

DBJT45

广西壮族自治区交通运输行业指南

DBJT45/T 051—2023

公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥 设计指南

Design guideline of prestressed concrete beam bridges with corrugated
steel web

2023 - 04 - 09 发布

2023 - 04 - 30 实施

广西壮族自治区交通运输厅 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 2

5 材料 3

 5.1 混凝土 3

 5.2 钢筋 4

 5.3 钢板 5

6 结构总体设计 6

 6.1 一般规定 6

 6.2 结构总体布置 6

 6.3 腹板布置 6

 6.4 预应力筋布置 7

 6.5 横隔梁（板）布置 7

7 截面刚度计算 7

8 持久状况承载能力极限状态计算 8

 8.1 一般规定 8

 8.2 抗弯承载力 9

 8.3 抗剪承载力 9

 8.4 抗扭承载力 9

 8.5 转向与锚固结构 10

9 持久状况正常使用极限状态计算 11

 9.1 一般规定 11

 9.2 截面应力验算 11

 9.3 抗裂验算 12

 9.4 挠度验算 13

10 短暂状况构件应力计算 14

 10.1 一般规定 14

 10.2 应力验算 14

11 钢腹板与顶底板结合设计 14

 11.1 一般规定 14

 11.2 钢腹板与混凝土顶底板结合 15

 11.3 结合部连接件抗剪计算 15

 11.4 结合部连接件横向抗弯计算 16

 11.5 焊钉连接件计算 17

- 11.6 开孔板连接件计算..... 18
- 12 波形钢腹板设计..... 19
 - 12.1 一般规定..... 19
 - 12.2 波形钢腹板选型..... 19
 - 12.3 波形钢腹板抗剪稳定性计算..... 20
 - 12.4 波形钢腹板间连接计算..... 22
 - 12.5 波形钢腹板与翼缘板焊接计算..... 22
- 13 构造细节设计..... 23
 - 13.1 一般规定..... 23
 - 13.2 波形钢腹板..... 23
 - 13.3 结合部构造..... 24
 - 13.4 预应力筋..... 25
 - 13.5 锚固和转向构造..... 25
 - 13.6 桥面板..... 25
- 14 耐久性..... 26
 - 14.1 一般规定..... 26
 - 14.2 耐久性设计..... 26

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。

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。

本文件由广西壮族自治区交通运输厅提出并宣贯。

本文件由广西交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：广西北投公路建设投资集团有限公司、同济大学、广西交科集团有限公司、广西路建工程集团有限公司。

本文件主要起草人：张云、刘玉擎、宋建平、张坤球、陶亮、江二中、唐亚森、罗光、罗婷倚、王思豪、叶源、韦黛笠、龙志、施智、余秋琴、邓宗萍、李育林、蔡昊初、李保军、蒋志豪、陆小兵、蒋昌盛、田畅、杨明、李臣光。

本文件主要审查人：罗吉智、李琳、黄中文、刘世忠、杨涛、欧阳平、周书林。

公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥 设计指南

1 范围

本文件界定了公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥设计的术语和定义，规定了公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥的材料、结构总体设计、截面刚度计算、持久状况承载力极限状态计算、持久状况正常使用极限状态计算、短暂状态构件应力计算、钢腹板与顶底板结合设计、波形钢腹板设计、构造细节设计、耐久性的要求。

本文件适用于广西壮族自治区行政区域内公路波形钢腹板预应力混凝土梁桥的设计。

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 700 碳素结构钢
- 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 4171 耐候结构钢
- GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉
- JGJ 92 无粘结预应力混凝土结构技术规程
- 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
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG D60 公路桥涵设计通用规范
- JTG D64 公路钢结构桥梁设计规范

3 术语和定义

JT/T 784界定的以及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梁桥 bridge with corrugated steel web
由混凝土顶底板、波形钢腹板、横隔板以及体内或体外预应力筋组成的一种组合结构梁桥。

3.2

内衬混凝土 encased concrete
波形钢腹板预应力混凝土梁桥支点区段一定范围内，在波形钢腹板内侧设置的混凝土。

3.3

焊钉连接件 headed stud

用于钢与混凝土连接的电弧螺柱焊用圆柱头焊钉。

3.4

开孔板连接件 perfobond connector

用于钢与混凝土连接的设有孔的钢板。

3.5

型钢连接件 profiled steel connector

用于钢与混凝土连接的焊接在钢构件上的槽钢、角钢等短小节段型钢。

3.6

翼缘型结合部 flanged connection

波形钢腹板上端或下端与混凝土板通过翼缘板连接的结合构造。

3.7

嵌入型结合部 embedded connection

波形钢腹板上端或下端与混凝土板通过腹板嵌入的结合构造。

3.8

外包型结合部 partial encased connection

波形钢腹板翼缘板与其上侧混凝土板连接的结合构造。

4 基本规定

4.1 本文件采用极限状态设计方法，设计基准期为 100 年。

4.2 桥梁主体结构的设计使用年限不应低于表 1 的规定。

表1 波形钢腹板预应力混凝土梁桥的设计使用年限

单位为年

公路等级	特大桥、大桥	中桥	小桥
高速公路、一级公路	100	100	50
二级公路、三级公路	100	50	30
四级公路	100	50	30

4.3 桥梁应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态两类极限状态设计：

- a) 承载能力极限状态：对应于结构及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态；
- b) 正常使用极限状态：对应于结构及其构件达到正常使用的某项限值的状态。

4.4 桥梁考虑以下设计状况进行极限状态设计：

- a) 持久状况：桥梁建成后承受结构自重、车辆荷载等持续时间长的状况，应进行承载能力极限状态和正常使用极限状态设计；
- b) 短暂状况：波形钢腹板及梁体在制作、运送和架设过程中承受临时性作用（或荷载）的状况，应进行承载能力极限状态设计，必要时进行正常使用极限状态设计；
- c) 偶然状况：桥梁在使用过程中偶然出现的状况，应进行承载能力极限状态设计；
- d) 地震状况：桥梁在使用过程中遭受地震时的情况，在抗震设防地区应考虑地震状况应进行承载能力极限状态设计。

- 4.5 桥梁设计应考虑结构上可能同时出现的作用，按 JTG D60 的规定进行承载能力极限状态和正常使用极限状态作用效应组合。
- 4.6 桥梁施工阶段的作用效应组合，应根据实际情况确定，结构上的施工人员和施工机具设备均应作为临时荷载。
- 4.7 持久状况设计应按承载能力极限状态的规定，进行承载力及稳定性计算。承载能力极限状态计算时，作用（或荷载）的效应采用作用（或荷载）承载能力极限状态基本组合，结构材料性能应采用其强度设计值。
- 4.8 持久状况设计应按正常使用极限状态的规定，采用作用频遇组合、准永久组合，对波形钢腹板预应力混凝土梁桥的抗裂、应力和挠度进行验算。
- 4.9 短暂状况设计应对施工过程中各个阶段的承载能力及稳定性进行验算，必要时应进行结构的倾覆验算。自重、施工荷载等除有特别规定外均应采用标准值，当有组合时组合系数可取 1.0。
- 4.10 计算波形钢腹板预应力混凝土梁桥的强度、稳定性以及连接的强度时，应采用作用（或荷载）承载能力极限状态基本组合。

5 材料

5.1 混凝土

- 5.1.1 混凝土强度等级不应低于 C40。
- 5.1.2 混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 应按表 2 规定执行。

表2 混凝土强度标准值

单位为MPa

强度等级	C40	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	26.8	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
f_{tk}	2.40	2.65	2.74	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10

- 5.1.3 混凝土轴心抗压强度设计值 f_{cd} 和轴心抗拉强度设计值 f_{td} 应按表 3 规定执行。

表3 混凝土强度设计值

单位为MPa

强度等级	C40	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{cd}	18.4	22.4	24.4	26.5	28.5	30.5	32.4	34.6
f_{td}	1.65	1.83	1.89	1.96	2.02	2.07	2.10	2.14

- 5.1.4 混凝土的弹性模量 E_c 和剪切模量 G_c 应按表 4 规定执行，混凝土泊松比 ν_c 可取为 0.2。

表4 混凝土的物理性能指标

单位为 $\times 10^4$ MPa

强度等级	C40	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
弹性模量 E_c	3.25	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80
剪切模量 G_c	1.30	1.38	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52

5.2 钢筋

5.2.1 普通钢筋宜选用热轧 HPB300、HRB400、HRB500、HRBF400 和 RRB400 钢筋，箍筋宜选用带肋钢筋。

5.2.2 预应力筋应选用钢绞线、钢丝，竖、横向预应力筋可选用预应力螺纹钢筋。

5.2.3 普通钢筋的抗拉强度标准值 f_{sk} 和预应力筋的抗拉强度标准值 f_{pk} 应分别按表 5 和表 6 规定执行，其中表 6 中抗拉强度标准值为 1960MPa 的钢绞线作为预应力筋作用时，应有可靠工程经验或充分试验验证。

表5 普通钢筋抗拉强度标准值

钢筋种类	公称直径 d mm	抗拉强度标准值 f_{sk} MPa
HPB300	6~22	300
HRB400、HRBF400、RRB400	6~50	400
HRB500	8~40	500

表6 预应力筋抗拉强度标准值

钢筋种类	公称直径 d mm	抗拉强度标准值 f_{pk} MPa
钢绞线 1×7（七股）	9.5、12.7、15.2、17.8	1 720、1 860、1 960
	21.6	1 860
消除应力钢丝 （光面螺旋肋）	5.0	1 570、1 770、1 860
	7.0	1 570
	9.0	1 470、1 570
预应力螺纹钢筋	18、25、32、40、50	785、930、1 080

5.2.4 普通钢筋的抗拉强度设计值 f_{sd} 和抗压强度设计值 f'_{sd} 应按表 7 规定执行，其中构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自的强度设计值；预应力筋的抗拉强度设计值 f_{pd} 和抗压强度设计值 f'_{pd} 应按表 8 规定执行。

表7 普通钢筋强度

单位为MPa

钢筋种类	抗拉强度设计值 f_{sd}	抗压强度设计值 f'_{sd}
HPB300	250	250
HRB400、HRBF400、RRB400	330	330
HRB500	415	400

表8 预应力筋强度

单位为MPa

钢筋种类	抗拉强度标准值 f_{pk}	抗拉强度设计值 f_{pd}	抗压强度设计值 f'_{pd}
钢绞线 1×7（七股）	1 720	1 170	390
	1 860	1 260	
	1 960	1 330	

表 8 预应力筋强度（续）

单位为MPa

钢筋种类	抗拉强度标准值 f_{pk}	抗拉强度设计值 f_{pd}	抗压强度设计值 f'_{pd}
消除应力钢丝	1 470	1 000	410
	1 570	1 070	
	1 770	1 200	
	1 860	1 260	
预应力螺纹筋	0 785	0 650	400
	0 930	0 770	
	1 080	0 900	

5.2.5 普通钢筋的弹性模量 E_s 和预应力筋的弹性模量 E_p 宜按表 9 规定执行；当有可靠试验依据时， E_s 和 E_p 可按实测数据确定。

表9 普通钢筋及预应力筋的弹性模量

单位为 $\times 10^5$ MPa

钢筋种类		弹性模量 E
普通钢筋	HPB300	2.10
	HRB400、HRBF400、RRB400、HRB500	2.00
预应力筋	消除应力钢丝	2.05
	钢绞线	1.95
	预应力螺纹筋	2.00

5.3 钢板

5.3.1 钢板宜采用 Q235、Q355、Q390 和 Q420，其材性应符合 GB/T 700 和 GB/T 1591 的规定。钢板的强度指标应符合 JTG D64 的规定，并按表 10 规定执行。

表10 钢板强度指标

单位为MPa

牌号	厚度 mm	抗拉、抗压和抗弯强度标准值 f_k	抗拉、抗压和抗弯强度设计值 f_d	抗剪强度设计值 f_{vd}
Q235	≤16	235	190	110
	16~40	225	180	105
	40~100	215	170	100
Q355	≤16	355	285	165
	16~40	345	275	160
	40~63	335	270	155
	63~80	325	260	150
	80~100	315	250	145
Q390	≤16	390	310	180
	16~40	370	295	170

表 10 钢板强度指标（续）

单位为 MPa

牌号	厚度 mm	抗拉、抗压和抗弯强度标准值 f_k	抗拉、抗压和抗弯强度设计值 f_d	抗剪强度设计值 f_{vd}
Q390	40~63	350	280	160
	63~100	330	265	150
Q420	≤16	420	335	195
	16~40	400	320	185
	40~63	380	305	175
	63~100	360	290	165

5.3.2 波形钢腹板的物理性能指标应按表 11 规定执行。

表11 波形钢腹板的物理性能指标

弹性模量 E_s (MPa)	剪切模量 G_s (MPa)	线性膨胀系数 α (/°C)	密度 ρ (kg/m³)	泊松比 ν
2.06×10^5	0.79×10^5	12×10^{-6}	7 850	0.3

5.3.3 波形钢腹板当采用耐候结构钢时，其力学性能、工艺性能及冲击性能应符合 GB/T 4171 的规定。

5.3.4 波形钢腹板的焊接材料选用，焊缝与主体钢板技术条件应相适应，并通过焊接工艺评定确定。

5.3.5 高强度螺栓连接副技术条件应符合 GB/T 1228、GB/T 1229、GB/T 1230、GB/T 1231 的规定。

5.3.6 波形钢腹板的焊钉连接件的材料及机械性能，应符合 GB/T 10433 的规定。

6 结构总体设计

6.1 一般规定

6.1.1 桥梁结构体系，宜综合考虑使用功能、经济性能、施工可行性、养护便利性等。

6.1.2 桥梁总体设计，宜综合考虑结构受力、景观效果、波形钢腹板加工以及施工工艺等因素。

6.2 结构总体布置

6.2.1 桥梁截面高度取值范围与普通预应力混凝土梁桥基本一致，宜考虑设置体外预应力筋对截面高度的影响。

6.2.2 桥梁横截面设计主要是确定横截面布置形式，包括主梁截面形式、腹板间距、截面各部分尺寸等，宜综合考虑立面布置、建筑高度、施工方法、美观要求以及经济性等因素。

6.2.3 桥梁顶、底板构造尺寸，宜综合考虑腹板间距、悬臂板长度等因素确定。

6.3 腹板布置

6.3.1 波形钢腹板高度大于 5m 的墩顶、梁端梁段，宜在腹板内侧浇筑混凝土或增加加劲肋形成组合腹板。

6.3.2 内衬混凝土长度不宜小于 1 倍中支点梁高，宜采用变截面厚度布置，最厚处不宜小于 0.07 倍中支点梁高，最薄处不宜小于 20 cm。

6.4 预应力筋布置

- 6.4.1 可采用全体外预应力筋、全体内预应力筋、体内外预应力筋混合布置的布置形式。
6.4.2 支点及跨内应设置横隔板（板），确保抗扭性能和体外预应力筋锚固、转向的规定。

6.5 横隔板（板）布置

- 6.5.1 支点应设置混凝土端横梁，折线形梁底板折角处以及跨内适当位置应设置横隔板。
6.5.2 桥梁跨内应设置不少于 2 道中间横隔板。
6.5.3 支点横隔板的设计，应确保将混凝土桥面及波形钢腹板承受的荷载安全可靠的传递给下部结构。
6.5.4 采用体外预应力结构体系时，横隔板（板）设计应复核预应力锚固与转向的规定。

7 截面刚度计算

7.1 梁段的轴向刚度 EA 、弯曲刚度 EI ，仅考虑混凝土顶底板的全截面有效，不考虑剪力滞效应及腹板的贡献。

7.2 梁段的剪切刚度仅考虑波形钢腹板的剪切刚度，梁段的剪切刚度 GA 可按式（1）计算：

$$GA = n_w \alpha_w G_s h_w t_w \dots\dots\dots (1)$$

式中：

G_s ——钢板的剪切模量；
 h_w ——波形钢腹板高度；
 t_w ——波形钢腹板厚度；
 n_w ——腹板个数；
 α_w ——波形钢腹板形状系数， $\alpha_w = (a_w + b_w) / (a_w + c_w)$ ；
 a_w ——波形直板段长度；
 b_w ——波形斜板段投影长度；
 c_w ——波形斜板段长度。

7.3 梁段的扭转刚度 GJ ，为钢腹板与混凝土顶底板构成的组合箱梁截面（如图 1）的扭转刚度，可按式（2）计算：

$$GJ = \frac{4A_m^2 G_c}{\frac{h_m}{n_E t_{w1}(1+\beta_w)} + \frac{b_{c1}}{t_{c1}(1-\beta_w)} + \frac{h_m}{n_E t_{w2}(1+\beta_w)} + \frac{b_{c2}}{t_{c2}(1-\beta_w)}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

G_c ——混凝土剪切模量；
 A_m ——组合箱梁扭转抵抗面积， $A_m = h_m(b_{c1} + b_{c2})/2$ ；
 b_{c1} ——顶板处的腹板中心线间距；
 b_{c2} ——底板处的腹板中心线间距；
 h_m ——组合截面顶底板中心线的间距；
 t_{c1} ——顶板的厚度；
 t_{c2} ——底板的厚度；
 t_{w1} ——左侧钢腹板的厚度；
 t_{w2} ——右侧钢腹板的厚度；
 n_E ——钢与混凝土的剪切弹性模量比， $n_E = G_s / G_c$ ；

β_w ——组合截面扭转刚度修正系数，可按式（3）计算：

$$\beta_w = \begin{cases} \frac{0.8h_m}{(b_{c1}+b_{c2})-0.06} & (\frac{h_m}{b_{c1}+b_{c2}} > 0.1) \\ 0 & (\frac{h_m}{b_{c1}+b_{c2}} \leq 0.1) \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

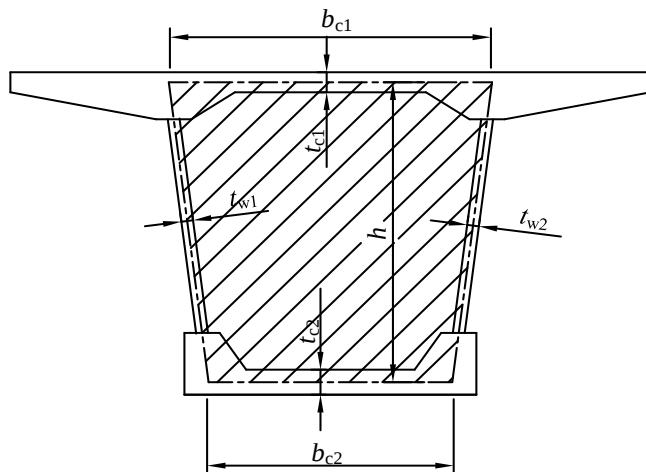


图1 扭转刚度计算截面

8 持久状况承载能力极限状态计算

8.1 一般规定

8.1.1 应根据 JTG D60 的规定选定设计安全等级，按照承载能力极限状态规定进行承载能力计算。

8.1.2 承载能力极限状态应按式（4）计算：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \dots\dots\dots(4)$$

式中：

γ_0 ——桥梁结构重要性系数，按桥梁结构设计安全等级，一级、二级、三级分别取用 1.1、1.0、0.9，桥涵结构设计安全等级应符合 JTG D60 的规定；

S_d ——作用（或荷载）效应的组合设计值；

R_d ——构件承载力设计值。

8.1.3 体外预应力筋作为抗拉钢筋进行截面承载力计算时，体外预应力筋的极限应力设计值 σ_{pu} 应按式（5）计算：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe,ex} + \Delta\sigma_p, \text{ 且 } \sigma_{pu} \leq f_{py} \dots\dots\dots(5)$$

式中：

$\sigma_{pe,ex}$ ——体外预应力筋的有效预应力；

$\Delta\sigma_p$ ——体外预应力筋的应力增量；

f_{py} ——预应力筋的屈服强度。

8.1.4 承载能力极限状态计算时，不考虑内衬混凝土对抗弯、抗剪和抗扭承载力的贡献。

8.2 抗弯承载力

8.2.1 截面抗弯承载力可按下列基本假定进行计算：

- 截面正应变分布符合拟平截面假定；
- 不考虑钢与混凝土之间的相对滑移；
- 忽略波形钢腹板的抗弯作用；
- 不考虑混凝土的抗拉作用；
- 忽略体外预应力筋的有效高度变化。

8.2.2 截面抗弯极限承载力计算时，混凝土顶底板可简化为矩形截面，且仅考虑混凝土顶底板承担纵向弯矩。

8.2.3 截面相对界限受压区高度 ζ_b 可按 JTG 3362 的规定选用。

8.3 抗剪承载力

8.3.1 抗剪承载力计算时，假定波形钢腹板承担组合截面全部剪力，且剪应力沿腹板高度均匀分布。

8.3.2 截面抗剪承载力设计值可按式（6）、式（7）、式（8）计算：

$$V_{ud} = V_{wd} + V_{ped} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$V_{wd} = n_w f_{vd} h_w t_w \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$V_{ped} = F_{pe} \sin \theta_p \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

V_{ud} ——组合截面抗剪承载力；

V_{wd} ——波形钢腹板抗剪承载力设计值；

V_{ped} ——有效预应力竖向分量；

f_{vd} ——波形钢腹板抗剪强度设计值；

h_w ——波形钢腹板高度；

n_w ——腹板个数；

t_w ——波形钢腹板厚度；

F_{pe} ——有效预应力；

θ_p ——预应力轴向倾角(rad)。

8.3.3 波形钢腹板应进行承载能力极限状态剪切稳定性验算，其相关内容应符合第 12 章的规定。

8.4 抗扭承载力

8.4.1 截面抗扭验算时，在验算抗扭承载力的同时，对于曲线梁桥应对混凝土顶底板等构件进行扭转与剪切相互作用的计算分析。

8.4.2 截面抗扭承载力设计值，应分别按照顶、底板扭转斜压破坏和截面整体扭转破坏两种模态进行计算，取两者中较小值。

8.4.3 顶、底板扭转斜压破坏承载力 M_{tcd} 可按式（9）和式（10）计算：

$$M_{tcd} = 2A_m t_i f_{tcd} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$f_{tcd} = 1.25\sqrt{f_{cd}} \leq 7.8 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值；

A_m ——组合箱梁扭转抵抗面积（参照 7.2）；

t_i ——顶底板厚最小值。

8.4.4 截面整体扭转破坏承载力 M_{tyd} 可按式(11)计算:

$$M_{tyd}=2A_mV_{odi} \quad \text{..... (11)}$$

式中:

A_m ——组合箱梁扭转抵抗面积(参照7.2);

V_{odi} ——混凝土顶、底板或波形钢腹板单位长度面内抗剪承载力的最小值。

混凝土顶、底板单位长度面内抗剪承载力的最小值 V_{od} ,取桥轴方向混凝土板钢筋承载力设计值 T_{xyd} 、横桥向混凝土板钢筋承载力设计值 T_{yyd} 两者较小值, T_{xyd} 、 T_{yyd} 可分别按下列式(12)和式(13)计算:

$$T_{xyd}=p_x f_{sd} b t_c \quad \text{..... (12)}$$

$$T_{yyd}=p_y f_{sd} b t_c \quad \text{..... (13)}$$

式中:

p_x ——纵桥轴向混凝土板配筋率;

p_y ——横桥向混凝土板配筋率;

f_{sd} ——钢筋的抗拉强度设计强度;

b ——混凝土顶、底板的单位宽度;

t_c ——混凝土顶、底板的厚度。

波形钢腹板单位长度面内抗剪承载力最小值 V_{od} 可按式(14)计算:

$$V_{od}=f_{vd} h t_w \quad \text{..... (14)}$$

式中:

f_{vd} ——波形钢腹板抗剪强度设计值;

h ——波形钢腹板单位高度;

t_w ——波形钢腹板厚度。

8.5 转向与锚固结构

8.5.1 体外预应力筋的转向结构应进行上拔抗拉承载力计算,在采用拉杆—压杆模型计算时钢筋的抗拉承载力应符合式(15)规定:

$$\gamma_0 N_d \leq f_{sd} A_s \quad \text{..... (15)}$$

式中:

γ_0 ——结构重要性系数;

N_d ——竖向拉力的组合设计值;

f_{sd} ——内环筋的抗拉设计强度,取JTG 3362-2018中第3.2.2条规定的0.6倍, f_{sd} 值大于330 MPa时取330 MPa;

A_s ——内环筋的抗拉截面面积。

8.5.2 体外预应力筋转向结构的开裂面应进行抗剪承载力计算,并符合式(16)规定:

$$\gamma_0 V_d \leq \mu (f_{sd} A_{sv} - N_d) \quad \text{..... (16)}$$

式中:

γ_0 ——结构重要性系数;

V_d ——横向剪切力的组合设计值；
 N_d ——与 V_d 对应的竖向拉力的组合设计值；
 M ——摩阻系数，整体浇筑混凝土剪切面取1.4；
 f_{sd} ——穿过剪切面的钢筋的抗拉设计强度；
 A_{sv} ——穿过剪切面的钢筋截面面积。

8.5.3 非块状转向结构可依据可能发生的开裂面，进行抗拉承载力和开裂面抗剪承载力的计算。

8.5.4 体外预应力筋的锚固块或锚固横梁，在采用拉杆—压杆模型计算时，钢筋的抗拉承载力应符合式（17）规定：

$$\gamma_0 T_d \leq f_{sd} A_s \quad \text{..... (17)}$$

式中：

γ_0 ——结构重要性系数；
 T_d ——拉杆拉力的组合设计值；
 f_{sd} ——拉杆钢筋的抗拉强度设计值；
 A_s ——拉杆钢筋的抗拉截面面积。

9 持久状况正常使用极限状态计算

9.1 一般规定

9.1.1 应根据 JTG 3362 的规定选定设计安全等级和作用（或荷载）组合，进行波形钢腹板预应力混凝土梁混凝土顶底板法向压应力和抗裂性、挠度、预应力筋拉应力、腹板剪应力的验算。

9.1.2 预应力筋的张拉控制应力及预应力损失，应按 JTG 3362 的规定计算。

9.2 截面应力验算

9.2.1 远离支点处组合截面弯曲应力可按下列基本假定进行计算：

- 截面正应变分布符合拟平截面假定；
- 不考虑钢与混凝土之间的相对滑移。
- 忽略波形钢腹板的抗弯作用；
- 钢材与混凝土为弹性材料；
- 混凝土顶、底板全截面有效。

9.2.2 支点区段一定范围内弯曲应力计算时，应考横隔梁对波形钢腹板剪切变形抑制效应在顶底板中产生的附加应力。

9.2.3 正截面混凝土最大压应力应符合式（18）规定：

$$\sigma_{cc} \leq 0.50 f_{ck} \quad \text{..... (18)}$$

式中：

σ_{cc} ——正截面混凝土最大压应力计算值；
 f_{ck} ——混凝土的抗压强度标准值。

9.2.4 体内预应力筋最大拉应力应符合式（19）规定：

$$\sigma_{pe} + \sigma_p \leq 0.65 f_{pk,i} \quad \text{..... (19)}$$

式中:

σ_{pe} ——体内预应力筋有效预应力;

σ_p ——体内预应力筋应力增量;

$f_{pk,i}$ ——体内预应力筋的抗拉强度标准值。

9.2.5 体外预应力筋有效预应力应符合式(20)规定:

$$\sigma_{pe,ex} \leq 0.60 f_{pk,ex} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$\sigma_{pe,ex}$ ——体外预应力筋有效预应力;

$f_{pk,ex}$ ——体外预应力筋的抗拉强度标准值。

9.2.6 波形钢腹板上的剪应力应确保因剪力引起的剪应力 τ_{wsd} 与因扭矩引起的剪应力 τ_{wtd} 的和,不超过其钢板抗剪强度设计值 f_{vd} , 应符合式(21)、式(22)、式(23)规定:

$$\tau_{wsd} + \tau_{wtd} \leq f_{vd} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\tau_{wsd} = \frac{V_d - V_{ped}}{n_w h_w t_w} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\tau_{wtd} = \frac{M_{td}}{2A_m t_w (1 + \beta_w)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

V_d 、 V_{ped} ——剪力组合设计值及有效预应力竖向分量;

τ_{wsd} 、 τ_{wtd} ——剪力、扭矩作用下波形钢腹板的剪应力设计值;

t_w ——波形钢腹板的厚度;

h_w ——波形钢腹板的高度;

n_w ——波形钢腹板的数量;

A_m ——组合箱梁扭转抵抗面积;

β_w ——组合截面扭转刚度修正系数。

f_{vd} ——钢板抗剪设计强度。

9.3 抗裂验算

9.3.1 在正常使用状态下不允许混凝土开裂, 应进行正截面抗裂验算。

9.3.2 整体式全预应力波形钢腹板组合梁正截面混凝土拉应力验算, 应符合式(24)规定:

$$\sigma_{st} - 0.85 \sigma_{pc} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

σ_{st} ——作用频遇组合下构件抗裂验算截面边缘混凝土的法向拉应力;

σ_{pc} ——永存预应力在截面边缘产生的压应力。

9.3.3 现浇节段式和预制节段式全预应力波形钢腹板组合梁正截面混凝土拉应力验算, 应符合式(25)规定:

$$\sigma_{st} - 0.8 \sigma_{pc} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

σ_{st} ——作用频遇组合下组合梁抗裂验算截面边缘混凝土的法向拉应力;

σ_{pc} ——永存预应力在截面边缘产生的压应力。

9.3.4 A类预应力波形钢腹板组合梁正截面混凝土拉应力验算,应符合式(26)、式(27)规定:

$$\sigma_{st}-\sigma_{pc}\leq 0.7f_{tk} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\sigma_{lt}-\sigma_{pc}\leq 0 \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

σ_{st} 、 σ_{lt} ——作用频遇组合、准永久组合下抗裂验算截面边缘混凝土的法向拉应力;

σ_{pc} ——永存预应力在截面边缘产生的压应力;

f_{tk} ——混凝土的抗拉强度标准值。

9.4 挠度验算

9.4.1 挠度计算时,应考虑波形钢腹板剪切变形和荷载长期效应对挠度的影响,挠度长期增长系数可按JTG 3362的规定取用。

9.4.2 简支梁桥在集中荷载作用下考虑剪切变形的跨中挠度,可按式(28)、式(29)计算:

$$f_{L/2}=\frac{PL^3}{48E_cI_c}(1+\beta_p) \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\beta_p=(0.67-0.53h/L)\frac{12E_cI_c}{\alpha_wG_sA_wL^2} \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中:

$f_{L/2}$ ——跨中挠度;

P ——集中荷载;

β_p ——集中荷载作用下的挠度修正系数;

L ——波形钢腹板预应力混凝土梁跨度;

H ——波形钢腹板预应力混凝土梁高度;

E_c ——混凝土弹性模量;

G_s ——波形钢腹板剪切模量;

I_c ——混凝土顶底板的惯性矩;

A_w ——波形钢腹板的横截面积;

α_w ——波形钢腹板形状系数, $\alpha_w=(a_w+b_w)/(a_w+c_w)$ 。

9.4.3 简支梁桥在均布荷载作用下考虑剪切变形的跨中挠度,可按式(30)和式(31)计算:

$$f_{L/2}=\frac{5qL^4}{384E_cI_c}(1+\beta_q) \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$\beta_q=0.67\frac{48EI_c}{5\alpha_wG_sA_wL^2} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

$f_{L/2}$ ——跨中挠度;

q ——均布荷载集度;

β_q ——均布荷载作用下的挠度修正系数;

L ——波形钢腹板预应力混凝土梁跨度;

- H ——波形钢腹板预应力混凝土梁高度；
 E_c ——混凝土弹性模量；
 G_s ——波形钢腹板剪切模量；
 I_c ——混凝土顶底板的惯性矩；
 A_w ——波形钢腹板的横截面积；
 α_w ——波形钢腹板形状系数， $\alpha_w = (a_w + b_w)/(a_w + c_w)$ 。

9.4.4 正常使用极限状态下挠度限值和预拱度设置应符合 JTG 3362 的规定。

10 短暂状况构件应力计算

10.1 一般规定

- 10.1.1 按短暂状况设计时，应确保在制作、运输及安装等施工阶段，由自重、施工荷载等引起的正截面应力、腹板剪应力不超过限值。
- 10.1.2 当进行波形钢腹板等构件运输和安装计算时，梁体或节段自重应乘以动力系数。动力系数应按 JTG D60 的规定采用。
- 10.1.3 波形钢腹板由吊机桥面运送安装时，应对已建结构部分进行极限承载力计算，吊机的荷载系数取 1.15。
- 10.1.4 对波形钢腹板预应力混凝土梁施加预应力时，混凝土的立方体强度不应低于设计混凝土强度等级的 90%，弹性模量不应低于混凝土 28d 弹性模量的 90%，且龄期不应小于 5d。

10.2 应力验算

- 10.2.1 短暂状况应力计算时，由预加力和荷载产生的法向应力，可按 9.2.1 和 9.2.2 的假定计算。
- 10.2.2 短暂状况下组合梁正截面混凝土压应力应符合式 (32) 规定：

$$\sigma_{cc} \leq 0.7f_{ck} \dots\dots\dots (32)$$

式中：

- σ_{cc} ——按短暂状况计算时截面预压区最大压应力；
 f_{ck} ——混凝土轴心抗压强度标准值。

10.2.3 短暂状况下组合梁正截面混凝土拉应力应符合下列规定：

- 当 $\sigma_{ct} \leq 0.7f_{tk}$ 时，配置于预拉区纵向钢筋的配筋率不小于 0.2%；
- 当 $\sigma_{ct} = 1.15f_{tk}$ 时，配置于预拉区纵向钢筋的配筋率不小于 0.4%；
- 当 $0.7f_{tk} \leq \sigma_{ct} = 1.15f_{tk}$ 时，配置于预拉区纵向钢筋的配筋率按以上两者直线内插取用；
- 拉应力 σ_{ct} 不应超过 $1.15f_{tk}$ 。

注1: σ_{ct} ——按短暂状况计算时截面预拉区混凝土最大拉应力；

注2: f_{tk} ——混凝土轴心抗压、抗压强度标准值。

10.2.4 波形钢腹板架设施工短暂状态，应进行剪力与局部承压共同作用下的强度和稳定性验算。

11 钢腹板与顶底板结合设计

11.1 一般规定

11.1.1 波形钢腹板与混凝土顶、底板结合形式的选取，宜综合考虑受力合理性、结构耐久性、施工便

利性等方面的因素。

11.1.2 钢与混凝土结合面宜选取在结合面垂直方向受压的部位，否则应采取措施防止结合面出现抗拔力或减少拉拔力的作用。

11.1.3 钢腹板与混凝土顶板结合面连接设计，应确保结合面能承担纵桥向剪力，同时应能承担结合面横桥向弯矩的作用。

11.2 钢腹板与混凝土顶底板结合

11.2.1 钢腹板与混凝土顶板结合形式，可从翼缘型结合部[如图 2 中分图 a)、分图 b)和分图 c)]、嵌入型结合部[如图 2 中分图 d)]两种构造中选取，钢腹板与混凝土底板结合形式，可从翼缘型结合部、嵌入型结合部、外包型结合部[如图 2 中分图 e)和分图 f)]三种构造中选取。

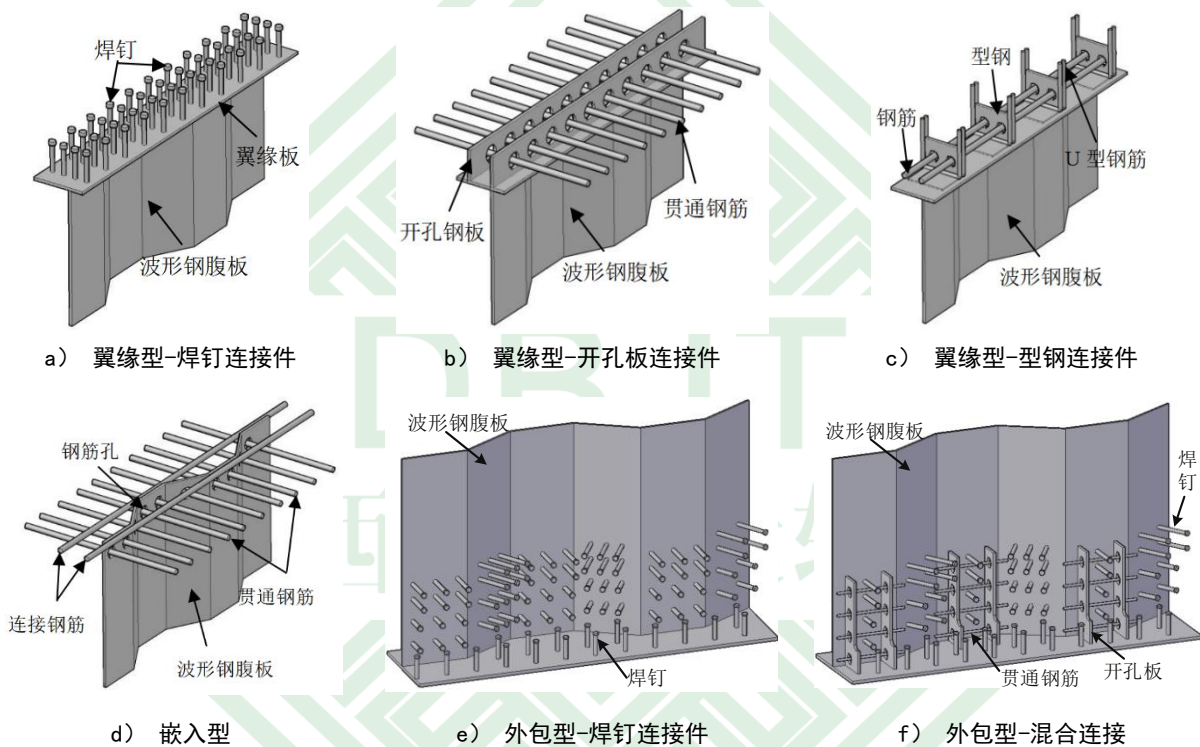


图2 结合部类型

11.2.2 钢腹板与混凝土顶板结合宜选用翼缘型结合部构造，钢腹板与混凝土底板的结合宜选用外包型结合部构造。

11.2.3 翼缘型结合部，钢翼缘板上可布置焊钉连接件、开孔板连接件、型钢连接件以及混合布置形式，宜综合考虑各因素选用。

11.2.4 外包型结合部，钢腹板、钢翼缘板上可布置焊钉连接件或焊钉开孔板混合布置形式，宜综合考虑受力及施工进行选用。

11.3 结合部连接件抗剪计算

11.3.1 结合部连接件在承载能力极限状态作用下的水平剪力，应符合式（33）规定：

$$\gamma_0 V_{sd} \leq V_{sud} \dots\dots\dots (33)$$

式中:

γ_0 ——结构重要性系数;

V_{sd} ——承载力极限状态下的连接件剪力设计值;

V_{sud} ——连接件抗剪极限承载力。

11.3.2 连接件在正常使用极限状态下的相对滑移,应符合式(34)规定:

$$\gamma_0 s_d \leq s_a \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

γ_0 ——结构重要性系数;

s_d ——承载力极限状态下的连接件剪力设计值;

s_a ——连接件极限滑移。

11.3.3 钢腹板与混凝土顶底板结合面作用的标准波长范围内剪力,可按式(35)计算:

$$q_v = L_w (V_d - V_p) \frac{S_c}{I_c} \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中:

q_v ——结合面作用标准波长范围内剪力设计值;

L_w ——波形钢腹板标准波长;

I_c ——混凝土顶底板惯性矩;

S_c ——混凝土顶板或混凝土底板对截面中性轴n-n的面积矩,与要计算的结合面对应,如图3所示;

V_d ——剪力组合设计值;

V_p ——剪力组合作用下预应力筋分担剪力。

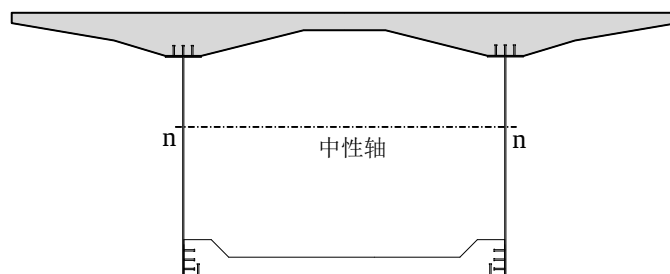


图3 结合面剪力计算

11.3.4 外包型结合部连接件剪力计算时,应考虑腹板上不同高度、单个标准波形内直板和斜板上连接件剪力不均匀现象。

11.4 结合部连接件横向抗弯计算

11.4.1 结合部连接件在承载力极限状态下的横桥向弯矩作用,应符合式(36)规定:

$$\gamma_0 M_d \leq M_{ud} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

γ_0 ——桥梁结构重要性系数;

M_d ——承载力极限状态下的连接件横向弯矩组合设计值;

M_{ud} ——连接件横向弯矩承载力设计值。

11.4.2 翼缘型结合部开孔板连接件的单位长度横向弯矩承载力，可按式（37）计算：

$$M_{ud}=n_{pb}e_{pb}N_{pb} \dots\dots\dots (37)$$

式中：

M_{ud} ——连接件横向弯矩承载力设计值；

N_{pb} ——开孔板连接件在翼缘板垂直方向上的抗拉拔承载力设计值；

e_{pb} ——开孔板的间距；

n_{pb} ——单位长度受拉侧开孔板的孔数。

11.4.3 翼缘型结合部焊钉连接件的单位长度横向弯矩承载力，可按式（38）计算：

$$M_{ud}=n_{st}e_{st}N_{st} \dots\dots\dots (38)$$

式中：

M_{ud} ——连接件横向弯矩承载力设计值。

N_{st} ——焊钉的抗拉拔承载力设计值；

e_{st} ——焊钉的横向间距；

n_{st} ——单位长度受拉侧配置的焊钉数。

11.5 焊钉连接件计算

11.5.1 焊钉连接件抗剪承载力设计值，可按式（39）计算：

$$V_{sud}=\begin{cases} 0.40A_{st}\sqrt{E_cf_{cd}} & (\sqrt{E_cf_{cd}}\leq 700.0\text{MPa}) \\ 0.16A_{st}\sqrt{E_cf_{cd}}+168.0A_{st} & (\sqrt{E_cf_{cd}}>700.0\text{MPa}) \end{cases} \dots\dots\dots (39)$$

式中：

V_{sud} ——焊钉连接件的抗剪极限承载力设计值；

A_{st} ——焊钉截面面积；

E_c ——混凝土弹性模量；

f_{cd} ——混凝土抗压强度设计值。

11.5.2 焊钉连接件抗剪刚度，可按式（40）计算：

$$k_{ss}=0.32d_{st}E_c^{3/4}E_s^{1/4} \dots\dots\dots (40)$$

式中：

k_{ss} ——焊钉连接件的抗剪刚度；

d_{st} ——焊钉连接件的直径；

E_c ——混凝土弹性模量；

E_s ——钢材弹性模量。

11.5.3 正常使用极限状态下，焊钉连接件最大滑移可按式（41）计算：

$$s_{max}=V_{sd}/k_{ss} \dots\dots\dots (41)$$

式中：

s_{max} ——正常使用极限状态下焊钉连接件的最大滑移值；

V_{sd} ——正常使用极限状态下焊钉连接件剪力设计值；

k_{ss} ——焊钉连接件的抗剪刚度；

11.5.4 焊钉连接件抗拉拔承载力，可按式（42）计算：

$$N_{st} = \min \begin{cases} \varphi_t A_s f_{su} \\ 14.1 \varphi_b \psi_{c,N} h_{ef}^{1.5} \sqrt{f_{cd} - 1.9} \dots\dots\dots (42) \\ 16.0 \varphi_p \psi_{c,p} A_{brg} (f_{cd} - 1.9) \end{cases}$$

式中：

N_{st} ——焊钉抗拉承载力设计值；

A_{st} ——焊钉截面面积；

f_{sd} ——焊钉材料抗拉强度设计值；

h_{ef} ——焊钉有效埋入深度，为焊钉头底面至混凝土顶面距离；

f_{cd} ——混凝土棱柱体抗压强度设计值；

A_{brg} ——焊钉头部的净支撑面积， $A_{brg} = \pi(d_{h2} - d_{s2})/4$ ；

$\psi_{c,N}$ ——混凝土掀起破坏时混凝土开裂修正系数，在正常使用状态下混凝土未开裂时，取1.25，开裂时取1.0；

$\psi_{c,p}$ ——焊钉拔出破坏时混凝土开裂修正系数，在正常使用状态下混凝土未开裂时，取1.4，开裂时取1.0；

φ_t 、 φ_b 、 φ_p ——分别为焊钉拉断破坏、混凝土掀起破坏和焊钉拔出破坏对应的抗力分项系数，依次取值为0.75、0.7和0.7。

11.6 开孔板连接件计算

11.6.1 开孔板连接件抗剪承载力，可按式（43）计算：

$$V_{pud} = 1.38(d^2 - d_s^2)f_{cd} + 1.24d_s^2 f_{sd} \dots\dots\dots (43)$$

式中：

V_{pud} ——开孔板连接件抗剪极限承载力设计值；

d ——开孔板连接件圆孔直径；

d_s ——孔中贯通钢筋直径；

f_{sd} ——孔中钢筋抗拉强度设计值；

f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值。

11.6.2 开孔板连接件抗剪刚度，可按式（44）计算：

$$k_{ps} = (0.27 + 0.14n_E n_d^2) E_c d \dots\dots\dots (44)$$

式中：

k_{ps} ——开孔板连接件的抗剪刚度；

n_E 、 n_d ——孔中钢筋与混凝土的弹性模量比、直径比；

E_c ——混凝土弹性模量；

D ——开孔板连接件圆孔直径。

11.6.3 正常使用极限状态下，开孔板连接件最大滑移可按式（45）计算：

$$s_{max} = V_{sd} / k_{ps} \dots\dots\dots (45)$$

式中：

s_{max} ——正常使用极限状态下开孔板连接件的最大滑移值；

V_{sd} ——正常使用极限状态下开孔板连接件剪力设计值；

k_{ss} ——开孔板连接件的抗剪刚度。

11.6.4 开孔板连接件抗拉拔承载力，可按式（46）计算：

$$N_{pb}=0.87(0.25d+h_p)^{0.75}\sqrt{f_{cd}}\cdots\cdots\cdots(46)$$

- 式中：
- N_{pb} ——开孔板连接件抗拉拔极限承载力设计值；
 - d ——开孔板连接件圆孔直径；
 - h_p ——开孔板连接件圆孔中心埋入深度；
 - f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值。

12 波形钢腹板设计

12.1 一般规定

- 12.1.1 波形钢腹板的设计，假定截面剪力全部由波形钢腹板承担，且沿截面高度方向剪应力均匀分布。
- 12.1.2 波形钢腹板的设计应对持久状况承载能力极限状态、正常使用极限状态以及短暂状况的强度、稳定性进行验算。
- 12.1.3 波形钢腹板弹性临界剪切屈曲应力的计算，应考虑整体屈曲、局部屈曲及合成屈曲三种屈曲模态。
- 12.1.4 波形钢腹板承载能力极限状态下抗剪稳定性验算可按图 4 所示流程进行。



图4 波形钢腹板抗剪稳定性验算流程

12.2 波形钢腹板选型

- 12.2.1 波形钢腹板预应力混凝土梁桥标准波形的选择，应依据桥梁跨径、截面高度、加工工艺等综合因素合理选取。
- 12.2.2 波形钢腹板几何参数包括：波形钢腹板波长 L_w 、腹板截面高度 h_w 、直板段长度 a_w 、斜板段投影

长度 b_w 、斜板段长度 c_w 、腹板形状高度 d_w 、厚度 t_w 及弯折半径 r_w 及弯折角度 θ_w 等，见图 5。

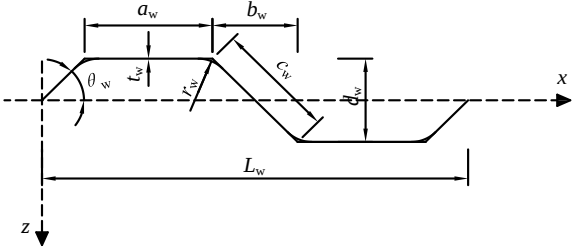


图5 波形钢腹板构造图

12.2.3 波形钢腹板预应力混凝土梁桥设计选型波形钢腹板时，宜采用表 12 规定的标准波形。

表12 波形钢腹板形状规格

单位为mm

形状规格	波长 L_w	适用厚度 t_w	形状尺寸参数			
			a_w	b_w	c_w	d_w
1000型	1 000	8~16	340	160	226	160
1200型	1 200	8~20	330	270	336	200
1600型	1 600	10~30	430	370	430	220
1800型	1 800	10~32	480	420	484	240

12.3 波形钢腹板抗剪稳定性计算

12.3.1 波形钢腹板局部屈曲和合成屈曲、合成屈曲和整体屈曲之间的转换的临界高度，可按式（47）和式（48）计算：

$$h_{w,LI} = C_1 t_w^{p_1} \dots\dots\dots (47)$$

$$h_{w,IG} = C_2 t_w^{p_2} \dots\dots\dots (48)$$

式中：

- $h_{w,LI}$ ——波形钢腹板局部屈曲向合成屈曲转换的临界高度，单位为毫米（mm）；
 $h_{w,IG}$ ——波形钢腹板合成屈曲向整体屈曲转换的临界高度，单位为毫米（mm）；
 C_1 、 C_2 、 p_1 、 p_2 ——屈曲模态转换系数，应符合表13的规定；
 t_w ——波形钢腹板厚度，单位为毫米（mm）。

表13 屈曲模态转换系数

系数	1000 型	1200 型	1600 型	1800 型
C_1	7 955	11 485	21 832	23 315
p_1	-0. 673	-0. 726	-0. 839	-0. 796
C_2	15 620	20 189	29 923	34 857
p_2	-0. 534	-0. 543	-0. 546	-0. 540

12.3.2 波形钢腹板最不利剪切屈曲模态为局部屈曲时，弹性临界剪切屈曲应力 τ_{cr} 可按式（49）和式（50）计算：

$$\tau_{cr}=k_L \frac{\pi^2 E_s}{12(1-\nu_s^2)} \left(\frac{t_w}{a_w}\right)^2 \dots\dots\dots (49)$$

$$k_L=5.88+7.06\left(\frac{a_w}{h_w}\right)^2-29.73\frac{t_w}{d_w} \dots\dots\dots (50)$$

式中:

k_L ——波形钢腹板局部剪切屈曲系数;

E_s ——钢板弹性模量;

ν_s ——钢板泊松比;

a_w ——波形钢腹板子板宽度(当斜板宽度 c_w 比直板宽度 a_w 大时取 c_w);

t_w ——波形钢腹板厚度;

h_w ——波形钢腹板高度;

d_w ——波形钢腹板波形高度。

12.3.3 波形钢腹板最不利剪切屈曲模态为整体屈曲时,弹性临界剪切屈曲应力 τ_{cr} 可按式(51)、式(52)、式(53)和式(54)计算:

$$\tau_{cr}=k_G \frac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{t_w h_w^2} \dots\dots\dots (51)$$

$$D_x=\frac{E_s t_w^3 [(d_w/t_w)^2+1]}{6\alpha_w} \dots\dots\dots (52)$$

$$D_y=\frac{E_s t_w^3}{12(1-\nu_s^2)} \alpha_w \dots\dots\dots (53)$$

$$k_G=76.53+1.33\frac{d_w}{t_w}-5.57\frac{h_w}{L_w} \dots\dots\dots (54)$$

式中:

k_G ——整体屈曲系数;

L_w ——标准波形长度;

α_w ——波形钢腹板形状系数, $\alpha_w=(a_w+b_w)/(a_w+c_w)$ 。

12.3.4 波形钢腹板最不利剪切屈曲模态为合成屈曲时,弹性临界剪切屈曲应力 τ_{cr} 可按式(55)和式(56)计算:

$$\tau_{cr}=k_I \frac{D_y^{1/4} D_x^{3/4}}{t_w h_w^2} \dots\dots\dots (55)$$

$$k_I=6.97+52.02\left(\frac{h_w}{L_w}\right)^2\frac{t_w}{d_w}-37.83\left(\frac{a_w}{h_w}\right)^2 \dots\dots\dots (56)$$

式中:

k_I ——合成屈曲系数。

D_x 、 D_y ——波形钢腹板弯曲刚度,按式(52)、式(53)计算。

12.3.5 波形钢腹板在承载力极限状态下,为确保剪切破坏为腹板的受剪屈服,应符合式(57)规定:

$$f_{vd}<0.36\tau_{cr} \dots\dots\dots (57)$$

式中:

τ_{cr} ——波形钢腹板弹性临界剪切屈曲应力;

f_{vd} ——波形钢腹板的设计剪切屈服强度。

12.4 波形钢腹板间连接计算

12.4.1 波形钢腹板间纵桥向宜采用高强螺栓[如图6中分图a)和分图b)]、焊接[如图6中分图c)和分图d)]或两者同时组合的连接[如图6中分图e)]。

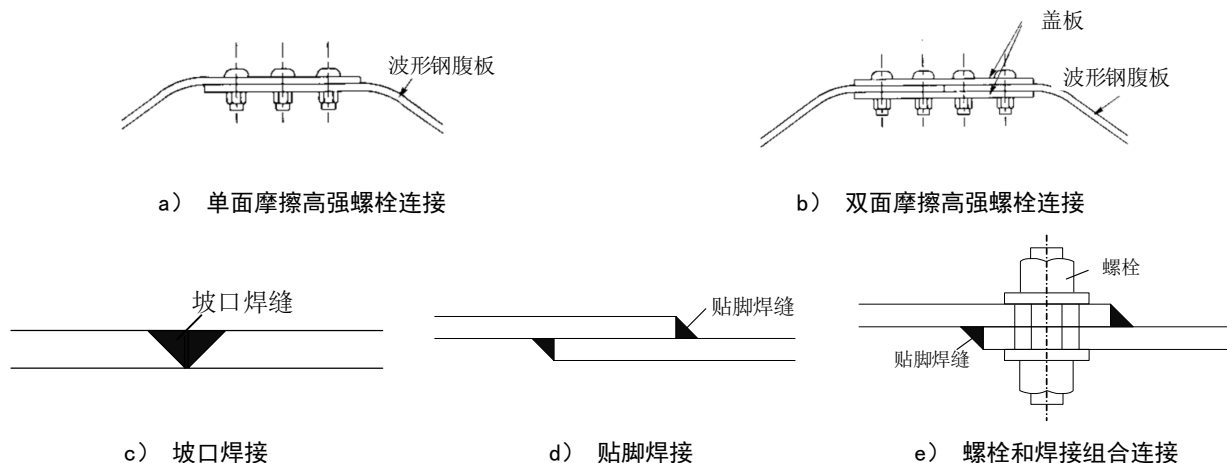


图6 波形钢腹板间连接方式

12.4.2 波形钢腹板采用高强螺栓连接时，连接处使用的螺栓数量应符合式(58)规定：

$$n \geq \frac{V_d}{N_v} \dots\dots\dots (58)$$

式中：

n ——螺栓数量；

V_d ——连接处竖向剪力设计值；

N_v ——单根螺栓抗剪承载力设计值。

12.4.3 波形钢腹板高强螺栓连接时，单根螺栓抗剪承载力设计值可按式(59)计算：

$$N_v = 0.9 n_f \mu P_p \dots\dots\dots (59)$$

式中：

n_f ——传力摩擦面数；

μ ——钢板间摩擦系数；

P_p ——高强度螺栓的预拉力。

12.4.4 波形钢腹板焊缝连接时，搭接直角焊缝作用的剪应力可按式(60)计算：

$$\tau_f = \frac{V_{fd}}{0.7 h_f \sum l_f} \leq f_f^w \dots\dots\dots (60)$$

式中：

V_{fd} ——焊缝承担的竖向剪力设计值；

f_f^w ——角焊缝的强度设计值；

h_f ——角焊缝的焊脚尺寸；

l_f ——焊缝的计算长度，对每条焊缝取其实际长度减去 $2h_f$ 。

12.5 波形钢腹板与翼缘板焊接计算

12.5.1 波形钢腹板与翼缘板的贴角焊缝，可换算成等效截面进行计算，如图7所示。

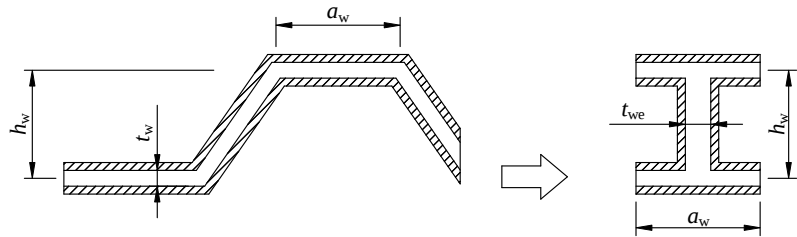


图7 贴角焊缝等效截面

12.5.2 焊接连接在承载力极限状态下纵桥向和横桥向的合成应力，应符合式（61）规定：

$$\left(\frac{\tau_{fv}}{f_f^w}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{fM}}{\beta_f f_f^w}\right)^2 < 1 \dots\dots\dots (61)$$

式中：

- τ_{fv} ——连接焊缝承载力极限状态下的纵桥向剪应力；
- β_f ——正面角焊缝的强度设计值增大系数，对直接承受动力荷载的结构， $\beta_f=1.0$ ；
- σ_{fM} ——连接焊缝承载力极限状态下的横向弯曲应力；
- f_f ——角焊缝的强度设计值。

13 构造细节设计

13.1 一般规定

- 13.1.1 桥梁截面总体布置与尺寸应合理设计，依据桥幅宽度、跨径确定波形钢腹板预应力混凝土梁桥的梁高、截面宽度、腹板中心间距。
- 13.1.2 桥梁截面顶、底板的板厚，应根据纵向和横向预应力筋布置及结构受力规定来确定。
- 13.1.3 桥梁悬臂板端部厚度，按符合横向预应力筋和防撞护栏钢筋锚固尺寸规定取值，腹板中心至悬臂板端部的悬臂板长度不宜超过腹板中心间距的 0.45 倍。

13.2 波形钢腹板

- 13.2.1 波形钢腹板尺寸选择，宜综合考虑结构受力、运输限制尺寸、现场吊装和拼装要求、经济性、景观等因素确定。
- 13.2.2 波形钢腹板的最小板厚为 8 mm。
- 13.2.3 波形钢腹板的直板段和斜板段长度宜相同，冷弯加工弯曲半径不宜小于 15 倍的板厚。
- 13.2.4 波形钢腹板节段间的连接，可采用焊接或高强螺栓连接，在选用贴角焊接连接时，宜设置临时固定螺栓。
- 13.2.5 波形钢腹板节段内的纵向连接宜采用对接焊接。
- 13.2.6 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，不宜采用螺栓连接。
- 13.2.7 钢腹板与顶底板混凝土间采用翼缘型结合时，连接处的翼缘板纵向连接间宜留 2 cm 间隙，同时波形钢腹板顶面切圆角，以避免焊缝与翼缘板焊缝相交。
- 13.2.8 当排水管通过波形钢腹板或多室箱梁各室之间在波形钢腹板上设置检查孔时，应对钢板开孔部位双面焊接钢板进行加强，不可在冷弯部位焊接。
- 13.2.9 波形钢腹板与上下钢翼缘板的连接、波形钢腹板节段间的连接，可通过构造措施提高抗疲劳性能。

13.3 结合部构造

13.3.1 钢与混凝土结合部，主要有钢腹板与混凝土的顶底板、支点横隔梁以及跨内横隔板等的结合，应合理选用结合构造和连接件形式。

13.3.2 波形钢腹板与支点横隔梁的结合方式，应根据横隔梁构造、结构受力、耐久性等因素综合确定，常用结合方式有嵌入型连接[如图 8 中分图 a)]和翼缘型连接[如图 8 中分图 b) 和分图 c)]。

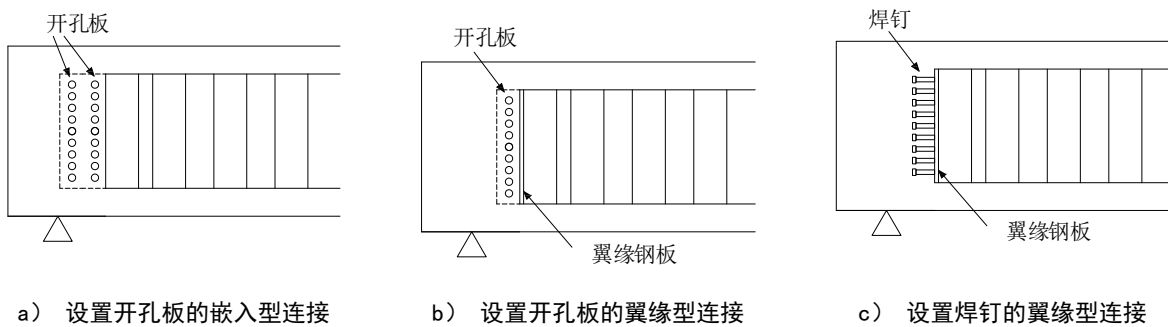


图8 钢腹板与支点横隔梁的结合方式

13.3.3 波形钢腹板与跨内横隔板的结合方式，应考虑横隔板是否兼作转向结构等因素，常用结合方式有焊钉型[如图 9 中分图 a)]和开孔板型[如图 9 中分图 b)]两种。

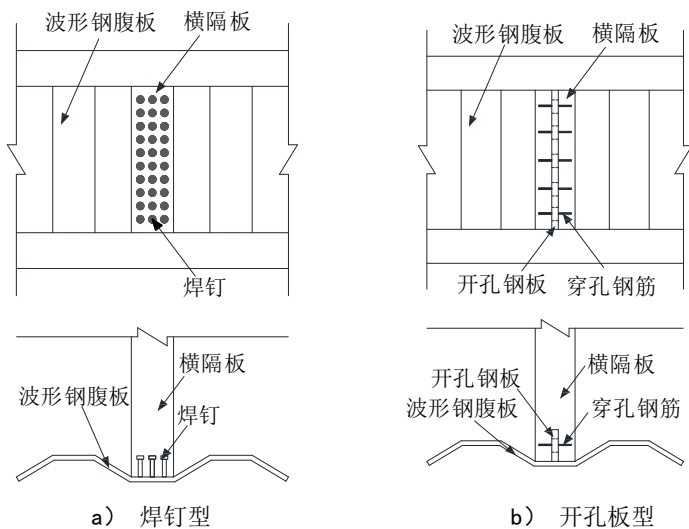


图9 钢腹板与横隔板的结合方式

13.3.4 焊钉连接件的构造符合下列规定：

- 焊钉连接件的材料、机械性能以及焊接要求应符合 GB/T 10433 的规定；
- 焊钉连接件的中心间距不宜超过 300 mm；
- 焊钉连接件剪力作用方向上的间距不应小于焊钉直径的 5 倍，且不应小于 100mm；
- 剪力作用垂直方向的间距不应小于焊钉直径的 2.5 倍，且不应小于 50mm；
- 焊钉连接件的外侧边缘与钢板边缘的距离不应小于 25mm。

13.3.5 开孔板连接件的构造符合下列规定：

- 双开孔板连接件开孔板间距不宜小于开孔板高的 3 倍；
- 开孔板连接件的钢板厚度不宜小于 12mm；

- 开孔板连接件孔径应大于孔中钢筋直径与混凝土骨料最大粒径之和；
- 开孔板连接件孔中贯通钢筋应采用带肋钢筋，其直径不宜小于 12mm；
- 开孔板连接件孔径宜采用 50mm~80mm。

13.4 预应力筋

- 13.4.1 采用体内及体外预应力筋混合配置形式时，宜根据受力计算确定体内、体外配置的比例。
- 13.4.2 体外预应力筋的锚固结构与转向结构间，或者两个转向结构间的自由段长度不宜大于 8m，否则应考虑设置减震装置。
- 13.4.3 体外预应力筋在转向结构处的弯折转角不宜大于 15°，转向结构鞍座处最小半径不能超过 JGJ 92 的规定。
- 13.4.4 体外预应力筋宜依据固有振动特性考虑设置体外预应力筋的减振装置。

13.5 锚固和转向构造

- 13.5.1 体内预应力筋在混凝土顶、底板的锚固，应合理分散配置避免应力集中。
- 13.5.2 体外预应力筋锚固及转向结构的位置，宜综合考虑跨内横隔梁（板）位置、预应力张拉顺序及方法等合理确定。
- 13.5.3 转向结构设计，应考虑波形钢腹板刚度相对较小等因素，合理选用转向结构形式，常用的结构形式有锚固块型[如图 10 中分图 a)]、竖肋板型[如图 10 中分图 b)]、横肋板型[如图 10 中分图 c)]和横隔板型[如图 10 中分图 d)]。

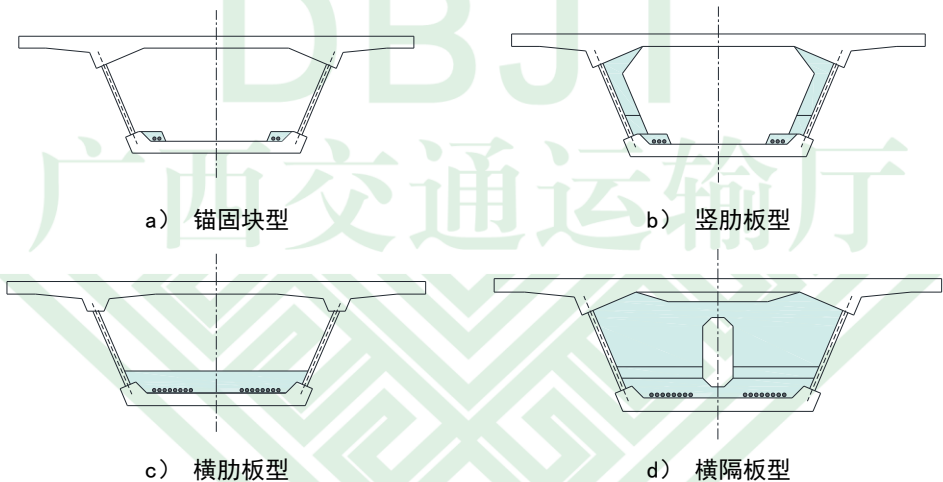


图10 转向结构构造形式

- 13.5.4 应重视转向结构主梁预应力产生的偏心力，并验证转向结构的安全性。

13.6 桥面板

- 13.6.1 桥面板设计的一般规定，可参照 JTG 3362 的有关规定执行。
- 13.6.2 桥面板最小厚度设计应符合安全性、施工性要求。两腹板间的桥面板按简支板计算，悬臂部分按悬臂板计算。
- 13.6.3 桥面板的计算跨径，可参照 JTG 3362 的有关规定。
- 13.6.4 桥梁可用平面框架模型进行横向计算分析，当桥面板跨径超过 6m 及单箱多室截面时，宜采用三维有限元模型进行分析。
- 13.6.5 正常使用极限状态下，桥面板横桥向荷载作用时按预应力混凝土桥面板计算应力或混凝土桥面

板计算裂缝。

13.6.6 正常使用极限状态下，荷载作用混凝土桥面板抗裂性按照 JTG 3362 的规定进行验算。

14 耐久性

14.1 一般规定

14.1.1 桥梁耐久性应根据结构的设计使用年限及其对应的极限状态、环境类别及其作用等级进行设计。

14.1.2 基于耐久性的概念设计是公路桥梁混凝土结构耐久性设计过程的核心内容，其实施过程应注意桥梁结构的可持续性，及基于对结构性能要求、环境作用及荷载作用的综合考虑制订。

14.2 耐久性设计

14.2.1 钢板耐久性保障措施，可采用耐候钢或防腐涂装。

14.2.2 波形钢腹板采用防腐涂装时，应符合 JT/T 722 的规定。

14.2.3 结合构造设计要求，可参考如下要求：

- 从混凝土配制、构造要求及施工工艺等方面防止接触面脱空；
- 除去接触面钢板的氧化皮；
- 波形钢腹板的防腐范围伸入钢—混凝土结合面不宜小于 20 mm；
- 钢—混凝土接触面做好防排水，必要时可设置密封胶等防水填塞料；
- 连接件表面无锈蚀、氧化皮、油脂和毛刺等缺陷。

14.2.4 应从材料、结构和构造三个方面出发，对施工过程提出以下规定：

- 严格控制混凝土、钢板的原材料质量；
- 确定合理的绑扎、钢板加工工艺；
- 在钢板、混凝土结合部位的施工过程中，应采取特别的耐久性能保障措施；
- 特殊情况下的施工，应注意针对实际情况，采取对应的有效措施保障施工质量。

14.2.5 管养设计要求应基于总成本优化的原则，针对不同的构件制定不同的管养对策；在管养设计中，应明确寿命周期中各项管养工作的类型，并明确基本工作范围和目标。