

# DB13

## 河北省地方标准

DB13/T 2466—2017

---

### 公路波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥 设计与施工规范

2017 - 03 - 29 发布

2017 - 06 - 01 实施

河北省质量技术监督局 发布

# 目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	2
4 总则.....	5
5 材料.....	5
6 结构分析.....	6
7 承载能力极限状态计算.....	8
8 正常使用极限状态计算.....	9
9 混凝土桥面板设计.....	10
10 波形钢腹板设计.....	13
11 抗剪连接件设计.....	17
12 横梁、横隔板、转向块以及内衬混凝土设计.....	24
13 构造要求.....	25
14 波形钢腹板制造.....	30
15 波形钢腹板现场安装.....	34
16 抗剪连接件施工.....	36
17 满堂支架现浇施工.....	38
18 悬臂现浇施工.....	39
19 预制吊装施工.....	42
20 顶推施工.....	43
21 施工质量检验与验收.....	45

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009的规则起草。

本标准由河北省交通运输厅提出。

本标准起草单位：河北省交通规划设计院、东南大学、邢台路桥建设总公司、河南大建桥梁钢构股份有限公司。

本标准主要起草人：王国清、何勇海、赵文忠、朱冀军、雷伟、张国清、张梅钗、万水、尉红彬、闫涛、李志聪、马骅、张建斌、张超、徐洪涛、高海涛、宋扬、赵晓辉、秦文香、苏立超、朱中华、李宁、陈华利、郑会玺。

# 公路波形钢腹板预应力混凝土组合桥梁设计与施工规范

## 1 范围

本标准规定了公路波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的材料、结构设计与分析、结构构造施工方法以及质量检验与验收等内容。

本标准适用于各等级公路桥梁，城市道路桥梁可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 700 碳素结构钢
- GB/T 714 桥梁用结构钢
- GB/T 1228 钢结构用高强度大六角头螺栓
- GB/T 1229 钢结构用高强度大六角螺母
- GB/T 1230 钢结构用高强度垫圈
- GB/T 1231 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 1591 低合金高强度结构钢
- GB/T 3632 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副
- GB/T 3633 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副技术条件
- GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉
- GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- GB/T 18593 熔融结合环氧粉末涂料的防腐蚀涂装
- GB 50017 钢结构设计规范
- GB 50153 工程结构可靠性设计统一标准
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收规范
- GB/T 50283 公路工程结构可靠度设计统一标准
- GB/T 50917 钢-混凝土组合桥梁设计规范
- GB 50661 钢结构焊接规范
- JGJ 92 无粘结预应力混凝土结构技术规程
- JTG B01 公路工程技术标准
- JTG/T B02-01 公路桥梁抗震设计细则
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG/T D60-01 公路桥梁抗风设计规范
- JTG D62 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG/T J22 公路桥梁加固设计规范
- JTG/T F50 公路桥涵施工技术规范
- JTG F80-1 公路工程质量检验评定标准

- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件
- JT/T 784 组合结构桥梁用波形钢腹板
- Q/CR 9211 铁路钢桥制造规范
- TB/T 1527 铁路钢桥保护涂装及涂料供货技术条件
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范
- JTG/T D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

**波形钢腹板预应力混凝土组合梁** prestressed concrete composite girder with corrugated steel webs

由预应力混凝土顶底板与波形钢腹板通过抗剪连接件组合而成能共同受力的钢-混凝土组合梁(图1)。

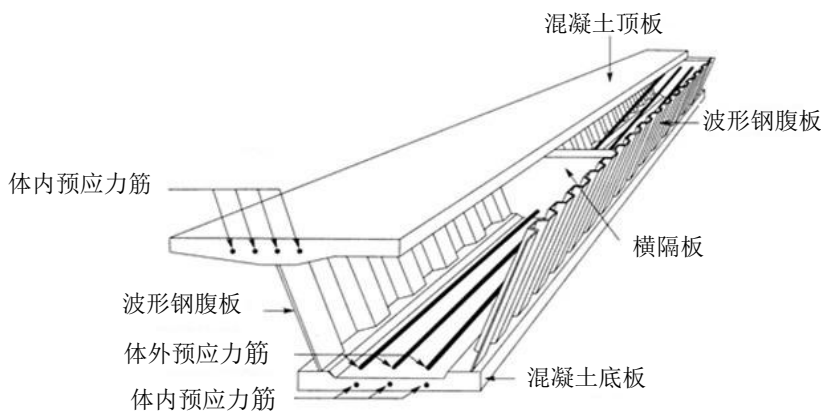


图 1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁示意图

3.2

**波形钢腹板** corrugated steel web

被加工成波折或波纹形状，作为箱梁或工字梁腹板构造的钢板（图2）。

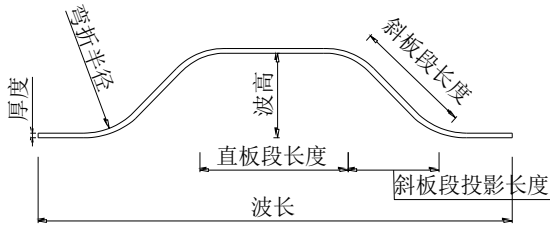


图 2 波形钢腹板形状示意图

3.3

**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）的屈曲（图3-a）。

### 3.4

#### 整体屈曲 global buckling

波形钢腹板整体的屈曲（图3-b）。

### 3.5

#### 组合屈曲 Interactive buckling

局部屈曲与整体屈曲复合形成的屈曲形式（图3-c）。

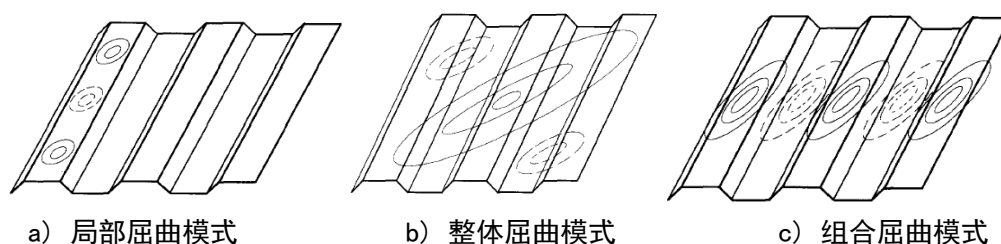


图3 波形钢腹板屈曲示意图

### 3.6

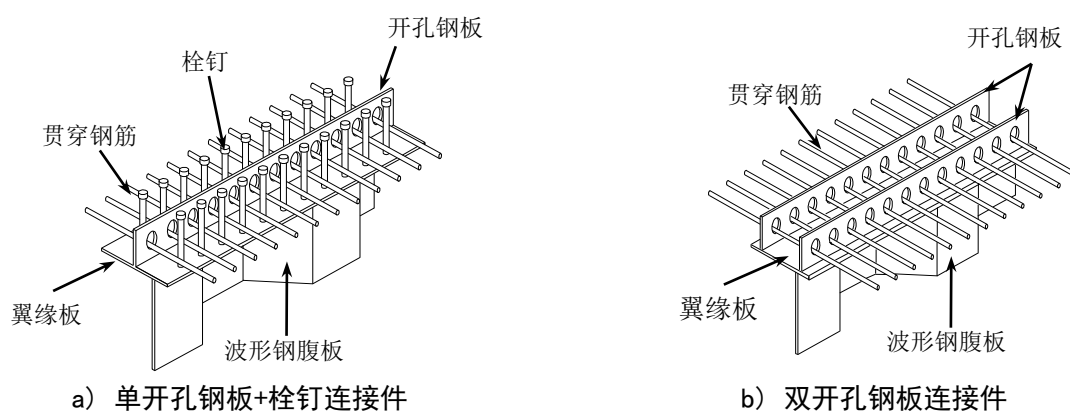
#### 角隅弯矩 corner moment

恒载与活载作用下，在波形钢腹板与组合箱梁顶板、底板连接部产生的腹板面内的嵌固弯矩。

### 3.7

#### 抗剪连接件 Shear connector

用于连接波形钢腹板与混凝土顶底板并传递两者之间的纵向剪力、横向弯矩，抵抗两者相对滑移、竖向分离，保证两者共同工作的部件，俗称剪力键(图4)。



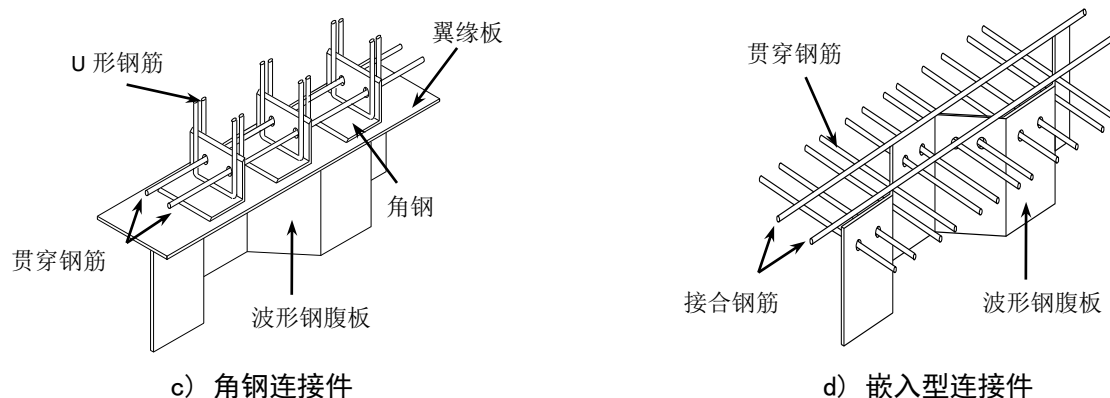


图4 波形钢腹板与混凝土顶、底板常用的连接方式

## 3.8

**翼缘型连接件 flange shear connector**

在波形钢腹板上下端焊接翼缘板，再在其上安装栓钉、销孔角钢或开孔板混凝土销等，使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接件。

## a) 单开孔钢板+栓钉连接件 single PBL and studs shear connector

通过开孔钢板与栓钉连接件使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接件(图4-a)；

## b) 双开孔钢板连接件 twin PBL shear connector

通过两块开孔钢板与孔内横向贯穿钢筋使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接件(图4-b)；

## c) 角钢连接件 angle plate shear connector

通过焊接在钢翼缘板上的角钢、U形钢筋、纵向贯穿钢筋使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接件(图4-c)。

## 3.9

**嵌入型连接件 embedded shear connector**

在波形钢腹板上焊接纵向接合钢筋、开设横向贯穿钢筋并埋入混凝土中，使其与混凝土共同受力的连接件(图4-d)。

## 3.10

**混凝土剪力销 concrete shear pins**

把混凝土注入开孔的钢板，使孔中填充的混凝土形成的圆柱体与横向贯穿钢筋共同起作用而形成的抗剪连接件。

## 3.11

**贯穿钢筋 steel bar through pin-hole**

穿过开孔钢板销孔的钢筋，分纵向和横向两种。

## 3.12

**内衬混凝土 inner lining concrete**

波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥在墩顶附近一定范围内，在波形钢腹板内侧设置的混凝土。

## 4 总则

- 4.1 为规范公路波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的应用与发展,使其符合安全可靠、适用耐久、技术先进、经济合理、节能环保的要求,制定本规范。
- 4.2 本规范按照国家标准 GB/T 50283、GB 50153 规定的设计原则,采用以概率理论为基础的极限状态设计方法(疲劳设计除外),按分项系数的表达式进行设计。
- 4.3 本规范采用的设计基准期为 100 年。
- 4.4 波形钢腹板预应力混凝土组合梁可用于梁桥、斜拉桥等结构体系。
- 4.5 除常规梁式桥外,其它结构类型的波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥在进行结构分析、设计、施工之前,宜进行必要的试验和研究,以确定相关设计模式和施工工艺。
- 4.6 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的抗风设计应依据 JTG/T D60-01 等相关规范进行。
- 4.7 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的抗震设计应依据 JTG/T B02-01 等相关规范进行。
- 4.8 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥应根据其所处环境条件和设计使用年限要求进行耐久性设计且应符合现行国家标准及行业标准的有关规定。
- 4.9 公路波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的设计与施工除应符合本规范的规定外,尚应符合现行国家和行业有关标准的规定。

## 5 材料

### 5.1 基本要求

波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥中所使用的材料性能应符合现行的国家标准和行业标准的規定。

### 5.2 混凝土

- 5.2.1 混凝土的材料参数应按 JTG D62 的有关规定执行。
- 5.2.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥上部结构的混凝土强度等级不应低于 C40。

### 5.3 普通钢筋与预应力筋

波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥所用的普通钢筋与预应力筋应按 JTG D62 的规定采用。

### 5.4 钢材

- 5.4.1 结构钢材要满足强度、塑性、韧性和可焊性的要求,选用时应综合考虑结构的重要性、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。
- 5.4.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥用的钢材宜采用质量等级 C 级或以上级别的碳素结构钢、低合金高强度结构钢或桥梁用结构钢,其质量要求应符合 GB/T 700、GB/T 1591 和 GB/T 714 的规定,钢材的强度设计值和物理特性指标按 GB 50917 规定执行。
- 5.4.3 波形钢腹板及其连接件焊接材料的选用应与主体钢材相匹配。



5.4.4 焊缝强度设计值应按 GB 50017 规定执行。

5.4.5 高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合 GB/T 1231、GB/T 3632、GB/T 3633 的规定。

5.4.6 栓钉连接件的材料应符合 GB/T 10433 的规定。

## 6 结构分析

### 6.1 一般规定

6.1.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥应按以下基本假定进行结构分析：

- 波形钢腹板与混凝土顶、底板共同工作，不会发生相对滑移或剪切连接破坏；
- 波形钢腹板不承受轴向力，纵向弯曲时忽略波形钢腹板的纵向弯曲作用，弯矩仅由混凝土顶、底板构成的截面承担；
- 组合梁纵向弯曲时符合平截面假定；
- 剪力由波形钢腹板承担且剪应力沿波形钢腹板高度方向均匀分布。

6.1.2 结构分析计算模型应基于波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥构造、受力作用、边界条件等做适当等效模拟，结构模型应反映桥梁的实际受力情况。

6.1.3 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥设计计算中采用的作用及作用效应组合应按 JTG D60 执行。

### 6.2 整体计算

6.2.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥一般用于线性分析的刚度计算截面(如图 5a 所示)。主梁弯曲、轴向刚度仅以混凝土顶底板组成的有效截面进行计算(如图 5b 所示)，剪切刚度则仅以波形钢腹板有效截面进行计算(如图 5c 所示)。而计算单元、边界条件和荷载的施加等可参考普通预应力混凝土桥梁。

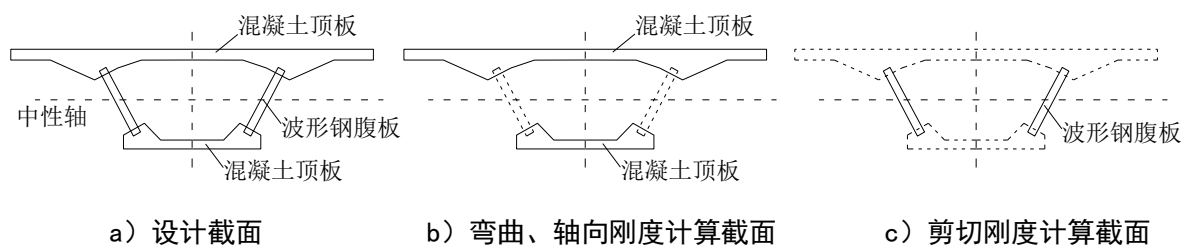


图 5 波形钢腹板预应力混凝土组合梁有效截面示意图

6.2.2 单箱单室波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁的扭转惯性矩可按式(1)计算。对于双室或多室截面，可仅考虑最外侧的波形钢腹板按单箱单室截面计算扭转刚度。

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\left[ \frac{h_m}{n_s t_3 (1+\alpha)} + \frac{b_m}{t_1 (1-\alpha)} + \frac{h_m}{n_s t_4 (1+\alpha)} + \frac{b_m}{t_2 (1-\alpha)} \right]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$J_t$  ——扭转惯性矩 ( $\text{mm}^4$ )；

- $A_m$  ——箱梁薄壁中心线所围面积( $\text{mm}^2$ ),  $A_m = h_m \times b_m$ ,  $h_m$  为顶板与底板中心线之间的距离( $\text{mm}$ );  
 $b_m = (b_1 + b_2)/2$ , 其中  $b_1$ 、 $b_2$  分别为顶、底板处波形钢腹板中心线之间的距离( $\text{mm}$ ) (图 6);  
 $n_s$  ——钢材与混凝土的剪切模量比,  $n_s = G/G_c$ ;  
 $t_i$  ——箱梁横截面各部件的厚度( $\text{mm}$ );  
 $\alpha$  ——修正系数,  $\alpha = 0.4h_m/b_m - 0.06 \geq 0$ , 且当  $h_m/b_m < 0.2$  时,  $\alpha = 0$ 。

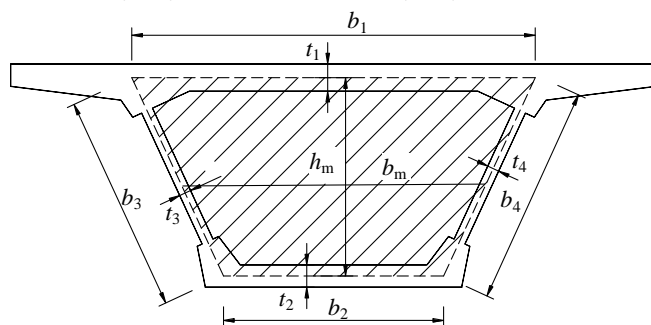


图 6 波形钢腹板组合梁桥扭转惯性矩计算图

### 6.3 截面内力计算

6.3.1 在验算波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥温度内力时,可只考虑混凝土顶、底板温度变化的影响。

6.3.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的冲击系数要根据桥梁结构基频按照 JTG D60 的相关公式进行计算。

### 6.4 横向分析

6.4.1 横向分析包括横隔板、桥面板、底板及波形钢腹板与混凝土顶、底板连接的横向抗弯分析。

6.4.2 根据不同要求,波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的横向分析可采用平面框架模型或三维有限元模型。对于桥面板跨径超过 6m 的箱形截面以及单箱多室截面的横向分析应采用三维有限元模型进行分析。

6.4.3 用平面框架模型进行分析时,可将横截面简化成由顶底板与腹板组成的箱梁框架计算模型进行受力计算,波形钢腹板与顶底板结合部做刚接处理,将波形钢腹板的重心间距视为腹板间距。

6.4.4 平面框架分析中,波形钢腹板的等效单位长度横向抗弯刚度  $D_x$  可按式(2)计算:

$$D_x = EI_x \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$D_x$  ——等效单位长度横向抗弯刚度( $\text{N} \cdot \text{mm}^2/\text{mm}$ );

$E$  ——波形钢腹板的弹性模量(MPa);

$I_x$  ——单位长度波形钢腹板绕纵桥向的惯性矩( $\text{mm}^4/\text{mm}$ ),按式(32)计算。

6.4.5 车辆作用的横向内力计算可按以下步骤进行:

- a) 确定所需计算的截面,进行车辆最不利纵横向布置;

- b) 确定板的有效分布宽度：将箱梁外伸悬臂板视作固支悬臂板；将中部顶板视作简支于两腹板的简支板；根据 JTG D62 中的规定确定车轮荷载在板上的有效分布宽度；
- c) 根据有效宽度范围，得出截面沿纵向单位箱梁上的作用荷载；
- d) 应用平面杆系有限元程序进行箱梁横向内力计算，将顶板中点的弯矩值乘以 1.1 进行修正（其余弯矩值保持不变）。

6.4.6 横隔板、桥面板、底板等各截面的极限承载力、抗裂、变形、应力等内容应满足 JTG D62 的相关要求。

## 7 承载能力极限状态计算

### 7.1 一般规定

7.1.1 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥的体内、体外预应力钢筋应作为抗拉钢筋来进行截面抗力计算，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但不超过材料强度设计值。

7.1.2 弯桥采用波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁时，应对其抗扭性能进行验算，并保证其抗扭承载力满足设计要求。

7.1.3 当弯桥和独墩桥采用波形钢腹板预应力混凝土组合梁时，应进行上部结构抗倾覆计算，同时在作用效应的标准组合下，单向受压支座不应处于脱空状态。

7.1.4 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥按承载能力极限状态进行验算时，作用的效应（其中汽车荷载应计入冲击系数）应采用其作用基本组合的效应设计值；结构材料性能应采用其强度设计值。

### 7.2 承载能力极限状态验算

7.2.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的正截面抗弯承载力验算应按 JTG D62 的规定执行。

7.2.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的波形钢腹板抗剪承载力验算应按本规范 10.2 条的规定执行。

7.2.3 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥抗剪连接件的承载力验算应按本规范 11.2 条的规定执行。

7.2.4 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的体内、体外预应力束应作为抗拉钢筋来进行截面抗力计算，体外预应力钢筋的极限应力设计值应按照式(3)和式(4)计算：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{pu} \leq f_{pd} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\sigma_{pu}$  ——体外预应力钢筋的极限设计值 (MPa)；

$\sigma_{pe}$  ——体外预应力钢筋的有效预应力 (MPa)；

$f_{pd}$  ——预应力束的抗拉屈服强度 (MPa)。

7.2.5 体外预应力束的转向块的抗拉和抗剪承载力计算应按本规范 12.2.2 条进行。

7.2.6 组合腹板段内衬混凝土的斜截面抗剪承载力验算应按 JTG D62 的规定进行, 同时应考虑波形钢腹板对抗剪承载力的贡献。

7.2.7 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥可按 (5) 式进行上部结构抗倾覆验算:

$$r_{\text{qf}} S_{\text{sk}} \leq S_{\text{bk}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$r_{\text{qf}}$  ——抗倾覆稳定系数, 不应小于 2.5;

$S_{\text{sk}}$  ——不平衡作用效应的标准组合;

$S_{\text{bk}}$  ——平衡作用效应的标准组合。

抗倾覆验算的汽车荷载及其组合应符合下列规定:

- a) 验算倾覆稳定的汽车荷载应采用 JTG D60 的车道荷载, 集中荷载标准值应乘以 1.2 的系数;
- b) 汽车荷载横向应按相应规范的最不利位置布置, 多车道桥梁汽车荷载产生的效应不得折减;
- c) 汽车荷载应计入冲击作用;
- d) 应计入风荷载与汽车荷载的共同作用, 风荷载应按 JTG-T D60-01 的规定进行计算。

## 8 正常使用极限状态计算

### 8.1 一般规定

8.1.1 正常使用极限状态下, 应考虑采用作用(或荷载)的短期效应组合、长期效应组合或短期效应组合并考虑长期效应组合的影响。对波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的混凝土顶、底板的抗裂和挠度进行验算, 汽车荷载可不计冲击系数。

8.1.2 正常使用极限状态下, 应对波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥使用阶段的顶、底板的法向应力和预应力筋的拉应力进行计算。计算时作用(或荷载)取其标准值, 汽车荷载效应考虑冲击系数。

### 8.2 正常使用极限状态验算

8.2.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥体内预应力筋的张拉控制应力及预应力损失按 JTG D62 的规定执行。

8.2.2 波形钢腹板正常使用极限状态剪切应力验算应按本规范 10.2.6 条的规定执行。

8.2.3 对于斜、弯波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥, 应根据 JTG D62 的规定进行箱梁顶、底板的斜截面抗裂验算, 验算箱梁顶、底板斜截面主拉应力时应计入扭转剪应力的作用, 扭转剪应力应采用作用效应的标准组合。

8.2.4 组合腹板段内衬混凝土的斜截面抗裂验算应按 JTG D62 中的规定进行。

8.2.5 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的挠度验算可根据 6.2.1 条规定的刚度计算截面用结构力学的方法进行计算, 且应符合 JTG D62 中规定。计算中应考虑波形钢腹板剪切变形对挠度的影响, 波形钢腹板因剪切变形产生的挠度按式(6)~(8)计算。

$$\omega_{\tau} = \int \frac{k_v V \beta_1 \bar{V}}{GA_w} dx \dots\dots\dots (6)$$

$$A_w = h_w t_w \zeta \dots\dots\dots (7)$$

$$\beta_i = h_w / h \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- $\omega_t$  ——波形钢腹板因剪切变形产生的挠度 (mm)；
- $k_v$  ——剪切修正系数，可取  $k_v = 1$ ；
- $V$  ——由荷载产生的剪力设计值 (N)；
- $\beta_i$  ——波形钢腹板的剪切分担率；
- $\bar{V}$  ——由单位荷载产生的剪力；
- $G$  ——波形钢腹板的剪切模量 (MPa)；
- $A_w$  ——波形钢腹板的有效剪切面积 (mm<sup>2</sup>)；
- $h_w$  ——波形钢腹板的高度 (mm)；
- $t_w$  ——波形钢腹板的厚度 (mm)；
- $\zeta$  ——波形钢腹板形状系数， $\zeta = (a_w + b_w) / (a_w + c_w)$ ；
- $a_w$  ——波形钢腹板直板段长度 (mm)；
- $b_w$  ——波形钢腹板斜板段投影长度 (mm)；
- $c_w$  ——波形钢腹板斜板段长度 (mm)；
- $h$  ——组合梁高度 (mm)。

8.2.6 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥顶、底板混凝土的压应力及预应力钢筋的拉应力计算应按 JTG D62 中规定进行。

8.2.7 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥在施工阶段的变形验算应按 JTG D62 中有关规定进行。

## 9 混凝土桥面板设计

### 9.1 一般规定

9.1.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁的桥面板必须充分考虑波形钢腹板的力学特性进行设计。

9.1.2 桥面板的构造要求应符合 GB 50917 的有关规定。

9.1.3 桥面板设置承托时，其外形尺寸及构造(图 7)应符合下列规定：

- a) 当承托高度在 80mm 以上时，应在承托底侧布置横向加强钢筋；
- b) 承托边至连接件外侧的距离不得小于 40mm，承托外形轮廓应在由最外侧连接件根部起的 45° 角线的界限以外；
- c) 承托中横向钢筋下部水平段距连接件上翼缘应小于 50mm，剪力连接件抗掀起端底面高出横向钢筋的距离  $h_{e0}$  不得小于 30mm，横向钢筋间距不应大于  $4h_{e0}$  且不应大于 300mm。

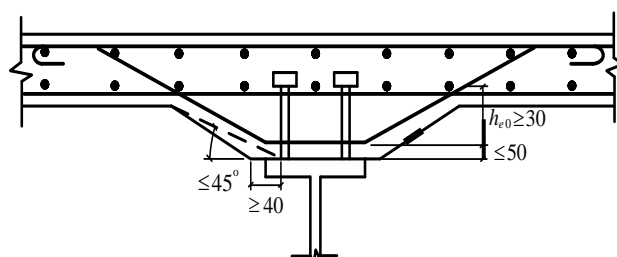


图7 桥面板承托构造图

## 9.2 桥面板的设计弯矩

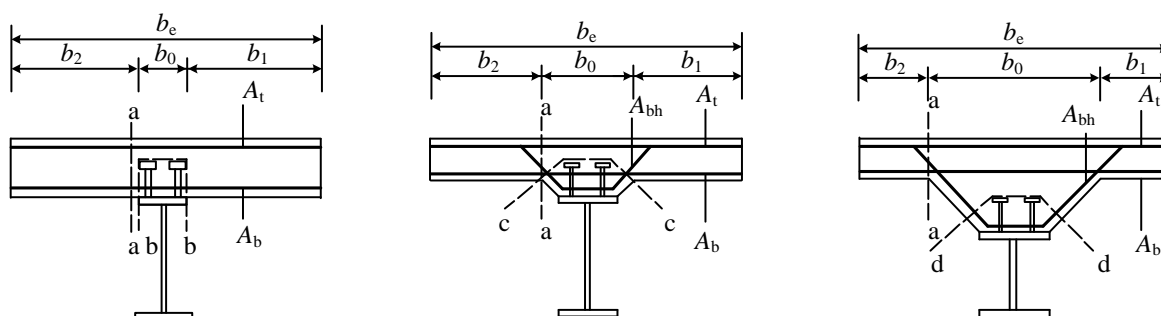
9.2.1 由活载产生的弯矩原则上应考虑桥面板的支撑状态、形状、荷载状况，根据薄板理论进行计算。

9.2.2 由恒载产生的弯矩，可以将箱梁看作是考虑其各部件厚度变化的由波形钢腹板、混凝土顶底板组成的箱形框架来计算。计算中应考虑混凝土桥面板预应力束产生的超静定力的影响（二次弯矩）。

9.2.3 桥面板横向弯矩的计算应满足本规范 6.4 节的要求。

## 9.3 桥面板纵向抗剪计算

9.3.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁承托及桥面板纵向抗剪承载力验算时，应分别验算图 8 所示的纵向受剪界面 a-a、b-b、c-c 及 d-d。



$A_t$  ——混凝土桥面板顶部附近单位长度内钢筋面积的总和 ( $\text{mm}^2$ )； $A_b$  ——混凝土桥面板底部单位长度内钢筋面积的总和 ( $\text{mm}^2$ )； $A_{bh}$  ——承托底部单位长度内钢筋面积的总和 ( $\text{mm}^2$ )。

图8 混凝土翼板纵向受剪控制界面

9.3.2 单位长度混凝土桥面板内横向钢筋总面积应满足式(9)要求：

$$A_e f_{sd} / L_s > 0.8 \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$A_e$  ——单位长度混凝土桥面板内横向钢筋总面积 ( $\text{mm}^2/\text{mm}$ )，按图 8 和表 1 取值；

$f_{sd}$  ——横向钢筋的抗拉强度设计值 (MPa)；

$L_s$  ——桥面板纵向受剪界面的长度 (mm)，按图 8 所示的 a-a、b-b、c-c 及 d-d 连线在抗剪连接件以外的最短长度取值；

0.8 ——系数 (MPa)。

表1 单位长度内在垂直于主梁方向上的钢筋截面面积  $A_s$ 

剪切面	a-a	b-b	c-c	d-d
$A_e$	$A_b + A_t$	$2A_b$	$2(A_b + A_{bh})$	$2A_{bh}$

9.3.3 波形钢腹板 PC 组合梁承托及混凝土桥面板纵向界面抗剪承载力应符合式(10)的要求:

$$V_{ld} \leq V_{IRd} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$V_{ld}$  ——作用(或荷载)引起的单位梁长混凝土桥面板内纵向受剪界面的纵向剪力(N/mm);

$V_{IRd}$  ——单位梁长混凝土桥面板内纵向受剪界面抗剪承载力设计值(N/mm)。

9.3.4 作用(或荷载)引起的单位梁长混凝土桥面板内纵向受剪界面的纵向剪力  $V_{ld}$  应符合以下规定:

a) 单位梁长内 a-a 纵向受剪界面的纵向剪力按式(11)计算:

$$V_{ld} = \max \left\{ V_1 \frac{b_1}{b_e}, V_1 \frac{b_2}{b_e} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$b_e$  ——混凝土桥面板的有效高度(mm), 见图8;

$b_1$ 、 $b_2$  ——凝土桥面板左右两侧在 a-a 界面以外的有效宽度(mm), 见图8;

$V_1$  ——单位梁长钢梁与混凝土桥面板的截面纵向剪力(N/mm)。

b) 单位梁长内 b-b、c-c、d-d 纵向受剪界面的纵向剪力按式(12)计算:

$$V_{ld} = V_1 \dots\dots\dots (12)$$

c) 单位梁长的界面纵向剪力应按下列要求进行计算:

1) 由竖向剪力引起的单位梁长的界面纵向剪力:

$$V_1 = \frac{V_d S_{0c}}{I_0} \dots\dots\dots (13)$$

2) 由预应力束集中锚固力、混凝土收缩变形或温差引起的纵向剪力:

预应力束在梁跨中间锚固, 锚固点前后均传递纵向剪力:

$$V_1 = \frac{V_t}{l_{cs}} \dots\dots\dots (14)$$

预应力束在梁跨中间锚固, 锚固点前(预应力作用区段)传递剪力或梁端部锚固:

$$V_1 = \frac{2V_t}{l_{cs}} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$V_d$  ——形成组合作用之后, 作用于组合梁的竖向剪力(N);

$V_t$ ——预应力束集中锚固力、混凝土收缩变形或温差的初始效应在混凝土桥面板中产生的纵向剪力(N);

$S_{0c}$ ——混凝土桥面板对组合截面中和轴的面积矩( $\text{mm}^3$ );

$I_0$ ——组合梁截面换算截面惯性矩( $\text{mm}^4$ );

$l_{cs}$ ——混凝土收缩变形或温差引起的纵向剪力计算传递长度(mm),取主梁间距和主梁长度的1/10中的较小值。

9.3.5 单位长度内纵向界面抗剪承载力设计值按式(16)及(17)计算,并取两者的较小值:

$$v_{IRd} = 0.7b_f f_{td} + 0.8A_e f_{sd} \dots\dots\dots (16)$$

$$v_{IRd} = 0.25b_f f_{cd} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$b_f$ ——桥面板纵向受剪界面在垂直于主梁方向上的长度,按图8所示的a-a、b-b、c-c及d-d连线在连接件以外的最短长度取值(mm);

$f_{td}$ ——混凝土轴心抗拉强度设计值(MPa);

$f_{sd}$ ——横向钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

$f_{cd}$ ——混凝土轴心抗压强度设计值(MPa)。

## 10 波形钢腹板设计

### 10.1 一般规定

10.1.1 波形钢腹板的验算应包括波形钢腹板剪应力验算、屈曲稳定性验算以及波形钢腹板之间的连接验算。

10.1.2 对于组合腹板段的波形钢腹板应按波形钢腹板承担全部剪力设计,且剪应力沿腹板高度方向均匀分布。

10.1.3 在波形钢腹板之间的连接验算中可忽略轴向力的作用。

### 10.2 波形钢腹板抗剪计算

10.2.1 波形钢腹板的抗剪验算应包括持久状况承载能力极限状态抗剪强度与剪切稳定验算以及持久状况、短暂状况正常使用极限状态剪应力验算。

10.2.2 波形钢腹板的剪应力应同时计入剪力、扭矩以及其与预应力的竖向分力产生的效应。其中剪力包括预应力的二次效应,扭矩可取汽车荷载最不利偏载情况下的组合设计值。抗剪强度与剪切稳定验算时预应力效应的分项系数不利时取1.2,有利时取1.0。

10.2.3 波形钢腹板持久状况承载能力极限状态抗剪强度与剪切稳定验算应采用JTG D60规定的效应的基本组合。

10.2.4 波形钢腹板持久状况、短暂状况正常使用极限状态剪应力验算应采用JTG D60规定的效应的基本组合。



10.2.5 波形钢腹板的承载能力极限状态抗剪强度应符合式(18)～(20)要求:

$$\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td}) \leq f_v \quad (18)$$

$$\tau_{md} = \frac{V_{d1} - V_{p1}}{h_w t_w} \quad (19)$$

$$\tau_{td} = \frac{T_d}{2A_m t_w (1 + \alpha)} \quad (20)$$

式中:

$\gamma_0$  ——结构重要性系数;

$\tau_{md}$  ——剪力与预应力的竖向分力产生的剪应力设计值(MPa);

$\tau_{td}$  ——扭矩产生的剪应力设计值(MPa);

$f_v$  ——钢板的抗剪强度设计值(MPa);

$V_{d1}$  ——作用效应基本组合下计算截面单块波形钢腹板的剪力设计值(N);

$V_{p1}$  ——作用效应基本组合下预应力对计算截面单块波形钢腹板产生的竖向分力标准值(N);

$T_d$  ——作用效应基本组合下计算截面的扭矩设计值(N·mm);

$A_m$ 、 $t_w$ 、 $\alpha$  ——按式(1)计算。

10.2.6 波形钢腹板正常使用极限状态剪应力应符合式(21)～(23)要求:

$$\tau_{mk} + \tau_{tk} \leq 0.625 f_{yv} \quad (21)$$

$$\tau_{mk} = \frac{V_{k1} - V_{p1}}{h_w t_w} \quad (22)$$

$$\tau_{tk} = \frac{T_k}{2A_m t_w (1 + \alpha)} \quad (23)$$

式中:

$\tau_{mk}$  ——剪力与预应力的竖向分力产生的剪应力设计值(MPa);

$\tau_{tk}$  ——扭矩产生的剪应力设计值(MPa);

$f_{yv}$  ——波形钢腹板剪切屈服强度标准值(MPa), 取屈服强度的 $1/\sqrt{3}$ ;

$V_{k1}$  ——作用效应标准组合下, 计算截面单块波形钢腹板的剪力设计值(N);

$T_k$  ——作用效应标准组合下, 计算截面的扭矩设计值(N·mm)。

10.2.7 波形钢腹板的承载能力极限状态组合屈曲应符合式(24)～(25)要求:

$$\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td}) \leq \tau_{cr} \quad (24)$$

$$\tau_{cr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_{cr,L}^4} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^4}\right)^{\frac{1}{4}}} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

- $\tau_{cr}$  ——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), 按 10.2.8 条计算;  
 $\tau_{cr,G}$  ——波形钢腹板整体屈曲临界剪应力(MPa), 按 10.2.8 条计算。

10.2.8 波形钢腹板局部(整体)屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,L}$ ( $\tau_{cr,G}$ )按式(26)~(28)计算:

$$\begin{cases} \tau_{cr,L}(\tau_{cr,G}) = f_v & \lambda_s \leq 0.6 \\ \tau_{cr,L}(\tau_{cr,G}) = [1 - 0.614 \times (\lambda_s - 0.6)] \cdot f_v & 0.6 < \lambda_s \leq \sqrt{2} \\ \tau_{cr,L}(\tau_{cr,G}) = f_v / \lambda_s^2 & \sqrt{2} < \lambda_s \end{cases} \dots\dots\dots (26)$$

$$\lambda_s = \sqrt{f_v / \tau_{cr,L}^e} \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{或 } \lambda_s = \sqrt{f_v / \tau_{cr,G}^e} \dots\dots\dots (28)$$

式中:

- $\lambda_s$  ——折算板宽厚比, 计算 $\tau_{cr,L}$ 时, 按式(27)计算, 计算 $\tau_{cr,G}$ 时, 按式(28)计算;  
 $\tau_{cr,L}^e$  ——弹性局部屈曲临界剪应力(MPa), 按式(29)~(30)计算:

$$\tau_{cr,L}^e = \frac{(k \pi^2 E)}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \dots\dots\dots (29)$$

$$k = 4 + 5.34(h_w/a_w)^2 \dots\dots\dots (30)$$

式中:

- $\tau_{cr,G}^e$  ——弹性整体屈曲临界剪应力(MPa), 按式(31)~(33)计算:

$$\tau_{cr,G}^e = \frac{36\beta(EI_y)^{\frac{1}{4}}(EI_x)^{\frac{3}{4}}}{h_w^2 t_w} \dots\dots\dots (31)$$

$$I_x = t_w^3 (\delta^2 + 1) / (6\zeta) \dots\dots\dots (32)$$

$$I_y = \frac{t_w^3}{12(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (33)$$

式中:

- $k$  ——波形钢腹板局部屈曲系数;  
 $\nu$  ——波形钢腹板的泊松比;  
 $\beta$  ——波形钢腹板整体嵌固系数, 取 1.0;

$I_y$  ——单位长度波形钢腹板绕高度方向的惯性矩 ( $\text{mm}^4/\text{mm}$ );

$I_x$  ——单位长度波形钢腹板绕纵桥向的惯性矩 ( $\text{mm}^4/\text{mm}$ );

$\delta$  ——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,  $t_w$  为波形钢腹板厚度;

$\zeta$  ——波形钢腹板的形状系数。

### 10.3 波形钢腹板之间的连接计算

#### 10.3.1 高强度螺栓的抗剪承载力设计值应按式(34)计算:

$$N_v^b = 0.9n_f\mu P \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$N_v^b$  ——螺栓的抗剪承载力设计值(N);

$n_f$  ——传力摩擦面数;

$P$  ——高强度螺栓的预拉力(N), 按 GB 50017 取用;

$\mu$  ——摩擦面的抗滑移系数, 按 GB 50017 取用。

连接处使用的螺栓个数应满足式(35)的要求:

$$N \geq \frac{V_{dl}}{N_v^b} \dots\dots\dots (35)$$

式中:

$N$  ——螺栓个数。

#### 10.3.2 波形钢腹板直角角焊缝在剪力作用下, 其剪应力按式(36)计算:

$$\tau_f = \frac{V_f}{0.7h_f \sum l_w} \leq f_f^w \dots\dots\dots (36)$$

式中:

$\tau_f$  ——波形钢腹板直角角焊缝在剪力作用下产生的剪应力(MPa);

$V_f$  ——焊缝承受的竖向剪力设计值(N);

$h_f$  ——角焊缝的焊脚尺寸(mm);

$\sum l_w$  ——焊缝的计算长度之和(mm), 对每条焊缝取其实际长度减去  $2h_f$ ;

$f_f^w$  ——角焊缝的强度设计值(MPa), 按 GB 50017 取值。

### 10.4 波形钢腹板与翼缘板的焊接计算

10.4.1 在承载能力极限状态下, 应对焊接连接纵桥向和横桥向的合成应力进行验算。波形钢腹板与翼缘板的角焊缝可按图 9 进行以下等效。

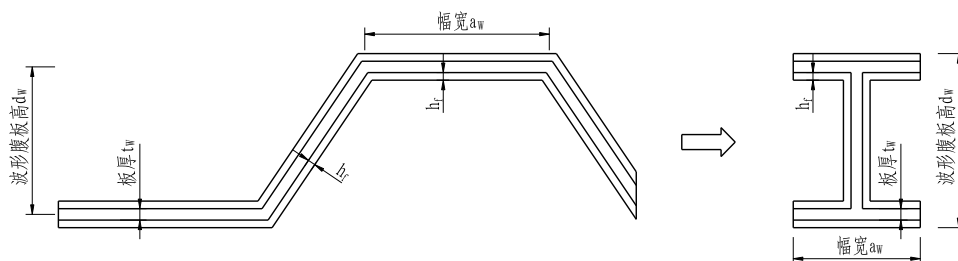


图9 角焊缝计算等效图

10.4.2 纵桥向的验算按照式(37)进行:

$$\tau_f = \frac{2Q_d^e}{0.7h_f \sum l_w} \leq f_f^w \dots\dots\dots (37)$$

式中:

$\tau_f$  ——水平剪力产生的剪应力(MPa);

$Q_d^e$  ——波形钢腹板与箱梁顶、底板连接处的单位长度水平剪力设计值(N), 按式(40)计算;

$h_f$  ——角焊缝的焊脚尺寸(mm);

$\sum l_w$  ——焊缝的计算长度之和(mm), 对每条焊缝取实际长度减去  $2h_f$ 。

10.4.3 横桥向的验算按照式(38)进行:

$$\sigma_M = \frac{6M_u}{\sum l_w (0.7h_f)^2} \leq f_f^w \dots\dots\dots (38)$$

式中:

$\sigma_M$  ——由横向弯矩产生的正应力(MPa);

$M_u$  ——横向抗弯承载力设计值(N·m)。

10.4.4 合成应力验算应满足式(39)要求:

$$\left( \frac{\tau_f}{f_f^w} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_M}{f_f^w} \right)^2 < 1 \dots\dots\dots (39)$$

## 11 抗剪连接件设计

### 11.1 一般规定

11.1.1 波形钢腹板组合梁桥抗剪连接件的选用, 应保证波形钢腹板与混凝土板有效结合, 使主梁断面能成为组合断面。

11.1.2 抗剪连接件应进行承载力极限状态抗剪强度计算和正常使用极限状态下的抗滑移和应力计算。其中承载力极限状态抗剪强度计算应采用作用的基本组合, 正常使用极限状态计算应采用作用的标准组合。

11.1.3 波形钢腹板预应力混凝土组合梁正常使用极限状态下, 单个抗剪连接件承担的剪力设计值不应超过 75% 的抗剪承载力设计值。

11.1.4 波形钢腹板与混凝土顶、底板连接件的常见形式包含嵌入型连接件(见图 4-a)、双开孔钢板连接件(见图 4-b)、单开孔钢板+栓钉连接件(见图 4-c)、角钢连接件(见图 4-d)及栓钉连接件等。如采用其它连接方式, 应经试验验证其可靠性和抗疲劳性。

## 11.2 连接件抗剪承载力计算

11.2.1 对于单箱单室截面, 波形钢腹板与顶、底板连接处的单位长度水平剪力按照式(40)和式(41)计算:

$$Q_d^e = \frac{(V_d - V_p)S}{2I} \dots\dots\dots (40)$$

$$Q_k^e = \frac{(V_k - V_p)S}{2I} \dots\dots\dots (41)$$

式中:

$Q_d^e$  ——抗剪强度计算时, 波形钢腹板与箱梁顶、底板连接处的单位长度水平剪力设计值(N/mm);

$Q_k^e$  ——抗滑移计算时, 波形钢腹板与箱梁顶、底板连接处的单位长度水平剪力设计值(N/mm);

$V_k$  ——作用效应标准组合下单箱截面的竖向剪力设计值(N);

$V_d$  ——作用效应基本组合下单箱截面波形钢腹板的剪力设计值(N);

$V_p$  ——作用效应基本组合下预应力对单箱截面产生的竖向分力标准值(N);

$S$  ——混凝土顶板或底板对截面中性轴的面积矩(mm<sup>3</sup>);

$I$  ——组合梁截面的惯性矩(mm<sup>4</sup>)。

11.2.2 波形钢腹板与混凝土顶板、底板的连接件的抗剪强度应符合式(42)要求:

$$\gamma_0 Q_d^e \leq Q_{pu} / s \dots\dots\dots (42)$$

式中:

$\gamma_0$  ——结构重要性系数;

$Q_{pu}$  ——连接件的水平抗剪承载力设计值(N), 按式(43)~(44)、式(48)~(50)、式(54)、式(56)计算;

$s$  ——连接件纵桥向间距(mm), 对于嵌入型连接件取 0.5 倍波形钢腹板波长。

11.2.3 栓钉连接件的抗剪承载力设计值应根据下列公式确定:

单个栓钉连接件的抗剪承载力设计值由公式(43)及(44)确定, 取两者中的较小值。

当发生栓钉剪断破坏时:

$$Q_{pu}^c = 1.19 A_{std} f_{std} \left( \frac{E_c}{E_s} \right)^{0.2} \left( \frac{f_{cu}}{f_{std}} \right)^{0.1} \dots\dots\dots (43)$$

当发生混凝土压碎破坏时:

$$Q_{pu}^c = 0.43\eta A_{std} \sqrt{E_c f_{cd}} \dots\dots\dots (44)$$

式中:

$Q_{pu}^c$  ——栓钉水平抗剪承载力设计值(N);

$A_{std}$  ——栓钉截面面积(mm<sup>2</sup>);

$f_{std}$  ——栓钉抗拉强度设计值(MPa)。当栓钉材料性能等级为 4.6 级时,取  $f_{std} = 400$  (MPa);

$E_c$ 、 $E_s$  ——混凝土和栓钉的弹性模量(MPa);

$f_{cu}$ 、 $f_{cd}$  ——混凝土的立方体抗压强度和轴心抗压强度设计值(MPa);

$\eta$  ——群钉效应折减系数。当  $6 < l_d/d < 13$  时,对于强度等级为 C30~C40 的混凝土, $\eta = 0.21l_d/d + 0.73$  ( $l_d$  为栓钉纵向间距,  $d$  为栓钉直径,单位 mm);对于 C45、C50 混凝土, $\eta = 0.016l_d/d + 0.80$ ;对于 C55、C60 混凝土, $\eta = 0.013l_d/d + 0.84$ 。当  $l_d/d \geq 13$  时,不考虑群钉效应,取 1.0。

11.2.4 栓钉连接件的抗滑移应符合式(45)~(47)的要求:

$$Q_k^e \leq Q_{sa}^c / s \dots\dots\dots (45)$$

$$Q_{sa}^c = 8.408 \sqrt{f_{cu,k}} d^2 \quad (H/d \geq 5.5) \dots\dots\dots (46)$$

$$Q_{sa}^c = 1.538 \sqrt{f_{cu,k}} dH \quad (H/d < 5.5) \dots\dots\dots (47)$$

式中:

$Q_{sa}^c$  ——单个栓钉的抗滑移水平剪力限值(N);

$f_{cu,k}$  ——混凝土立方体抗压强度标准值(MPa);

$d$  ——栓钉直径(mm);

$H$  ——栓钉长度(mm)。

11.2.5 双开孔钢板连接件的水平抗剪承载力设计值  $Q_{pu}$  应取混凝土剪力销抗剪承载力  $Q_{pu1}$ 、混凝土剪力销抗劈裂承载力  $Q_{pu2}$  以及开孔钢板孔间抗剪承载力  $Q_{pu3}$  的最小值:

a) 混凝土剪力销抗剪承载力设计值按式(48)计算:

$$Q_{pu1} = n_p \{1.4(d_p^2 - d_s^2) f_{cd} + 1.2d_s^2 f_{sd}\} \dots\dots\dots (48)$$

式中:

$d_p$  ——钢板开孔直径(mm);

$d_s$  ——贯穿钢筋直径(mm);

$n_p$  ——开孔钢板连接件的排数。双开孔钢板连接件中,当两个开孔钢板之间的距离大于开孔钢板高度的 1.5 倍时,  $n_p$  取 2。

b) 混凝土剪力销抗劈裂承载力设计值按式(49)计算:

$$Q_{pu2} = 7.5n_p f_{cd} d_p t \dots\dots\dots (49)$$

式中:

$t$  ——开孔钢板厚度(mm)。

c) 开孔钢板孔间抗剪承载力设计值按式(50)计算:

$$Q_{pu3} = n_p f_v d_j t \dots\dots\dots (50)$$

式中:

$f_v$  ——钢板抗剪强度设计值(MPa);

$d_j$  ——开孔钢板的孔净距(mm)。

11.2.6 双开孔钢板连接件抗滑移应符合式(51)及式(52)要求:

$$Q_k^c \leq 2Q_{sa}/s \dots\dots\dots (51)$$

$$Q_{sa} = 0.154\pi \left[ 0.677 f_{cu,k} (d_p^2 - d_s^2) + d_s^2 f_{stk} \right] - 35367 \dots\dots\dots (52)$$

式中:

$Q_{sa}$  ——单个开孔钢板连接件销孔的抗滑移水平剪力限值(N);

$f_{stk}$  ——贯穿钢筋抗拉强度标准值(MPa);

$f_{cu,k}$  ——混凝土立方体抗压强度标准值(MPa)。

11.2.7 单开孔钢板+栓钉连接件的水平抗剪承载力取单个开孔钢板连接件与栓钉抗剪承载力之和。单个开孔钢板水平抗剪承载力设计值  $Q_{pu}$  按 11.2.5 条计算, 栓钉水平抗剪承载力设计值  $Q_{pu}^c$  按 11.2.3 条计算。

11.2.8 单开孔钢板+栓钉连接件抗滑移应符合式(53)要求:

$$Q_k^c \leq (Q_{sa} + nQ_{sa}^c)/s \dots\dots\dots (53)$$

式中:

$n$  ——栓钉的排数,  $n \leq 4$ 。

11.2.9 嵌入型连接件水平抗剪承载力按式(54)计算:

$$Q_{pu} = 0.6 f_{cd} A_1 + \mu f_{sld} A_s \dots\dots\dots (54)$$

式中:

$A_1$  ——波形钢腹板斜板段的投影面积(mm<sup>2</sup>) (图 17);

$\mu$  ——系数, 取 1.0;

$f_{sld}$  ——接合钢筋的抗拉强度设计值(MPa);

$A_s$  ——接合钢筋的面积(mm<sup>2</sup>)。

11.2.10 嵌入型连接件在波形钢腹板斜板段处的混凝土应力应符合式(55)计算要求:

$$\frac{Q_k^e s}{0.25A_1 + 0.05A} \leq 0.8f_{cu,k} \dots\dots\dots (55)$$

式中:

$s$  ——连接件纵桥向间距(mm);

$A_1$  ——波形钢腹板斜板段的投影面积(mm<sup>2</sup>), 如图 17;

$A$  ——板腋有效承压面积(mm<sup>2</sup>), 如图 17。

11.2.11 角钢连接件的水平抗剪承载力按式(56)计算:

$$Q_{pu} = f_{cd} A_{as} / 1.5 \dots\dots\dots (56)$$

式中:

$A_{as}$  ——角钢承压面积(mm<sup>2</sup>) (图 10)。

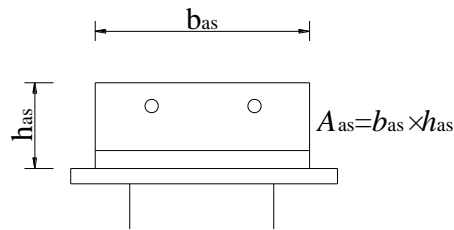


图 10 角钢连接件承压面积计算图

11.2.12 角钢连接件中, 角钢与翼缘板的连接焊缝应进行纵向水平力承载力验算, 连接焊缝承受的水平剪力按式(57)计算:

$$F_h = sQ_d^e \dots\dots\dots (57)$$

式中:

$F_h$  ——连接焊缝承受的水平剪力(N);

$Q_d^e$  ——角钢连接件承受的单位长度水平剪力设计值(N/mm), 按式(40)计算。

### 11.3 连接件抗角隅弯矩计算

11.3.1 采用双开孔钢板连接件、单开孔钢板+栓钉连接件、角钢连接件和栓钉连接件时, 应进行连接件的抗角隅弯矩计算。

11.3.2 双开孔钢板连接件承受的角隅弯矩应符合式(58)要求:

$$M_d \leq n_p b_p Q_{pu} \dots\dots\dots (58)$$

式中:

$M_d$  ——角隅弯矩设计值(N·m);

$n_p$  ——与角隅弯矩对应板宽内的开孔钢板数量;

$b_p$  ——开孔板的间距(mm);



$Q_{pu}$  ——单个开孔钢板件抗剪承载力设计值(N)，按 11.2.5 条计算。

11.3.3 单开孔钢板+栓钉连接件、栓钉连接件承受的角隅弯矩(图 11)应符合式(59)及式(60)要求:

$$M_d \leq n_s b_s N_d \dots\dots\dots (59)$$

$$N_d = 1.283 H^2 \sqrt{f_{cd}} \leq \frac{\pi}{4} d^2 f_{std} \dots\dots\dots (60)$$

式中:

$M_d$  ——角隅弯矩设计值(N·m);

$n_s$  ——与角隅弯矩对应板宽内的单排栓钉数量;

$b_s$  ——栓钉间距(mm);

$N_d$  ——栓钉抗拉承载力设计值(N);

$H$  ——栓钉长度(mm);

$f_{cd}$  ——混凝土抗压强度设计值(MPa);

$d$  ——栓钉直径(mm);

$f_{std}$  ——栓钉抗拉强度设计值(MPa)。

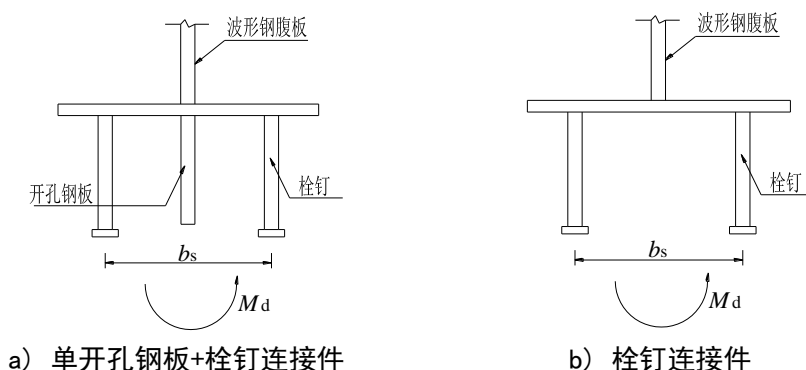


图 11 作用于单开孔钢板+栓钉连接件及栓钉连接件的角隅弯矩

11.3.4 角钢连接件承受的角隅弯矩(图 12)应符合式(61)~(64)要求:

U形钢筋不与角钢焊接:

$$M_d \leq A_s f_{sd} B_s / \sqrt{3} \dots\dots\dots (61)$$

$$M_d \leq 2A_u B_u f_u \dots\dots\dots (62)$$

$$M_d \leq 2u_u l_u B_u R_u \dots\dots\dots (63)$$

U形钢筋与角钢焊接:

$$M_d \leq A_s f_{sd} B_s / \sqrt{3} + \min(2A_u B_u f_u, 2u_u l_u B_u R_u) \dots\dots\dots (64)$$

式中:

$A_s$  ——贯穿钢筋面积(mm<sup>2</sup>);

- $f_{sd}$  ——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<sup>2</sup>);  
 $B_u$  ——U 形钢筋的轴间距 (mm);  
 $f_u$  ——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 形钢筋锚固长度 (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。

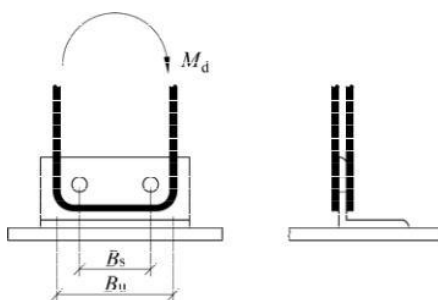


图 12 角钢连接件抗角隅弯矩计算图示

#### 11.4 连接件疲劳计算

11.4.1 抗剪连接件应根据下列公式 (65) ~ (66) 进行疲劳验算:

$$\gamma_{Ff} \Delta N_p \leq \Delta N_L / \gamma_{Mf} \quad (65)$$

$$\Delta N_p = N_{p,max} - N_{p,min} \quad (66)$$

式中:

$\gamma_{Ff}$  ——疲劳荷载分项系数, 取 1.0;

$\gamma_{Mf}$  ——疲劳抗力分项系数, 对重要构件取 1.35, 对次要构件取 1.15;

$\Delta N_p$  ——抗剪连接件按疲劳荷载模型计算得到的剪力幅 (N);

$\Delta N_L$  ——连接件疲劳容许剪力幅 (N), 可按本规范第 11.4.3 条计算;

$N_{p,max}$ 、 $N_{p,min}$  ——无限疲劳寿命验算的疲劳荷载模型按最不利情况加载于影响线得出的最大和最小剪力 (N)。

11.4.2 抗剪连接件的疲劳荷载模型, 采用 JTG D60 规定的等效车道荷载形式, 其集中荷载为  $0.7P_k$ , 均布荷载为  $0.3q_k$ , 集中荷载标准值  $P_k$  和均布荷载标准值  $q_k$  应按 JTG D60 相关规定取值, 计算时应考虑多车道的影响, 横向多车道系数按 JTG D60 的相关规定计算。

11.4.3 抗剪连接件的疲劳容许剪力幅应符合下式 (67) 规定:

$$\Delta N_L \leq 0.2N_v^c \dots\dots\dots (67)$$

式中：

$N_v^c$ ——连接件的抗剪承载力设计值(N)。

## 12 横梁、横隔板、转向块以及内衬混凝土设计

### 12.1 横梁、横隔板设计

12.1.1 为使波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥具有足够的刚度，必须以合适的间距来配置横梁和横隔板。横隔板间距应根据桥梁的扭转和畸变效应确定。

12.1.2 当将横隔板与转向块设计成一体时，除进行通常的荷载所引起的截面力验算之外，对于体外束的锚固与弯折所导致的局部作用力，也必须进行验算。

12.1.3 锚固横梁、转向横梁宜采用实体有限元模型进行分析并根据应力结果进行配筋。

### 12.2 转向块设计

12.2.1 转向块应做成能将体外预应力钢筋的转向力顺利传递到主梁的结构。另外，转向块及其周围的构件必须是能安全地抵抗转向力的结构。

12.2.2 转向块应进行抗拉承载力计算和抗剪承载力计算，计算方法可参照 JTG/T J22 的规定执行。

### 12.3 内衬混凝土设计

12.3.1 内衬混凝土应进行承载能力极限状态斜截面抗剪承载力验算和正常使用极限状态斜截面抗裂验算。

12.3.2 在荷载作用下，验算内衬混凝土受力及配筋时，内衬混凝土承担的剪力值按其波形钢腹板的剪切刚度进行分配。内衬混凝土承担的剪力可按式(68)计算：

$$V_{cd} = \frac{G_c A_c}{G_c A_c + G A_w} V \dots\dots\dots (68)$$

式中：

$V_{cd}$ ——内衬混凝土承担的剪力设计值(N)；

$G_c$ ——内衬混凝土的剪切模量(MPa)；

$A_c$ ——内衬混凝土的平均截面面积(mm<sup>2</sup>)；

$G$ ——波形钢腹板的剪切模量(MPa)；

$A_w$ ——波形钢腹板的有效抗剪截面面积(mm<sup>2</sup>)，可根据式(7)计算；

$V$ ——剪力设计值(N)。

12.3.3 根据内衬混凝土承担的剪力值，对弯起钢筋及箍筋进行配置，其斜截面的抗剪承载力计算按 JTG D62 规定采用。

12.3.4 内衬混凝土主拉应力可按式(69)及式(70)计算：

$$\sigma_{\text{tp}} = \frac{1}{2}(\sigma_c - \sqrt{\sigma_c^2 + 4\tau_c^2}) \dots\dots\dots (69)$$

$$\tau_c = \frac{V_{\text{cd}} S_c}{b_c I_c} \dots\dots\dots (70)$$

式中:

$\sigma_{\text{tp}}$  ——内衬混凝土的主拉应力(MPa);

$\sigma_c$  ——内衬混凝土的轴向压应力(MPa), 轴向压应力按内衬混凝土平均厚度计算;

$\tau_c$  ——内衬混凝土的剪应力(MPa);

$V_{\text{cd}}$  ——内衬混凝土承担的剪力设计值(N);

$S_c$  ——内衬混凝土最小厚度截面, 剪应力计算点外侧部分对中性轴的面积矩(mm<sup>3</sup>);

$I_c$  ——内衬混凝土最小厚度截面惯性矩(mm<sup>4</sup>);

$b_c$  ——内衬混凝土最小厚度(mm)。

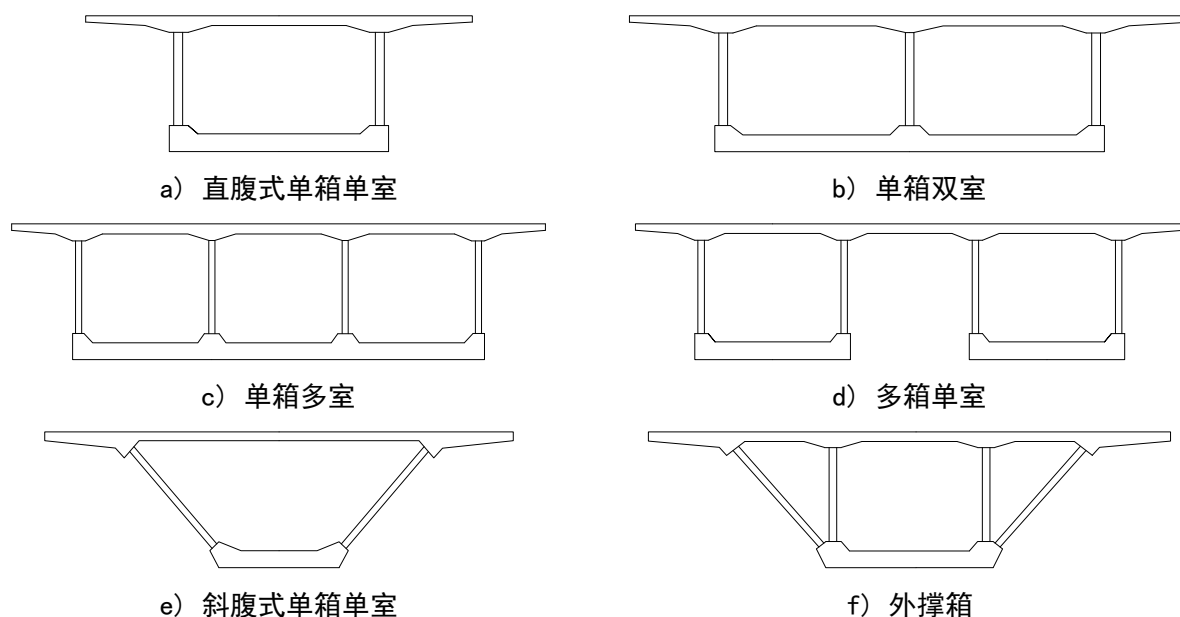
### 13 构造要求

#### 13.1 一般规定

13.1.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁及其桥面板应符合 JTG D62 的构造规定。

13.1.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的梁高设计可参照常规预应力混凝土桥梁按跨径选定, 在同等跨径情况下, 梁高宜比预应力混凝土桥梁略高。

13.1.3 根据桥面宽度不同, 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥可采用图 13 所示的单箱单室、单箱多室、多箱单室, 亦可采用斜腹板作成倒梯形或采取外(内)撑加强顶板、悬挑板。



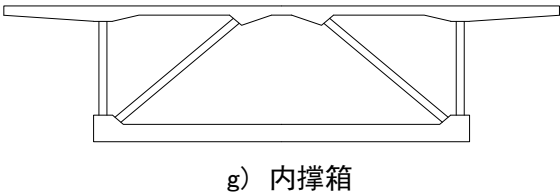


图 13 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥典型截面图

13.1.4 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的截面总体尺寸可参照常规预应力混凝土桥梁的设计，跨径 50m 以下时，宜采用等截面波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥；跨径 50m 及以上时，宜采用变截面波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥，支点梁高宜取为跨径的  $1/16 \sim 1/17$ ，跨中梁高宜取为跨径的  $1/30 \sim 1/33$ 。

13.2 墩顶节段及组合腹板段

13.2.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥在支点处应设置内衬混凝土腹板以承受较大的剪力，支点附近内衬混凝土腹板的长度、厚度可参照常规预应力混凝土箱梁桥设置。

13.2.2 临近支点处的波形钢腹板高度较高时，应在波形钢腹板内侧设置内衬混凝土。组合腹板段长度不宜小于支点处梁高的 1.5 倍，内衬混凝土厚度应根据其抗剪承载力和斜截面抗裂验算确定，但最薄处不宜小于 20cm。

13.2.3 组合腹板段内衬混凝土应根据抗裂验算结果确定是否设置竖向预应力筋或钢筋网片等有效防裂措施。

13.2.4 内衬混凝土宜采用栓钉与波形钢腹板连接。

13.3 混凝土桥面板

13.3.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥顶板、底板的厚度应根据预应力布置及结构受力要求来确定。顶板厚度不宜小于 250mm，底板厚度不宜小于 220mm。

13.3.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥根据顶、底板与波形钢腹板连接形式的不同，在顶、底板与腹板连接处宜采用必要的梗腋处理。

13.4 波形钢腹板

13.4.1 波形钢腹板型号宜采用图 14 所示的 1000 型、1200 型、1600 型三种型号。波形钢腹板的其它构造细节应符合 JT/T 784 的有关规定。小跨径桥梁宜用 1000 型和 1200 型波形钢腹板。40m~150m 跨径连续梁桥，宜选用 1600 型波形钢腹板。当使用图 14 所示形状以外的波形钢腹板时，应对波高、幅段长度、幅段倾角等进行合适的选择，并做相应的研究、试验以确保安全性。

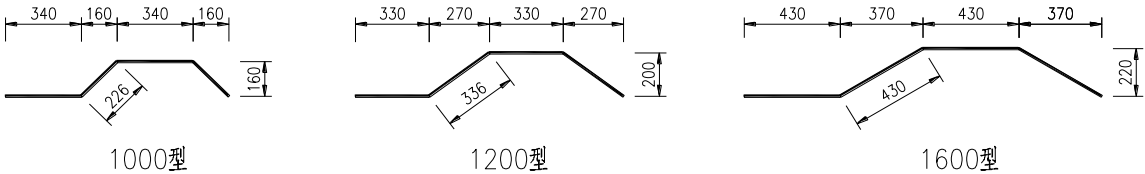


图 14 波形钢腹板几何尺寸 (mm)

13.4.2 波形钢腹板的厚度宜小于 40mm，且不宜小于 8mm。

13.4.3 波形钢腹板的冷弯加工弯曲半径不宜小于 15 倍的板厚。

13.4.4 波形钢腹板的连接形式和构造尺寸由承载力要求和连接施工的可操作性决定。

13.4.5 波形钢腹板现场工地连接分为焊接连接和高强螺栓连接。焊接连接根据连接形式可分为对接焊接和角焊接，如图 15 所示；高强螺栓连接分为单面摩擦连接和双面摩擦连接，如图 16 所示。

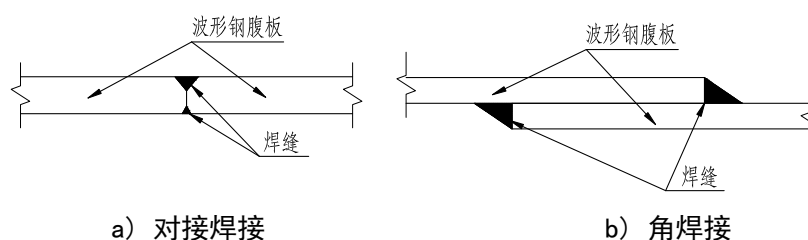


图 15 焊接连接形式

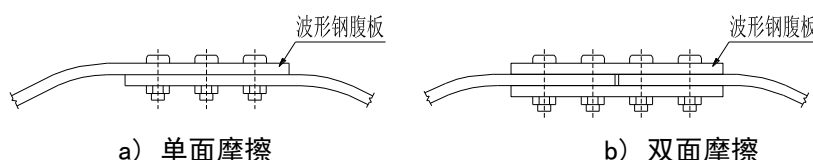


图 16 高强螺栓连接形式

13.4.6 在不同厚度的波形钢腹板连接中，应从波形钢腹板的一侧或两侧做成坡度不大于 1:4 的斜坡。当板厚相差不大于 4mm 时，可不做斜坡。

### 13.5 抗剪连接件

13.5.1 波形钢腹板与混凝土顶、底板连接件形式的选取应考虑构造的合理性、施工可行性、结构耐久性等因素。波形钢腹板与混凝土顶、底板连接件的构造应符合本标准规定外，还应符合现行国家标准及行业标准的有关要求。

13.5.2 波形钢腹板与混凝土顶、底板的连接，应能够可靠传递作用于其连接部的桥轴方向水平剪力，应能抵抗因车辆荷载所导致的与桥轴成直角方向的桥面板角隅弯矩，以保证桥梁运营期间的安全性。

13.5.3 波形钢腹板与混凝土顶、底板的连接，应保证其正常使用时不发生过大的相对滑移。

13.5.4 连接部必须密封并实施恰当的防腐蚀处理。其它构造上还应具有足够的抗疲劳性能。

13.5.5 翼缘型连接件中，翼缘板的厚度不得小于 16mm。

13.5.6 嵌入型连接件中波形钢腹板斜板段的投影面积 ( $A_1 = \text{埋深} \times \text{波高}$ ) 不应小于板腋有效承压面积 ( $A = b_0 \times h_0$ ) 的 1/5 (见图 17)。

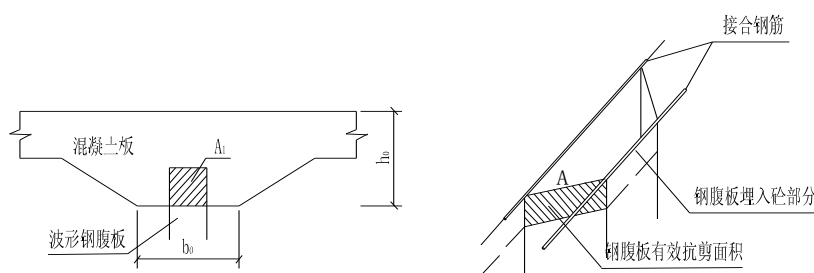


图 17 嵌入型连接件斜板段投影面积示意

13.5.7 嵌入型连接件中，贯穿钢筋宜采用环氧防锈钢筋。

13.5.8 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥采用翼缘型连接件时，为防止焊接部位的疲劳破坏，连接件的翼缘板纵向连接间应留一定的间隙，同时波形钢腹板顶面应切圆角，以避免焊缝与翼缘板焊缝相交。

13.5.9 当波形钢腹板与梁底板采用翼缘型连接件时，应在连接件的翼缘板上设置出气孔以确保翼缘板下的混凝土浇筑密实。

13.5.10 开孔钢板连接件应符合下列规定：

- 开孔钢板厚度不宜小于 14mm；
- 开孔钢板孔径应大于贯穿钢筋直径与集料最大颗粒直径的 2 倍之和，可取 45mm~60mm；
- 孔与孔的中心间距不宜大于 500mm，可取 150mm~250mm；
- 孔距钢板边缘的净距不宜小于孔中心距的一半；
- 贯穿钢筋应采用 HRB400 及以上强度级别的钢筋，直径不宜小于 16mm，贯穿钢筋直径应与钢板开孔直径相匹配；
- 双开孔钢板连接件中，两个开孔钢板之间的距离应大于开孔钢板高度的 1.5 倍。

13.5.11 当波形钢腹板与混凝土桥面板间剪力方向不明确或者有较大的掀起力时宜布置栓钉连接件。

13.5.12 栓钉连接件应符合下列规定：

- 栓钉的长度不应小于栓钉直径的 4 倍，有拉拔作用时不宜小于栓钉直径的 10 倍；
- 栓钉纵桥向的中心间距不应小于 6 倍的栓钉直径，且不小于 100mm；横桥向的中心间距不应小于 4 倍的栓钉直径且不小于 50mm；
- 栓钉连接件沿主要受力方向中心间距不应超过 300mm；
- 栓钉连接件的外侧边缘距翼缘板边缘的距离不应小于 20mm。

13.5.13 角钢连接件宜采用 U 形钢筋与角钢焊接的方式。

## 13.6 横隔板

13.6.1 为保证波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的抗扭刚度，应以合适的间距设置横隔板。

13.6.2 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥应在支点处以及在底板或体外预应力束纵向折线折角处设置横隔板。横隔板最大间距不宜超过 20m。

13.6.3 横隔板构造可参照常规模预应力混凝土箱梁桥设计，当横隔板兼作体外束的锚固或转向装置时，应满足体外束的张拉、锚固、换索要求。

13.6.4 横隔板可采用混凝土板墙式与钢、混凝土横撑式。混凝土板墙式横隔板可与体外束的锚固块、转向块设为一体。

13.6.5 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥采用顶推施工或者波形钢腹板工字梁作为施工承重构件的工法施工时，波形钢腹板工字型钢梁的横隔宜做成钢横撑式。

### 13.7 波形钢腹板与横隔板的连接

13.7.1 波形钢腹板与端横梁和横隔板的连接方式应根据端横梁横隔板形状、结构受力、横梁配筋、经济性、耐久性等因素综合考虑后确定。

13.7.2 波形钢腹板与横隔板可通过栓钉连接件、开孔钢板连接件等进行连接。

13.7.3 波形钢腹板与端横梁的连接方式有翼缘型连接(图 18)和嵌入型连接(图 19)两种类型。

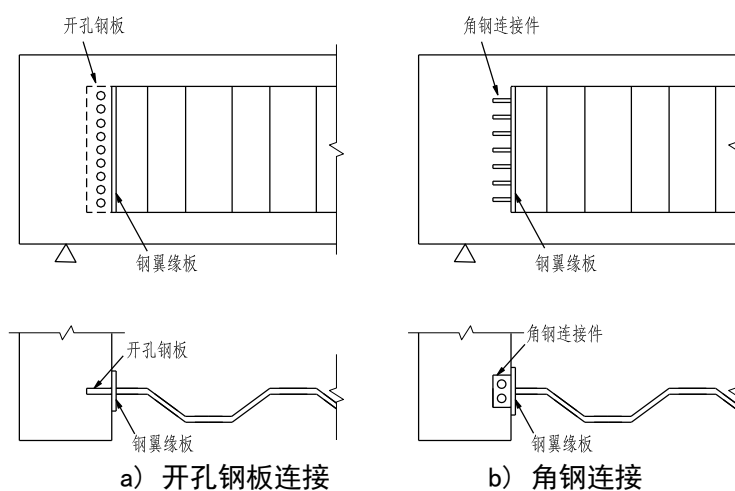


图 18 翼缘型连接

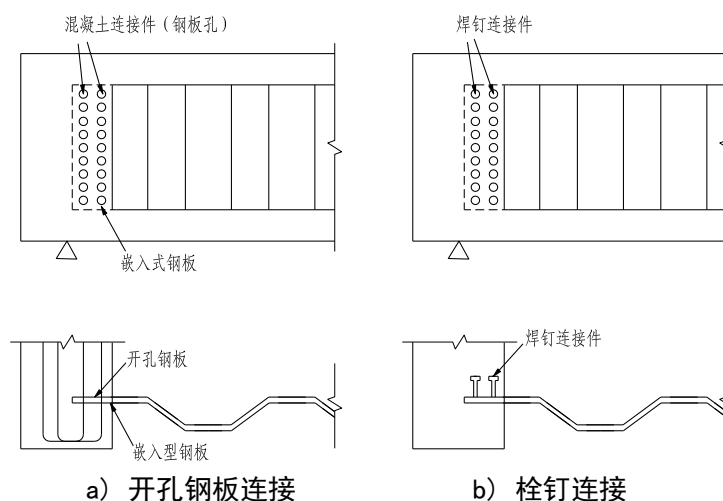


图 19 嵌入型连接

### 13.8 预应力体系



13.8.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥宜采用体内、体外预应力筋共用的预应力体系。体内预应力筋宜主要承担一期恒载，体外预应力筋宜主要承担二期恒载及活载等。预应力筋的布置数量及形式应根据结构受力、桥梁施工方法确定。

13.8.2 体外预应力钢筋应避免与梁体发生共振，为此可适当增加体外预应力钢筋与梁体的固定装置。

13.8.3 体外预应力锚具的选用应符合 GB/T 14370 的要求。使用可更换或多次张拉的锚具时，预应力筋应预留能够再次张拉的工作长度。

13.8.4 体外预应力筋在转向块处的弯折转角不应大于  $15^\circ$ ，转向块鞍座处最小曲率应符合 JGJ 92 的有关规定。

### 13.9 转向块与转向器

13.9.1 转向块的构造形式应根据结构受力、体外预应力筋布置方式、转向器等因素进行选择。

13.9.2 集束式转向器可用于成品和非成品体外束，散束式转向器可用于非成品体外束。

13.9.3 在转向块的设计中，宜考虑增加体外预应力束的可能性，预留备用孔，以便在特殊需要时采用。

13.9.4 转向块内应设置两种钢筋，即围住单个转向器的内环筋和沿转向块周边围住所有转向器的外封闭箍筋。内环筋离转向器上缘的距离不小于 25mm，直径不大于 20mm；外封闭箍筋在竖直方向高于内环筋的净距不小于 50mm；内环筋和外封闭箍筋沿转向器纵向布置的间距不小于 100mm。

### 13.10 耐久性措施

13.10.1 涂装系统设计应综合考虑桥梁所处的腐蚀环境、涂层设计使用年限、涂层维修性能等因素，并符合 JT/T 722 的规定。

13.10.2 波形钢腹板内外表面、翼缘型连接件外露于混凝土的部分应进行防腐涂装。

13.10.3 波形钢腹板纵向节段间采用高强螺栓连接时，波形钢腹板搭接面应进行无机富锌漆涂装。

13.10.4 高强螺栓连接及焊接连接施工后应及时进行防腐涂装。

13.10.5 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥底板与波形钢腹板结合处可做成不小于 2% 的斜坡，并用硅胶等止水材料密封，防止雨露水渗入（见图 20）。

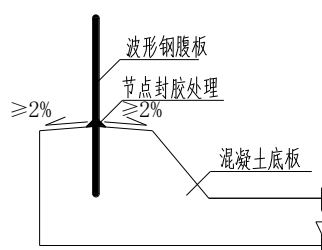


图 20 横向排水示意

13.10.6 端横梁与波形钢腹板连接部位采用硅胶等止水材料密封，防止雨露水渗入。

## 14 波形钢腹板制造

## 14.1 一般规定

- 14.1.1 波形钢腹板的制造成型、涂装、试验、检验等技术要求应符合 JT/T 784 的规定。
- 14.1.2 波形钢腹板制造前应按 Q/CR 9211、JT/T 784、JT/T 722、GB 50205、设计文件和本标准要求，编制制作工艺指导书，确保制作和运输任务的完成。
- 14.1.3 制作前测量人员应对连接件的位置进行准确的测量放样。
- 14.1.4 连接件材料应符合设计及相关标准要求，连接件加工时，翼缘板、开孔板、角钢的外形、尺寸、位置应符合设计尺寸要求，加工尺寸偏差应小于 2mm。
- 14.1.5 波形钢腹板与翼缘板及连接件间的焊接形式和焊缝尺寸应在图纸中有明确的标注。

## 14.2 切割与制孔

- 14.2.1 碳素结构钢在环境温度低于-20℃，低合金结构钢在环境温度低于-15℃时，不得进行切割加工。
- 14.2.2 切割前应将钢料面上的浮锈、污物清除干净。钢料应放平、垫稳，割缝下面应留有空隙。
- 14.2.3 切割的其它技术要求按照 Q/CR 9211 的规定执行。
- 14.2.4 螺栓孔应采取钻孔工艺，不得采用冲孔、气割孔，制成的孔应成正圆柱形，孔壁表面粗糙度不大于 25 $\mu$ m，孔缘无损伤不平，无刺屑。
- 14.2.5 螺栓孔的孔径允许偏差为+0.7mm；孔壁垂直度允许偏差不大于 0.3mm。
- 14.2.6 螺栓孔距允许偏差应符合表 2 规定，有特殊要求的孔距偏差应符合设计文件的规定。

表2 螺栓孔距允许偏差

定位方法	检查项目	允许偏差 (mm)	说明
用钻孔样板、数控机床	两相邻孔距	$\pm 0.4$	
	构件极边孔距	$\pm 1.0$	
	两组孔群中心距	$\pm 1.0$	
	孔群中心线与杆件中心线的横向偏移	2.0	
号钻的孔	两相邻孔距	$\pm 1.0$	包括用分离式样板分别对线钻孔的孔群
	极边及对角线孔距	$\pm 1.5$	
	孔中心与孔群中心线的横向偏移	2.0	

- 14.2.7 钻孔应采用数控钻床或标准钻孔样板，并优先选用数控钻床钻孔。
- 14.2.8 采用标准样板钻孔时，应采用冲钉定位，冲钉数不得少于两个。
- 14.2.9 用标准钻孔样板依次钻足孔径的零件，卡料厚度应保证最底层零件栓孔质量，不得超过允许偏差。

14.2.10 钻头直径应符合规定，磨完后的钻头，应先在废料上试钻孔，经检查合格后方可在零部件上钻孔。

14.2.11 钻孔时，应经常用试孔器检查孔径精度。

14.2.12 采用配钻及扩孔工艺时，其孔距不受表 2 的制约。

### 14.3 边缘加工和矫正

14.3.1 切割后需焊接的边缘应进行机械焊接坡口加工，不要求焊接但属气割的边缘应进行边缘机械加工。机加工零件的边缘加工深度不得小于 3mm，加工面表面粗糙度不得低于  $25\mu\text{m}$ ；顶紧传力面的粗糙度不得低于  $12.5\mu\text{m}$ ；顶紧加工面与板面垂直度偏差应不小于板厚的 1%，且不得大于 0.3mm。

14.3.2 边缘加工的允许偏差应符合 Q/CR 9211 的规定。

14.3.3 使用锯割和自动等离子切割的部件边缘，在不要求焊接处，可不进行边缘加工。

14.3.4 钢板矫正应采用冷矫。矫正后的钢料表面不应有明显的凹痕或损伤，划痕深度不应大于该钢材厚度负允许偏差的 1/2。

14.3.5 钢板矫正的技术方法及允许偏差按 Q/CR 9211 的规定。

### 14.4 波形钢腹板的成型

14.4.1 波形钢腹板的成型应采用冷成型，成型工艺分为模压法和冲压法（也称折弯法）。

14.4.2 模压法：利用液压机与波形近似截面的模具进行一次性成型的方法(图 21)。

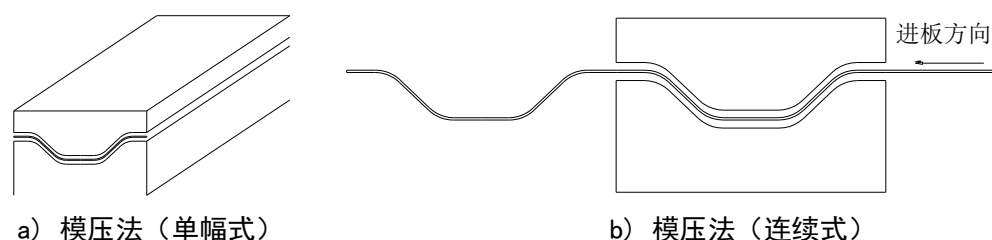


图 21 普通模压法

14.4.3 冲压法（也称折弯法）：利用折弯机多次反复折压成型的方法(图 22)。

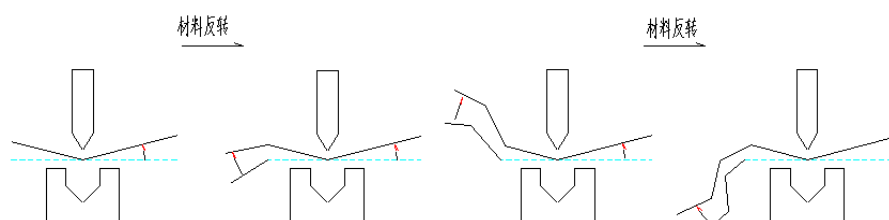


图 22 冲压法

#### 14.4.4 成型角度

a) 波形钢腹板加工成型时转角半径一般应不小于板厚的 15 倍；

- b) 当满足表 3 所示的夏比冲击试验的要求,且化学成分中的氮含量不超过 0.006%,波形钢腹板加工成型时转角半径亦可做成板厚的 7 倍或 5 倍以上。若是在与轧制成直角方向处进行冷弯加工时,则应当采用压延直角方向的夏比冲击试验吸收能量的值。

表3 冷弯加工半径与冲击韧性的吸收能量值

冲击韧性-吸收能量(J)	冷弯加工半径(mm)	试验方法
>150	$\geq 7t$	夏比摆锤冲击试验
>200	$\geq 5t$	
注：t 为板厚。		

## 14.5 组拼与连接

14.5.1 波形钢腹板的组拼应在作业车或标准钢胎膜上进行,组拼角度应考虑波形钢腹板焊接时的变形量。平台或胎膜要求牢固平整以保证波形钢腹板组拼精度。

14.5.2 波形钢腹板波段之间的纵向连接方式宜采用对接焊接。

14.5.3 波形钢腹板节段与节段间的连接通常有:高强度螺栓连接法、角焊接法、对接焊接法等。

14.5.4 波形钢腹板之间的连接方式,设计和制造时应选择能以工厂焊接为主、减少现场焊接和涂层修复作业量的连接方式。

14.5.5 波形钢腹板与翼缘板的焊接、开孔钢板与翼缘板的焊接应采用熔透焊或坡口焊,并达到 2 级焊缝。

## 14.6 波形钢腹板工厂涂装

### 14.6.1 涂装前处理

- 涂装前应采用抛丸或喷砂的工艺,对波形钢腹板表面应进行二次除锈,将表面氧化皮和铁锈以及其它杂物清除干净,油污脱脂应采用化学分解去除法,不建议采用灼烧法;
- 前处理达标后 4h 内应进行涂装作业,否则应再次进行前处理。

### 14.6.2 涂装准备

涂装前应制作两块 $300\text{mm}\times 150\text{mm}\times 6\text{mm}$ 薄板,焊成 $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的板,用与钢腹板相同的涂料和喷涂方法,做成喷漆样板,经检查确认平板区和焊缝区各项检验指标均合格后,方可进行喷涂作业。

### 14.6.3 涂装环境

除现场修复及最后整体面漆可在现场作业外,其余涂装均应在工厂进行。涂装时的环境温度宜在 $5^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间,相对湿度不应大于80%。不得在雨天、有扬尘风、蚊虫多、钢材表面有潮气、结露、涂漆后表面易产生气泡时涂装;涂装后4h内应加以保护,免受雨淋。

### 14.6.4 底层防护配置及涂装

底层涂装宜配置高附着力的具屏蔽或阴极保护功能的涂层体系,主要有以下三类:

- a) 重防腐粉体涂装系列:主要有通用粉体环氧类、熔融结合性重防腐粉体环氧类涂层(符合 GB/T 18593 的规定)。应采用静电喷涂及热喷涂方式,并加热使涂层固化。采用热喷涂工艺可一次性涂装;
- b) 铝和锌防腐系列:主要有喷铝、喷锌和喷涂铝锌合金涂层。应采用电弧热喷涂工艺,不宜采用热镀锌工艺和冷镀锌工艺;
- c) 富锌系列:主要有有机类富锌、无机类富锌涂料。应采用高压无气喷涂方式。不宜采用水性富锌涂料。

#### 14.6.5 中层防护配置及涂装

中层防护配置及涂装应满足以下要求:

- a) 中层防护宜配置具备屏蔽封孔功能的涂层体系,主要有环氧云铁、环氧厚浆漆等。应采用高压无气喷涂方式;
- b) 以重防腐粉体涂装系列做为底层涂装的,无需单独再实施中层涂装。

#### 14.6.6 面层防护配置及涂装

面层防护配置及涂装应满足以下要求:

- a) 面层防护宜配置具备耐候及防化学腐蚀功能的涂层体系,面层防护采用粉体涂装的,宜配置聚酯等面层体系,应采用静电喷涂及热喷涂方式,并加热使涂层固化。底层也采用粉体涂装的,面层可一次性或在底层未固化前涂装;
- b) 面层涂装可采用聚氨脂类、聚硅氧烷类和氟碳类等液态涂料;
- c) 应采用高压无气喷涂方式。面层液态涂料涂装宜分成二层,一层在工厂涂装,最后一层在安装修复后整体涂装。

#### 14.6.7 涂装面成品保护

根据不同的成品保护要求,可采用粘贴有粘性的塑料薄膜的罩膜保护法;或临时涂刷一层漆膜的保护方法,在最终面漆涂装前,临时涂刷的漆膜应能被清除。

### 15 波形钢腹板现场安装

#### 15.1 一般规定

15.1.1 波形钢腹板安装应进行施工过程控制,保证其变形、线形及高程符合设计要求。

15.1.2 安装前应对临时支架、支撑、吊机等临时结构本身在不同受力状态下的强度、刚度、稳定性进行验算,对波形钢腹板应按板块设计编号进行核对并查验产品出厂合格证及材料的质量证明书,并应对桥梁的墩台顶面高程、中线及各孔跨径进行复测,误差在允许偏差内方可安装。

15.1.3 波形钢腹板安装时,不得在现场对其进行未被批准的临时性的焊接和切割作业。

15.1.4 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。

15.1.5 波形钢腹板施工除满足本标准外,尚应符合 JTG/T F50 有关规定。

15.1.6 安装前对连接件进行外观检查,其外观应平整、无裂缝、毛刺、凹坑、变形等缺陷。

15.1.7 浇筑混凝土之前，应对连接件的位置进行检查；混凝土在施工振捣时应保证连接件的位置不发生偏移，必要时应采取临时措施保证施工过程中连接件的位置，若超出允许偏差应及时进行纠正。

15.1.8 应保证连接件周围混凝土的密实性，保证连接件周围的混凝土满足设计要求的强度。

15.1.9 波形钢腹板翼缘板与混凝土连接一侧的表面不得有油漆，在浇筑上翼缘板混凝土之前，应清除铁锈、焊渣、泥土和其他杂物。

## 15.2 波形钢腹板的运输与保存

15.2.1 在运输和保存过程中采用多层叠放的形式，底层钢板支撑在外形相同的混凝土存放垫上，最多不宜多于5层。

15.2.2 为妥善保护防腐涂装层，在钢板表面涂装完全干透后进行搬运，且宜覆粘一层保护膜。

15.2.3 波形钢腹板从加工厂运往工地后，集中按编号堆放，待现场需安装时，由小型平板车运输，为减小起吊时变形，宜将波形钢腹板竖直安放于平车上，拉好揽风，防止倾倒。

## 15.3 波形钢腹板的安装与定位

15.3.1 波形钢腹板吊装应注意如下事项：

- a) 吊装施工人员必须持证上岗；
- b) 吊装前，必须检查钢丝绳、吊钩是否符合要求，不符合要求时更换；
- c) 吊装前必须检查确认波形钢腹板编号是否正确、是否变形，如变形，应矫正后才可吊装；
- d) 吊装前应做好波形钢腹板定型加固以防止因吊装使波形钢腹板产生变形；
- e) 吊装应缓慢进行，吊件起吊离地后，应暂停顿，观察吊件挂钩是否稳妥，确认无误后，再继续吊装；
- f) 吊装过程中，应按指挥信号作业，严禁未得到指挥信号时，私自起吊；
- g) 吊装时，在吊装设备作业范围内禁止人员进入、停留；
- h) 六级及以上大风、雷雨天气时禁止起吊作业。

15.3.2 波形钢腹板吊装时应采用专用夹具，保持起吊后波形钢腹板上缘水平。

15.3.3 在钢腹板安装定位后，同时注意连接件中贯穿钢筋与顶底板钢筋的绑扎次序，以免顶底板钢筋与连接件贯穿钢筋相抵触。

## 15.4 波形钢腹板焊接连接

15.4.1 波形钢腹板节段之间的焊接连接，应在梁段就位、固定、并经检查合格后方可进行施焊。

15.4.2 工地焊接前应做工艺评定试验，施焊应严格按已评定的焊接工艺进行。焊接前应对接头坡口、焊缝间隙和焊接板面高低差等进行检查，并应采用钢丝砂轮对焊缝进行除锈，且工地焊接应在除锈后24h内进行。

15.4.3 工地焊接时应设立防风、防雨设施，遮盖全部焊接处。工地焊接的环境要求为：风力小于5级，温度应高于5摄氏度，相对湿度应小于85%，在箱梁内焊接时应有通风防护安全措施。

15.4.4 焊接施工时的技术要求应符合GB 50661的要求，工地焊接接缝检验应按JTG/T F50进行。

15.4.5 在钢腹板现场焊缝焊接完后，需要对钢腹板的偏位进行复合校正，并在焊接完成 24h 后进行焊缝第三方检测，合格后方可进行下道工序。

### 15.5 波形钢腹板安装焊缝处的防腐处理

波形钢腹板施工现场涂装修复：在清除焊接时烧蚀区域的涂装后，涂刷富锌底漆。中层和面层的涂装做法不变，修复宽度以焊接施工时不破坏相邻涂层为准，各层修复厚度应以原设计厚度的120%为准。

### 15.6 波形钢腹板高强度螺栓连接

15.6.1 高强度螺栓宜选用大六角头螺栓。高强度螺栓、螺母及垫圈的外形尺寸公差、技术条件、运输、保管以及储存应符合 GB/T 1228、GB/T 1229、GB/T 1230、GB/T 1231 的规定。

15.6.2 高强度螺栓连接的摩擦面应按照 GB 50205 的要求进行防滑处理。安装前应复验出厂所附试件的抗滑移系数，合格后方可进行安装。

15.6.3 高强度螺栓的施工预拉力应符合设计要求。高强度螺栓连接副应按出厂批号复验扭矩系数，每批号抽验不少于 8 套，其平均值和标准偏差应符合设计要求。设计无要求时平均值应为 0.11~0.15，其标准偏差应小于或等于 0.01。复验数据应作为施拧的主要参数。

### 15.7 波形钢腹板现场涂装

#### 15.7.1 涂装前准备

涂装前应先对焊缝表面及焊缝两边进行处理，清除表面的锈迹、焊渣、氧化皮、油脂等污物，直至表面呈现出均匀金属光泽。进行表面处理的质量检查，合格后方可进行涂装。

#### 15.7.2 涂装

- a) 涂装层数和漆膜厚度应符合设计要求。防腐涂料应有良好的附着性、耐蚀性，底漆应具有良好的封孔性能；
- b) 涂装完成后，波形钢腹板表面有光泽，颜色均匀，不应有露底、漏涂与涂层剥落、破裂、起泡、划伤等缺陷；
- c) 波形钢腹板纵向节段间采用高强螺栓连接时，波形钢腹板搭接面宜采用无机富锌底漆涂装。

## 16 抗剪连接件施工

### 16.1 一般规定

16.1.1 连接件的材料和焊接工艺除应满足设计和本章的要求外，尚应满足规范 GB 50661 的相关要求。

16.1.2 连接件宜在工厂成型和焊接，宜采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊。栓钉和型钢安装前应对其平面位置进行准确的测量放样；连接件安装前应进行外观检查，外观应平整，无裂缝、锈蚀、毛刺、凹坑、变形等缺陷。

16.1.3 连接件与钢结构焊接前，应进行焊接工艺评定试验，合格后方可正式实施。

16.1.4 混凝土浇筑前，应检查连接型钢和栓钉安装质量。连接件周边的普通钢筋安装过程中，严禁损伤型钢和栓钉。

## 16.2 栓钉连接件施工

16.2.1 栓钉连接件的材料、机械性能以及焊接要求应符合 GB/T 10433 的规定。

16.2.2 设置栓钉连接件的翼缘钢板应采取有效措施，保证焊接变形控制在规定范围内。

16.2.3 栓钉布置间距及栓钉连接件外侧边缘与翼缘钢板边缘的距离应严格按照设计要求进行控制。

## 16.3 开孔钢板连接件的施工

16.3.1 开孔钢板成型及翼缘板、钢板开孔、焊接应在专业钢结构加工厂进行，严格按设计要求实施，孔径偏差不得大于 1mm，孔位偏差不得大于 2mm。

16.3.2 贯穿钢筋至孔周边的距离不宜小于混凝土骨料最大粒径。

16.3.3 贯穿钢筋直径和材料应符合设计要求，使用前应以批次控制进行相应的试验检验。贯穿钢筋加工尺寸偏差不大于 5mm，并要求顺直。

16.3.4 贯穿钢筋安装及定位应符合设计要求并可通过下述措施来保证：

- a) 对于不设承托的混凝土板贯穿钢筋可在模板安装完成后穿入，并利用普通钢筋进行精确定位；
- b) 对于设置承托的混凝土板贯穿钢筋安装，可以先穿入贯穿钢筋，后安装模板，并利用普通钢筋进行精确定位；
- c) 贯穿钢筋应居中于预留孔，安装偏差不应超过 5mm 且垂直于开孔板，并定位牢固；
- d) 贯穿钢筋安装偏差不应超过 5mm。偏差量可通过钢筋周边至孔周边的距离以及相邻钢筋间距进行控制。

16.3.5 配置顶、底板混凝土的粗骨料宜采用 5mm~20mm 连续级配碎石，最大粒径不得超过 25mm，混凝土强度应满足设计要求。

16.3.6 宜进行工艺试验验证混凝土配合比及性能，并在贯穿钢筋、钢板预留孔、混凝土的相互结合程度满足设计传力要求的前提下确定施工工艺。

## 16.4 嵌入型连接件的施工

16.4.1 嵌入型连接件的接合钢筋与波形钢腹板的焊接连接应在工厂内完成，焊缝等级应达到二级及以上。

16.4.2 在波形钢腹板与混凝土底板交接界面上应采取密封措施防水、防结露，并设置排水横坡。

## 16.5 角钢连接件的施工

16.5.1 角钢连接件应在专业钢结构加工厂进行，严格按设计要求实施，孔径偏差不得大于 1mm，孔位偏差不得大于 2mm。

16.5.2 贯穿钢筋应居中于预留孔，安装偏差不应超过 5mm。

16.5.3 角钢连接件的 U 形钢筋与角钢的焊接连接应在工厂完成。

## 16.6 连接件处混凝土施工

16.6.1 应保证混凝土填充密实并与连接件良好接触。对受混凝土收缩影响的部位宜采用微膨胀混凝土，必要时可掺入纤维提高其抗裂性能。



16.6.2 配置混凝土用的粗集料宜采用 5~20mm 连续级配碎石，集料最大粒径不应超过 25mm；混凝土应有良好的工作性、和易性和流动性。

16.6.3 当连接件布置成倒立状态时，应在钢板上设孔用于混凝土振捣和排气，保证钢板下的混凝土浇筑密实；当连接件布置成倒、侧立状态时，应优化混凝土配合比，避免混凝土离析。

16.6.4 混凝土浇筑过程中，应保证连接件周围混凝土的密实性。在翼缘型连接件与底板连接区域，应充分振捣，确保翼缘板下的混凝土浇筑密实。

16.6.5 对直立栓钉，宜采用平板式振捣器；对侧立栓钉，宜选用较小直径的插入式振捣棒，棒体距离栓钉端部 30~50mm，在保证振捣效果的前提下，避免触碰栓钉造成损坏。

## 17 满堂支架现浇施工

### 17.1 基本要求

17.1.1 所用的水泥、砂、石、水、外掺剂及混合材料的质量和规格，必须符合有关规范要求，并按规定的配合比施工。

17.1.2 支架和模板的强度、刚度和稳定性，应符合 JTG/T F50 有关规定。

17.1.3 支架变形和地基沉降应符合设计和相关规范要求。

17.1.4 预应力筋施工应符合 JTG/T F50 的有关规定。

17.1.5 预埋件的预埋和固定应符合设计和相关规范要求。

17.1.6 梁体不得出现漏筋和空洞现象。

### 17.2 模板、支架工程

17.2.1 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥的现浇可使用满堂支架或梁式支架。满堂支架宜采用碗扣式、盘扣式、门式或扣件式等钢管构件，波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥支架宜采用型钢、钢管和贝雷桁片等构件。

17.2.2 施工支架应具备波形钢腹板就位、平面纠偏、高度调整、倾斜度控制的设施。波形钢腹板外侧可设一定刚度的靠架，在波形钢腹板内侧设可调拉杆。

17.2.3 靠架与可调拉杆的刚度可适当加大，以控制波形钢腹板加载后产生局部变形，或混凝土浇筑时导致波形钢腹板上浮，影响标高控制效果。

17.2.4 支架应预留施工预拱度，在确定施工预拱度值时，应考虑下列因素：

- a) 支架承受施工荷载时的弹性变形；
- b) 超静定结构由于混凝土收缩、徐变及温度变化引起的挠度；
- c) 加载后由于构件接头挤压和卸落设备压缩所产生的非弹性变形挤压力；
- d) 由于恒载及活载作用结构所产生的挠度；
- e) 由于支架基础下沉而产生的非弹性变形。

17.2.5 当在软弱地基上设置满布现浇支架时，应对地基进行处理，使地基的承载力满足现浇混凝土的施工荷载要求。

17.2.6 满堂支架现浇法模板安装施工允许偏差参照本规范 21.6.1 条执行。

### 17.3 波形钢腹板安装

17.3.1 波形钢腹板现场安装应符合本规范第 15 章有关规定。

17.3.2 波形钢腹板的安装在底板钢筋绑扎后、顶板钢筋绑扎前，波形钢腹板宜分段安装，分段长度视吊装能力与波形钢腹板节段刚度而定，安装顺序宜从一端向另一端顺序安装，并及时纠偏焊接。

17.3.3 波形钢腹板定位时，其标高应与桥梁纵坡一同调整。

17.3.4 波形钢腹板在支架上的安装步骤应根据具体工程设定，也可参照以下步骤执行：

- a) 安装波形钢腹板前，应在底模板上标记出底板钢筋位置及波形钢腹板位置，以保证横隔板位置准确，避免底板钢筋与波形钢腹板的下翼缘连接件互相干扰；
- b) 多箱室波形钢腹板安装，可按照先边腹板，后中腹板的顺序进行；

17.3.5 为保证钢腹板位置准确，宜在腹板两侧及翼缘板上设置临时支撑，临时支撑参照下列规定：

- a) 安装前计算箱梁内尺寸断面，可用钢管制成胎具控制箱梁断面形状；
- b) 可沿桥梁纵向每隔 3m~5m 设置一道支撑，通过外撑杆、拉杆螺丝、内支撑和大头楔等工具将钢腹板组合并焊接。焊接时宜挂线作业，及时校正钢腹板位置，保持钢腹板各向线形顺直。

17.3.6 波形钢腹板安装精确定位可参照以下步骤执行：

- a) 宜在波形钢腹板底部设临时千斤顶调整标高，上下翼缘板上设置可调支撑脚，微调波形钢腹板位置和线形；
- b) 宜在波形钢腹板顶端每隔 3m~5m，设置横拉或横撑的定位钢管，把每一块钢腹板准确地调整到图纸设计位置；
- c) 自检合格后按规定程序进行验收，验收合格方可进行连接工作。

17.3.7 波形钢腹板的连接控制指标根据本规范 21.4.4 条执行。

### 17.4 混凝土浇筑

17.4.1 混凝土浇筑及养护应符合 JTG/T F50 的有关规定。

17.4.2 混凝土浇筑时纵向从梁跨中向墩顶方向浇筑，防止浇筑过程中墩顶位置出现裂缝，全部浇筑在混凝土初凝前完成。

17.4.3 混凝土底板的浇筑可按先底板、再承托、最后连接部的顺序进行。

17.4.4 混凝土顶板浇筑时应保证顶板与连接件部位的混凝土振捣密实。

17.4.5 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥满堂支架现浇法施工质量应符合本规范 21.6.2 有关规定。

## 18 悬臂现浇施工

### 18.1 基本要求

18.1.1 所用的水泥、砂、石、水、外掺剂及混合材料的质量和规格，必须符合有关规范要求，并按规定的配合比施工。

18.1.2 大跨径波形钢腹板预应力混凝土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长的整数倍。

18.1.3 悬臂浇筑前，必须对桥墩根部（0号块件）的高程、轴线作详细复核，符合设计要求后，方可进行下一步施工。

18.1.4 悬臂施工时应应对梁的高程、轴线以及波形钢腹板的姿态进行监控。

18.1.5 在施工过程中，梁体不得出现宽度超过设计和规范规定的受力裂缝，一旦出现，必须查明原因，经过处理后方可继续施工。

18.1.6 悬臂合龙时，两侧梁体的高差应在设计允许范围内。

## 18.2 挂篮

18.2.1 挂篮结构必须经过设计计算，具有足够的强度、刚度和稳定性，且应符合 JTG/T F50 的相关要求。

18.2.2 挂篮设计时，应预留波形钢腹板的吊装设备与空间，锚固部位应考虑抗剪连接件的影响。

18.2.3 当采用波形钢腹板作为挂篮主承重梁进行悬臂施工时，应对施工阶段中波形钢腹板的强度和稳定性进行验算。

18.2.4 挂篮应根据实际可能发生的作用及其最不利组合进行设计，应考虑的主要荷载如下：

- a) 最大浇筑梁段重量；
- b) 挂篮自重；
- c) 最大梁段模板重量；
- d) 施工机具重量；
- e) 施工人群荷载；
- f) 平衡重物重量；
- g) 冬期施工防寒设施重量；
- h) 其它施工中可能出现的荷载。

18.2.5 挂篮的设计要求：挂篮质量与梁段混凝土的质量比值宜控制在 0.3~0.5 之间，特殊情况下也不应超过 0.7。主要设计参数如下：

- a) 挂篮总重控制在设计限重之内；
- b) 允许最大变形(包括吊带变形的总和)：20mm；
- c) 施工时、行走时的抗倾覆安全系数：2；
- d) 自锚固系统的安全系数：2；
- e) 斜拉水平限位系统安全系数：2；
- f) 上水平限位安全系数：2。

18.2.6 挂篮模板的结构形式、几何尺寸，应能适应梁段长度及高度、顶底板厚度等变化和与已浇筑梁段紧密搭接的要求。

18.2.7 挂篮后吊杆和下限位拉杆孔道应严格按照计划尺寸准确预留。

18.2.8 挂篮支承平台除应有足够的强度外，还应有足够的平面尺寸，以满足梁段的现场作业需要。

18.2.9 挂篮使用前，应对制作及安装质量进行全面检查，进行行走性能试验并按设计要求进行静载试验。

18.2.10 当设计对静载试验无要求时，挂篮应按 1.2 倍最大施工荷载进行静载试验，消除挂篮在加载状态的非弹性变形并测量挂篮的弹性变形值，以便合理设置悬臂浇筑梁段的立模高程。

### 18.3 波形钢腹板安装

18.3.1 波形钢腹板现场安装应符合本规范第 15 章有关规定。

18.3.2 波形钢腹板的悬臂安装可参照以下步骤执行：

- a) 波形钢腹板起吊、安装；
- b) 波形钢腹板定位；
- c) 设置临时支撑固定内外侧波形钢腹板使之成为整体，并应留有可调整余地。

18.3.3 波形钢腹板起吊系统宜采用塔吊起吊，将波形钢腹板运输至塔吊吊点正下方，起吊纵向移动至设计位置，转换吊点至手拉葫芦，通过松、紧四角手拉葫芦精确定位安装(如图 23 所示)。

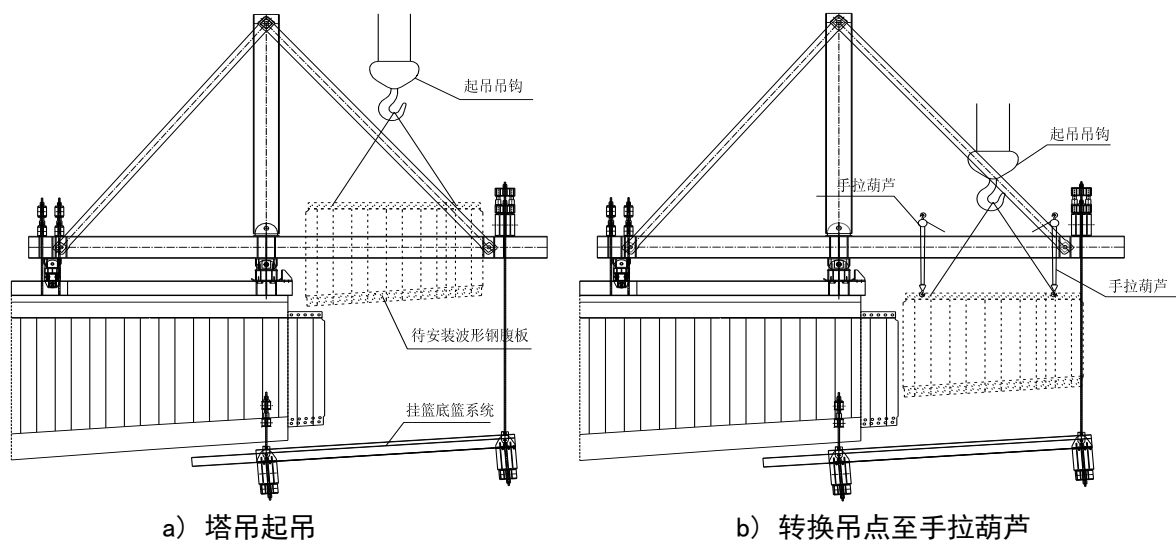


图 23 波形钢腹板吊装

18.3.4 波形钢腹板应根据横向坐标、纵向坐标和竖向坐标进行空间定位，定位精度应符合本规范 21.4.3 节有关规定。

18.3.5 波形钢腹板在合龙段的安装可参照以下步骤执行：

- a) 测量合龙段的实际尺寸，合龙段波形钢腹板根据现场实际长度精确确定；
- b) 调整合龙段两端的标高至符合设计要求；
- c) 锁定合龙段；
- d) 将波形钢腹板吊装就位，按设计连接方式与合龙口两侧钢腹板有效连接；
- e) 焊接波形钢腹板的安装焊缝。

### 18.4 混凝土浇筑

18.4.1 悬臂段混凝土的浇筑应符合 JTG/T F50 有关规定。

18.4.2 现浇段的浇筑顺序宜靠近边墩(台)的先浇,逐段向合龙段靠拢,并逐渐调整现浇梁段的标高,使合龙高差在允许误差范围之内。浇筑混凝土前应确保支架与梁底之间能相对滑动,使边跨合龙时现浇段能随原浇筑 T 构自由伸缩,避免混凝土拉应力过大。

18.4.3 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥悬臂浇筑施工的质量及检测应符合本规范 21.7 条有关规定。

## 18.5 合龙段施工

18.5.1 应测量箱梁顶面标高及轴线,连续测试温度影响偏移值,观测合龙段在温度影响下梁体长度的变化。

18.5.2 合龙顺序应按设计要求进行,设计无要求时,一般先边跨,后次中跨,再中跨。多跨一次合龙时,必须同时均衡对称地合龙。合龙时,桥面上设置的所有临时荷载均应与监控单位和设计单位协商决定。

18.5.3 连续梁合龙段长度及体系转换应符合设计规定,将两悬臂端内合龙口临时联结,联结注意事项如下:

- a) 复查、调整两悬臂端合龙施工荷载,使其对称相等,如不相等时,应用压重调整;
- b) 检查梁内预应力钢束是否张拉完成;
- c) 复测、调整中跨、边跨悬臂的挠度及两端的高差;
- d) 观测了解合龙前的温度变化与梁端高程及合龙段长度变化的关系;
- e) 合龙前应在两端悬臂预加压重,并于浇筑混凝土过程中逐步撤除,使悬臂挠度保持稳定。合龙宜在一天中最低气温时完成。合龙段的混凝土强度等级可提高一级,以尽早张拉。合龙段混凝土浇筑完成后,应加强养护,悬臂端应覆盖,防止日晒。

18.5.4 体系转换及支座反力调整,应按设计程序要求施工。

## 19 预制吊装施工

### 19.1 基本要求

19.1.1 所用的水泥、砂、石、水、外掺剂及混合材料的质量和规格,必须符合有关规范要求,并按规定的配合比施工。

19.1.2 梁体不得出现漏筋和空洞现象。

19.1.3 梁体在吊装移出预制底座时,混凝土的强度不得低于设计要求的吊装强度;梁体安装时,支承结构(墩台、盖梁、垫石)的强度应符合设计要求。

19.1.4 梁体安装前,墩、台支座垫板必须稳固。

19.1.5 梁体就位后,梁端支座应对位,梁底与支座以及支座与垫石应密贴,否则应重新安装。

19.1.6 梁体之间的接缝填充材料的规格和强度,应符合设计要求。

### 19.2 预制梁的制作

19.2.1 预制场地与预制台座的要求应符合 JTG/T F50 的有关规定。

19.2.2 钢筋、模板及预应力的施工应符合 JTG/T F50 的有关规定。

19.2.3 波形钢腹板的制造及安装应符合本规范第 14、15 章的有关规定。

19.2.4 预制梁制作时应充分考虑波形钢腹板剪切变形引起的梁体挠度变化。

19.2.5 对波形钢腹板预应力混凝土组合梁的预制场布置、预制和存放台座的设置，应进行专门的荷载计算并进行专项设计。

### 19.3 预制梁的运输与保存

19.3.1 预制波形钢腹板预应力混凝土组合梁的运输与保存可参考 JTG/T F50 的有关规定。

19.3.2 预制梁在运输的过程中，应注意保护波形钢腹板的表面涂装层。

### 19.4 预制梁的现场安装

19.4.1 预制波形钢腹板预应力混凝土组合梁的安装施工应符合 JTG/T F50 的有关规定。

19.4.2 预制梁吊装前应做好工艺设计，计算吊装工况下结构应力和变形，确保吊装过程中结构安全。

19.4.3 吊点应设置在设计支承线、具有横隔板位置，梁上的吊点以 4 个为宜。

19.4.4 预制波形钢腹板预应力混凝土组合梁就位后，应及时设置保险垛或支撑，将梁固定并用钢板与先安装好的梁体预埋横向连结钢板焊接，防止倾倒。梁体就位后应按设计要求及时浇筑接头混凝土。

19.4.5 在预制波形钢腹板预应力混凝土组合梁整体运输与安装时必须配备足够吨位的起吊运输设备。如对梁体有先简支后连续的设计要求时，安装时应设临时支座，且临时支座必须预压到 1.0 倍以上的设计荷载；支座体系转换必须符合设计规定，以防止在转换过程中造成梁体开裂。

19.4.6 预制波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥安装过程中，应经常对梁体混凝土进行裂缝观测。

## 20 顶推施工

### 20.1 基本要求

20.1.1 台座和滑道组的中线必须在桥轴线或其延长线上。

20.1.2 导梁应在地面试装后，再在台座上安装，导梁与梁身必须牢固连接。

20.1.3 千斤顶及其它顶推设备在施工前应仔细检查校正，多点顶推时必须确保同步。

20.1.4 顶推过程中，须设专人观测墩台沉降位移及梁的偏位、导梁和梁挠度等，提供观测数据。

20.1.5 顶推及落梁过程中，若梁体出现裂缝，应查明原因，在采取措施后，方可继续顶推。

### 20.2 预制场地

20.2.1 选择梁段预制场地时，除应按本规范 19.2.1 条有关规定执行外，还应注意下列事项：

- a) 预制场地应设在桥台后面桥轴线的引道或引桥上。当为多联顶推时，为加速施工进度，可在桥两端均设预制场地，从两端相对顶推；

- b) 预制场地的长度应考虑梁段悬出反压段的长度、梁段底板与顶板预制长度、导梁拼装长度和机具设备材料进入预制作业线的长度，预制场地的宽度应考虑梁段两侧施工作业的需要；
- c) 预制场地上空宜搭设固定或活动的作业棚，其长度宜大于 2 倍预制梁段长度，使梁段作业不受天气影响，并便于混凝土养护；
- d) 在桥端路基上或引桥上设置台座时，其地基或引桥的强度、刚度和稳定性应符合设计要求。应做好台座地基的防水、排水措施，以防沉陷。在荷载作用下，台座顶面变形不应大于 2mm；
- e) 在预制场内台座后方，可设置波形钢腹板起吊安装台移动式门吊，便于安装调整波形钢腹板。

20.2.2 台座的轴线应与桥梁轴线的延长线重合，台座的纵坡应与桥梁的纵坡一致。台座施工的允许偏差应按本规范 21.9.1 条执行。

### 20.3 导梁和临时墩

20.3.1 顶推过程中导梁下缘要承受较大的纵向压力和支架的集中支承力，混凝土突缘可用高强纤维混凝土做成，顶推完成后此突缘作为底板的一部分。

20.3.2 导梁的两侧波形钢腹板间应安装支撑系统，以确保顶推过程中导梁不发生横向扭曲。

20.3.3 在顶推过程中，应注意防止临时设施损坏波形钢腹板涂装。

20.3.4 为保证导梁顺利迎墩，导梁前方宜设置钢制牛腿。

20.3.5 桥跨中间设置有临时墩时，其施工技术要求应按照设计规定以及 JTG/T F50 的有关规定执行。各联主梁顶推作业完成并落位到正式支座上以后，应将临时墩拆除。

### 20.4 梁段预制及养护

20.4.1 模板宜采用钢模板，底模与底架联成一体并可升降，底模两侧应设置波形钢腹板调整就位的靠架系统，内模板采用在可移动的台车上加上安装的升降旋转整体模板。模板应保证刚度，制作精度应符合 JTG/T F50 的规定。

20.4.2 波形钢腹板现场安装应按本规范第 15 章有关规定执行。

20.4.3 钢筋工作和预应力管道安装除应符合 JTG/T F50 的规定外，还应注意顶底板钢筋加工时与波形钢腹板连接件的匹配。横桥向任一相邻钢筋间距偏差应小于 3mm，每 10 个间距总和的偏差不应超过 5mm。

20.4.4 梁段模板、钢筋、预应力管道、波形钢腹板、滑道、预埋件等应经检查签认后方可浇筑混凝土。

20.4.5 混凝土的材料要求、配合比设计、搅拌、运输、浇筑等的具体要求，可参照 JTG/T F50 的有关规定执行。在必要时可使用早强水泥或掺入早强减水剂，以提高早期强度，缩短顶推周期。

20.4.6 梁段工作缝的接触面应凿毛，并洗刷干净，或采用其它可加强混凝土接触的措施。

20.4.7 混凝土可采用两次浇筑，第一次浇筑主梁底板，第二次浇筑主梁顶板。支座位置处的隔板，在整联梁顶推到位并完成解联后进行浇筑。振捣时应避免振动器碰撞预应力筋管道、预埋件等。

20.4.8 第一梁段前端设置导梁端的混凝土浇筑，应注意振捣密实，导梁的中心线与水平位置应准确平整。

## 20.5 梁段施加预应力

20.5.1 梁段预应力束的布置、张拉次序、临时束的拆除次序等，应严格按照设计规定执行。其施工的技术要求应按照 JTG/T F50 有关规定执行。

20.5.2 在桥梁顶推就位后需要拆除的临时预应力束，张拉后不应灌浆，锚具外露多余预应力钢材不必切除。

20.5.3 梁段间需连接的永久预应力束，应在两梁段间留出适当空间，用预应力束连接器连接，张拉后用混凝土填塞。

## 20.6 梁体顶推方法及装置

梁段顶推方法及其装置应按JTG/T F50的有关规定执行，顶推施工过程中应按本规范21.9.2条的要求进行施工观测。

## 21 施工质量检验与验收

### 21.1 一般规定

波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥施工中，工程质量应符合JTG F80-1、JTG/T F50和GB 50205等的要求，机械设备、试验及监测仪器等也应符合现行有关标准的规定。

### 21.2 波形钢腹板制造

21.2.1 波形钢腹板外观质量应符合表4的规定。

表4 波形钢腹板外观质量

项 次	项 目	要 求
1	转角处	转角处圆弧平滑，无裂纹，无纤维状暗筋
2	切口	平直、无明显锯齿
3	颜色	表面色泽均匀，无明显缺陷和色泽灰暗现象
4	锈蚀、麻点和划痕	深度不得大于钢材厚度允许偏差值的1/2
5	其他外观质量	表面顺滑平整

21.2.2 波形钢腹板尺寸偏差允许值应按表5采用。

表5 波形钢腹板制造精度

项 次	项 目	精度
1	翼缘板宽 (mm)	$\pm 2$
2	翼缘板平整度	$\pm L/1000$
3	翼缘板垂直度	$\pm b/200$
4	波形钢腹板高度 (mm)	$\pm 2$



表 5 波形钢腹板制造精度（续）

项 次	项 目	精 度
5	波形钢腹板节段长和节段对角线长（mm）	$\pm 3$
6	波形钢腹板高度方向平整度	$\pm h/750$
7	波形钢腹板波高（mm）	$\pm 3$
8	波形钢腹板波长（mm）	$\pm 5$
9	单个节段波形钢腹板平面挠曲量（mm）	$\pm 3$
注：L为波形钢腹板波长（mm），b为翼缘板宽（mm），h为波形钢腹板高度（mm）。		

21.2.3 波形钢腹板的制造质量控制和整形控制应根据设计要求和 JT/T 784 的有关规定执行。

### 21.3 抗剪连接件焊接

21.3.1 波形钢腹板连接件的焊接工艺可参照下列规定执行：

- 栓钉宜采用镇静钢制作，栓钉连接件的材料、机械性能以及焊接要求应满足 GB/T 10433 的规定；
- 其他连接件的钢材要求参照 GB 50661 的规定；
- 焊接材料应符合 GB 50661 的规定。

21.3.2 波形钢腹板连接件的焊接工艺应按如下要求作出评定：

- 连接件应执行严格的焊接工艺评定，满足设计要求和抗疲劳要求并经检测合格后，进行全面实施。其评定规则参照 GB 50661 的规定；
- 栓钉在施焊前，应进行与现场条件相似的焊接实验，确定合适的施焊时间和电流大小。

### 21.4 波形钢腹板现场安装

21.4.1 波形钢腹板现场焊接接口的无损检测应满足下列要求：

- 不论接口形式如何，应对接口线的全长进行肉眼观测；
- 不论接口形式如何，在顶板和底板附近部分，应通过渗透、探伤试验来进行表面检查；
- 对于对接接头，应通过超声探伤试验进行内部缺陷检查。

21.4.2 波形钢腹板安装质量检验应满足下列要求：

- 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；
- 焊缝均应平滑，无裂纹、未溶合、夹渣、未填满弧坑、焊瘤等外观缺陷，预焊件的装焊应符合设计要求。

21.4.3 波形钢腹板的定位标准应符合表 6 要求。

表 6 波形钢腹板定位标准

项次	项 目	允许偏差	备 注
1	波形钢腹板轴向偏位（mm）	10	内外侧波形钢腹板分别测量

表 6 波形钢腹板定位标准 (续)

项次	项目	允许偏差	备注
2	内外侧波形钢腹板间距偏差 (mm)	5	间距 2m 量 3 处
3	内外侧波形钢腹板高差 (mm)	10	间距 2m 量 3 处
4	波形钢腹板垂直度	1/500	间距 2m 量 3 处
5	波形钢腹板纵桥向坡度	1/500	间距 2m 量 3 处
注：此表格为参考斜拉桥结合梁工字梁悬臂拼装制定。			

21.4.4 波形钢腹板连接控制指标参照表 7。

表 7 波形钢腹板连接控制指标

项次	项目	规定值或允许偏差	检验方法和频率
1	钢腹板高程 (mm)	$\pm 10$	水准仪或钢尺
2	钢腹板中心距 (mm)	$\pm 20$	尺量：检查两腹板中心距
3	钢腹板横断面对角线差 (mm)	$\pm 30$	尺量：检查两端断面
4	钢腹板拱度 (mm)	+10, -5	拉线用尺量：检查跨中
5	钢腹板连接	焊缝尺寸	量规：检查全部
		焊缝探伤	超声：检查全部
		高强螺栓扭矩	测力扳手：检查 5%，且不少于 2 个

21.4.5 波形钢腹板安装质量按表 8 进行控制。

表 8 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥波形钢腹板安装实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	跨径 $L$ (mm)	$\pm (5+0.00015L)$	全站仪或钢尺：测两支座中心线距离
2	全长 (mm)	$\pm 15$	全站仪或钢尺
3	波形钢腹板中心距 (mm)	$\pm 3$	尺量：检查两波形钢腹板中心距
4	横截面对角线差 (mm)	4	尺量：检查两端截面
5	拱度 (mm)	+10, -5	水平仪测量：检查跨中
6	扭曲 (mm)	每米 $\leq 1$	安装前置于平台，四角中有三角接触平台，用尺量另一角与平台间隙
7	焊接	焊缝尺寸	量规：检查全部
		焊缝探伤	无损探伤：检查全部

21.4.6 波形钢腹板现场涂装质量检验应符合 TB/T 1527 和表 9 的要求。

表 9 波形钢腹板防护涂装检验要求

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	除锈清洁度		符合设计规定,设计未规定时表面取 Sa2.5	比照板目测: 100%
2	粗糙度 (μ m)	外表面	70~100	按设计规定检查,设计未规定时,用粗糙度仪检查,每段检查 6 点,取平均值
		内表面	40~80	
3	总干膜厚度(μ m)		符合设计要求	漆膜测厚仪检查
4	附着力(MPa)		符合设计要求	划格或拉力试验: 按设计规定频率检查
注: 项次3的检查频率按设计规定执行,设计未规定时,每10m <sup>2</sup> 测3~5个点,每个点附近测3次,取平均值,每个点的量测值如小于设计值应加涂一层涂料,每涂完一层后,应检测干膜总厚度。				

## 21.5 波形钢腹板竣工验收

波形钢腹板竣工验收质量标准应按GB 50205 的相关规定执行。

## 21.6 满堂支架现浇法施工

## 21.6.1 满堂支架现浇法模板安装施工允许偏差参照表 10。

表 10 波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥满堂支架现浇施工模板安装允许偏差

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查频率		检查方法
				范围	点数	
1	轴线偏位 (mm)		10	每跨	3	用经纬仪测量
2	梁板顶面高程 (mm)		$\pm 10$		3~5	用水准仪测量
3	断面尺寸 (mm)	高度	+5, -10		1~3 个断面	用钢尺量
		宽度	$\pm 30$			
		顶、底板厚度	+10			
4	长度 (mm)		+5, -10		2	用钢尺量
5	横坡 (%)		$\pm 0.15$		1~3	用水准仪测量
6	顶板平整度 (mm)		$\pm 5$		$\geq 15$ 处	用 3m 靠尺检查
7	底板平整度 (mm)		$\pm 3$		$\geq 15$ 处	用 3m 靠尺检查

## 21.6.2 满堂支架现浇梁段施工质量检验应符合表 11 的要求。

表 11 满堂支架现浇梁段实测项目

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
1△	混凝土强度 (MPa)	在合格标准内	按 JTG/T F50 检测

表 11 满堂支架现浇梁段实测项目（续）

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
2△	轴线偏位（mm）		±跨径/10000	全站仪或经纬仪；纵桥向检查 2 点
3	顶面高程（mm）		±10	水准仪；检查 3～5 处
4△	断面尺寸（mm）	高度	+5，-10	尺量：每跨检查 2～3 个断面
		顶宽	±30	
		底宽	±20	
		顶、底板厚	+10	
5	横坡（%）		±0.15	水准仪；检查 3 处
6	预埋 PBL 键位置（mm）		5	尺量：每件
7	平整度（mm）		8	2m 直尺：检查竖直、水平两个方向，每侧面每 10m 梁长测 1 处
△表示重要项目。				

## 21.7 悬臂浇筑法施工

21.7.1 悬臂浇筑梁段施工质量检验应符合表 12 的要求。

表 12 悬臂浇筑梁段实测项目

项次	检查项目		规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	混凝土强度（MPa）		在合格标准内	按 JTG/T F50 检测
2	轴线偏位（mm）	$L \leq 100\text{m}$	10	全站仪或经纬仪；每个节段检查 2 处
		$L > 100\text{m}$	$L/10000$	
3	顶面高程（mm）	$L \leq 100\text{m}$	±20	水准仪；每个节段检查 2 处
		$L > 100\text{m}$	± $L/5000$	
		相邻节段高差	10	尺量；检查 3~5 处
4	断面尺寸（mm）	高度	+5，-10	尺量；每个节段检查 2 处
		顶宽	±30	
		底宽	±20	
		顶、底板厚	+10	
5	合龙后同跨对称点高程差（mm）	$L \leq 100\text{m}$	20	水准仪；每跨检查 5~7 处
		$L > 100\text{m}$	$L/5000$	
6	横坡（%）	±0.15		水准仪；每节段检查 1~2 处
7	平整度（mm）	8		2m 直尺：检查竖直、水平两个方向，每侧面每 10m 梁长测 1 处

21.7.2 应力跟踪测量：应对梁体主要断面应力观测值与理论值进行比较，研究体系转换过程中的应力变化，分析相关因素对箱梁应力的影响。

## 21.8 预制吊装法施工

波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥预制吊装法施工允许误差可参考表13。

表 13 波形钢腹板预应力混凝土组合梁桥预制吊装法施工安装允许误差

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法和频率
1	混凝土强度 (MPa)			在合格标准内	按JTG/T F50 检测
2	梁长度 (mm)			+5, -10	尺量：每梁
3	宽度 (mm)	干接缝（梁翼缘、板）		±10	尺量：检查3 处
		湿接缝（梁翼缘、板）		±20	
		箱梁	顶宽	±30	
			底宽	±20	
4	高度 (mm)	梁、板		±5	尺量：检查3 个截面
		箱梁		+5, -0	
5	截面尺寸 (mm)	顶板厚		+5, -0	尺量：检查3 截面
		底板厚			
		腹板或梁肋			
6	平整度 (mm)			5	2m 直尺：每侧面每10 m 梁长测1 处
7	横系梁及预埋件位置 (mm)			5	尺量：每件

## 21.9 顶推法施工

21.9.1 顶推施工前的预制场地台座施工的允许偏差应满足如下要求：

- 轴线偏差：5mm；
- 相邻两支承点上台座中滑移装置的纵向顶面标高差：2mm；
- 同一个支承点上滑移装置的横向顶面标高差：1mm；
- 台座（包括滑移装置）和梁段底模板顶面标高差：2mm。

21.9.2 顶推过程中的施工观测项目如下：

- 墩台和临时墩承受竖直荷载和水平推力所产生的竖直、水平位移，需要时，应观测其应力变化；
- 桥梁顶推过程中，主梁和导梁控制截面的挠度和轴线偏移，需要时，应观测其应力变化；
- 桥梁顶推过程中，波形钢腹板应力；
- 应力的跟踪测量应按本规范 21.7.2 条执行；
- 滑动装置的静摩擦系数和动摩擦系数。观测结果应随时记录、整理，如超过设计规定限值，应分析原因，并采取措施纠正。