

江 苏 省 地 方 标 准

DB 32/T XXXX—XXXX
代替DB32/T 2881—2016

波形钢腹板组合结构桥梁设计与施工规范

Specification for design and construction of composite girder bridges with corrugated
steel webs

(报批稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

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 材料 5

 4.1 混凝土 5

 4.2 钢材 5

 4.3 普通钢筋与预应力筋 6

 4.4 焊接材料 6

 4.5 涂装材料 6

 4.6 其它材料 6

5 设计 6

 5.1 基本规定 6

 5.2 构造 7

 5.3 整体受力 12

 5.4 横桥向及桥面板计算 14

 5.5 波形钢腹板 17

 5.6 连接件 21

6 施工 25

 6.1 基本规定 25

 6.2 波形钢腹板工厂制造 26

 6.3 波形钢腹板现场安装 29

 6.4 同步悬臂浇筑法 31

 6.5 异步悬臂浇筑法 36

 6.6 满堂支架法 38

7 质量控制与检验 39

 7.1 波形钢腹板现场检验 39

 7.2 同步悬臂浇筑法、异步悬臂浇筑法 40

 7.3 满堂支架法 41

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替DB32/T 2881—2016《波形钢腹板组合结构桥梁设计与施工规范》，与DB32/T 2881—2016相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 删除了“总则”，修改为“范围”（范围见第1章，2016年版的第1章）；
- b) 删除了“总则”，修改为基本规定（设计的基本规定见5.1，施工的基本规定见6.1，2016年版的第1章）；
- c) 增加了焊接材料的要求（见4.4）；
- d) 增加了涂装材料的要求（见4.5）；
- e) 增加了其它材料的要求（见4.6）；
- f) 更改了混凝土设计强度要求由“不应低于C40”调整为“宜不小于C50”（见5.1.14，2016年版4.2.2）；
- g) 更改了对接焊接图例（见图13a，2016年版的图7a）；
- h) 增加了搭接坡口焊（见图13c）；
- i) 更改了嵌入型连接件水平抗剪承载力计算公式（见5.6.2.7，2016年版的10.2.7）；
- j) 更改了嵌入型连接件在波形钢腹板斜板段处的混凝土应力计算公式（见5.6.2.8，2016年版的10.2.8）；
- k) 增加了施工监测要求（见6.1.8）；
- l) 增加了“标准化、智能化施工、四新技术等”要求（见6.1.9）；
- m) 更改了“波形钢腹板工厂制造”技术要求（见6.2，2016年版的第11章）；
- n) 增加了溶剂型涂料和水性涂料的施工温度、湿度规定（见6.2.8.2，2016年版的12.7.2）；
- o) 增加了波形钢腹板运输存储中的保护要求（见6.2.9，2016年版的12.2）；
- p) 更改了“挂篮预压重量”要求，且细化分级加载比例（见6.4.3.5，2016年版的15.3.3）；
- q) 增加了体外预应力筋张拉方式“采用顶压式，不应采用自锚式”要求（见6.4.12.2 d）；
- r) 增加了“异步悬臂浇筑法”施工方法及相关技术规定（见6.5）；
- s) 删除了“预制吊装施工方法”章节（见2016年版的第14章）；
- t) 删除了“顶推施工方法”章节（见2016年版的第16章）；
- u) 增加了“质量控制与检验”要求（见第7章）；
- v) 删除了“代表性波形钢腹板组合结构桥梁实例”（见2016年版的附录A）。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省交通运输厅提出、归口并组织实施。

本文件起草单位：宿迁市交通运输局、南京交通工程有限公司、江苏省交通工程建设局、苏交科集团股份有限公司、南京市公共工程建设中心、东南大学、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、南京市公路事业发展中心、江苏润通项目管理有限公司、江苏恒基路桥股份有限公司，镇江市交通工程建设管理有限公司、浙江中隧桥波形钢腹板有限公司。

本文件主要起草人：张爱军、孙晓俊、谢久田、程伟、唐显云、成朝恒、刘佃勇、陈斯宁、陈加富、侯爵、郭赵元、梅达放、孙鹏利、吴洪、赵旻、朱晓勇、朱牛锁、何凌、徐士磊、韩荣金、余飞、郭臻、吕钢斧、宋祖广、赵小虎、张建东、刘朵、杨红成、章登精、武加恒、万水、孙天明、郑清刚、白亚东、丁晓春、王正中、王翔、王登吉、王东旭、杨树春、樊小林、顾冕、卜泽元、顾孜敏。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2016年首次发布为DB32/T 2281—2016；

——本次为第一次修订。

波形钢腹板组合结构桥梁设计与施工规范

1 范围

本文件规定了波形钢腹板组合结构桥梁设计与施工的材料、设计、施工、质量控制与检验的要求。
本文件适用于波形钢腹板组合结构桥梁设计与施工。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
GB/T 700 碳素结构钢
GB/T 709 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
GB/T 714 桥梁用结构钢
GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓连接副
GB/T 1591 低合金高强度结构钢
GB/T 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱
GB/T 3632 钢结构用扭剪型高强度螺栓连接副
GB/T 4171 耐候结构钢
GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
GB/T 10433 紧固件 电弧螺柱焊用螺柱和瓷环
GB/T 11345 焊缝无损检测 超声检测 技术、检测等级和评定
GB/T 14977 热轧钢板表面质量的一般要求
GB/T 18365 斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索
GB/T 26951 焊缝无损检测 磁粉检测
GB 50017 钢结构设计标准
GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准
GB 50661 钢结构焊接规范
GB 55002 建筑与市政工程抗震通用规范
JB/T 3223 焊接材料质量管理规程
JG/T 161 无粘结预应力钢绞线
JGJ 92 无粘结预应力混凝土结构技术规程
JT/T 722 公路钢结构桥梁防腐涂装技术条件
JT/T 784 组合结构桥梁用波形钢腹板
JT/T 876 填充型环氧涂层钢绞线体外预应力束
JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范
JT/T 1516 公路工程脚手架与支架施工安全技术规程
JTG/T 3360-01 公路桥梁抗风设计规范
JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

JTG 3420 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程
JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
JTG/T 3650-01 公路桥梁施工监控技术规程
JTG D60 公路桥涵设计通用规范
JTG F80/1 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程

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 corrugated steel web

被加工成波折或波纹形状的用于组合结构桥梁腹板的钢结构构件（示意图见图1）。

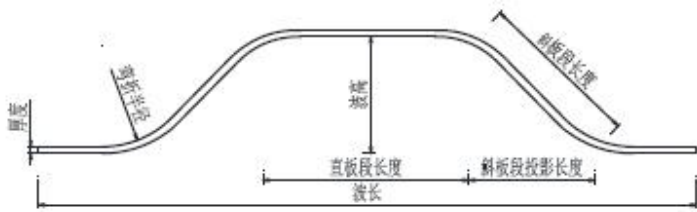


图 1 波形钢腹板形状示意图

[来源：JT/T 784—2022，3.1.1]

3.2

波形钢腹板组合结构梁 composite beam with corrugated steel webs

由预应力混凝土顶板、底板与波形钢腹板通过抗剪连接件组合而成，共同受力的钢-混凝土组合梁（示意图见图2）。

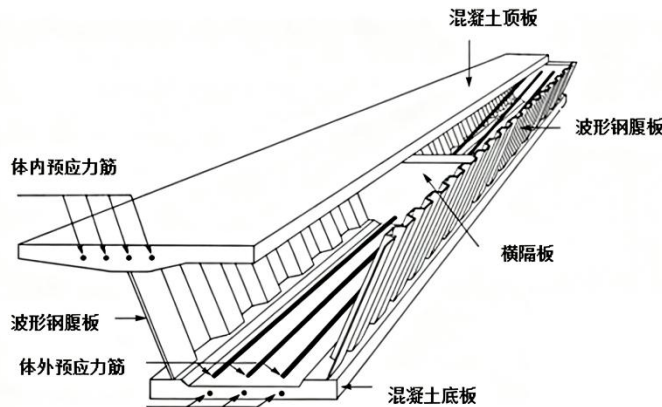


图 2 波形钢腹板组合结构梁示意图

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（示意图见图3）。

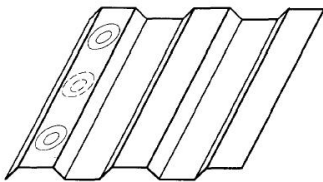


图 3 局部屈曲模式示意图

3.4

整体屈曲 global buckling

波形钢腹板整体的屈曲（示意图见图4）。

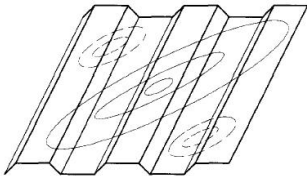


图 4 整体屈曲模式示意图

3.5

组合屈曲 combined buckling

局部屈曲与整体屈曲复合形成的屈曲形式（示意图见图5）。

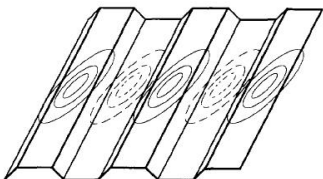


图 5 组合屈曲模式示意图

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梁顶板、底板连接部产生的板面内的嵌固弯矩。

3.7

抗剪连接 shear resistant connection

连接波形钢腹板与混凝土顶板、底板，共同承受荷载的构造。

3.8

连接件 shear connector

使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接构造。

3.9

翼缘型连接件 flange shear connector

在波形钢腹板端部焊接钢翼缘板，再在其上安装剪力钉、角钢或开孔钢板与贯穿钢筋等，使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接件。

3.10

嵌入型连接件 embedded shear connector

将波形钢腹板埋入混凝土顶板、底板内,并在其端部焊接纵向接合钢筋、开孔设横向贯穿钢筋,与混凝土共同受力的连接件(示意图见图6)。

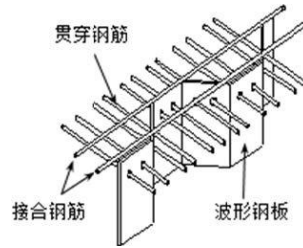


图 6 嵌入型连接件示意图

3. 11

双开孔钢板连接件 twin PBL shear connector

属于翼缘型连接件的一种,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(示意图见图7)。

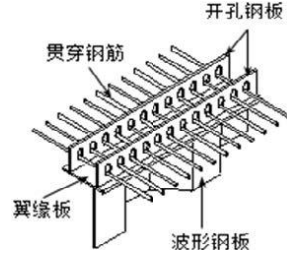


图 7 双开孔钢板连接件示意图

3. 12

单开孔钢板+剪力钉连接件 single PBL and studs shear connector

属于翼缘型连接件的一种,通过开孔钢板与剪力钉连接件使混凝土与波形钢腹板共同受力的连接件(示意图见图8)。

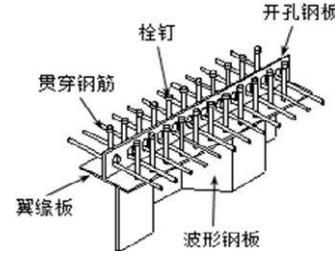


图 8 单开孔钢板+剪力钉连接件示意图

3. 13

角钢连接件 angle plate shear connector

属于翼缘型连接件的一种,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(示意图见图9)。

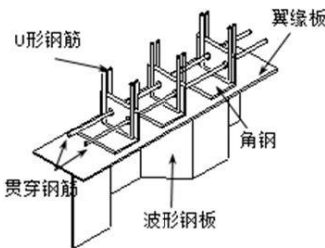


图 9 角钢连接件示意图

3. 14

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. 15

内衬混凝土 lining concrete

波形钢腹板组合结构梁在墩顶附近一定范围内,在波形钢腹板内侧设置的混凝土。

3. 16

组合腹板段 girders with composite web

设置内衬混凝土的梁段。

3. 17

异步悬臂浇筑法 cantilever casting method

在悬臂浇筑施工中,将N节段波形钢腹板作为挂篮的承重结构,先后浇筑N节段混凝土底板与N-1节段混凝土顶板的施工方法(示意图见图10)。

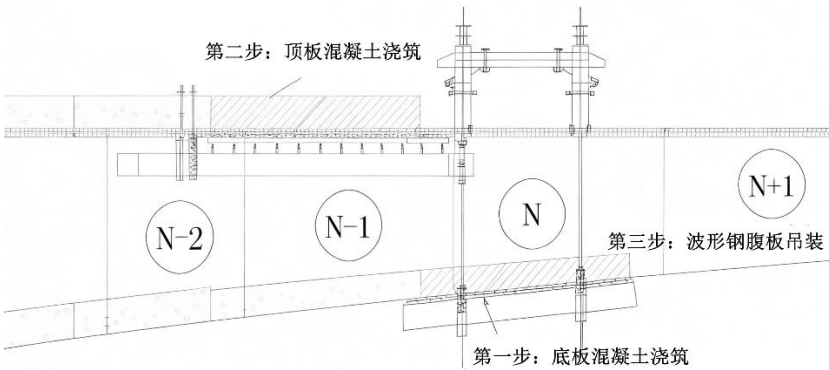


图 10 异步悬臂浇筑法施工示意图

4 材料

4. 1 混凝土

混凝土施工的原材料选择、骨料级配、配合比设计、拌和、运输、浇筑和养护应符合 JTG/T 3650 的规定。

4. 2 钢材

4. 2. 1 钢材质量等级应不低于 C 级,力学性能、化学成分等应满足 GB/T 1591、GB/T 4171、GB/T 700、

GB/T 714 的规定。

- 4.2.2 钢材表面质量应符合 GB/T 14977 的规定。
- 4.2.3 剪力钉连接件的材料应符合 GB/T 10433 的规定。
- 4.2.4 高强度螺栓、螺母、垫圈应符合 GB/T 1231 的规定。
- 4.2.5 普通螺栓应符合 GB/T 3098.1 的规定。
- 4.2.6 翼缘板、连接件及焊接材料的材质应与主体钢材相匹配。

4.3 普通钢筋与预应力筋

- 4.3.1 普通钢筋与预应力筋应符合 JTG/T 3650 的规定。
- 4.3.2 体内预应力筋应符合 GB/T 5224 的规定，体外预应力筋应符合 JG/T 161 的规定。
- 4.3.3 体外预应力筋宜采用工厂制造的环氧涂层钢绞线和热挤 HDPE 钢绞线成品索，应符合 JT/T 876 和 GB/T 18365 的规定。

4.4 焊接材料

- 4.4.1 焊接材料应符合 GB 50661 的规定
- 4.4.2 焊接材料的采购、验收、仓储、使用过程管理应符合 JB/T 3223 的规定。

4.5 涂装材料

- 4.5.1 涂料的型号、颜色等应与设计文件和质量证明文件相符。
- 4.5.2 涂装材料品种、规格、性能等应符合 JT/T 722 的规定。

4.6 其它材料

硅胶等止水材料使用年限不应小于年限15年。

5 设计

5.1 基本规定

- 5.1.1 波形钢腹板组合结构梁设计方法宜参考普通预应力混凝土桥梁规范 JTG D60 设计。
- 5.1.2 按持久状况承载能力极限状态设计时，桥梁结构的设计安全等级的划分应符合 JTG D60、JTG 3362 的规定。
- 5.1.3 波形钢腹板组合结构梁设计中采用的作用及作用效应组合应符合 JTG D60 的规定。
- 5.1.4 波形钢腹板组合结构梁极限状态设计应符合 JTG3362 的规定。
- 5.1.5 波形钢腹板组合结构梁应根据不同种类的作用或荷载及其对桥梁的影响、桥梁所处的环境条件，考虑以下三种设计状况：
 - a) 持久状况，即桥梁建成后承受自重、汽车荷载等持续时间很长的状况。该状况下波形钢腹板组合结构梁应作承载能力极限状态和正常使用极限状态设计；
 - b) 短暂状况，即桥梁施工过程中承受临时性作用或荷载的状况，该状况下波形钢腹板组合结构梁应作承载能力极限状态设计，必要时才作正常使用极限状态设计；
 - c) 偶然状况，即在桥梁使用过程中偶然出现的状况，该状况波形钢腹板组合结构梁只作承载能力极限状态设计。
- 5.1.6 弯桥在采用波形钢腹板组合结构梁时，应对其抗扭性能进行验算，保证其抗扭承载力符合设计要求。

- 5.1.7 持久状况下，桥梁不应发生结构体系改变，并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，单向受压支座应始终保持受压状态。
- 5.1.8 对于扭矩较大的斜、弯、宽波形钢腹板组合结构梁，应按 JTG 3362 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。
- 5.1.9 当采用波形钢腹板作为施工承重件进行施工时，应对波形钢腹板施工阶段的强度和稳定进行验算。
- 5.1.10 大跨径波形钢腹板组合结构梁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。
- 5.1.11 波形钢腹板组合结构梁的抗震设计应按 JTG/T 2231-01 或 GB 55002 等相关规范执行。
- 5.1.12 大跨径波形钢腹板组合结构梁采用减隔震设计时，减隔震装置的构造宜简单并考虑减隔震系统的可维修性、可更换性。
- 5.1.13 波形钢腹板组合结构梁的抗风设计应按 JTG/T 3360-01 等相关规范执行。
- 5.1.14 波形钢腹板组合结构梁混凝土设计强度等级应不小于 C50。
- 5.1.15 波形钢腹板组合结构梁应根据其所处环境条件 and 设计使用年限要求进行耐久性设计。

5.2 构造

5.2.1 主梁截面

- 5.2.1.1 波形钢腹板组合结构梁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。
- 5.2.1.2 根据桥面宽度不同，波形钢腹板组合结构梁可采用直腹式单箱单室、斜腹式单箱单室、单箱双室、单箱多室，如图 11 a)~图 11 d) 所示；亦可采用斜腹板作成倒梯形或采取外（内）撑加强箱体顶板、悬挑板，如图 11 e)~图 11 f) 所示。

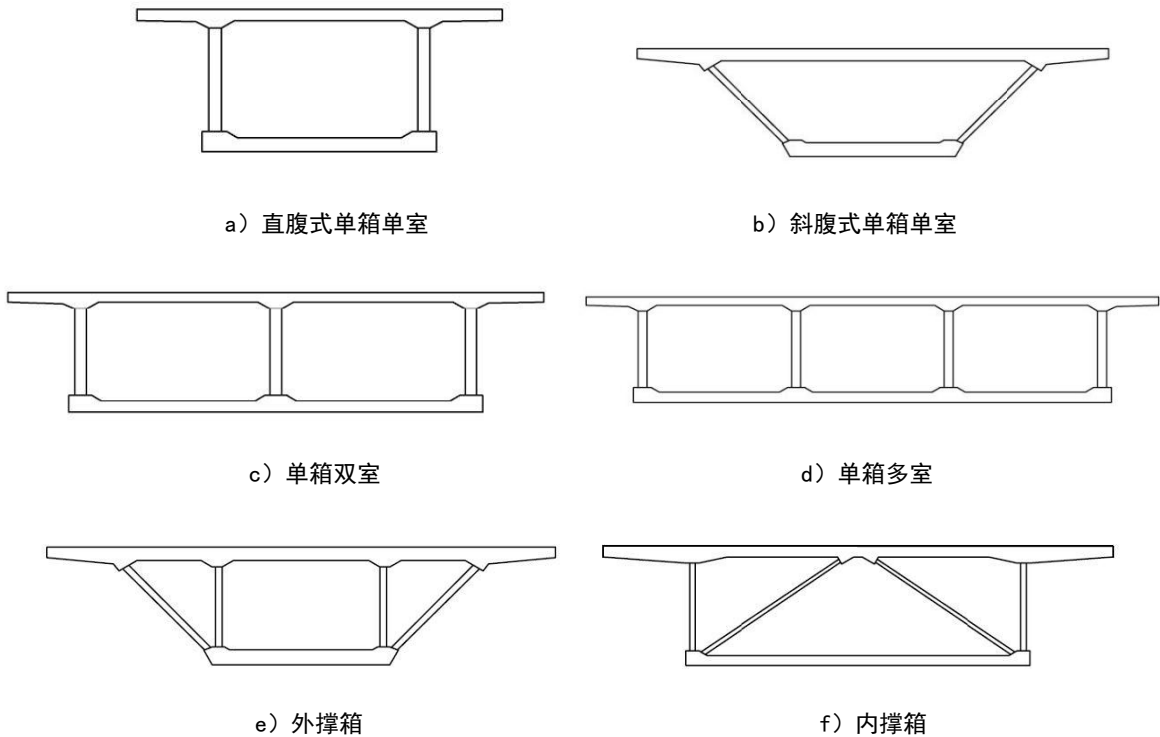


图 11 波形钢腹板组合结构梁典型截面图

- 5.2.1.3 波形钢腹板组合结构梁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 50 m 以下时，宜采用等截面波形钢腹板组合结构梁；跨径 50 m 及以上时，宜采用变截面波形钢腹板组合结构梁，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 $1/30 \sim 1/33$ 。
- 5.2.1.4 波形钢腹板组合结构梁顶板、底板的厚度应根据预应力布置及结构受力要求确定。顶板厚度不宜小于 250 mm，底板厚度不宜小于 220 mm。
- 5.2.1.5 波形钢腹板组合结构梁根据顶、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。

5.2.2 波形钢腹板

5.2.2.1 波形钢腹板宜采用图 12 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 的规定。40 m~150 m 跨径连续梁，宜选用 1600 型波形钢腹板。当使用图 7 所示形状以外的波形钢腹板时，应考虑加工、运输、安装、节段长度、腹板厚度的变化及节段间的连接等因素。

单位为毫米

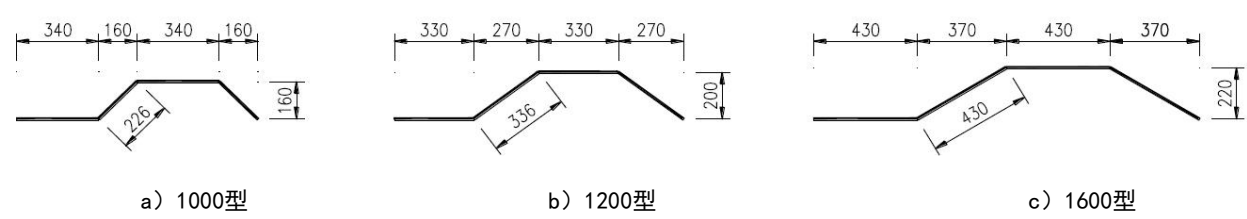


图 12 波形钢腹板几何尺寸

- 5.2.2.2 波形钢腹板的厚度不宜小于 10 mm。
- 5.2.2.3 波形钢腹板的冷弯加工弯曲半径不宜小于 15 倍的板厚。
- 5.2.2.4 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。
- 5.2.2.5 波形钢腹板现场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、角焊接和搭接坡口焊接，如图 13 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 14 所示。

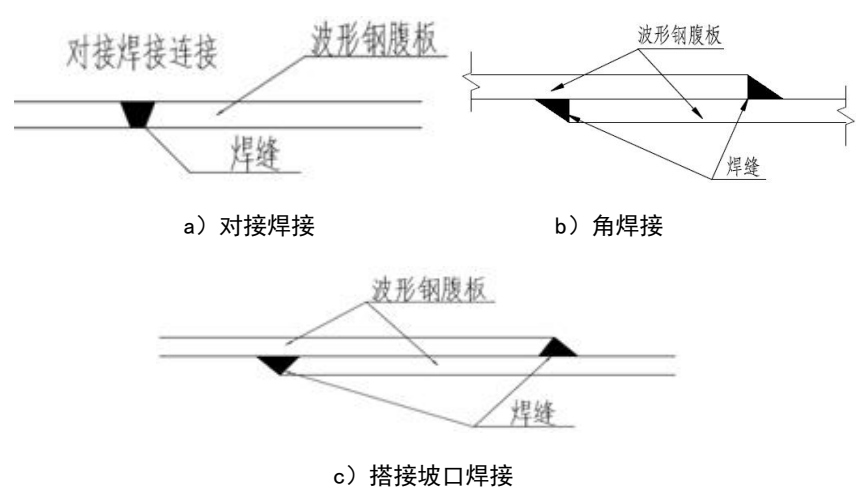


图 13 焊接连接形式

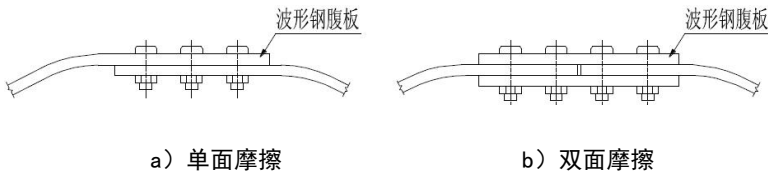


图 14 高强螺栓连接形式

5.2.2.6 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 4 mm 时,可不做斜坡。

5.2.3 连接件

5.2.3.1 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。

5.2.3.2 波形钢腹板与混凝土顶、底板连接件形式常见的形式包含嵌入型连接件、双开孔钢板连接件、单开孔钢板+剪力钉连接件、角钢连接件及剪力钉连接件等。如采用其他连接方式,应经试验验证其可靠性和抗疲劳性。

5.2.3.3 波形钢腹板与混凝土顶、底板的连接,应能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。

5.2.3.4 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。

5.2.3.5 连接部应密封并实施防腐蚀处理。

5.2.3.6 嵌入型连接中波形钢腹板斜板段的投影面积 (A_1 =埋深×波高) 应不小于板腋有效承压面积 ($A = b_0 \times h_0$) 的 1/5, 如图 15 所示。

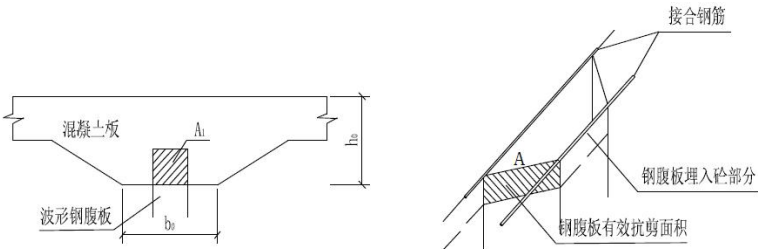


图 15 嵌入型连接件斜板段投影面积示意

5.2.3.7 波形钢腹板组合结构桥梁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。

5.2.3.8 当波形钢腹板与梁底板采用翼缘型连接件时,可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。

5.2.3.9 连接件的翼缘板与开孔钢板符合下列规定:

- a) 翼缘板的厚度宜不小于 16 mm, 开孔钢板厚度宜不小于 12 mm;
- b) 开孔钢板孔径应大于贯穿钢筋直径与集料最大颗粒直径之和, 可取 60 mm~80 mm;
- c) 孔与孔的中心间距宜取 150 mm~250 mm;
- d) 孔距钢板边缘的净距宜不小于孔中心距的 1/2;
- e) 贯穿钢筋应采用 HRB400 及以上强度级别的钢筋, 直径宜不小于 16 mm, 贯穿钢筋直径应与钢板开孔直径相匹配。

5.2.3.10 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剪力钉连接件。

5.2.3.11 剪力钉连接件符合下列规定：

- a) 剪力钉的长度应不小于剪力钉直径的 4 倍，有拉拔作用时宜不小于剪力钉直径的 10 倍；
- b) 剪力钉纵桥向的中心间距应不小于 5 倍的剪力钉直径，且不小于 100 mm；横桥向的中心间距应不小于 4 倍的剪力钉直径且不小于 50 mm；
- c) 剪力钉连接件沿主要受力方向中心间距应不超过 300 mm；
- d) 剪力钉连接件的外侧边缘距翼缘板边缘的距离应不小于 25mm。

5.2.4 横隔板

5.2.4.1 为保证波形钢腹板组合结构梁的抗扭刚度，应以合适的间距设置横隔板。

5.2.4.2 波形钢腹板组合结构梁应在支点处以及在底板或体外预应力索纵向折线折角处设置横隔板。横隔板间距应根据桥梁的扭转和畸变效应确定。横隔板最大间距宜不超过 20 m。

5.2.4.3 当横隔板兼作体外索的锚固或转向装置时，应满足体外索的张拉、锚固、换索要求。

5.2.5 波形钢腹板与横隔板的连接

5.2.5.1 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。

5.2.5.2 波形钢腹板与横隔板可通过剪力钉连接件、开孔钢板连接件等进行连接。

5.2.5.3 波形钢腹板与端横梁的连接方式有翼缘型连接（如图 16 所示）和嵌入型连接（如图 17 所示）两种类型。

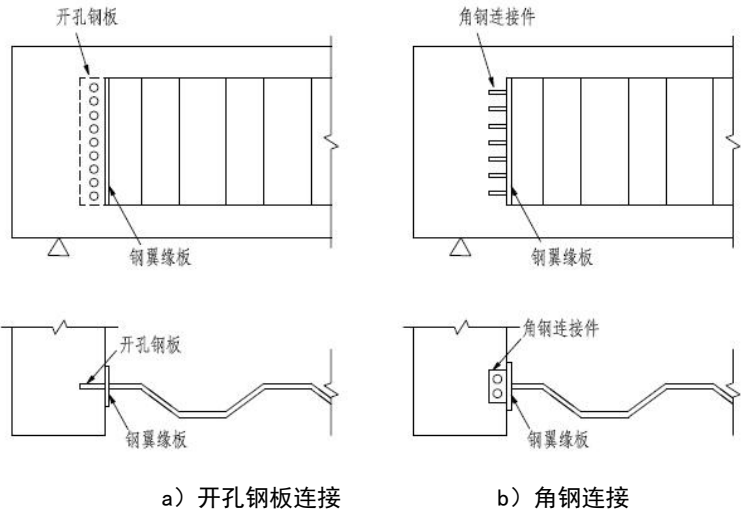


图 16 翼缘型连接

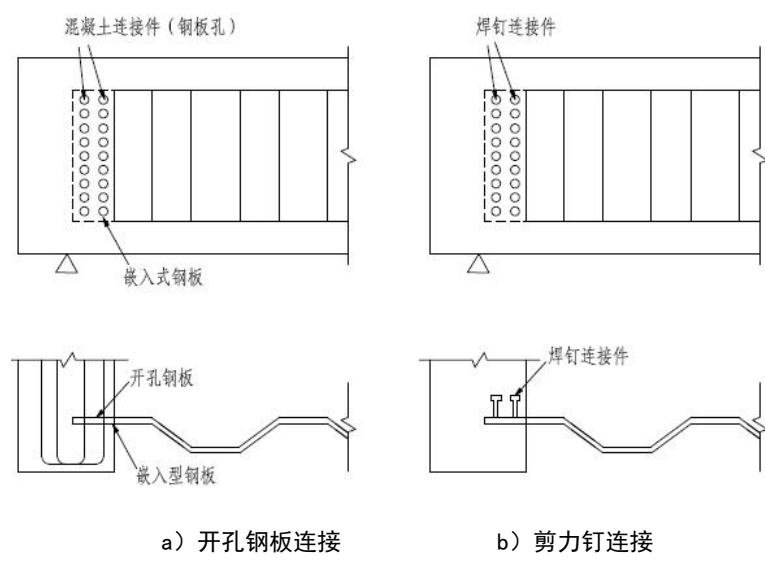


图 17 嵌入型连接

5.2.6 内衬混凝土

5.2.6.1 支点附近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，形成组合腹板。组合腹板段顺桥向长度宜不小于支点处梁高的 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，但最薄处宜不小于 20 cm。

5.2.6.2 内衬混凝土宜采用剪力钉与波形钢腹板连接。

5.2.7 预应力体系

5.2.7.1 波形钢腹板组合结构梁宜采用体内、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。

5.2.7.2 体外预应力筋宜在索体上以适当的间隔设置防振装置。

5.2.7.3 体外预应力锚具的选用应符合 GB/T 14370 的规定。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。

5.2.7.4 体外预应力筋在转向块处的弯折转角不应大于 15°，转向块鞍座处最小曲率应符合 JGJ 92 的规定。

5.2.8 转向块与转向器

5.2.8.1 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。

5.2.8.2 转向块设计时宜考虑增加体外预应力索的可能性，预留备用孔，以便在特殊需要时采用。

5.2.8.3 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应不小于 25 mm，直径应不大于 20 mm；外封闭箍筋在竖直方向高于内环筋的净距应不小于 50 mm；内环筋和外封闭箍筋沿转向器纵向布置的间距应不小于 100 mm。

5.2.9 耐久性措施

5.2.9.1 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。

5.2.9.2 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。

- 5.2.9.3 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。
- 5.2.9.4 高强螺栓连接及焊接连接施工后应及时进行防腐涂装。
- 5.2.9.5 波形钢腹板组合结构梁底板与波形钢腹板结合处宜做成 2% 的横向排水斜坡，并用硅胶等止水材料密封，如图 18 所示。

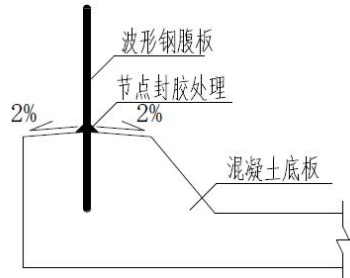


图 18 横向排水示意图

- 5.2.9.6 端横梁与波形钢腹板连接部位采用硅胶等止水材料密封。

5.3 整体受力

5.3.1 一般规定

- 5.3.1.1 应基于波形钢腹板组合结构梁构造、受力作用、边界条件等；建立等效结构模型，结构模型应反映桥梁的实际受力情况。
- 5.3.1.2 波形钢腹板组合结构梁作杆系结构的抗弯受力分析时，主梁仅考虑混凝土顶底板的有效截面进行截面特性的计算，如图 19 所示。计算单元、边界条件和荷载的施加等宜参考普通预应力混凝土桥梁。

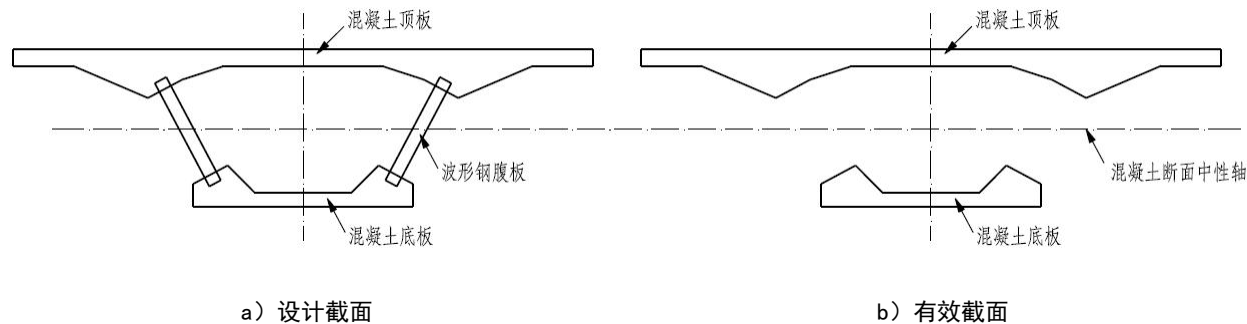


图 19 组合梁有效截面示意图

5.3.2 持久状况承载能力极限状态计算

- 5.3.2.1 波形钢腹板组合结构梁的承载能力应按以下基本假定进行计算：
- a) 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；
 - b) 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；
 - c) 组合梁纵向弯曲时符合平截面假定；
 - d) 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。

5.3.2.2 波形钢腹板组合结构梁按承载能力极限状态进行验算时，作用的效应应采用其组合设计值，其中汽车荷载应计入冲击系数；结构材料性能采用其强度设计值。

5.3.2.3 波形钢腹板组合结构梁的正截面抗弯承载力验算应按 JTG 3362 的规定执行。

5.3.2.4 波形钢腹板组合结构梁腹板的抗剪承载力验算应按 5.5.2 的规定执行。

5.3.2.5 体内预应力筋的张拉控制应力及预应力损失应按 JTG 3362 的规定执行。

5.3.2.6 波形钢腹板组合结构梁的体内、体外预应力索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式（1）和式（2）计算。

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} \quad (1)$$

$$\sigma_{pu} < f_{pd} \quad (2)$$

式中：

σ_{pu} ——体外预应力钢筋的极限设计值，单位为兆帕（MPa）；

σ_{pe} ——体外预应力钢筋的有效预应力，单位为兆帕（MPa）；

f_{pd} ——预应力索的钢筋拉屈服强度，单位为兆帕（MPa）。

5.3.2.7 波形钢腹板预应力混凝土组合梁的抗扭惯性矩按式（3）计算。

$$J_t = \frac{4A_m^2}{\left[\frac{h_m}{n_s t_3 (1+\alpha)} + \frac{b_m}{t_1 (1-\alpha)} + \frac{h_m}{n_s t_4 (1+\alpha)} + \frac{b_m}{t_2 (1-\alpha)} \right]} \quad (3)$$

式中：

J_t ——抗扭惯性矩，单位为四次方毫米（mm⁴）；

A_m ——箱梁截面面积，单位为平方毫米（mm²）； $A_m = h_m \times b_m$ ， h_m 为顶板与底板中心线之间的距离； $b_m = (b_1 + b_2) / 2$ ，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，如图20所示；

n_s ——钢材与混凝土的剪变模量比， $n_s = G / G_c$ ；

t_i ——各部件的厚度，单位为毫米（mm）；

α ——修正系数， $\alpha = 0.4h_m / b_m - 0.06$ ，当 $h_m / b_m \leq 0.2$ 时， $\alpha = 0$ 。

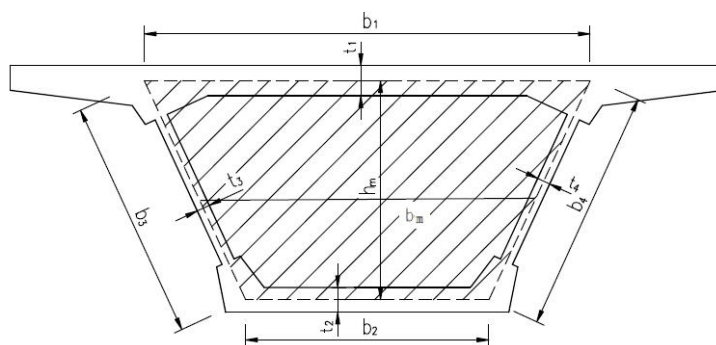


图 20 抗扭惯性矩计算图

5.3.2.8 波形钢腹板组合结构梁按式（4）进行上部结构抗倾覆验算。

$$r_{qf} = \frac{S_{bk}}{S_{sk}} \geq 2.5 \quad (4)$$

式中：

r_{qf} ——抗倾覆稳定系数；

S_{bk} ——使上部结构稳定的作用效应标准组合，单位为千牛·米（kN·m）；

S_{sk} ——使上部结构倾覆的汽车荷载（含冲击作用）效应标准值，单位为千牛·米（kN·m）。

5.3.3 持久状况正常使用极限状态计算

5.3.3.1 公路桥涵的持久状况设计应按正常使用极限状态的要求，采用作用频遇组合作用准永久组合，或作用频遇组合并考虑作用长期效应的影响，对构件的抗裂、裂缝宽度和挠度进行验算，并使各项计算值不超过本规范规定的各相应限值。在上述各种组合中，汽车荷载不计冲击作用。

5.3.3.2 波形钢腹板组合结构梁顶、底板混凝土的抗裂验算按 JTG 3362 执行。

5.3.3.3 波形钢腹板组合结构梁的挠度验算应符合 JTG 3362 的规定，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（5）～式（7）计算。

$$\omega_{\tau} = \int \frac{k_V \times V \times \beta_i \times \bar{V}}{G \times A_w} \times d_x \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_i = h_w / h \dots\dots\dots (2)$$

$$A_w = h_w \times t_w \times \eta \dots\dots\dots (3)$$

式中：

ω_{τ} ——波形钢腹板因剪切变形产生的挠度，单位为毫米（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，单位为牛（N）；

β_i ——波形钢腹板的剪切分担率；

$\bar{V}$ ——由单位荷载产生的剪力，单位为牛（N）；

G ——钢材的剪变模量，单位为兆帕（MPa）；

A_w ——波形钢腹板的有效剪切面积，单位为平方毫米（mm²）；

h_w ——波形钢板的高度，单位为毫米（mm）；

t_w ——波形钢板的厚度，单位为毫米（mm）；

η ——形状系数， $\eta = (a_w + b_w) / (a_w + c_w)$ 。 a_w 为波形钢腹板直板段长度，单位为毫米（mm）； b_w 为波形钢腹板斜板段投影长度，单位为毫米（mm）； c_w 为波形钢腹板斜板段长度，单位为毫米（mm）；

h ——组合梁高度，单位为毫米（mm）。

5.3.3.4 按持久状况设计的波形钢腹板组合结构梁，应对其使用阶段的顶、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。

5.3.3.5 波形钢腹板组合结构梁顶、底板混凝土的压应力及预应力钢筋的拉应力计算应按 JTG 3362 执行。

5.3.3.6 波形钢腹板组合结构梁在施工阶段的验算应按 JTG 3362 执行。

5.4 横桥向及桥面板计算

5.4.1 横向抗弯

5.4.1.1 横向计算包括横隔板、桥面板、底板及波形钢腹板与顶、底板连接的横向抗弯计算。

5.4.1.2 波形钢腹板组合结构梁中的端横梁一般为预应力混凝土构件，其横向分析可按普通预应力混凝土梁结构的分析方法进行计算。

5.4.1.3 波形钢腹板组合结构梁的横向分析可采用平面框架模型或三维有限元模型。桥面板跨径超过 6 m 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。

5.4.1.4 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。

5.4.1.5 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按式（8）计算。

$$D_x = EI_x \quad (1)$$

式中：

D_x ——等效单位长度横向抗弯刚度，单位为牛·毫米（N·mm）；

E ——钢材的弹性模量，单位为兆帕（MPa）；

I_x ——单位长度波形钢腹板绕纵桥向的惯性矩，单位为立方毫米（mm³），按式（28）计算。

5.4.1.6 车辆作用的横向内力计算按以下步骤进行：

- 确定所需计算的截面，进行车辆最不利纵横向布置；
- 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 3362 的规定确定车轮荷载在板上的有效分布宽度。
- 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；
- 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。

5.4.1.7 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 3362 的相关要求。

5.4.2 桥面板纵向抗剪

5.4.2.1 桥面板的构造要求应符合 JTG 3362 的规定。

5.4.2.2 桥面板设置承托时，其外形尺寸及构造（如图 21 所示）符合下列规定：

- 当承托高度在 80 mm 以上时，应在承托底侧布置横向加强钢筋；
- 承托边至连接件外侧的距离不应小于 40 mm，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；
- 承托中横向钢筋下部水平段距连接件上翼缘应小于 50 mm，剪力连接件抗掀起端底面高出横向钢筋的距离 h_{e0} 不应小于 30 mm，横向钢筋间距不应大于 $4h_{e0}$ 且不应大于 300 mm。

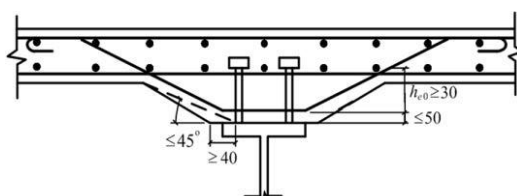


图 21 承托构造图

5.4.2.3 混凝土桥面板单位长度板内横向钢筋总面积不应小于式（9）的规定。

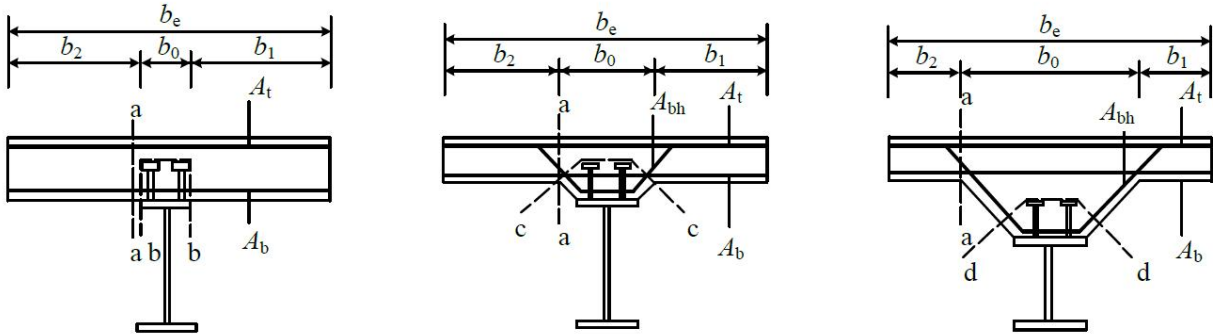
$$A_e f_{sd} / L_s > 0.8 \quad (1)$$

式中：

A_e ——单位长度上在垂直于主梁方向上的钢筋截面面积，单位为平方毫米（ mm^2 ）；

f_{sd} ——横向普通钢筋强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

L_s ——纵向受剪界面的长度，单位为毫米（mm）；按图22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。



标引符号说明：

A_t ——混凝土板顶部单位长度内垂直于主梁方向的钢筋面积总和；

A_b ——混凝土板底部单位长度内垂直于主梁方向的钢筋面积总和；

A_{bh} ——混凝土承托底部单位长度内垂直于主梁方向的钢筋面积总和。

图 22 混凝土翼板纵向受剪控制界面

5.4.2.4 梁承托及混凝土板纵向抗剪承载力应符合式（10）的规定。

$$v_{1d} \leq v_{1Rd} \quad (2)$$

式中：

v_{1d} ——作用（或荷载）引起的混凝土板单位长度内纵向抗剪界面上的纵向剪力，单位为牛（N）；

v_{1Rd} ——混凝土板单位长度内纵向抗剪承载力，单位为牛（N），按5.4.2.5计算确定。

5.4.2.5 单位长度内纵向界面抗剪承载力设计值按式（11）、式（12）计算，取两者较小值。

$$v_{1Rd} = 0.7b_f f_{td} + 0.8A_e f_{sd} \quad (3)$$

$$v_{1Rd} = 0.25b_f f_{cd} \quad (4)$$

式中：

b_f ——纵向抗剪界面在垂直于主梁方向上的长度，单位为毫米（mm）；按图16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；

f_{td} ——混凝土轴心抗拉强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

A_e ——单位长度上在垂直于主梁方向上的钢筋截面面积，单位为平方毫米（ mm^2 ），按图16和表1取值；

f_{sd} ——普通钢筋的抗拉强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值，单位为兆帕（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_e

剪切面	a-a	b-b	c-c	d-d
-----	-----	-----	-----	-----

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

5.5 波形钢腹板

5.5.1 一般规定

- 5.5.1.1 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。
- 5.5.1.2 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。
- 5.5.1.3 因波形钢腹板承受的纵桥向轴力很小，在波形钢腹板之间的连接验算中可以忽略轴向力的作用。

5.5.2 波形钢腹板验算

- 5.5.2.1 波形钢腹板的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和持久状况、短暂状况正常使用极限状态剪应力验算。
- 5.5.2.2 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。
- 5.5.2.3 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 规定的作用效应的基本组合。
- 5.5.2.4 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 规定的作用效应的标准组合。
- 5.5.2.5 波形钢腹板的承载能力极限状态抗剪强度应符合式（13）～式（15）的规定。

$$\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td}) \leq f_v \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_{md} = \frac{V_d - V_p}{h_w t_w} \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau_{td} = \frac{T_d}{2A_w t_w (1 + \alpha)} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- γ_0 ——结构重要性系数；
- τ_{md} ——剪力与预应力的竖向分力产生的剪应力设计值，单位为兆帕（MPa）；
- τ_{td} ——扭矩产生的剪应力设计值，单位为兆帕（MPa）；
- f_v ——钢板的抗拉、抗压和抗弯强度设计值，单位为兆帕（MPa）；
- V_d ——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，单位为牛（N）；
- V_p ——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，单位为牛（N）；
- T_d ——作用效应基本组合下计算截面的扭矩设计值，单位为牛·毫米（N·mm）。

5.5.2.6 波形钢腹板正常使用极限状态剪应力应符合式（16）～式（18）的规定。

$$\tau_{mk} + \tau_{tk} \leq 0.625f_{yv} \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{mk} = \frac{V_k - V_p}{h_w t_w} \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_{tk} = \frac{T_k}{2A_m t_w (1 + \alpha)} \quad (6)$$

式中：

τ_{mk} ——剪力与预应力的竖向分力产生的剪应力设计值，单位为兆帕（MPa）；

τ_{tk} ——扭矩产生的剪应力设计值，单位为兆帕（MPa）；

f_{yv} ——波形钢腹板剪切屈曲强度标准值，取屈曲强度的 $1/\sqrt{3}$ ，单位为兆帕（MPa）；

V_k ——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，单位为牛（N）；

T_k ——作用效应标准组合下计算截面的扭矩设计值，单位为牛·毫米（N·mm）。

5.5.2.7 波形钢腹板的承载能力极限状态组合屈曲应符合式（19）、式（20）的规定。

$$\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td}) \leq \tau_{cr} \quad (7)$$

$$\tau_{cr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_{cr,L}^4} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^4} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (8)$$

式中：

τ_{cr} ——用于计算波形钢腹板组合屈曲临界剪应力的函数，单位为兆帕（MPa）；

$\tau_{cr,L}$ ——波形钢腹板局部屈曲临界剪应力，单位为兆帕（MPa），按式（21）计算；

$\tau_{cr,G}$ ——波形钢腹板整体屈曲临界剪应力，单位为兆帕（MPa），按式（21）计算。

5.5.2.8 波形钢腹板局部（整体）屈曲临界剪应力按式（21）～式（28）计算。

$$\begin{cases} \tau_{cr,L}(\tau_{cr,G}) = f_v & \lambda_s \leq 0.6 \\ \tau_{cr,L}(\tau_{cr,G}) = [1 - 0.614 \times (\lambda_s - 0.6)] \times f_v & 0.6 \leq \lambda_s \leq \sqrt{2} \\ \tau_{cr,L}(\tau_{cr,G}) = \frac{f_v}{\lambda_s} & \lambda_s \geq \sqrt{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_s = \sqrt{f_v / \tau_{cr,L}^e} \quad (10)$$

或

$$\lambda_s = \sqrt{f_v / \tau_{cr,G}^e} \quad (11)$$

式中：

λ_s ——折算板宽厚比，计算 $\tau_{cr,L}$ 时，按式（22）计算；计算 $\tau_{cr,G}$ ，按式（23）计算；

$\tau_{cr,L}^e$ ——弹性局部屈曲临界剪应力，单位为兆帕（MPa），按式（24）、式（25）计算：

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

$$k = 4 + 5.34(h_w/a_w)^2 \quad (13)$$

$\tau_{cr,G}^e$ ——弹性整体屈曲临界剪应力，单位为兆帕（MPa），按式（26）～式（28）

计算：

$$\tau_{cr,G}^e = \frac{36\beta(EI_y)^{\frac{1}{4}}(EI_x)^{\frac{3}{4}}}{h_w^2 t_w} \quad (14)$$

$$I_y = \frac{t_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (15)$$

$$I_x = t_w^3(\delta^2 + 1)/(6\eta) \cdots \cdots (16)$$

式中:

k ——波形钢腹板局部屈曲系数;

μ ——波形钢腹板的泊松比;

β ——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, 单位为立方毫米 (mm^3);

I_x ——单位长度波形钢腹板绕纵桥向的惯性矩, 单位为立方毫米 (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, t_w 为波形钢腹板厚度。

5.5.3 波形钢腹板之间的连接计算

5.5.3.1 高强度螺栓的抗剪承载力设计值应按式 (29) 计算, 连接处使用的螺栓个数 N 应符合式 (30) 的规定。

$$N_V^b = 0.9n_f \times \mu \times P \cdots \cdots (1)$$

式中:

N_V^b ——螺栓的抗剪承载力设计值, 单位为牛 (N);

n_f ——传力摩擦面数;

μ ——摩擦面的抗滑移系数, 按GB 50017取用;

P ——高强度螺栓的预拉力, 单位为牛 (N), 按GB 50017取用。

$$N \geq \frac{V_d}{N_V^b} \cdots \cdots (2)$$

5.5.3.2 波形钢腹板直角角焊缝在剪力作用下, 其剪应力按式 (31) 计算。

$$\tau_f = \frac{V_f}{0.7h_f \sum l_w} \leq f_f^w \cdots \cdots (3)$$

式中:

τ_f ——波形钢腹板直角角焊缝在剪力作用下产生的剪应力, 单位为兆帕 (MPa);

V_f ——焊缝承受的竖向剪力设计值, 单位为牛 (N);

h_f ——角焊缝的焊脚尺寸, 单位为毫米 (mm);

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

f_f^w ——角焊缝的强度设计值, 单位为兆帕 (MPa), 按GB 50017取值。

5.5.4 波形钢腹板与翼缘板的焊接计算

5.5.4.1 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 23 进行以下等效。

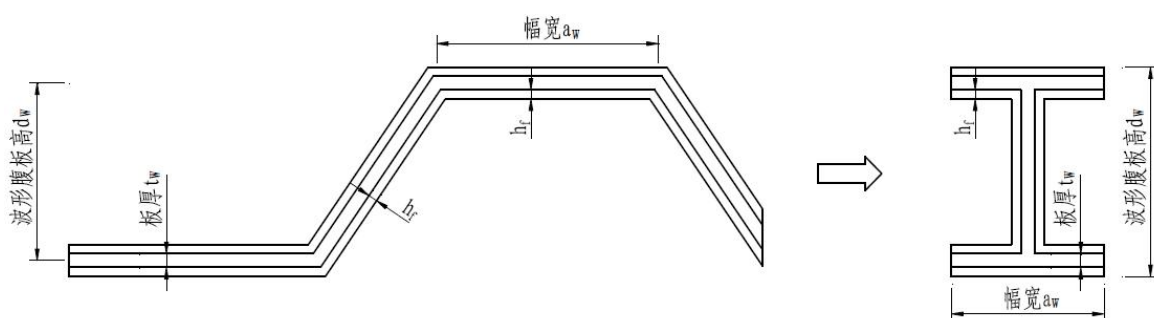


图 23 角焊缝计算等效图

5.5.4.2 纵桥向按式 (32) 进行验算。

$$\tau_f = \frac{2Q_d^e}{0.7h_f \sum l_w} \leq f_f^w \quad (1)$$

式中:

τ_f ——水平剪力产生的剪应力, 单位为兆帕 (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, 单位为牛/毫米 (N/mm), 按式 (38) 计算;

h_f ——角焊缝的焊脚尺寸, 单位为毫米 (mm);

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

5.5.4.3 横桥向按式 (33) 进行验算。

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

式中:

σ_M ——由横向弯矩产生的正应力, 单位为兆帕 (MPa);

M_u ——横向弯矩设计值, 单位为牛·毫米 (N·mm)。

5.5.4.4 合成应力验算应满足式 (34) 规定。

$$\left(\frac{\tau_f}{f_f^w}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_M}{f_f^w}\right)^2 < 1 \quad (3)$$

5.5.5 内衬混凝土的验算

5.5.5.1 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。

5.5.5.2 内衬混凝土承担的剪力按式 (35) 计算。

$$V_{cd} = \frac{G_c \times A_c}{G_c \times A_c + G \times A_s} \times V \quad (1)$$

式中:

V_{cd} ——内衬混凝土承担的剪力设计值, 单位为牛 (N);

G_c ——内衬混凝土的剪变模量, 单位为兆帕 (MPa);

A_c ——内衬混凝土的平均截面面积, 单位为平方毫米 (mm²);

G ——波形钢腹板的剪变模量, 单位为兆帕 (MPa);

A_s ——有效抗剪截面面积, 单位为平方毫米 (mm²);

V ——剪力设计值, 单位为牛 (N)。

5.5.5.3 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 3362 规定采用。

5.5.5.4 内衬混凝土主拉应力按式 (36)、式 (37) 计算, 并应符合 JTG 3362 的规定。

$$\sigma_{tp} = \frac{1}{2} \left(\sigma_c - \sqrt{\sigma_c^2 + 4\tau_c^2} \right) \quad (2)$$

$$\tau_c = \frac{V_{cd} \times S_c}{b_c \times I_c} \quad (3)$$

式中:

σ_{tp} ——内衬混凝土的主拉应力，单位为兆帕（MPa）；

σ_c ——内衬混凝土的轴向压应力，轴向压应力按内衬混凝土平均厚度计算，单位为兆帕（MPa）；

τ_c ——内衬混凝土的剪应力，单位为兆帕（MPa）；

V_{cd} ——内衬混凝土承担的剪力设计值，单位为牛（N）；

S_c ——内衬混凝土最小厚度截面的面积矩，单位为立方毫米（ mm^3 ），剪应力计算点外侧部分对中性轴的面积矩；

b_c ——内衬混凝土最小厚度，单位为毫米（mm）；

I_c ——内衬混凝土最小厚度截面惯性矩，单位为立方毫米（ mm^3 ）。

5.6 连接件

5.6.1 一般规定

5.6.1.1 波形钢腹板组合结构梁抗剪连接件的选用，应保证波形钢腹板与混凝土板有效结合并共同承担作用。

5.6.1.2 连接件应进行承载能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。其中承载能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。

5.6.2 连接件抗剪承载力计算

5.6.2.1 对于单箱单室或多箱单室截面，波形钢腹板与顶、底板连接处的单位长度水平剪力按式（38）、式（39）计算：

$$Q_d^e = \frac{(V_d - V_p)S}{2I} \dots\dots\dots (1)$$

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

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，单位为牛/毫米（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，单位为牛/毫米（N/mm）；

V_d ——作用效应基本组合下，单箱截面的竖向剪力设计值，单位为牛（N）；

V_p ——作用效应基本组合下，预应力筋对计算截面单块波形钢腹板产生的竖向分力标准值，单位为牛（N）；

V_k ——作用效应标准组合下，单箱截面竖向剪力设计值，单位为牛（N）；

S ——混凝土顶板或底板对截面中性轴的面积矩，单位为立方毫米（ mm^3 ）；

I ——组合梁截面的惯性矩，单位为立方毫米（ mm^3 ）。

5.6.2.2 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（40）要求：

$$\gamma_0 Q_d^e \leq Q_{pu}/s \dots\dots\dots (3)$$

式中：

Q_{pu} ——连接件的水平抗剪承载力设计值，单位为牛（N），按式（41）～（43）、式（46）、式（50）、式（52）计算；

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

5.6.2.3 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（41）计算：

$$Q_{pu1} = n_p \{ 1.4(d_p^2 - d_s^2)f_{cd} + 1.2d_s^2f_{sd} \} \quad (4)$$

式中：

d_p ——钢板开孔直径，单位为毫米（mm）；

d_s ——贯穿钢筋直径，单位为毫米（mm）；

n_p ——开孔钢板连接件的排数，双开孔钢板连接件应取2。

b) 混凝土剪力销抗劈裂承载力设计值按式（42）计算：

$$Q_{pu2} = 7.5n_p f_{cd} d_p t \quad (5)$$

式中：

t ——开孔钢板厚度，单位为毫米（mm）。

c) 开孔钢板孔间抗剪承载力设计值按式（43）计算：

$$Q_{pu3} = 5/3 n_p f_v d_j t \quad (6)$$

式中：

f_v ——钢板抗剪强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

d_j ——开孔钢板的孔净距，单位为毫米（mm）。

5.6.2.4 双开孔钢板连接件抗滑移应符合式（44）及式（45）要求：

$$Q_k^e \leq 2Q_{sa}/s \quad (7)$$

$$Q_{sa} = 0.154\pi \times 10^{-3} [0.677f_{cu,k}(d_p^2 - d_s^2) + d_s^2 f_{sk}] - 35.367 \quad (8)$$

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，单位为牛（N）；

f_{sk} ——贯穿钢筋抗拉强度标准值，单位为兆帕（MPa）；

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值，单位为兆帕（MPa）。

5.6.2.5 单开孔钢板+剪力钉连接件的水平抗剪承载力可取单个开孔钢板连接件与剪力钉抗剪承载力之和。单个开孔钢板水平抗剪承载力设计值按 5.6.2.3 条计算，剪力钉水平抗剪承载力设计值按式（46）计算：

$$Q_{pu}^c = 0.43nA_s\sqrt{E_c f_{cd}} \leq 0.7nA_s\gamma f \quad (9)$$

式中：

Q_{pu}^c ——剪力钉水平抗剪承载力设计值，单位为牛（N）；

n ——剪力钉的排数， $n \leq 4$ ；

A_s ——剪力钉截面面积（mm²）；

γ ——剪力钉材料抗拉强度最小值与屈服强度之比；

E_c ——混凝土弹性模量（MPa）；

f ——剪力钉抗拉强度设计值（MPa）。

5.6.2.6 单开孔钢板+剪力钉连接件抗滑移应符合式（47）～式（49）要求：

$$Q_k^e \leq (Q_{sa} + nQ_{sa}^c)/s \quad (10)$$

$$Q_{sa}^c = 8.4 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} d^2 (H/d \geq 5.5) \quad (11)$$

$$Q_{sa}^c = 1.538 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} dH (H/d < 5.5) \quad (12)$$

式中：

Q_{sa}^c ——单个剪力钉的抗滑移水平剪力限值，单位为牛（N）；

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值，单位为兆帕（MPa）；

n ——剪力钉的排数， $n \leq 4$ ；

d ——剪力钉直径，单位为毫米（mm）；

H ——剪力钉长度，单位为毫米（mm）。

5.6.2.7 嵌入型连接件水平抗剪承载力按式（50）计算：

$$Q_{pu} = f_{cd}A_1 + \mu f_{sd}A_s \quad (13)$$

式中：

A_1 ——波形钢腹板斜板段的投影面积，单位为平方毫米（mm²），如图15；

μ ——系数，取1.0；

f_{sd} ——接合钢筋的抗拉强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

A_s ——接合钢筋的面积，单位为平方毫米（mm²）。

5.6.2.8 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（51）计算要求：

$$\frac{Q_k^e s - 0.5 f_{sk} A_s}{0.25 A_1 + 0.05 A} \leq 0.8 f_{cu,k} \quad (14)$$

式中：

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

A_1 ——波形钢腹板斜板段的投影面积，单位为平方毫米（mm²），如图15；

A ——板腋有效承压面积，单位为平方毫米（mm²），如图15。

5.6.2.9 角钢连接件的水平抗剪承载力按式（52）计算：

$$Q_{pu} = f_{cd}A_{as}/1.5 \quad (15)$$

式中：

A_{as} ——角钢承压面积，单位为平方毫米（mm²），如图24。

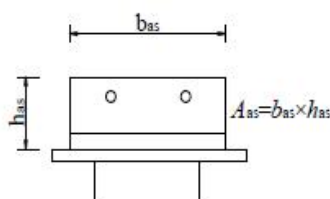


图 24 角钢连接件承压面积计算图

5.6.2.10 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（53）计算：

$$F_h = sQ_d^e \dots\dots\dots (16)$$

式中:

Q_d^e ——角钢连接件承受的单位长度水平剪力设计值, 单位为牛/毫米 (N/mm), 按式 (38) 计算。

5.6.2.11 剪力钉连接件的水平抗剪承载力和抗滑移分别按 5.6.2.5、5.6.2.6 条计算, 但不考虑开孔钢板的作用。

5.6.3 连接件抗角隅弯矩计算

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

5.6.3.2 双开孔钢板连接件承受的角隅弯矩应符合式 (54) 要求:

$$M_d \leq n_p b_p Q_{pu} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

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, 单位为平方毫米 (mm);

Q_{pu} ——单个开孔钢板件抗剪承载力设计值, 单位为牛 (N), 按 5.6.2.3 条计算。

5.6.3.3 单开孔钢板+剪力钉连接件、剪力钉连接件承受的角隅弯矩 (图 25) 应符合式 (55)、式 (56) 要求:

$$M_d \leq n_s b_s T_d \dots\dots\dots (2)$$

$$T_d = 1.28H^2 \sqrt{f_{cd}} \leq \frac{\pi}{4} d^2 f \dots\dots\dots (3)$$

式中:

M_d ——角隅弯矩设计值, 单位为牛·毫米 (N·mm);

n_s ——与角隅弯矩对应板宽内的单排剪力钉数量;

b_s ——剪力钉间距, 单位为毫米 (mm);

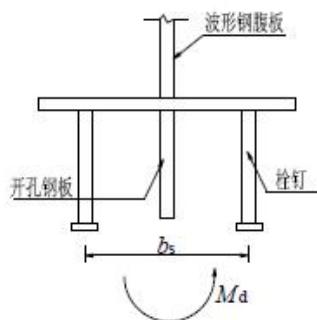
T_d ——剪力钉抗拉承载力设计值, 单位为牛 (N);

H ——剪力钉长度, 单位为毫米 (mm);

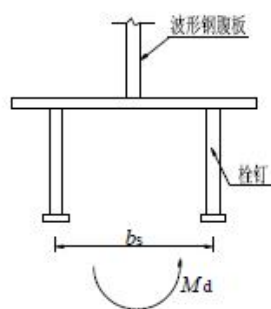
f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值, 单位为兆帕 (MPa);

d ——剪力钉直径, 单位为毫米 (mm);

f ——剪力钉抗拉强度设计值, 单位为兆帕 (MPa)。



a) 单开孔钢板+剪力钉连接件



b) 剪力钉连接件

图 25 作用于单开孔钢板+剪力钉连接件及剪力钉连接件的角隅弯矩

5.6.3.4 角钢连接件承受的角隅弯矩（图 26）应符合式（57）～式（60）要求：

a) U 形钢筋不与角钢焊接：

$$M_d \leq A_s f_{sd} B_s / \sqrt{3} \dots\dots\dots (4)$$

$$M_d \leq 2A_u B_u f_u \dots\dots\dots (5)$$

$$M_d \leq 2u_u l_u B_u R_u \dots\dots\dots (6)$$

b) U 形钢筋与角钢焊接：

$$M_d \leq A_s f_{sd} B_s / \sqrt{3} + \min(2A_u B_u f_u, 2u_u l_u B_u R_u) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

A_s ——贯穿钢筋面积，单位为平方毫米（ mm^2 ）；

f_{sd} ——贯穿钢筋抗拉强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

B_s ——贯穿钢筋间距，单位为毫米（mm）；

A_u ——单根U形钢筋截面面积，单位为平方毫米（ mm^2 ）；

B_u ——U形钢筋的轴间距，单位为毫米（mm）；

f_u ——U形钢筋抗拉强度设计值，单位为兆帕（MPa）；

u_u ——U形钢筋截面周长，单位为毫米（mm）；

l_u ——U形钢筋锚固长度，单位为毫米（mm）；

R_u ——U形钢筋与混凝土粘结强度设计值，单位为兆帕（MPa），应根据试验确定。

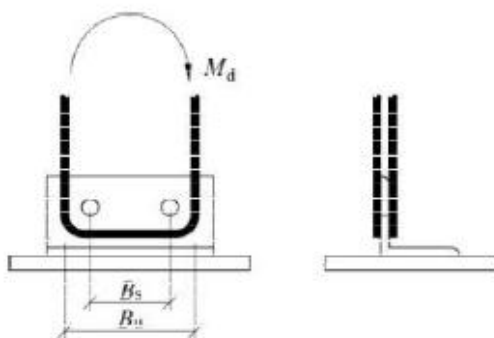


图 26 角钢连接件抗角隅弯矩计算图示

6 施工

6.1 基本规定

6.1.1 波形钢腹板组合结构梁施工方法宜根据以下跨径大小选择：

- 80m~250m 的大跨径波形钢腹板组合结构梁采用同步悬臂浇筑法或异步悬臂浇筑法；
- 80m 以下的中小跨径波形钢腹板组合结构梁采用满堂支架法；
- 30m 以下的小跨径波形钢腹板组合结构梁采用预制吊装法。

6.1.2 波形钢腹板组合结构梁施工前，应编制专项施工方案，明确质量、安全及环境保护措施。

- 6.1.3 施工前应应对波形钢腹板设计文件进行深化，形成波形钢腹板厂内制造图纸。
- 6.1.4 进场材料应符合 JTG/T 3650、JTG/T 3651 和设计文件的要求。
- 6.1.5 施工设备、检测及监测仪器等应及时检校且合格。
- 6.1.6 波形钢腹板成型、制造、涂装、试验、检验等技术要求应符合 JT/T 784 的规定。
- 6.1.7 波形钢腹板组合结构梁施工应对应力、应变、标高、预拱度等进行全过程控制。
- 6.1.8 施工监测应符合 JTG/T 3650-01 的规定。
- 6.1.9 宜推行标准化、工厂化、装配化和智能化施工，推广使用“四新技术”。
- 6.1.10 安全保障措施应贯穿全流程，涵盖施工操作、人员防护等关键环节。

6.2 波形钢腹板工厂制造

6.2.1 一般规定

- 6.2.1.1 波形钢腹板宜采用普通碳素结构钢、低合金高强度结构钢、桥梁用结构钢等优质钢板制造。
- 6.2.1.2 波形钢腹板制造应符合 JT/T 784 的规定。
- 6.2.1.3 波形钢腹板制造应进行工艺评定，制造过程中应考虑预拱度设置及预拼线形。
- 6.2.1.4 波形钢腹板安装前，应按 JT/T 784 的规定检查外观质量。
- 6.2.1.5 波形钢腹板工厂制造宜采用自动埋弧焊、二氧化碳气体保护焊等设备。

6.2.2 切割与制孔

- 6.2.2.1 钢板应进行预处理，平直度应符合 GB/T 709 的规定。
- 6.2.2.2 钢板切割符合下列要求：
 - d) 厚度不大于 20 mm 的钢板宜采用数控激光、等离子切割，厚度大于 20 mm 宜采用数控火焰切割；
 - e) 机械剪切仅适用于厚度小于 10 mm 且剪切后的边缘需再加工的钢板；
 - f) 剪力键开孔宜采用数控切割，切割后应对孔边进行倒边处置。
- 6.2.2.3 采用翼缘型连接件的波形钢腹板，下翼缘板应开设出气孔，每个波形断面内出气孔宜不少于 2 个，出气孔间距宜不小于 600 mm，出气孔直径宜为 20 mm~50 mm。
- 6.2.2.4 波形钢腹板工地栓接螺栓孔应采取钻孔工艺，不应采用冲孔、气割孔，成孔应为正圆柱形，孔壁表面粗糙度应不大于 25 μm ，孔缘无损伤不平，无刺屑。
- 6.2.2.5 螺栓孔的孔径允许偏差范围为 0 mm~0.7 mm；孔壁垂直度允许偏差应不大于 0.3 mm。
- 6.2.2.6 螺栓孔距允许偏差应符合表 2 的规定，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/规定值/mm	说明
钻孔样板、数控机床	两相邻孔距	± 0.4	—
	构件极边孔距	± 1.0	
钻孔样板、数控机床	两组孔群中心距	± 1.0	—
	孔群中心线与杆件中心线的横向偏移	2.0	
号钻	两相邻孔距	± 1.0	包括分离式样板分别 对线钻孔的孔群
	极边及对角线孔距	± 1.5	
	孔中心与孔群中心线的横向偏移	2.0	

- 6.2.2.7 钻孔宜选用数控钻床进行钻孔，采用标准样板钻孔时，应采用冲钉定位，冲钉数量应不少于两个。
- 6.2.2.8 钻孔时，应多次使用试孔器检查孔径精度，检查数量应不小于总孔数的 20%。

6.2.3 边缘加工

6.2.3.1 切割后需焊接的边缘应进行手工气体保护焊焊接坡口加工，不要求焊接但属气割的边缘应进行边缘机械加工。尺寸要求如下：

- a) 机加工零件的边缘加工深度应不小于 3 mm，加工面表面粗糙度应不低于 25 μm ；
- b) 顶紧传力面的粗糙度应不低于 12.5 μm ；
- c) 顶紧加工面与板面垂直度偏差应不小于板厚的 1%，且应不大于 0.3 mm。

6.2.3.2 非焊接处使用锯割和自动等离子切割后可不进行边缘加工。

6.2.4 整平

6.2.4.1 钢板整平应采用冷矫正。整平后的钢料表面不应有明显的凹痕或损伤，划痕深度应不大于该钢材厚度负允许偏差的二分之一。

6.2.4.2 整平后的波形钢腹板平面度每米应不大于 1 mm。长度小于 8 000 mm 的波形钢腹板，直线度应不大于 2 mm；长度大于 8 000 mm 的波形钢腹板，直线度应不大于 3 mm。

6.2.5 成型

6.2.5.1 波形钢腹板宜采用无牵制模压法冷成型。

6.2.5.2 成型角度满足以下要求：

- a) 波形钢腹板加工成型时转角半径宜不小于板厚的 15 倍；
- b) 转角半径小于板厚的 15 倍，冲击韧性满足 GB/T 229 夏比摆锤冲击试验的要求，且氮含量不超过 0.006% 时，波形钢腹板的冷弯加工半径按板厚的 5 倍（冲击韧性—吸收能量 150 J）、7 倍（冲击韧性—吸收能量 200 J）以上控制；
- c) 与轧制成直角方向处进行冷弯加工时，应采用压延直角方向的夏比冲击试验吸收能量的值。

6.2.6 组拼、连接

6.2.6.1 组拼

6.2.6.1.1 组拼前，应对波形钢腹板进行拼接区域的预处理，检验合格后 24 h 内应进行波形钢腹板组拼。

6.2.6.1.2 在待焊区域或距焊缝边缘 30 mm~50 mm 以内的部位，应清除有害物，表面应显露金属光泽。

6.2.6.1.3 对每块波形钢腹板节段零件标记，按次序排列。

6.2.6.1.4 波形钢腹板的组拼应在作业车或标准钢胎模上进行，组拼角度考虑焊接时的变形量，平台或胎模应牢固平整。

6.2.6.2 连接

6.2.6.2.1 波形钢腹板节段与节段间的连接分为高强度螺栓连接法、角焊接法、对接焊接法等。波形钢腹板波段之间的纵向连接方式宜采用对接焊接。

6.2.6.2.2 波形钢腹板为接高而进行的工厂水平连接应采用对接焊接，不宜使用螺栓连接。

6.2.6.2.3 波形钢腹板宜按波长整体模压成型或连续模压成型，波形钢腹板的纵向连接应采用对接埋弧焊的方式。

6.2.6.2.4 波形钢腹板与翼缘板的焊接，开孔钢板与翼缘板的焊接应符合 JT/T 784 的规定。

6.2.6.2.5 当出现以下情况，应按 GB 50205 进行焊接工艺评定试验，出具焊接工艺评定报告：

- a) 在工厂或工地首次焊接前；
- b) 材料、工艺在施工过程中有变化时；

c) 检验结果与上次检验有较大差异时。

6.2.6.2.6 焊缝的焊接质量、力学性能应符合 GB 50205 的规定。焊缝不应有裂纹、未熔合、焊瘤、夹渣、焊漏等缺陷，厂内制作焊缝气孔直径应不大于 1 mm，每米不超过 3 个，气孔间距不应小于 200 mm；厂内制作焊缝咬边深度不应大于 0.5 mm。

6.2.7 涂装与保护

6.2.7.1 涂装预处理应满足以下要求：

- a) 涂装前采用抛丸或喷砂工艺，对波形钢腹板表面进行表面处理，清除表面氧化皮和铁锈等。除锈等级应符合设计要求；
- b) 表面处理合格后 4 h 内进行涂装作业，超过 4 h 再次进行表面处理。

6.2.8 涂装准备

6.2.8.1 波形钢腹板的涂工艺和质量应符合设计及 JT/T 722 的规定。涂装前应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。

6.2.8.2 涂装施工的环境条件应与涂料产品说明书的要求一致，并应符合下列规定：

- a) 对溶剂型涂料，施工环境温度应为 5~38℃，空气相对湿度应不大于 85%，且钢材表面温度应高于露点 3℃；
- b) 对水性涂料，施工环境应为 5~35℃，空气相对湿度应不大于 80%。

6.2.8.3 底层涂装宜配置附着力高、富锌、具备屏蔽或阴极保护功能的涂层体系。

6.2.8.4 中层涂装应具备屏蔽封孔功能，应采用环氧云铁或环氧厚浆漆等，宜采用高压无气喷涂方式。

6.2.8.5 面层涂装宜采用聚氨脂类、聚硅氧烷类或氟碳类面漆。应采用高压无气喷涂方式，外侧面层涂装宜分为二层，工厂涂装第一层，现场安装后整体涂装第二层。

6.2.8.6 波形钢腹板箱室内侧面层涂装宜分为二层，在工厂完成二层涂装；波形钢腹板与混凝土结合面，仅涂装一层底漆。

6.2.8.7 波形钢腹板节段连接处宜采用板面保护膜保护。

6.2.9 运输与存储

6.2.9.1 运输

波形钢腹板运输应符合以下规定：

- a) 对运输线路认真勘察，确保运输构件安全、准时到达施工现场；
- b) 运输车辆应检查信号和指示装置、制动系统、轮胎气压等确定正常；
- c) 运输车车厢长度满足支撑点间的距离要求；
- d) 装载时，钢腹板底部支垫支点设置在加劲板或连接件端部位置；
- e) 波形钢腹板分段绑扎牢固，采取二点绑扎，绑扎点与构件的重心互相对称；
- f) 波形钢腹板分段移运的支撑位对称一致，用托架、钢丝绳、手动葫芦等分段绑扎牢固；
- g) 散件按同类型集中堆放，波形钢腹板之间放置缓冲物；
- h) 绑扎或固定处用软性材料衬垫保护；
- i) 螺栓采用橡胶套进行封闭处理。

6.2.9.2 存储

波形钢腹板存储应符合以下规定：

- a) 存放过程中波形钢腹板采用多层叠放的形式，不宜超过 5 层，每层之间应设置支垫；

- b) 钢板表面涂装完全干透，且采取涂装面成品保护措施后，再进行搬运；
- c) 波形钢腹板加工完成后进行出厂验收，并按板块设计编号进行核对并标记；
- d) 波形钢腹板在施工现场应按编号集中堆放、覆盖，并按吊运顺序安排位置；
- e) 现场储存地基应进行硬化，浇筑砼堆放梗，干燥通风，防止雨淋，地基坚固，有排水、防护隔离设施；
- f) 波形钢腹板用油布包裹覆盖。钢腹板之间支垫高度应大于锚钉长度，底层支垫高度不低于 5 cm。

6.3 波形钢腹板现场安装

6.3.1 一般规定

- 6.3.1.1 波形钢腹板安装应进行施工过程控制，保证其内力、变形、线形及高程符合设计要求。
- 6.3.1.2 安装前应对临时支架、支撑、塔吊基础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。
- 6.3.1.3 波形钢腹板现场焊接宜采用二氧化碳气体保护焊设备等设备。
- 6.3.1.4 波形钢腹板安装时，不应在现场对其进行未被批准的临时性的焊接和切割作业。
- 6.3.1.5 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。
- 6.3.1.6 波形钢腹板施工除满足本标准外，尚应符合 JTG/T F50 规定。
- 6.3.1.7 安装前应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。
- 6.3.1.8 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。
- 6.3.1.9 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。
- 6.3.1.10 翼缘板与混凝土连接一侧的表面不应有油漆，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。

6.3.2 安装准备

- 6.3.2.1 波形钢腹板安装应设置底部、侧向临时支架，安装前应对临时支架、吊装系统等临时结构进行强度、刚度及稳定性验算。
- 6.3.2.2 波形钢腹板安装前，在底模上标记波形钢腹板位置，并定位设置底部临时支架。

6.3.3 波形钢腹板吊装

- 6.3.3.1 波形钢腹板吊装宜采用塔吊、挂篮辅助吊装等设备。
- 6.3.3.2 大跨度波形钢腹板应根据重量合理分段，当波形钢腹板节段重量超出一般吊装重量时，宜采用波形钢腹板运输车将波形钢腹板运输至挂篮下方，运行速度宜不超过 6 m/min，额定载重不小于 6t，并设置安全止挡。通过挂篮吊装系统将波形钢腹板空间姿态由水平方向调整至竖直方向后，将波形钢腹板与挂篮吊装系统固定，走行至下个节段。
- 6.3.3.3 波形钢腹板安装过程，应符合下列要求：
 - a) 吊装前，应完成波形钢腹板临时支架并定位；
 - b) 吊装前，应完成波形钢腹板试吊工作，正式吊装应缓慢进行，吊件按照最大吊距起吊离地高 0.5 m 后，暂时停顿，确保吊件挂钩稳妥后，再继续吊装；
 - c) 在吊装过程中，确保波形钢腹板的空间姿态稳定。
 - d) 采用增加临时支撑、使用调整器具等措施限制波形钢腹板变形；

- e) 合理设置吊点位置，并确保吊点与波形钢腹板的连接牢固。吊点均匀设置在加劲板或连接件位置；
- f) 在吊装过程中，宜进行实时监测和调整。通过使用测量仪器、传感器等设备，对波形钢腹板的姿态和变形进行监测，并根据监测结果进行相应的调整和控制；
- g) 五级及以上大风、雷雨、大雾、沙尘暴天气时不应起重吊装作业。

6.3.3.4 波形钢腹板宜采用适当工艺进行三向定位。两侧对向波形钢腹板之间采用临时支架进行临时定位。

6.3.4 波形钢腹板纵向连接

6.3.4.1 波形钢腹板节段间的连接宜采用高强度螺栓连接法、搭接焊法、对接焊法、普通螺栓与焊接组合法等连接方式。

6.3.4.2 波形钢腹板焊接连接，符合下列要求：

- a) 波形钢腹板节段之间的焊接连接，应在节段就位、固定并检查合格后进行；
- b) 焊接前应进行焊接工艺评定试验，焊接施工时的技术要求应符合 GB 50661 的规定，工地焊缝检验应符合 GB/T 11345、GB/T 26951 与 JTG/T 3650 的规定。应采用钢丝砂轮对焊缝进行除锈，且焊接应在除锈后 24 h 内进行；
- c) 焊接材料应根据焊接工艺评定确定。焊丝、焊剂、焊条的化学性能应与波形钢腹板母材材质相匹配；
- d) 焊接时应设立防风、防雨设施。焊接的环境要求为：风力小于 5 级，温度应高于 5℃，相对湿度小于 80%。在箱梁内焊接时应设置通风防护安全措施；
- e) 现场波形钢腹板焊接宜设置可移动吸附式防风挡板；
- f) 在波形钢腹板现场焊接完成后，应在 48 h 内进行焊缝的防腐涂装；
- g) 合龙段钢腹板焊接宜采用开坡口搭接焊法。

6.3.4.3 高强度螺栓连接，应符合下列要求：

- a) 高强度螺栓选用大六角头螺栓。高强度螺栓、螺母及垫圈的外形尺寸公差、技术条件、运输保管以及储存符合 GB/T 1231 和 GB/T 3632 的规定；
- b) 高强度螺栓连接的摩擦面按 GB 50205 的要求进行防滑处理。安装前复验出厂所附试件的抗滑移系数；
- c) 高强度螺栓的施工预拉力符合设计要求。高强度螺栓连接副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符合设计要求。设计无要求时平均值为 0.11~0.15，其标准偏差不大于 0.01。复验数据作为施工的主要参数；
- d) 高强度螺栓长度与拼装图的规定一致。高强度螺栓不应强行敲入，全桥穿入方向一致。被栓合的板束表面垂直于螺栓轴线；
- e) 高强螺栓施拧从螺栓群中间向四周对称扩散方式进行紧固；
- f) 高强度螺栓的紧固，分两次进行。初拧紧固至螺栓设计轴力的 50%~80%。终拧至设计轴力，并拧掉卡头。终拧扭矩值符合 JTG/T 3650 的规定。

6.3.5 剪力钉连接件

6.3.5.1 剪力钉连接件与混凝土结合部位不宜进行防腐涂装。

6.3.5.2 剪力钉连接件施工应在完成焊接工艺试验且各项试验数据检验合格后实施。

6.3.5.3 剪力钉连接件与钢筋有位置冲突时，应适当调整钢筋位置，不应割断剪力钉连接件。

6.3.6 开孔钢板连接件

6.3.6.1 开孔钢板连接件应由钢结构加工厂制造，螺栓孔的孔径允许偏差为 $+0.7\text{mm}$ ；孔壁垂直度允许偏差不大于 $\pm 0.3\text{mm}$ ，孔位允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ 。

6.3.6.2 开孔钢板连接件贯穿钢筋应符合设计要求，使用前应按批次进行相应的试验检验。

6.3.6.3 开孔钢板连接件贯穿钢筋安装及定位，应符合设计和下列要求：

- a) 对于不设承托的混凝土板，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；
- b) 对于设置承托的混凝土板，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) 贯穿钢筋安装偏差不大于 5mm 。偏差量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。

6.3.6.4 开孔钢板连接件的顶板和底板混凝土应有良好的工作性能，必要时可采用自密实混凝土。底板钢腹板处混凝土浇筑宜从顶板开孔布料浇筑，混凝土浇筑次序从内侧向外侧浇筑。

6.3.6.5 混凝土振捣应选择功率和直径较小的插入式振动棒，振捣时应避免触碰连接件。

6.3.7 嵌入型连接件

6.3.7.1 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，焊缝等级不低于Ⅱ级。

6.3.7.2 在波形钢腹板与混凝土底板交接界面上应采取防水密封措施，并设置排水横坡。

6.3.8 角钢连接件

6.3.8.1 螺栓孔的孔径允许偏差为 $+0.7\text{mm}$ ；孔壁垂直度允许偏差不大于 $\pm 0.3\text{mm}$ ，孔位允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ 。

6.3.8.2 贯穿钢筋应居中于预留孔，安装偏差不应大于 5mm 。

6.3.8.3 角钢连接件的U形钢筋与角钢的焊接连接应在现场完成。

6.3.8.4 浇筑混凝土时应保证孔内及角钢连接件周边混凝土浇筑密实。

6.3.9 现场涂装

6.3.9.1 涂装前，应先对焊缝表面及焊接区域进行处理，清除表面的锈迹、焊渣、氧化皮、油脂等污物，直至表面显现出均匀金属光泽。

6.3.9.2 涂装施工，应符合下列规定：

- a) 杆件和梁段表面无雨水或结露，相对湿度不高于 80% ；
- b) 采用环氧类漆涂装时，环境温度不低于 10℃ ；
- c) 采用氟碳面漆和聚氨酯漆涂装时，环境温度不低于 5℃ ；
- d) 五级及以上大风、雷雨、大雾、沙尘暴天气时不应进行涂装施工；
- e) 涂装后 4h 内采取保护措施，避免遭受雨淋；
- f) 雨天、有扬尘大风、蚊虫多、钢材表面有潮气、结露、涂漆后表面易产生气泡时不涂装；
- g) 涂装后 4h 内不淋雨。

6.3.9.3 波形钢腹板内外表面及翼缘型连接件外露于混凝土的部分均应进行防腐涂装。采用耐候钢时不宜涂装。

6.3.9.4 波形钢腹板焊接区域涂装修复应满足以下规定：

- a) 先清理锈蚀区域，底层涂刷底漆代替外层，其他中层和面层按涂装设计方案执行；
- b) 焊接区域涂装修复在焊接检验合格后一周内完成；
- c) 修复范围应包括焊接施工的影响区域，各层修复厚度应不低于原设计厚度的 1.2 倍。

6.4 同步悬臂浇筑法

6.4.1 一般规定

- 6.4.1.1 悬臂浇筑前，应对桥墩根部（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。
- 6.4.1.2 应在相邻波形钢腹板之间增设横向桁架连接。横向桁架的布置需结合波形钢腹板波长、节段划分长度及施工荷载特性确定。
- 6.4.1.3 悬臂浇筑施工宜对称、平衡进行，各悬臂阶段预拱度应考虑混凝土收缩徐变的影响。
- 6.4.1.4 在施工过程中，应严格控制裂缝，一旦出现，须查明原因并采取适当措施。
- 6.4.1.5 悬臂段新旧混凝土须保证充分的粘结性能，应对接缝处混凝土进行拉毛等处理。
- 6.4.1.6 合龙时，应考虑两侧梁体的高差及温度的影响，选择一天中气温最低且稳定的时段内进行施工。
- 6.4.2 0 号节段
- 6.4.2.1 0 号节段顶板、翼缘板、箱室内宜采用盘扣支架、柱梁式支架组合体系。0 号节段外侧宜采用定型钢模板。
- 6.4.2.2 应按挂篮施工设计要求设置预留孔和预埋件。
- 6.4.3 挂篮安装
- 6.4.3.1 吊装前，构件的外观尺寸及质量应检查合格。
- 6.4.3.2 吊装前，应调试准备好吊装机具，清理 0 号节段顶面，并应精确标明桥梁的轴线、高程控制点和支撑位置。
- 6.4.3.3 挂篮安装，应符合下列要求：
- a) 挂篮构件吊装前，确定构件的吊装重心、吊点位置；
 - b) 挂篮支点与连接纵梁、前后上横梁焊接牢固之前，挂篮应采取临时稳固措施；
 - c) 挂篮预留孔设置准确，孔道垂直；
 - d) 挂篮在墩顶 0 号节段施工完成后安装，调平挂篮的支脚；
 - e) 挂篮在现场组拼后，挂篮安装质量、模拟荷载试验符合设计要求；
 - f) 挂篮的最大变形（包括吊带变形的总和）不大于 20 mm。
- 6.4.3.4 挂篮防倾覆安全措施符合下列要求：
- a) 挂篮在浇筑混凝土状态和行走时的抗倾覆安全系数、锚固系统的安全系数、斜拉水平限位系统的安全系数及上水平限位的安全系数均应不小于 2；
 - b) 采用地面拼装式时，应对基础进行评估，并采取必要的加固措施；
 - c) 在挂篮施工过程中，应定期进行检查和维护。检查应包括锚固设施、安全绳索、连接质量等方面，并及时修复或更换损坏部分；
 - d) 挂篮承重系统安装的前支点和前吊点的支垫应稳固。
- 6.4.3.5 每套挂篮使用前应进行预压，并测量挂篮的弹性变形值，确定模板预抬标高。挂篮预压技术要求应符合表 3 的规定。

表 3 挂篮预压技术要求

序号	工序	要求
1	预压重量	预压荷载为主桁架承受荷载的1.2倍
2	预压过程	分级施加荷载，每级加载为预压荷载的30%
		加载过程中应注意观测挂篮变形情况，如有异常立即停止加载、分析原因
		预压过程应记录预压力、预压时间、预压顺序、张拉力等参数

序号	工序	要求
3	预压观测及调整	每施加一级荷载均应进行变形观测并记录，并对重点受力部位进行检查
4	卸载	预压完成后，待整个变形稳定，即可进行卸载，卸载过程与压载过程相反，并做好观测记录
5	成果分析与处理	待整个预压、卸载过程全部完成以后，应对观测成果进行分析，确定模板预抬标高
6	挂篮调整	根据监控方提供的数据，测量放样，调整挂篮模板系统标高

- 6.4.3.6 挂篮走行轨迹应无障碍，挂篮走行安全控制应符合以下规定：
- a) 挂篮走行前，检查纵向、横向及竖向预应力筋是否张拉完毕；
 - b) 挂篮侧模松开前，侧模松开间距不大于 5 cm；
 - c) 垫枕调平，垫枕间距不大于 50 cm。垫枕与梁体用钢板密贴、底部密实；
 - d) 挂篮主桁梁与梁体预埋筋锚固，每根走道梁不少于 3 道；
 - e) 挂篮走行时风力小于 5 级；
 - f) 挂篮走行时两端挂篮对称、缓慢前行，最大不同步量不超过 0.5 m；
 - g) 挂篮走行到位后，做好锚固工作，并组织对挂篮进行验收工作。

6.4.4 波形钢腹板现场安装

波形钢腹板现场安装应符合6.3的要求。

6.4.5 内衬混凝土钢混结合部

- 6.4.5.1 钢混结合部不应出现混凝土脱空、不密实等现象。对浇筑空间复杂、配筋较密的结合部，宜调整混凝土配合比设计，优化振捣工艺，设置振捣通道。顶板、底板的钢混结合部宜进行密实度检测。
- 6.4.5.2 钢混结合部的混凝土浇筑前，应清除波形钢腹板及连接件上的污垢，并贴膜防护。
- 6.4.5.3 在模板面预先标记波形钢腹板投影位置，设置波形钢腹板型钢支撑架。
- 6.4.5.4 吊装结束后，应设置临时支撑，采用支架定位。内外侧波形钢腹板应在支架上固定成整体，且留调整空间。
- 6.4.5.5 多箱室波形钢腹板安装，宜按先边腹板、后中腹板的顺序进行。
- 6.4.5.6 波形钢腹板前、后各设置不少于一组上、下位置的临时支架，临时支架的规格、数量应通过计算确定。
- 6.4.5.7 临时支架应使波形钢腹板符合竖直度、平整度和抗倾覆要求。
- 6.4.5.8 当梁体有纵坡时，波形钢腹板纵向倾斜角度应通过底部支撑进行调整，错口偏差应不大于 2 mm。
- 6.4.5.9 两节段间宜预留不小于 60 cm 的对接空间，临时支撑不宜设置在浇筑混凝土节段内，拆除临时支架后，波形钢腹板位置和垂直度应符合设计要求。
- 6.4.5.10 钢混结合部位宜采用聚丙烯纤维混凝土。

6.4.6 悬浇段

- 6.4.6.1 悬浇段混凝土的浇筑应符合 JTG/T 3650 规定，宜对梁体主要截面应力观测值与理论值进行比较，观测体系转换过程中的应力变化。
- 6.4.6.2 应设置临时支撑固定内外侧波形钢腹板成为整体。
- 6.4.6.3 悬浇接头交界面凿毛后宜采用水泥基胶凝材料涂刷。
- 6.4.6.4 悬臂浇筑施工应对称、平衡地进行，并应从悬臂端开始，向已完成梁段推进分层浇筑。

6.4.7 边跨现浇段

6.4.7.1 边跨现浇段宜采用盘扣支架法施工。

6.4.7.2 边跨现浇段支架应预压，根据预压观测数据计算模板弹性变形量。

6.4.8 合龙段

6.4.8.1 合龙施工应按施工方案的要求进行。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，应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。

6.4.8.2 合龙节段施工宜采用吊架法，应连续三天分早中晚分别预先测量合龙段的尺寸，取实际测量尺寸最大值切割下料，制作合龙段钢腹板；应采用换载压重的方式调整合拢段两端的标高至符合设计要求。

6.4.8.3 劲性骨架应按设计文件和施工方案要求设置。

6.4.8.4 临时固结解除前宜对中跨合龙段进行临时锁定。

6.4.9 钢筋加工及安装

6.4.9.1 钢筋安装应符合 JTG/T 3650 和 JTG F80/1 的规定。

6.4.9.2 剪力钢筋应布设位置准确、牢固，不应与开孔板焊接，同时应防止混凝土振捣施工时出现位移。

6.4.10 混凝土浇筑

6.4.10.1 梁段混凝土应按对称、均衡的原则进行浇筑，混凝土浇筑时应加载均匀，桥墩两侧不平衡偏差不应超过设计要求。

6.4.10.2 混凝土浇筑在竖直方向应按先底板、后顶板，在水平方向应按先远后近的顺序进行，最后与已完成节段浇筑接合。

6.4.10.3 混凝土浇筑时，横向应两侧对称浇筑，纵向应从梁跨中向墩顶方向对称浇筑，全部浇筑应在混凝土初凝前完成。梁段混凝土浇筑时间宜控制在首盘混凝土初凝前完成。

6.4.10.4 整体浇筑时不应有梁体不均匀下沉产生的裂缝。

6.4.10.5 当波形钢腹板悬浇箱梁不设置调平层时，应控制标高，宜采用振动刮尺整平收面。桥面铺装前，梁顶宜采用精铣刨处理，深度为 3 mm~6 mm。

6.4.10.6 开孔钢板连接件贯穿钢筋混凝土、节段横梁混凝土粗骨料宜采用 5 mm~20 mm 连续级配碎石，最大粒径不应超过 25mm。

6.4.10.7 剪力连接件部位混凝土浇筑应符合以下规定：

- a) 浇筑前，剪力连接件各个部位检查合格；
- b) 对直立剪力钉，采用平板式振捣器；
- c) 对侧立剪力钉，选用较小直径的插入式振捣棒；
- d) 采用开孔钢板连接件的顶、底板混凝土具有良好的和易性。对钢筋较为密集的结合部，采用较小直径的振捣棒，必要时可采用附着式振捣器；
- e) 浇筑混凝土时应保证孔内及角钢连接件周边混凝土浇筑密实。

6.4.10.8 特殊部位混凝土浇筑应符合以下规定：

- a) 转向器、锚具周围振捣宜距离 100 mm，并进行二次振捣；
- b) 横梁处混凝土在底板混凝土振捣密实后进行分层浇筑，分层厚度不大于 300 mm。振捣每层混凝土时与侧模保持 50 mm~100 mm 的距离且插入下层混凝土的深度为 50 mm~100 mm。

6.4.10.9 混凝土浇筑及养生应符合 JTG/T 3650 的规定。

6.4.11 预应力

6.4.11.1 体内预应力施工应符合 JTG/T 3650 的规定。

6.4.11.2 体外预应力施工应符合下列要求：

- a) 减震器、转向器、保护套等预埋位置定位准确；
- b) 外套管和连接接头完全密闭防水，外套管应与预应力筋、防腐材料具有良好的兼容性；
- c) 防腐材料的耐久性能应与体外束所处的环境类别和使用年限一致；防腐材料在加工、运输、安装及张拉过程中保持其稳定性、柔性且不产生裂缝，并在所要求的温度范围内不流淌；
- d) 张拉时采用“顶压式”张拉锚固方式，不应采用“自锚式”张拉锚固方式；
- e) 千斤顶应带有顶推功能，或配有顶压器，采用环氧钢绞线专用工具锚及工具夹片，不能采用普通工具锚及夹片进行施工；
- f) 体外预应力束张拉完成后，钢绞线留长与保护罩长度适配，钢绞线应切割齐整，确保切割后所有钢绞线留长比保护罩端面短 20 mm；以便于后期维护更换；
- g) 体外预应力束张拉完成后，对其锚具设置全密封防护罩，并在防护罩内灌注油脂或其他可清洗的防腐材料。

6.4.11.3 预应力管道压浆与封锚应符合 JTG/T 3650 的规定。

6.4.12 施工监测

6.4.12.1 一般规定

6.4.12.1.1 波形钢腹板制作前，应通过理论计算确定预拱度。

6.4.12.1.2 施工前，应根据结构设计参数、预拱度和各节段环境温度、混凝土龄期、挂篮结构类型及重量等施工技术参数确定节段立模标高。

6.4.12.1.3 节段轴线、高程测量监控时宜在每日固定时段进行。

6.4.12.1.4 在每个悬臂浇筑节段施工过程中，监测节段在挂篮行走前后、混凝土浇筑前后和预应力筋张拉等工况的高程变化情况，并与理论计算值进行比较分析，合理调整下一施工节段的立模标高。

6.4.12.1.5 挂篮立模高程调整后，相邻节段接缝应连接平顺。

6.4.12.2 测量

6.4.12.2.1 节段轴线应符合以下规定：

- a) 编制专项的测量方案，有特殊要求时建立专项的测量控制网；
- b) 采用三角形控制网将轴线引测到节段顶面上，并定期进行复测；
- c) 节段波形钢腹板安装定位采用全站仪全程跟踪测量控制，确保轴线偏位小于 ± 5 mm；定位前宜采用激光水平仪复核波形钢腹板线型。

6.4.12.2.2 节段高程应符合以下规定：

- a) 采用经过标定的钢尺和高精度水平仪将高程引测到节段顶面方便测量的位置；
- b) 待浇筑节段的挂篮前端模板立模高程偏差不得大于 2 mm；
- c) 挂篮模板安装完毕，在浇筑混凝土前全面检查各部位纵、横向高程，并测量挂篮各部位变形量，符合设计立模高程后方可浇筑；

6.4.12.2.3 0 号节段、边跨现浇段测量应符合以下规定：

- a) 0 号节段、边跨现浇段波形钢腹板安装定位应用全站仪全程跟踪测量控制，确保轴线偏位小于 ± 5 mm，定位前采用激光水平仪复核波形钢腹板线型；
- b) 边跨现浇段施工应考虑已完成现浇节段及引桥轴线偏位及高程偏差情况，确保桥梁合龙精度满足要求。

6.5 异步悬臂浇筑法

6.5.1 一般规定

- 6.5.1.1 施工前，应对施工各工况进行受力分析及稳定性分析。施工期，应对关键受力部位进行局部安全性验算。
- 6.5.1.2 应在相邻波形钢腹板之间增设横向桁架连接，横向桁架的布置需结合波形钢腹板波长、节段划分长度及施工荷载特性确定。
- 6.5.1.3 施工中，可对波形钢腹板上翼缘板荷载作用部位进行加强。
- 6.5.1.4 应在波形钢腹板安装检验合格后进行行走系统的安装、行走和悬臂施工作业。
- 6.5.1.5 波形钢腹板与顶板宜采用双开孔钢板连接件进行连接。
- 6.5.1.6 下翼缘板的焊接应采用全熔透对接焊。

6.5.2 0号节段

0号节段施工应符合6.4.2的规定。

6.5.3 挂篮安装

- 6.5.3.1 挂篮安装应符合6.4.3的规定。
- 6.5.3.2 挂篮承重系统设计应充分利用N节段波形钢腹板作为核心受力构件，挂篮主桁与波形钢腹板的连接节点应进行专项验算，确保节点抗剪、抗拉承载力满足施工荷载要求。
- 6.5.3.3 挂篮行走系统的前、后支点应支承在波形钢腹板翼缘板的开孔钢板之间，支点处应设置防滑、限位装置，避免行走过程中出现滑移或倾覆风险。
- 6.5.3.4 挂篮模板系统应适配“先底板、后顶板”的异步浇筑工艺，底模支架应与波形钢腹板临时固结，顶板模板应预留调整空间，满足N-1节段顶板浇筑时的标高控制要求。
- 6.5.3.5 挂篮预压除按6.4.3.5要求分级加载外，还应模拟波形钢腹板承重状态，预压荷载需包含N节段波形钢腹板自重、底板混凝土重量及施工荷载，预压过程中重点监测波形钢腹板的变形及应力分布。
- 6.5.3.6 挂篮安装完成后，应增设波形钢腹板间的横向桁架连接，横向桁架的布置间距需结合波形钢腹板波长、节段划分长度确定，确保施工过程中波形钢腹板的整体稳定性。

6.5.4 行走系统

- 6.5.4.1 施工行走系统应进行专项设计，满足施工整体性能要求。
- 6.5.4.2 施工行走系统应尽量利用上翼缘开孔板连接件构造特点进行临时固定。
- 6.5.4.3 行走系统及模板系统的安装，应符合下列要求：
 - a) 安装前，应根据施工现场环境、起重机械性能、位置和吊装物件情况等，编制实施性吊装方案和操作安全技术细则，并对施工作业人员进行技术交底；
 - b) 支点与连接纵梁、前后横梁焊接牢固之前，应采取措施临时稳固，避免施工过程中倾覆；
 - c) 行走系统及模板系统拼装完成后，应按图纸认真检查，特别是各个结点、销子、锚杆的连接情况，保证稳妥可靠；
 - d) 行走装置所使用的预留孔，应准确设置，并保持孔道垂直；
 - e) 构件吊装前，应确定构件的吊装重心，合理确定吊点位置；
 - f) 起重吊装作业应由专职人员统一指挥，高处作业人员应系牢安全带、戴好安全帽；
 - g) 主桁吊装到位后，各吊带吊杆连接销轴和插销应按规定安装齐全到位，并由专人检查确认合格后方可进行下一道工序施工；

- h) 行走系统及模板系统应在 1#块波形钢腹板安装完成后对称安装，并应在行走系统尾部采取措施保证施工安全，行走系统的支脚应调平；
- i) 行走系统及模板系统组装完毕，应全面检查安装质量并复核挂篮轴线、高程；
- j) 行走系统使用前，应进行行走性能和静载试验。

6.5.5 挂篮前移与拆除

6.5.5.1 挂篮前移前，应做好下列准备工作：

- a) 测量标出已施工节段的轴线及高程，并宜按间距不大于 0.5 m 测量标出移位位置横向标线，以观测和保证桥墩两侧挂篮同步对称前移；
- b) 铺设滑道或安放滚轮箱等行走设施；
- c) 应详细检查挂篮的结构状态和各部位连接情况并做好记录，对发现的缺陷应及时纠正；
- d) 解除挂篮主桁架后锚和前支点处的锚固；
- e) 安装并调试前移动力装置；
- f) 承重钢腹板间应设置临时横撑。

6.5.5.2 挂篮系统前移，应符合下列要求：

- a) 桥墩两侧挂篮应在节段的纵向预应力筋张拉完成后同步移动，并应设专人指挥；
- b) 挂篮前移应根据不同移动方式（滑动式、滚轴式、支架滚轮等）、驱动动力（倒链、千斤顶和液压驱动走行）的操作要求进行，应保持主桁处于水平状态。挂篮前移不应使用卷扬机钢丝绳作为牵引动力；
- c) 挂篮移动就位时轴线偏差不应大于 5 mm；
- d) 挂篮前移时，宜在其后方设置控制其滑动的装置或在滑道上设置止动装置；前移就位后，应立即将后锚固点锁定，防止倾覆。

6.5.5.3 拆除行走系统应按照安装顺序倒置进行。

6.5.6 波形钢腹板现场安装

波形钢腹板现场安装应符合 6.3 的规定。

6.5.7 内衬混凝土钢混结合部

内衬混凝土钢混结合部施工应符合 6.4.5 的规定。

6.5.8 悬浇段施工

悬浇段施工应符合 6.4.6 的规定。

6.5.9 边跨现浇段

边跨现浇段施工应符合 6.4.7 的规定。

6.5.10 合龙段

合龙段施工钢筋加工及安装应符合 6.4.8 的规定。

6.5.11 钢筋加工及安装

钢筋加工及安装应符合 6.4.9 的规定。

6.5.12 混凝土浇筑

混凝土浇筑应符合6.4.10的规定。

6.5.13 预应力施工

预应力施工应符合6.4.11的规定。

6.5.14 施工监测

施工监测应符合6.4.12的规定。

6.6 满堂支架法

6.6.1 一般规定

支架和模板的强度、刚度和稳定性，应符合JTG/T 3650规定。

6.6.2 模板、支架

6.6.2.1 波形钢腹板组合结构梁的现浇施工可使用满堂支架或梁式支架。满堂支架宜采用盘扣式或钢管柱梁式支架，支架宜采用型钢、钢管和贝雷片等构件。

6.6.2.2 支架施工应符合 JT/T 1516 的规定。

6.6.2.3 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。

6.6.2.4 波形钢腹板外侧宜设靠架，波形钢腹板内侧宜设可调拉杆。靠架与可调拉杆应具有一定的刚度。

6.6.2.5 支架应预留施工预拱度，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) 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值；
- c) 由于支架基础下沉而产生的非弹性变形。

6.6.2.6 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。

6.6.2.7 应通过预压的方式，消除支架地基的不均匀沉降和支架的非弹性变形并获取弹性变形参数，或检验支架的安全性。

6.6.2.8 预压荷载宜为支架需承受全部荷载的 1.10 倍，预压荷载的分布应模拟需承受的结构荷载及施工荷载。

6.6.2.9 预压过程不应小于 7 天，连续 24 小时的沉降量应不超过 1mm，或连续 72h 的沉降量不超过 3mm，可进行预压卸载。

6.6.2.10 支架变形和地基沉降应符合设计要求和 JTG/T 3650 的规定。

6.6.3 波形钢腹板施工

6.6.3.1 波形钢腹板现场安装应符合 6.3 的要求。

6.6.3.2 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。

6.6.3.3 波形钢腹板定位时，其标高应与桥梁纵坡一同调整。

6.6.3.4 波形钢腹板两侧及翼缘板上宜设置临时支撑。

6.6.3.5 波形钢腹板安装应设置精确定位装置。

6.6.4 混凝土浇筑

- 6.6.4.1 混凝土浇筑时横向要两侧对称浇筑，纵向从梁跨中向墩顶方向对称浇筑，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。整体浇筑时应采取措施，防止梁体不均匀下沉产生的裂缝。
- 6.6.4.2 当顶板混凝土浇筑临近结束时，严格控制其顶面的标高。箱梁顶面混凝土应压实抹平，并在其初凝前进行拉毛处理。去除浮浆和油污，以提高与混凝土调平层的结合。

6.6.5 预应力筋施工

应符合JTG/T 3650的规定。

7 质量控制与检验

7.1 波形钢腹板现场检验

波形钢腹板外观质量、尺寸偏差、制造质量控制应符合JT/T 784及设计要求。

- 7.1.1 波形钢腹板现场焊缝应按 GB/T 11345 的规定进行检查。
- 7.1.2 波形钢腹板安装质量应满足下列要求：
- a) 波形钢腹板的内外表面无凹陷、划痕、焊疤、电弧擦伤等缺陷，边缘无毛刺；
 - b) 焊缝平滑，无裂纹、未溶合、夹渣、未填满弧坑、焊瘤等外观缺陷；
 - c) 搭接焊气孔直径不大于 1.5 mm，每米不多于 3 个，气孔间距不小于 20 cm，咬边不大于 0.5 mm。
- 7.1.3 波形钢腹板的定位，应符合表 4 的要求。

表 4 波形钢腹板定位要求

项次	检测项目	规定值或允许偏差	检查方法	频率
1	波形钢腹板轴向偏位/mm	±5	内外侧波形钢腹板分别测量	检查每个节段波形钢腹板
2	内外侧波形钢腹板间距偏差/mm	±5	尺量	每2 m测量3处
3	内外侧波形钢腹板高差/mm	±5	尺量	每2 m测量3处
4	波形钢腹板垂直度	1/500	铅锤或全站仪	每2 m测量3处
5	波形钢腹板纵桥向坡度	1/500	水准仪	每2 m测量3处
6	波形钢腹板定位高度/mm	±5	内外侧波形钢腹板分别测量	检查每个节段波形钢腹板

- 7.1.4 波形钢腹板的连接，应符合表 5 的要求。

表 5 波形钢腹板连接要求

项次	检测项目	规定值或允许偏差	检查方法	频率
1	波形钢腹板连接	焊缝尺寸/mm	量规	检查全部，每条焊缝3处
2		焊缝探伤	无损探伤	检查全部
3		高强螺栓扭矩/%	测力扳手	检查5%，且不少于2个
4	波形钢腹板埋入深度/mm	±10	尺量	检查顶部及底部埋入深度

- 7.1.5 波形钢腹板的安装，应符合表 6 的要求。

表 6 波形钢腹板安装要求

项次	检测项目	规定值或允许偏差	检查方法	频率
1	跨径/mm	$\pm (5+0.00015L)$	全站仪或钢尺测两支座中心线距离	—
2	相邻节段对接错边/mm	≤ 2	塞尺	每段接缝最大值
3	波形钢腹板安装累计长度/mm	± 15	全站仪	每节段检查
4	波形钢腹板中心距/mm	± 3	尺量	检查两腹板中心距
5	横截面对角线差/mm	≤ 4	尺量	检查两端端面
6	扭曲/ (mm/m)	每米 ± 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	每节段检查

7.1.6 波形钢腹板的涂装, 应符合表 7 的要求。

表 7 波形钢腹板的涂装要求

项次	检测项目	规定值或允许偏差	检查方法	频率
1	除锈清洁度	符合设计规定, 设计未规定时内表面取Sa2.5, 外表面取Sa3	比照板目测	100%
2	粗糙度/ μm	符合设计要求	按设计, 未规定时, 用粗轴度仪检查	每段检查6点取平均值
3	干膜总厚/ μm	符合设计要求	漆膜测厚仪	按设计要求检查; 设计未要求时用测厚仪检查: 抽查20%且不少于5件, 每10 m^2 测10点, 且不少于10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, 检测干膜总厚度
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; 设计未要求时用拉开法检查: 抽查5%且不少于5件, 每件测1处; 现场要搭接焊缝位置2个节段抽检1次; 面漆涂装后随机抽检1次
5	外观质量	漆膜颜色与色卡一致, 漆膜无流挂、针孔、气泡、裂纹等缺陷; 铝涂层均匀、致密, 无未熔化大颗粒, 无漏喷现象	目测	每种涂层全面检查

7.2 同步悬臂浇筑法、异步悬臂浇筑法

7.2.1 同步悬臂浇筑、异步悬臂浇筑的钢筋、模板及支架、混凝土、预应力等的检查、验收应符合 JTG/T 3650 的要求。

7.2.2 同步悬臂浇筑、异步悬臂浇筑施工质量, 应符合表 8 的要求。

表 8 同步悬臂浇筑法、异步悬臂浇筑法的施工质量要求

项次	检测项目		规定值或允许偏差	检查方法	频率
1	混凝土强度/MPa		$\geq$ 设计值	按JTG F80/1附录D检查	按JTG F80/1附录D检查
2	轴线偏位/mm	$L \leq 100$ m	10	全站仪或经纬仪	每个节段检查2处
3		$L > 100$ m	$L/10\,000$		
4	顶面高程/mm	$L \leq 100$ m	± 20	水准仪	每个节段检查2处
5	顶面高程/mm	$L > 100$ m	$L/5\,000$	水准仪	每个节段检查2处
6		相邻节段高差	10	尺量	检查3~5处
7	断面尺寸/mm	高度	$-5 \sim +10$	尺量	每个节段检查2处
8		顶宽	± 30		
9		底宽	± 20		
10		顶、底板厚	$+10$		

表8 同步悬臂浇筑法、异步悬臂浇筑法的施工质量要求（续表）

项次	检测项目		规定值或允许偏差	检查方法	频率
11	合龙后同跨对称点高程差/mm	$L \leq 100$ m	20	水准仪	每个节段检查5~7处
12		$L > 100$ m	$L/5\,000$		
13	横坡/%		± 0.15	水准仪	每个节段检查1~2处
14	平整度/mm		± 8	2 m直尺	检查数值、水平两个方向，侧面每10 m梁长测1处

7.2.3 波形钢腹板组合梁线形和内力应符合设计要求，并接近设计成桥状态。

7.2.4 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。

7.2.5 波形钢腹板组合结构梁在成桥时的高程偏差应符合 JTG/T 3650 和 JTG F80/1 的要求。主梁相邻节段相对高程偏差不应大于节段长度的 $\pm 0.3\%$ ，主梁各节段线形与理论线形的偏差为 ± 10 mm。

7.3 满堂支架法

满堂支架现浇施工质量，应符合表9的要求。

表9 满堂支架现浇梁段的施工质量要求

项次	检测项目		规定值或允许偏差	检查方法	频率
1△	混凝土强度/MPa		$\geq$ 设计值	按JTG F80/1附录D检查	按JTG F80/1附录D检查
2△	轴线偏位/mm		$\pm$ 跨径/10 000	全站仪或经纬仪测量	纵向检查2点
3	顶面高程/mm		± 10	水准仪测量	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、底板厚度	± 10		
5	横坡/%		± 0.15	水准仪测量	检查3处

项次	检测项目	规定值或允许偏差	检查方法	频率
6	预埋连接件位置/mm	5	尺量	每件
7	平整度/mm	8	2 m直尺测量	检查竖直、水平两个方向，每 侧面每10 m梁长测1处
注：△表示重要项目。				