, $\lambda_{s,L}$ 与 $\lambda_{s,G}$ 多数小于0.6,如采用式(7)计算组合屈曲临界剪应力会因低估稳定性而导致不经济的设计,所以为合理评估剪切稳定性,当 $\lambda_{s,L}$ 与 $\lambda_{s,G}$ 在0.6以下时,可忽略组合屈曲验算。本标准出于设计安全考虑,即使 $\lambda_{s,L}$ 与 $\lambda_{s,G}$ 小于0.6,也按式(5.2.3-2)进行组合屈曲验算,此时组合屈曲临界剪应力 $\tau_{cr}=0.84f_{vd}$ 。

5.3 连接件水平受剪承载力计算

5.3.1 本条适用于单箱单室和多箱单室截面,由于这两类截面的单个箱有两块腹板,因此式(5.3.1)分母系数为2。对于单箱多室截面,每块腹板承受的剪力可按腹板剪切刚度进行分配。

对于变高度梁还存在附加剪应力影响,具体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进行。

5.3.3 根据现行国家标准《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433的规定,栓钉材料的极限强度设计值 f_u 不小于400MPa。

5.3.4 本条关于开孔钢板连接件混凝土剪力销受剪承载力计算公式来源于《工程力学》期刊刊登的论文《开孔板连接件抗剪承载力试验研究》。该公式基于国内外 168 个模型试验结果通过回归分析得到，可适用于孔中有无钢筋、孔径 35mm~90mm、混凝土强度等级 C20~C70、孔中钢筋直径 10mm~25mm 及屈服强度 295MPa~480MPa 的开孔钢板连接件，适用范围较广。

5.4 连接件抗角隅弯矩计算

5.4.4 角钢连接件目前有 U 形钢筋焊接于角钢和 U 形钢筋不焊接于角钢两种构造形式。前者通过 U 形钢筋的抗拉强度以及 U 形钢筋与混凝土的粘结强度来抵抗角隅弯矩，后者通过贯穿钢筋的抗剪强度来抵抗角隅弯矩。通常情况下，如果贯穿钢筋的抗剪强度满足抗角隅弯矩要求，则推荐采用 U 形钢筋不焊接于角钢的构造形式，因为近些年国外所做的角钢连接件角隅弯矩疲劳试验结果表明，U 形钢筋与角钢焊接端易产生疲劳裂缝。当采用 U 形钢筋焊接于角钢的构造时，应使得 U 形钢筋抵抗角隅弯矩的能力不低于贯穿钢筋。

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 当无试验数据时,管道壁摩擦系数与管道每米局部偏差对摩擦的影响系数可分别取 0.04、0.009。

6.2 连接件抗滑移与应力计算

目前有两种方法考虑连接件的抗滑移:内力控制和滑移量控制。前者是目前《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64-2015 的做法,后者是《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01-2015 的做法,本标准采用前者。

6.2.2 根据日本规范《道路桥示方书及解说》,设计荷载作用时栓钉连接件容许水平剪力按下列公式计算:

$$V_u = 9.4d^2 \sqrt{f_{cy,k}} \quad (H/d \geq 5.5) \quad (8)$$

$$V_u = 1.72dH \sqrt{f_{cy,k}} \quad (H/d < 5.5) \quad (9)$$

式中: V_u ——栓钉连接件容许水平剪力 (N);

d ——栓钉直径 (mm);

H ——栓钉长度 (mm);

$f_{cy,k}$ ——混凝土圆柱体抗压强度标准值 (MPa)。

由于我国采用混凝土立方体抗压强度标准值来确定混凝土强度等级,将 $f_{cy,k}$ 按 $0.8 f_{cu,k}$ 换算后可得到本标准式 (6.2.2-2)、式 (6.2.2-3)。

6.2.3 本条公式根据日本规范《道路桥示方书及解说》中的相关公式修改得到。《道路桥示方书及解说》规定,设计荷载作用下混凝土剪力销的剪力不应大于其在极限荷载作用下水平受剪承载力的 0.33 倍。

6.2.4 为便于贯穿钢筋的布置,单开孔钢板与栓钉组合连接件

中的开孔和栓钉通常沿顺桥向错开布置,且间距相等,因此式(6.2.4)仅适用于该情况。

6.2.5、6.2.6 埋入式连接件在正常使用极限状态下的验算公式根据日本设计技术文件《波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计计算手册》中的相关计算公式修改得到。

6.3 挠度计算

6.3.1 梁在垂直于其长度方向的荷载作用下,其挠度由弯曲变形和剪切变形产生。梁的挠度计算时,如只计入弯曲变形的作用,剪切变形的影响可忽略不计,这种梁称为欧拉梁。混凝土梁挠度计算时通常按欧拉梁考虑,但对于深梁、短梁以及剪切刚度较低的梁(如三明治梁),剪切变形对挠度的影响会比较大。有研究表明,波形钢腹板组合梁桥剪切变形产生的挠度与弯曲变形产生的挠度的比值可达10%~20%,且等高度梁比变高度梁更大,因此波形钢腹板组合梁桥挠度计算时应计入剪切变形的影响。

6.3.3 对于配置体外预应力钢筋的受弯构件,混凝土开裂前外荷载引起的体外预应力钢筋的应力增量很小,因此换算截面惯性矩不计入体外预应力钢筋的贡献。

6.3.4 波形钢腹板组合梁桥弯曲变形由顶板、底板的轴向变形和弯曲变形产生,其计算原理与常规混凝土梁桥相同。而荷载长期效应的影响考虑的是混凝土构件随着时间增长刚度不断降低这一材料特性,因此波形钢腹板组合梁桥挠度验算时荷载长期效应的影响可参照常规混凝土梁桥计算,但仅针对弯曲变形产生的挠度,对于波形钢腹板剪切变形产生的挠度则无需考虑。

7 构造要求

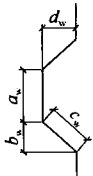
7.1 波形钢腹板

7.1.1 为便于波形钢腹板制作应用的标准化,目前国内外常用的波形钢腹板型号主要有三种:1600型、1200型、1000型。其中1600型整体稳定性最好,也较经济(用钢量比1200型小约3.2%),因此工程实践中应用最多,而1200型和1000型通常用于小跨径桥梁,或因施工运输条件限制需较短波长与波幅的桥梁。

如使用本标准图7.1.1所示型号之外的波形形状,应综合考虑制造与施工的可行性、经济性和景观性等因素,合理设计波长、幅长、波高、幅板倾角等参数,并宜使直幅段长度与斜幅段长度相等。

表1为日本早期波形钢腹板组合梁桥波形钢腹板形状参数。

表1 日本早期波形钢腹板组合梁桥波形钢腹板形状参数 (mm)

桥名	波形形状				板厚	形状示意
	a_w	b_w	c_w	d_w		
新开桥	250	200	250	150	9	
银山御幸桥	300	260	300	150	8~12	
本谷桥	330	270	330	200	9~14	
锅田高架桥	340	160	226	160	9~28	
中子沢桥	300	260	300	150	8~12	
中野高架桥	330	270	330	200	9~19	
前谷桥	430	370	430	220	9~12	
大内山川第二桥	430	370	430	220	9~22	
锅田高架桥(西)	430	370	430	220	16~22	
勝手川桥	430	370	430	220	9~12	
小大九川桥	430	370	430	220	9~16	
小河内川桥	430	370	430	220	9~16	
下田桥	430	370	430	220	12~16	

7.1.2 目前国内波形钢腹板组合梁桥，波形钢腹板的厚度已超过 30mm，但不建议厚度超过 40mm，因为较厚的钢板存在弯曲加工部位韧性低、变形时效显著及层状撕裂等问题。

7.1.4 波形钢腹板组合箱梁桥设置通风孔的目的主要是促进箱室内外的空气流通，减小箱内外温差引起的温度效应，为后期的维修养护提供必要的通风措施。

7.2 体外预应力束

7.2.1 体外预应力束锚固系统主要有可调式、可调可换式两种。

采用集束式转向器的非成品体外预应力钢绞线，若不更换，可选用一般预应力锚具，如需要更换，通常选用带隔离层的体外预应力锚具，这两种锚具均在内腔及边管内灌注水泥浆防腐，如需要多次张拉，可选用专用锚具，锚具附近改用油脂防腐。

采用散束式转向器的非成品体外预应力钢绞线，如需要单根钢绞线更换或多次张拉，通常选用带喇叭管的专用锚具，喇叭管及连管内采用油脂防腐。

成品体外索如需要更换，可选用带保护罩的体外索锚具，如需要多次张拉，锚板可设螺帽，锚具内腔或喇叭管及连管内采用油脂防腐。

7.2.3 在设置体外预应力束的波形钢腹板组合梁桥中，体外预应力束在转向块之间，或转向块与锚固块之间，会产生独立于梁体的变形与振动。为避免体外预应力束与梁体产生共振，可通过设置减振装置来减小其自由长度。理论研究表明，当体外预应力束的自由长度在 10m 以内或者体外预应力束和梁体的竖向自振频率比不小于 5 时，不会发生体外预应力束与梁体的共振。

7.2.4 在体外预应力束与转向块的接触区域，由于横向挤压力和体外预应力束因弯曲后产生的内应力，可能使体外预应力束的强度下降。为减轻这一不利影响，应限制体外预应力束在转向块处的最小曲率半径，但是如采用较大的曲率半径，则转向

块的尺寸也将变大,从而导致自重增加和其他设计上的不合理。因此,在能够保证转向块和体外预应力束受力安全的前提下,体外预应力束的曲率半径宜尽可能小,通常可为套管直径的100倍以上。

7.3 支点节段及组合腹板段

7.3.1 波形钢腹板组合梁桥横隔板与顶板、底板连接处,通常通过设置加腋来减轻该部位的应力集中。

7.3.2 在邻近支点节段设置内衬混凝土的作用如下:

1 防止波形钢腹板发生屈曲

由于存在支座反力扩散的影响,邻近支点节段的波形钢腹板受力较复杂,其稳定性比纯剪切状态要差。另一方面,因制作时加工精度和平整度的影响,当腹板较高时,稳定性也有所降低。如设置内衬混凝土,可为波形钢腹板提供面外支撑,防止其发生屈曲。

2 减小支点附近顶板、底板的附加弯矩

波形钢腹板组合梁桥由于腹板剪切刚度低,竖向荷载作用下,会产生两种形式的弯曲变形和内力:整个截面绕形心轴的转动和整体弯矩;顶板、底板绕各自形心轴的转动和局部弯矩(或称附加弯矩),前者即欧拉梁理论中的弯曲效应,后者为局部效应。该局部效应对组合梁顶板、底板的受力是不利的,尤其是在集中荷载和支点反力作用位置,局部效应更为显著,而设置内衬混凝土后,可提高组合梁腹板刚度从而降低局部效应的影响。

3 使波形钢腹板节段与支点节段的剪力均匀传递

波形钢腹板和支点节段混凝土腹板的剪切刚度相差较大,设置内衬混凝土形成钢-混凝土组合腹板后,可缓和刚度突变,使波形钢腹板剪力均匀传递至支点节段混凝土腹板。

7.3.3 波形钢腹板开孔并设置贯穿钢筋的连接方式相当于开孔钢板连接件,因此每个孔的竖向受剪承载力可根据本标准第5.3.4条计算,但 n 取1.0。

7.4 跨间横隔板

7.4.1、7.4.2 设置一定数量的跨间横隔板是为了提高波形钢腹板组合梁桥的抗扭性能,此外跨间横隔板还可兼具体外预应力束的转向功能。在中等跨径的工程实例中,转向块在一跨内通常至少设置2个,因而横隔板间距多为10m~25m。表2为日本部分已建波形钢腹板组合梁桥中跨间横隔板的间距。

表2 日本部分已建波形钢腹板组合梁桥跨间横隔板间距(m)

桥名	最大跨径	横隔板间距	曲线半径
新开桥	30.0	9.0~12.0	∞
银山御幸桥	45.5	9.0~15.5	∞
本谷桥	97.2	11.1~24.6	2400
中野高架桥	85.5	7.8~19.6	250~440
白泽桥	50.0	16.3~17.5	250

工程设计时,如要精确确定横隔板的合理间距,往往需要进行扭转效应(约束扭转和畸变)分析与研究,合理间距的标准为截面翘曲正应力与弯曲正应力的比值在5%以内,但相关理论较复杂,如无条件进行相关研究和计算,横隔板间距可取10m~25m,对于弯桥尚应适当减小。

7.4.3 当组合箱梁部分正弯矩区域采用钢底板时,该区域的横隔板可采用钢横撑式,以简化连接,减轻自重。

7.4.4 研究表明,混凝土板墙式横隔板即使不与波形钢腹板连接,其提高波形钢腹板组合梁桥抗扭性能的作用也不会有明显差异,而且运营阶段,波形钢腹板再涂装更容易。

7.5 连接件

7.5.1 已有工程实例中,波形钢腹板组合梁桥中的连接件可分为以下两类:

1 有钢翼缘板的连接件

波形钢腹板上下端焊接钢翼缘板，钢翼缘板上安装栓钉、角钢或开孔钢板等部件的连接方式（图 6）。

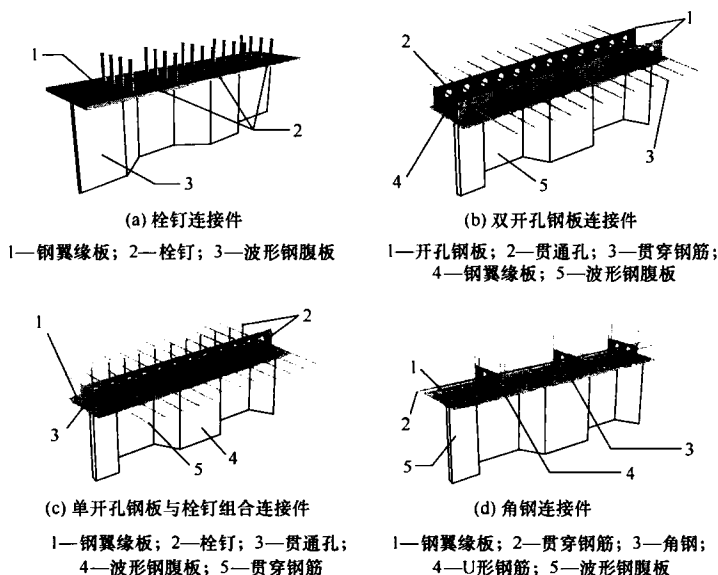


图 6 有钢翼缘板的连接件

2 无钢翼缘板的连接件（埋入式连接件）

波形钢腹板直接嵌入顶板或底板，依靠混凝土齿块、接合钢筋以及波形钢腹板上的混凝土剪力销传力的连接方式（图 7）。

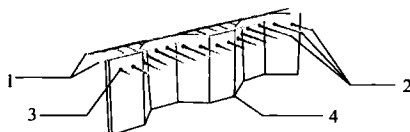


图 7 埋入式连接件

1—接合钢筋；2—贯穿钢筋；3—贯通孔；
4—波形钢腹板

与有钢翼缘板的连接件相比，无钢翼缘板的连接件具有更好的抗角隅弯矩能力，并且由于不存在焊接问题，其抗疲劳性能也更好。对于组合梁顶板而言，由于是交通荷载直接作用的部位，为提高耐久性和维修养护方便，其与波形钢腹板的连接采用有钢翼缘板的连接件更合理。

7.5.2 靠近纯波形钢腹板附近组合腹板的栓钉，由于伴随着剪力转移会产生应力集中，可在栓钉根部设置缓冲材料或采用弹性栓钉。

7.5.3 波形钢腹板与底板的连接区域，在运营阶段各种荷载的长期作用下易产生裂缝或空隙，设置排水和密封措施可防止雨水、露水的蓄积，有利于提高该部位的抗腐蚀性和耐久性。

7.5.7 由于混凝土的收缩效应，钢翼缘板与混凝土之间容易产生空隙，从而影响连接件耐久性，因此波形钢腹板与底板的连接如采用有钢翼缘板的连接件，钢翼缘板宜埋入底板混凝土中。但对于波形钢腹板与顶板的连接件，在车辆荷载作用下存在较大的角隅弯矩，角隅弯矩对连接件产生的掀起力容易使得钢翼缘板与顶板剥离，因此不建议钢翼缘板埋入顶板混凝土中。

7.5.8 本条规定是为了保证钢翼缘板下的混凝土浇筑密实。

8 施 工

8.1 一 般 规 定

8.1.4 波形钢腹板互换性不强，所以在出厂前应按照设计图纸进行编号，并在安装前进行查验。

8.1.7 波形钢腹板安装过程中随意焊接和切割作业，容易引起残余应力和损伤。

8.1.12 波形钢腹板组合梁桥变形计算理论较复杂，采用混凝土梁的计算理论，会产生较大的误差，而大跨径桥梁施工中的线形控制又是重点，因此波形钢腹板组合梁桥的悬臂施工需要相应资质的第三方进行施工监控。

施工监控的主要目的是，保证施工过程中结构的安全以及成桥后的线形、内力满足设计要求。为达到目的，施工监控的主要工作内容如下：

1 监测桥梁施工过程中的主要应力、应变状态及分析桥梁变形测量数据；

2 验算施工过程中各构件的应力状态及稳定性，对危险施工工况提出警告；

3 复核设计单位提供的主要工况的挠度变化值；

4 确定混凝土弹性模量、容重的测定和收缩、徐变系数；

5 协同施工单位进行施工挂篮静力荷载试验；

6 对施工方案提出合理建议；

7 协助施工单位提供合理的施工立模标高；

8 协助设计单位提供合理的合龙温度；

9 会同有关部门对施工过程中出现的问题和意外事故提出合理的解决方案。

8.2 波形钢腹板施工

8.2.1 波形钢腹板在安装过程中易出现残余变形和内力，需要进行施工过程控制以保证其内力和变形符合设计要求。

8.2.2 波形钢腹板组合梁桥的施工包括组合梁节段现场施工和波形钢腹板工厂制造两道作业，组合梁节段施工过程中预应力钢筋的张拉与混凝土收缩徐变效应会引起组合梁长度方向的变形，波形钢腹板工厂制造确定尺寸时，需考虑这一影响。

8.2.8 波形钢腹板组合梁桥首块波形钢腹板定位对后续波形钢腹板影响很大，因此其定位精度最为关键。而后续波形钢腹板定位前对前续波形钢腹板的定位进行复测，是为了方便对定位偏差进行修正。

8.2.12 波形钢腹板节段之间的对接焊缝连接，其质量对施焊条件要求较高，如采用现场竖焊很难保证焊缝受力的可靠性。

8.2.16 波形钢腹板若不进行预涂装，则从工厂运出到现场浇筑混凝土这一时间段内，易于生锈，而且锈水也会使波形钢腹板污染，从而增加现场施工中的清洁和除锈作业量，因此波形钢腹板在从工厂运出前应先涂饰底漆。

8.2.17 波形钢腹板的涂装可能会在运输时受到损伤。作为对策，可采用表面喷涂和粘贴薄膜两种方法进行保护，其注意事项如下：

1 对于表面喷涂的方式，由于涂装面的凹凸，保护材料上会产生斑纹，涂抹后 3 个月，损坏的情况比较多，而且剥离作业比较困难和耗时，因此不适合用于 3 个月以上的涂装保护。另一方面，由于对热非常敏感，不能在现场焊接线附近进行涂抹。

2 对于粘贴薄膜的方式，若进入空气或形成皱折，粘贴比较困难；若粘结力比较强，拆除时可能会对涂装面造成损伤；温度稳定性差，不宜在高温天气中使用。