

公路钢混组合结构桥梁设计规程

2023 - 12 - 04 发布

2024 - 04 - 05 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	2
3.1 术语	2
3.2 符号	2
4 材料	4
5 总体设计	4
5.1 设计原则	4
5.2 结构形式	5
5.3 负弯矩区设计	7
6 构造设计	10
6.1 钢梁	10
6.2 桥面板	10
6.3 剪力连接件	12
7 钢混组合梁计算	13
7.1 基本规定	13
7.2 强度计算	14
7.3 稳定计算	14
7.4 疲劳计算	16
7.5 变形计算	16
7.6 裂缝宽度计算	17
7.7 桥面板抗剪计算	17
7.8 连接件计算	19
8 耐久性设计	20
8.1 一般规定	20
8.2 钢梁耐久性设计	21
8.3 钢混结合面耐久性设计	21
8.4 混凝土板耐久性设计	21
附录 A（规范性） 焊接接头疲劳计算	22

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。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：山西交科公路勘察设计院有限公司、山西省交通规划勘察设计院有限公司、中铁建投山西高速公路有限公司。

本文件主要起草人：王彬、季建东、邓洪宗、宋曰建、李晓燕、贾旭东、韩锋、庞新刚、傅卯生、臧博、王峰、张海君、常欣昱、侯云强、张雪峰。

公路钢混组合结构桥梁设计规程

1 范围

本文件规定了公路钢混组合结构桥梁的术语与符号、材料、构造、结构计算等相关内容。
本文件适用于山西省各等级新建、改扩建公路钢混组合结构桥梁的设计，同类城市桥梁可参照执行。
采用本文件进行公路钢混组合桥梁的设计时，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

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 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头螺母
- 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 5117 碳钢焊条
- GB/T 5118 低合金钢焊条
- GB/T 5293 埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂
- GB/T 8110 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝
- GB/T 10433 电弧螺栓焊用圆柱头焊钉
- GB 50017 钢结构设计标准
- GB 50205 钢结构工程施工质量验收规范
- GB 50917 钢-混凝土组合桥梁设计规范
- JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范
- JTG B01 公路工程技术标准
- 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
- JTG/T 4 公路桥梁板式橡胶支座
- JTG/T 3650 公路桥涵施工技术规范
- JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范
- JTG/T D64-01 公路钢混组合桥梁设计与施工规范
- JT/T 722 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

3.1.1

钢混组合梁

由外露钢梁与混凝土板通过剪力连接件形成整体并在横截面内能够共同受力的梁。

3.1.2

双层结合钢混组合梁

钢梁上翼缘与下翼缘均与混凝土板通过剪力连接件组合成整体截面共同受力的组合梁。

3.1.3

剪力连接件

将钢梁与混凝土两种材料连接在一起共同受力的构件，本规程简称连接件。

3.1.4

槽形钢箱组合梁

钢混组合梁外露钢梁由翼缘板、腹板、底板、横隔系及加劲肋等通过焊接组成开口钢箱梁，钢梁翼缘板焊接剪力连接件与混凝土板组合。

3.1.5

闭口钢箱组合梁

钢混组合梁外露钢梁由顶板、腹板、底板、横隔系及加劲肋等通过全焊接组成封闭的钢箱梁，钢梁翼缘板焊接剪力连接件与混凝土板组合。

3.1.6

叠合板桥面板

钢混组合梁外露钢梁上先铺设一层较薄的预制板，后在预制板上现浇混凝土叠合层形成的混凝土桥面板。

3.1.7

未开裂截面刚度

钢混组合梁截面刚度由有效宽度范围内的钢梁和混凝土板共同贡献。

3.1.8

开裂截面刚度

负弯矩区钢混组合梁截面刚度仅计有效宽度范围内的钢梁和钢筋作用，不计混凝土的抗拉贡献。

3.2 符号

3.2.1 材料力学性能符号

E_c ——混凝土的弹性模量；

E_s ——普通钢筋的弹性模量；

f_{ck} 、 f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{ctm} ——混凝土抗拉强度平均值；

f_d ——钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

f_{sd} ——普通钢筋抗拉强度设计值；

f_{td} ——混凝土轴心抗拉强度设计值；

f_{vd} ——钢材的抗剪强度设计值。

3.2.2 作用和作用效应的有关符号

- V_b ——单个剪力槽孔内集束式焊钉承载力设计值；
 V_q ——形成组合截面后作用于组合梁上的可变荷载产生的竖向剪力设计值；
 V_{IRd} ——单位长度内混凝土板纵向抗剪承载力；
 σ_{Ed} ——钢混组合梁混凝土板整体分析与局部分析组合效应；
 $\sigma_{glob,d}$ ——混凝土板整体受力分析效应；
 $\sigma_{loc,d}$ ——混凝土板局部受力分析效应；
 σ_{ss} ——混凝土桥面板钢筋纵向拉应力；
 $\Delta\sigma_s$ ——开裂混凝土的拉伸硬化效应引起的附加应力。

3.2.3 几何参数相关符号

- A_{cr} ——开裂截面面积；
 A'_{cr} ——由纵向普通钢筋、预应力钢筋与钢梁形成组合截面的面积；
 I_{cr} ——混凝土板开裂截面惯性矩；
 I'_{cr} ——由纵向普通钢筋、预应力钢筋与钢梁形成的组合截面的惯性矩；
 I_0 ——不考虑荷载长期效应组合梁换算截面惯性矩；
 I_1 ——考虑荷载长期效应组合梁换算截面惯性矩；
 S_0 ——不考虑荷载长期效应混凝土板对组合截面中性轴的面积矩；
 S_1 ——考虑荷载长期效应混凝土板对组合截面中性轴的面积矩；
 a_y ——集中荷载沿梁跨度方向的支撑长度；
 d_k ——预制混凝土板剪力槽纵向间距；
 d_{ss} ——焊钉连接件杆的直径；
 h_y ——钢梁翼缘板厚度；
 k_{ss} ——剪力连接件的抗剪刚度；
 l_c ——槽钢连接件的长度；
 l_d ——焊钉连接件的纵向间距；
 l_z ——集中荷载在腹板翼缘纵向假定分布长度；
 s_{lim} ——正常使用极限状态下结合面的滑移限值；
 s_{max} ——正常使用极限状态下结合面的最大滑移值；
 t_1 ——槽钢连接件翼缘平均厚度；
 t_2 ——槽钢连接件腹板厚度。

3.2.4 计算系数及其他有关符号

- β ——强度增大系数；
 κ_σ ——弯曲正应力作用下腹板屈曲系数；
 κ_τ ——剪应力作用下腹板屈曲系数；
 ν_B ——腹板板件局部稳定安全系数；
 ϕ ——钢梁腹板法向应力比值；
 ψ ——组合系数；
 ω ——刚度系数。

4 材料

4.1 钢-混凝土组合梁的主要受力构件中混凝土强度等级不应低于 C40。

注：高性能混凝土的应用是钢混组合结构桥梁发展的重要方向，合理使用高性能混凝土可以有效提高结构的受力性能和耐久性，对于有必要采用高性能混凝土的组合结构桥梁，其材料技术指标经过论证，可以突破本条规定。

4.2 预制桥面板剪力连接件预留孔及后浇湿接缝材料应采用补偿收缩混凝土，强度等级不低于预制桥面板的混凝土强度等级。

4.3 混凝土、普通钢筋及预应力钢筋的相关设计指标应符合 JTG 3362 的规定。

4.4 根据结构形式、受力状态及环境条件合理选择钢材，相关设计指标应符合 JTG D64、GB/T 714、GB/T 4171、GB/T 1591、GB/T 700 的规定。

注：钢混组合结构桥梁推荐采用桥梁用结构钢，在环境条件恶劣的情况下，推荐采用耐候钢。

4.5 钢混组合梁设置的圆柱头焊钉剪力连接件相关设计指标应符合 GB/T 10433 中的规定。

4.6 钢材焊接和栓接材料应与主体相匹配，相关设计参数应符合 JTG D64 的规定。

4.7 预制桥面板与钢梁结合面两侧应采用橡胶条密封，橡胶条宜采用天然橡胶，其力学性能指标应满足表 1 的规定。

表 1 橡胶密封条力学性能指标

技术指标		检验方法	技术要求
硬度 (IRHD)		GB/T 6031	60±5
拉伸强度 (MPa)		GB/T 528	≥18
拉断伸长率 (%)			≥400
脆性温度 (°C)		GB/T 1682	≤50
恒定压缩永久变形 (%) (70°C, 24h)		GB/T 7759.1	≤20
耐臭氧老化 (20%伸长, 40°C, 24h)		GB/T 7762	无龟裂
热空气老化试验 (70°C, 168h)	刚度变化 (IRHD)	GB/T 3512	-5~+10
	拉伸强度 (%)		≤15
	拉断伸长 (%)		≤20

5 总体设计

5.1 设计原则

5.1.1 公路钢混组合结构桥梁的设计基准期为 100 年。

5.1.2 公路钢混组合结构桥梁设计应结合建设条件，综合考虑结构受力、架设方案、工程造价、安全性、耐久性、运营养护等因素合理确定结构形式、桥跨布置及截面构造。

5.1.3 钢混组合梁桥一般由钢梁、横向联结系（横隔板）、混凝土桥面板、剪力连接件等部分组成。钢混组合梁的钢梁可采用工字形钢梁、槽形（开口）钢箱梁及闭口钢箱梁，混凝土桥面板可采用预制桥面板、现浇桥面板或叠合板桥面板，闭口钢箱组合梁部分宜采用现浇桥面板，剪力连接件可采用圆柱头焊钉、开孔钢板及槽钢。

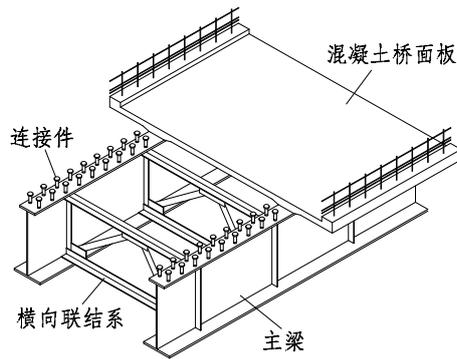


图1 钢混组合梁构造示意图

5.1.4 钢混组合梁构造尺寸应保证具有合理的抗弯、抗扭刚度，梁截面中性轴宜位于钢梁截面范围内。

5.2 结构形式

5.2.1 跨径布置

公路工字钢组合梁桥适用跨径通常在30m~70m范围内，等跨径布置时宜采用30m~50m标准化设计，非标准化设计时边中跨比宜为0.6~0.8；跨径大于70m组合梁的钢梁宜采用槽形或闭口钢箱梁，边中跨比宜为0.6~0.8。

5.2.2 立面布置

简支工字钢组合梁桥高跨比约为 $1/22 \sim 1/24$ ；连续等高度工字钢组合梁桥高跨比约为 $1/24 \sim 1/28$ ，跨径大于50m取小值，跨径30m左右时取大值，变截面支点高跨比约为 $1/22 \sim 1/24$ ，跨中约为 $1/34 \sim 1/36$ 。

简支钢箱组合梁桥高跨比约为 $1/20 \sim 1/24$ ；连续等高度钢箱组合梁桥高跨比约为 $1/16 \sim 1/25$ ，变高度钢箱组合梁支点高跨比约为 $1/15 \sim 1/23$ 、跨中约为 $1/32 \sim 1/45$ 。

当钢梁与混凝土板结合采用有支撑施工时，梁的高跨比取小值，采用无支撑施工时取大值。

5.2.3 横断面结构形式

5.2.3.1 双工字钢组合梁一般用于桥面宽度低于13m的桥梁，双工字钢腹板间距约为0.55倍的桥面宽度；当桥面宽度较大、结构高度受限或避免桥面板设置横向预应力时可采用横向多工字钢组合梁结构形式，悬臂长度不宜大于2m，钢梁横向宜等间距布置。

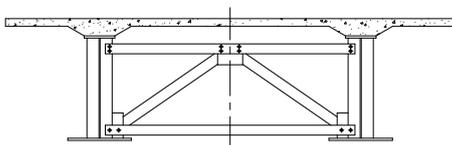


图2 双工字钢组合梁断面

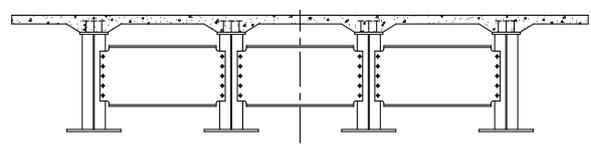


图3 横向多工字钢组合梁断面

5.2.3.2 钢箱组合梁根据钢梁顶板是否开孔分为开口钢箱梁（槽型钢梁）和闭口钢箱梁两种结构形式，根据施工过程中钢梁受力需求进行选择；横断面可分为单箱单室、单箱多室及横向长悬臂截面等形式；单箱单室组合梁适用于桥面板宽度小于20m，钢箱梁顶板宽度约为0.5倍的桥面宽度；桥面宽度大于20m时可采用单箱多室或大悬臂+斜撑截面形式，其中大悬臂钢梁顶板宽度约为 $1/3$ 倍的桥面宽度。

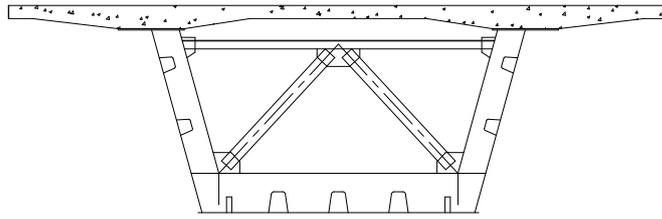


图 4 单箱单室钢混组合梁断面

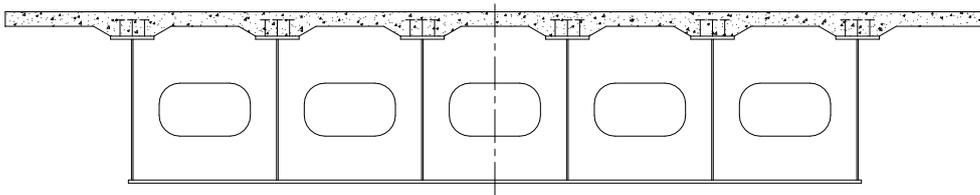


图 5 单箱多室钢混组合梁断面

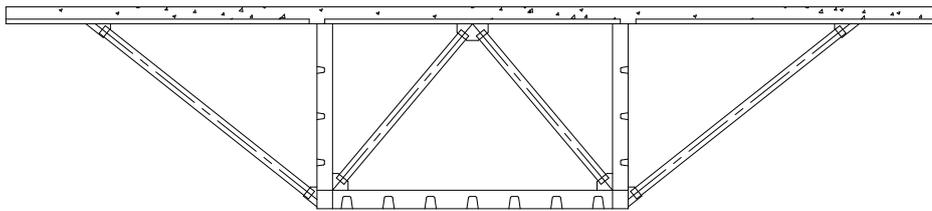


图 6 横向长悬臂钢混组合梁断面

5.2.4 横向连接系

5.2.4.1 横向布置多片钢混组合梁时，支撑处必须设置端横梁，跨内横向连接系一般等间距布置，常用纵向间距 4m~8m，当横向连接系上缘与桥面板结合时取小值，反之取大值。斜交角度较小时（小于 20° ），横向连接系沿支座方向布置；斜交角度较大时，横向连接系与主梁宜正交布置。

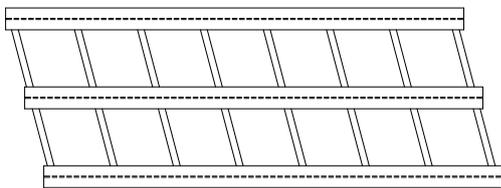


图 7 横向连接系斜交布置示意图

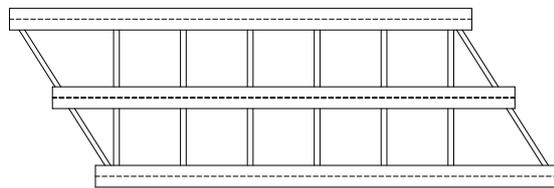


图 8 横向连接系正交布置示意图

5.2.4.2 钢箱组合梁横向连接系一般由实腹式横隔板和框架式横隔板组成，支撑处必须设置实腹式横隔板。框架式横隔板一般由顶板横向加劲肋（闭口钢箱）、腹板竖向加劲肋、底板横向加劲肋及加劲斜撑组成，沿纵向等间距布置，直线段不宜大于 6m，曲线段由计算确定。当平面曲率较大、扭转效应突出时，可采用实腹式横隔板替代。

5.2.5 桥面板

5.2.5.1 钢混组合梁混凝土桥面板根据施工方法、结构形式及组合方式可采用现浇桥面板、预制桥面板和叠合板桥面板，桥面板的选用根据受力状况、施工条件及工程造价等综合确定。

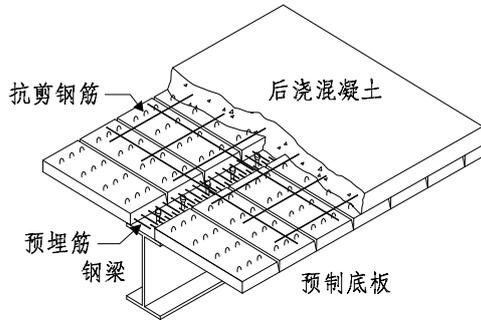


图9 叠合板组合梁构造图

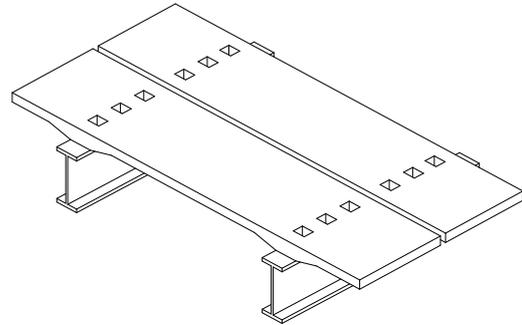


图10 预制板组合梁构造图

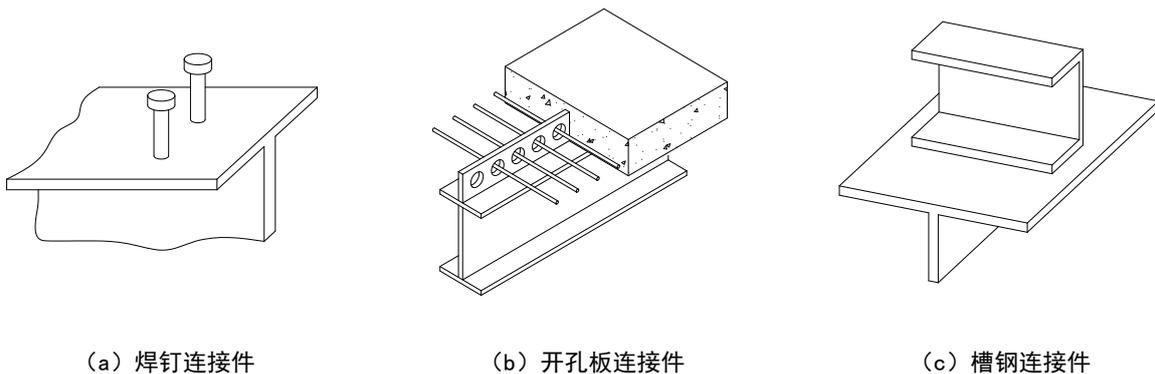
5.2.5.2 当桥面板采用预制桥面板和叠合板桥面板时,应采取有效措施保证新老混凝土结合共同受力。

5.2.5.3 钢混组合梁混凝土桥面板厚度沿顺桥向一般保持不变,横桥向等厚度板变化范围一般为24cm~32cm;钢梁腹板间距大于6m的横向受力桥面板宜采用变厚度板,跨中及挑臂板厚为24cm~30cm,钢梁腹板处板厚40cm~55cm,板厚通过加腋过渡,加腋长度为0.2倍~0.25倍的钢梁腹板间距。

5.2.6 剪力连接件

5.2.6.1 组合梁的剪力连接件应能够承担钢梁和混凝土板间的纵桥向剪力和横桥向剪力,同时应能抵抗混凝土板与钢梁间的掀起作用。

5.2.6.2 钢混组合梁的剪力连接件常用焊钉、开孔钢板及槽钢连接件。



(a) 焊钉连接件

(b) 开孔板连接件

(c) 槽钢连接件

图11 常用剪力连接件形式

5.2.6.3 钢与混凝土结合面剪力作用方向不明确时应选用焊钉连接件,焊钉连接件可采用均布式或集束式布置。

5.2.6.4 钢与混凝土结合面对抗剪刚度、抗疲劳性能要求较高时,宜选用开孔钢板连接件。

5.2.6.5 钢与混凝土结合面对抗剪刚度要求很高时,可选用槽钢连接件。

5.3 负弯矩区设计

5.3.1 连续钢混组合梁桥中支点负弯矩区钢梁底板应满足承载力和稳定性要求。

5.3.2 负弯矩区钢混组合梁桥面板宜按限值裂缝宽度法控制设计，计算方法见本规程第7章。

5.3.3 为降低负弯矩区桥面板拉应力可采取双层结合构造、张拉预应力、支点升降及桥面板间断施工法等优化措施，具体优化过程如下：

- a) 双层结合构造是指钢梁上下翼缘均与混凝土板结合，下翼缘混凝土板仅布设在支点附近范围，一方面与钢梁下翼缘共同受压，提高了钢梁抗屈曲能力，降低了钢板厚度，另一方面与上翼缘混凝土桥面板共同作用，增大了结构刚度，减少了混凝土桥面板的裂缝宽度。

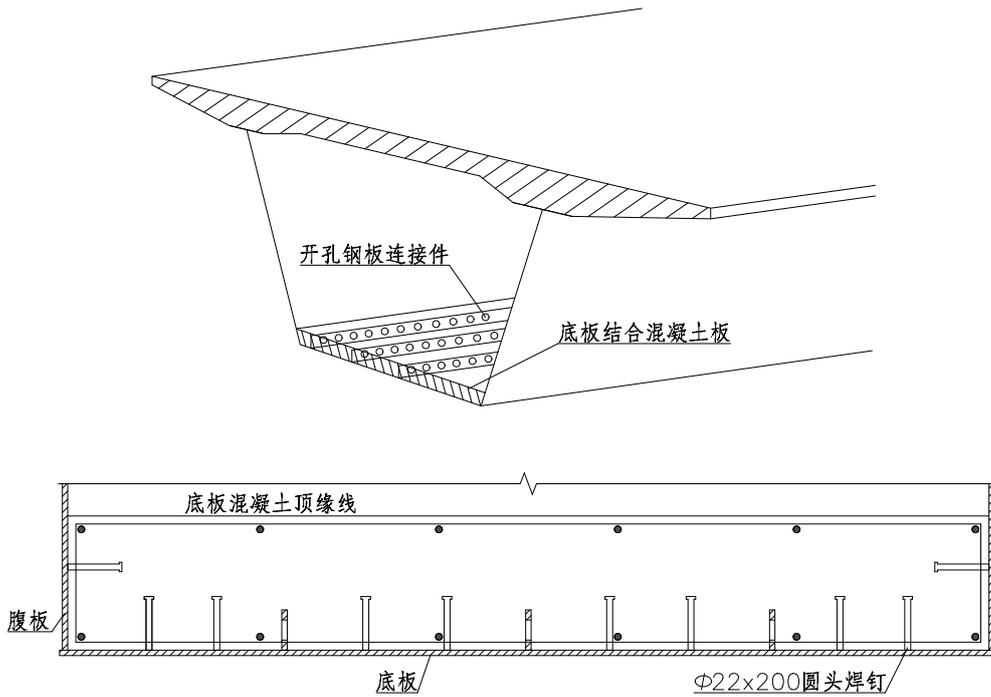
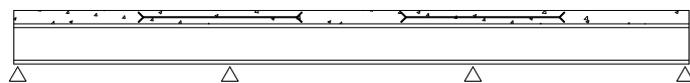
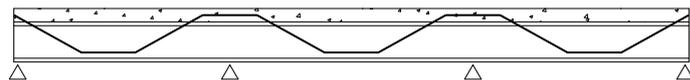


图 12 钢混组合梁双层结合构造示意图

- b) 张拉预应力是通过张拉预应力钢束对钢混组合梁负弯矩区桥面板施加轴向压力，一般有体内预应力法和体外预应力法，其中体内预应力是混凝土桥面板张拉完预应力后再与钢梁结合，体外预应力是桥面板与钢梁结合后再张拉预应力钢束。



(a) 连续钢混组合梁张拉体内预应力钢束布置



(b) 连续钢混组合梁张拉体外预应力钢束布置

图 13 张拉预应力钢束施加预应力

- c) 连续体系的桥梁，支点的竖向位移影响结构的内力分布，混凝土桥面板浇筑前后，通过调整支点的相对高度，可在负弯矩区混凝土内形成预压力。当连续钢混组合结构桥梁跨数较少时，可同时顶升中支点，混凝土板与钢梁结合后再回落支点；当跨数较多时，依次顶升中间支点，

浇筑该支点附近混凝土板，待结合硬化后再回落支点，如此循环施工至全桥混凝土板施工完成。

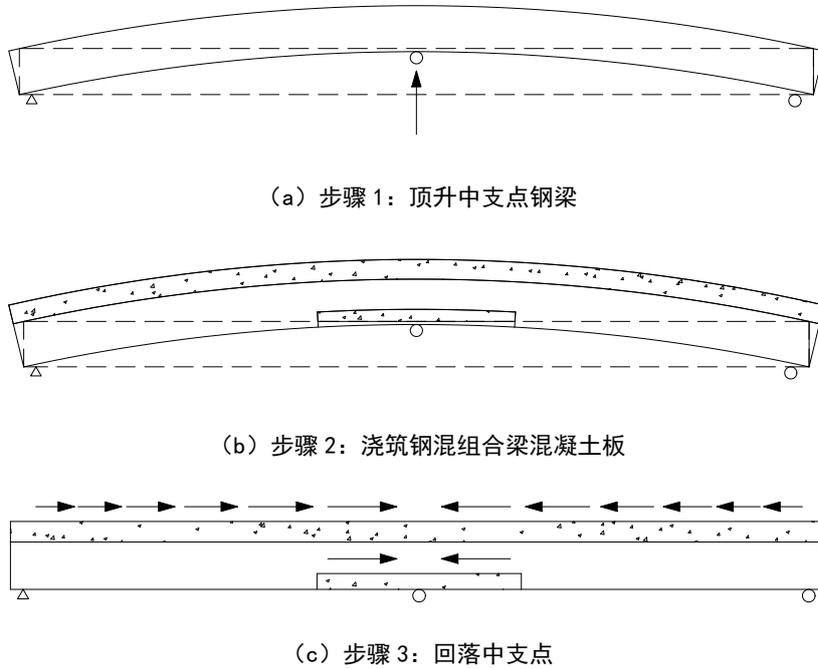


图 14 中间支点同时顶升施加预压力示意图

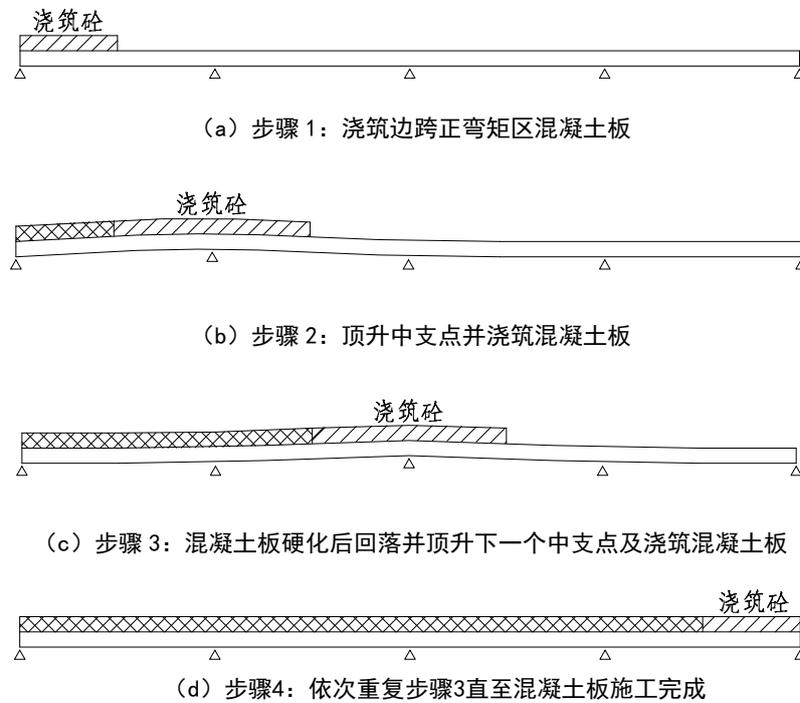


图 15 中间支点依次顶升施加预压力示意图

- d) 混凝土桥面板间断施工法是先施工正弯矩区混凝土桥面板，待混凝土硬化后再施工负弯矩区桥面板，该方法同时适用于现浇及预制桥面板施工。

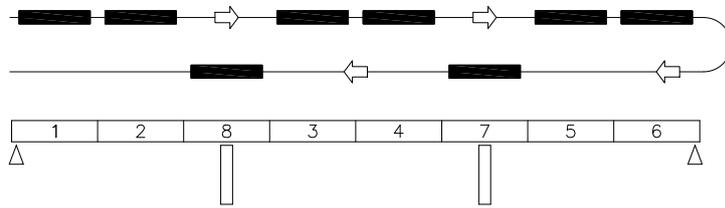


图 16 间断施工法示意图

5.3.4 钢混组合梁双层结合构造底板混凝土布置范围为支点两侧各 0.15 倍~0.2 倍的跨径长度，板厚 300mm~600mm。

6 构造设计

6.1 钢梁

- 6.1.1 根据结构受力特点、运输条件、架设方案、施工工期等因素，对钢梁进行纵、横向分块。
- 6.1.2 钢梁焊接剪力连接件钢板厚度不小于 16mm，腹板厚度不小于 12mm，填板厚度不小于 4mm。
- 6.1.3 长挑臂钢箱组合梁钢管斜撑一般采用方钢管或圆钢管截面，通过内插节点板与钢梁焊接或栓接，焊缝应采用熔透焊，受压斜撑不宜开过焊孔。
- 6.1.4 钢梁架设阶段（未与混凝土桥面板结合）宜在钢梁开口翼缘增设纵向连接系承受水平荷载和偏心荷载引起的扭矩作用，一般常用 X 形、菱形及 K 形。

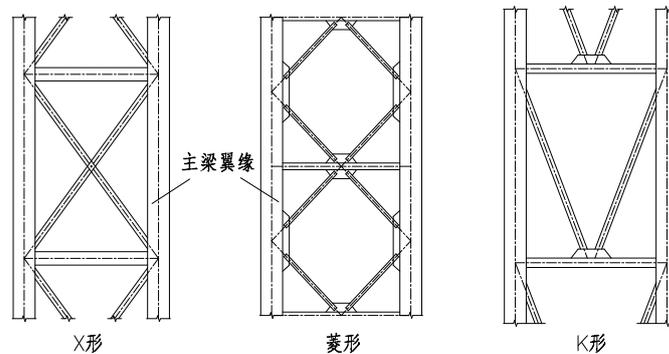


图 17 钢梁开口翼缘增设纵向连接系示意图

6.1.5 钢梁翼缘、腹板和横向连接系的构造应符合现行 JTG D64 的相关规定。

6.2 桥面板

6.2.1 根据运输条件及吊装能力对预制桥面板进行纵、横向分块，横向宽度一般小于 7m，纵向分块长度不宜大于 6m。

注：单块预制桥面板重量不宜大于 30t。

- 6.2.2 预制桥面板安装前存放期不宜小于 180 天。
- 6.2.3 当桥面板设置承托时，承托的构造应符合下列规定：

- a) 当承托高度大于 80mm 时，应在承托底设置横向加强钢筋。
- b) 承托边至连接件外侧的距离不得小于 40mm，承托外形轮廓应在最外侧连接件根部起的 45° 角线的界限以外。

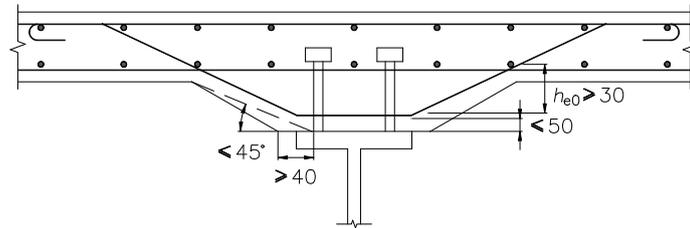


图 18 承托构造图（尺寸单位：mm）

6.2.4 桥面板下层横向钢筋距钢梁翼缘不应大于 50mm，剪力连接件掀起端底面高出下层横向钢筋的距离 h_{e0} 不得小于 30mm，下层横向钢筋间距不应大于 $4h_{e0}$ 且不应大于 300mm。

6.2.5 钢混组合梁桥面板的配筋应满足下列要求：

- a) 桥面板钢筋应满足桥梁整体受力需求，且应满足局部荷载引起的效应。
- b) 单位长度桥面板内横向钢筋总面积应满足下式要求：

$$A_e > \frac{\eta b_l}{f_{sd}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

A_e ——单位长度内垂直于主梁方向上的钢筋截面面积 (mm^2/mm)，且配筋率不小于 0.2%；

η ——系数，取为 $0.75\text{N}/\text{mm}^2$ ；

b_l ——纵向抗剪界面在垂直于主梁方向上的长度，按本规程 7.7.1 条所示的 a-a、b-b、c-c、d-d 连线在剪力连接件以外的最短长度取值 (mm)；

f_{sd} ——普通钢筋强度设计值 (MPa)。

- c) 桥面板钢筋可根据不同受力区段选择不同的配筋率，主受力方向钢筋可置于外侧，负弯矩区纵向钢筋最小配筋率不低于 1.5%，正弯矩区不低于 1%。
- d) 桥面板剪力集中作用的部位应设置加强钢筋，条件允许时应垂直主拉应力方向布置。

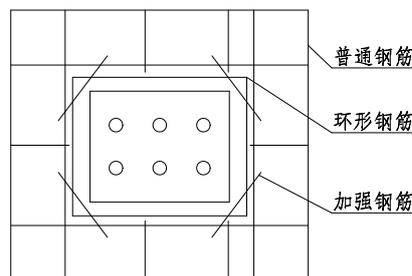


图 19 剪力集中部位加强钢筋示意图

6.2.6 预制桥面板与钢梁翼缘搭接长度不小于 50mm，且用橡胶条进行密封，板的四周和顶面应进行人工凿毛保证粗骨料出露，凿毛深度不小于 5mm。

6.2.7 预制桥面板现浇湿接缝宽度不宜小于 500mm，常用形式有直钢筋湿接缝、环形钢筋湿接缝和弧形钢筋湿接缝；湿接缝钢筋宜采用焊接接头，双面焊缝长度不应小于 5 倍的钢筋直径，单面焊缝不应小于 10 倍的钢筋直径，弧形钢筋的锚固长度不应小于 30 倍的钢筋直径；现浇混凝土宜采用补偿收缩混凝土。

土，保温保湿养护 7 天以上，负弯矩区可掺加增强纤维以提高抗裂性能。

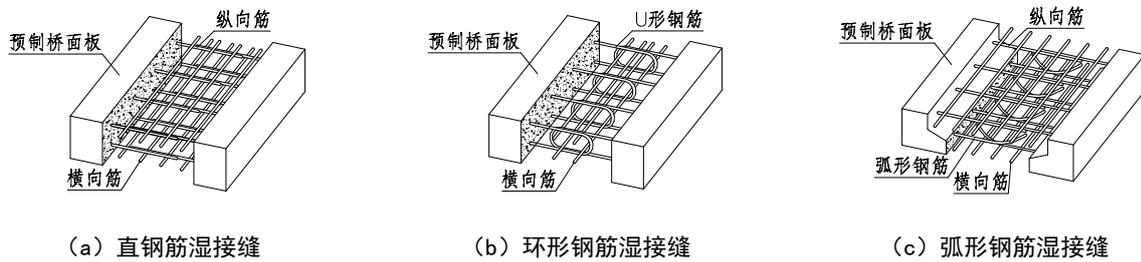


图 20 湿接缝示意图

6.3 剪力连接件

6.3.1 焊钉连接件构造应满足下列规定：

- a) 焊钉连接件长度不小于 4 倍的焊钉直径，当有直接拉拔力作用时不宜小于 10 倍的焊钉直径。
- b) 焊钉连接件的间距不宜超过 300mm，沿剪力作用方向不小于 5 倍的焊钉直径且不小于 100mm，沿剪力垂直方向不小于 2.5 倍的焊钉直径且不小于 50mm。
- c) 焊钉连接件的外侧边缘距焊接钢梁板件边缘不小于 25mm。
- d) 焊钉连接件的外侧边缘距混凝土桥面板边缘不小于 100mm，焊钉连接头下表面距桥面板底部钢筋不小于 30mm，混凝土保护层厚度不小于 15mm。

6.3.2 开孔钢板连接件构造应满足下列规定：

- a) 开孔钢板连接件的材质应与焊接钢梁板件一致，板厚不小于 12mm，采用双面角焊缝焊接。
- b) 开孔钢板多列布置时，相邻间距不宜小于 3 倍的钢板高度。
- c) 开孔钢板孔径不宜小于贯通钢筋直径和骨料最大粒径之和。
- d) 开孔钢板连接件贯通钢筋应采用螺纹钢，直径不小于 12mm，宜居中布置。
- e) 开孔钢板连接件的相邻两孔最小边缘间距应满足下式要求：

$$e > \frac{V_{su}}{t f_{vd}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

V_{su} ——开孔钢板连接件抗剪承载力设计值（N）；

t ——开孔钢板厚度（mm）；

f_{vd} ——开孔钢板抗剪强度设计值（MPa）。

6.3.3 槽钢连接件构造应满足下列规定：

- a) 槽钢连接件钢材牌号不低于 Q235，截面不宜大于 [12.6。
- b) 槽钢连接件最大间距不宜超过 500mm，当焊接 U 形钢筋时直径不小于 16mm，顶面混凝土保护层厚度不应小于 15mm，外侧边缘距焊接钢梁板件边缘不应小于 25mm，且距混凝土板边缘不应小于 100mm。
- c) 槽钢连接件上翼缘下表面距混凝土板底层钢筋距离不宜小于 30mm。

6.3.4 剪力连接件处混凝土应填充充实保证与连接件良好接触，宜保温保湿养护 7 天以上，受混凝土收缩徐变影响部位宜采用补偿收缩混凝土，可掺加增强纤维以提高抗裂性能。

7 钢混组合梁计算

7.1 基本规定

7.1.1 钢混组合梁应根据组合截面形成过程，对相应的结构体系和各工况进行计算。

7.1.2 钢混组合结构桥梁设计应考虑运营阶段和施工阶段可能同时出现的作用、按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行荷载组合，进行以下验算：

- 承载能力极限状态进行持久状况及偶然状况下构件截面承载力、稳定、倾覆和疲劳计算。
- 正常使用极限状态进行持久状况下应力、构件变形和混凝土抗裂计算。
- 短暂状况结构受力状态进行施工等工况的验算。
- 当钢与混凝土组合桥梁进行截面承载力、整体稳定、抗剪连接件承载力计算时，作用的效应组合应采用现行标准 JTG D60 的基本组合；当进行支座脱空、挠度验算及疲劳计算时，作用的效应组合应采用标准组合；混凝土结构抗裂验算时，作用采用短期效应组合。

7.1.3 连续钢混组合结构桥梁整体计算应符合下列规定：

- 应采用线弹性分析方法，考虑温度、混凝土收缩徐变、混凝土开裂、剪力滞效应、钢梁受压折减、施工方法及结合过程的影响。
- 整体计算可不考虑钢梁与混凝土桥面板之间的滑移效应。
- 混凝土桥面板按全预应力混凝土或部分预应力混凝土 A 类构件设计时，应采用未开裂分析方法。
- 混凝土板按部分预应力混凝土 B 类或普通钢筋混凝土构件设计时，应采用开裂分析方法，中间支座两侧开裂区钢混组合梁截面刚度取开裂截面刚度，其余区段组合梁截面刚度取未开裂截面刚度。整体分析计算标准荷载组合下，桥面板最大拉应力大于 2 倍的混凝土轴心抗拉强度平均值 f_{ctm} 的范围作为开裂区，开裂截面刚度仅考虑钢梁及有效宽度范围内纵向钢筋的作用。

7.1.4 钢混组合梁混凝土板考虑汽车荷载引起的局部受力分析时，整体分析与局部分析按下式进行效应组合：

$$\sigma_{Ed} = \max(\sigma_{loc,d} + \psi\sigma_{glob,d}, \psi\sigma_{loc,d} + \sigma_{glob,d}) \quad (3)$$

式中：

σ_{Ed} ——钢混组合梁混凝土板整体分析与局部分析组合效应；

$\sigma_{loc,d}$ ——混凝土板局部受力分析效应；

$\sigma_{glob,d}$ ——混凝土板整体受力分析效应；

ψ ——组合系数，桥梁计算跨径 $L_0 \leq 20\text{m}$ 时， $\psi=1.0$ ； $L_0 \geq 40\text{m}$ 时， $\psi=0.7$ ；其余内插。

7.1.5 钢梁翼缘有效分布宽度和局部稳定受压折减系数按现行 JTG D64 的相关规定计算，受压翼缘与混凝土结合后可不考虑局部稳定受压折减系数，但应考虑施工及钢梁与混凝土板结合顺序的影响。

7.1.6 钢混组合梁混凝土板有效宽度按现行 JTG D64 的相关规定计算。

7.1.7 钢混组合结构梁温度效应、混凝土收缩徐变应按现行 JTG/T D64-01 相关规定进行计算，并符合下列要求：

- 钢混组合梁温度效应计算不考虑桥面板开裂的影响，宜采用双单元法建立有限元分析模型。
- 钢材与混凝土材料的温度线膨胀系数基本相当，当组合结构桥梁随环境温度整体变化时，钢梁与混凝土板的温度变形基本协调，可不计由此引起的温度应力，但当环境温度剧烈变化时，由于钢材导热系数约为混凝土材料的 50 倍，钢梁温度很快达到环境温度，此时钢梁与混凝土板间就产生了温度差，钢材的温度变形受混凝土板的约束将引起截面应力重分布，从而在组

合梁截面上产生自平衡的应力。组合结构桥梁的温度应力主要由钢梁和混凝土板之间的温度差引起，除温度差特别显著外，钢梁和混凝土板的温度差可取 10°C 简化计算。

- c) 无可靠技术资料时，混凝土收缩采用等效降温简化计算，现浇混凝土板收缩效应可取钢梁与混凝土板之间温差-15°C 进行分析。
- d) 预制桥面板可不考虑混凝土收缩徐变，现浇无收缩混凝土可按 0.5 倍的收缩效应计算。
- e) 超静定钢混组合结构桥梁混凝土桥面板收缩徐变效应宜按有限元法进行计算。

7.2 强度计算

7.2.1 钢混组合结构梁抗弯承载力、竖向抗剪承载力按现行 JTG/T D64-01 的相关规定进行计算，并符合下列要求：

- a) JTG/T D64-01 中关于混凝土抗弯承载力的规定适用于混凝土板受压验算，对于混凝土受拉应按裂缝宽度控制验算。
- b) 钢混组合梁抗弯承载力应考虑施工、剪力滞效应及钢梁受压折减的影响，计算负弯矩区抗弯承载力时应不计开裂混凝土的影响，但考虑混凝土板有效宽度范围内纵向钢筋的贡献。
- c) 钢混组合梁竖向剪力完全由钢梁腹板承担，忽略混凝土板及钢梁翼缘的抗剪作用。

7.2.2 钢混组合梁竖向承受集中荷载作用时计算应符合下列规定：

- a) 集中荷载沿腹板平面作用位置处未设置支撑加劲肋时，腹板局部压应力应按下列公式计算：

$$\sigma_c = \frac{\gamma_0 F}{t_w l_z} \leq f_d \quad \text{..... (4)}$$

$$l_z = a_y + 2h_y \quad \text{..... (5)}$$

式中：

F ——集中荷载设计值 (N)；

l_z ——集中荷载在腹板翼缘纵向假定分布长度 (mm)；

a_y ——集中荷载沿梁跨度方向的支撑长度 (mm)；

h_y ——钢梁翼缘板厚度 (mm)。

- b) 集中荷载沿腹板平面作用位置处设置支撑加劲肋时，支撑加劲肋可按现行 JTG D64 的相关规定计算。

7.2.3 钢混组合梁腹板计算高度处，若同时承受较大的正应力、剪应力和局部压应力，或同时承受较大的正应力和剪应力时，腹板最大折算应力应按下列公式计算：

$$\sqrt{\sigma^2 + \sigma_c^2 - \sigma\sigma_c + 3\tau^2} \leq \beta f_d \quad \text{..... (6)}$$

式中：

σ 、 τ 、 σ_c ——钢梁腹板同一点上同时产生的正应力、剪应力和局部压应力 (MPa)；

β ——强度增大系数，当 σ 与 σ_c 异号，取为 1.2，否则为 1.1。

7.3 稳定计算

7.3.1 钢混组合梁整体稳定计算应符合下列规定：

- a) 钢混组合梁施工阶段及运营阶段应具有足够的侧向刚度和侧向约束，以保证钢梁不发生整体失稳，整体稳定验算应符合现行 JTG D64 的相关规定。
- b) 混凝土桥面板与钢梁可靠连接能防止钢梁侧向位移时，可不进行整体稳定性验算。

- c) 连续钢混组合梁负弯矩区钢梁为箱型断面或者下翼缘有可靠侧向约束，且腹板有加劲措施时，可不进行负弯矩区侧扭稳定性验算，否则应按 JTG/T D64-01 的规定对钢梁侧扭稳定性进行验算。

7.3.2 钢混组合梁局部稳定计算应符合下列规定：

- a) 钢混组合梁加劲肋应结合钢梁架设方案进行设计，设计方法应按现行 JTG D64 的相关规定执行。
- b) 钢混组合梁腹板由纵、横向加劲肋分割的每个区格，在弯矩正应力和剪应力共同作用下局部稳定安全系数应满足下式要求：

$$\nu = \frac{1}{\frac{1+\phi}{4} \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \sqrt{\left(\frac{3-\phi}{4} \frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2}} \geq \nu_B \left(\frac{1}{R}\right)^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\nu_B = 1.25 + (0.3 + 0.15\phi)e^{(-4.3\eta)} \geq 1.25 \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_{cr} = \kappa_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau_{cr} = \kappa_\tau \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$R = 0.9 - 0.1\phi \dots\dots\dots (11)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\max(\sigma_1, \sigma_2)} \dots\dots\dots (12)$$

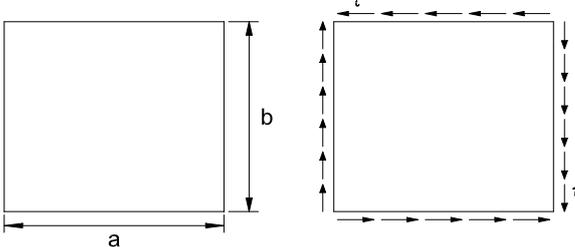
式中：

- ν_B —— 腹板板件局部稳定安全系数；
- κ_σ 、 κ_τ —— 弯曲正应力和剪应力作用下腹板屈曲系数，计算方法见表2；
- σ_1 、 σ_2 —— 腹板区格上下缘应力；
- ϕ —— 钢梁腹板法向应力比值。

表 2 组合梁钢梁腹板屈曲系数

正应力分布（受压为“+”）						
$\phi = \sigma_2 / \sigma_1$	$\phi = 1$	$1 > \phi > 0$	$\phi = 0$	$0 > \phi > -1$	$\phi = -1$	$-1 > \phi > -3$
κ_σ	4.0	$8.2 / (1.05 + \phi)$	7.81	$7.81 - 6.29\phi + 9.78\phi^2$	23.9	$5.98(1 - \phi)^2$

表2 组合梁钢梁腹板屈曲系数（续）

剪应力		
		
边长比	$\alpha = \frac{a}{b} \geq 1$	$\alpha = \frac{a}{b} < 1$
K_τ	$K_\tau = 5.34 + \frac{4.0}{\alpha^2}$	$K_\tau = 4.0 + \frac{5.34}{\alpha^2}$

7.4 疲劳计算

7.4.1 钢混组合梁的抗疲劳设计应符合下列规定：

- 受汽车荷载作用的结构构件及连接应进行疲劳验算。
- 桥梁设计使用年限内不应发生疲劳破坏。
- 钢混组合梁疲劳验算应采用弹性分析方法。
- 钢混组合梁疲劳荷载的选取应符合现行 JTG D64 的相关规定，疲劳荷载计算模型Ⅲ采用单车道加载，加载位置位于慢车道（重车道）中间。

7.4.2 钢混组合梁应按下列规定进行疲劳验算：

- 钢混组合梁的钢梁及连接的疲劳设计与计算应符合现行 JTG D64 的相关规定。
- 钢混组合梁的剪力连接件疲劳计算应符合现行 JTG/T D64-01 的相关规定。
- 桁架式横隔系采用管-板焊接接头与钢梁连接时，接头疲劳计算参照附录 A 执行。
- 组合梁混凝土桥面板可不进行疲劳验算。

7.5 变形计算

7.5.1 钢混组合结构桥梁竖向挠度限值应符合下列规定：

- 简支钢混组合结构桥梁竖向挠度不超过计算跨径的 1/900。
- 连续钢混组合结构桥梁竖向挠度不超过计算跨径的 1/500。
- 钢混组合梁的悬臂端部竖向挠度不超过悬臂长度的 1/300。

7.5.2 钢混组合结构桥梁计算正常使用极限状态下的竖向挠度时，应考虑混凝土板开裂、收缩徐变及预应力的影响，并满足下列规定：

- 简支钢混组合梁截面刚度可取考虑滑移效应的折减刚度。
- 连续钢混组合梁采用未开裂分析方法时，全桥均应考虑滑移效应的折减刚度。
- 连续钢混组合梁采用开裂分析方法时，按 7.1.3 条计算的开裂区范围内组合梁截面刚度采用开裂截面刚度，其余区段可采用考虑滑移效应的折减刚度。
- 折减刚度计算按现行 JTG/T D64-01 的相关规定执行。

7.5.3 钢混组合结构桥梁应设置预拱度，预拱度值应根据实际需要确定，宜为结构自重标准值和 1/2 车道荷载（不计冲击）频遇值所产生的竖向挠度之和，频遇值系数为 1.0，并考虑施工方法和顺序的影响。预拱度设置应保持桥面曲线平顺，连续钢混组合梁线性宜采用三角函数曲线。

7.5.4 组合梁桥面板混凝土收缩徐变效应对挠度变化影响显著，在设计时应考虑减少混凝土的收缩作用的措施，如混凝土采用补偿收缩混凝土或纤维增强混凝土、桥面板采用预制桥面板、调整桥面板浇筑顺序等。

7.6 裂缝宽度计算

7.6.1 钢混组合梁负弯矩区混凝土板在正常使用极限状态下最大裂缝宽度 w_{rk} 应按现行 JTG 3362 的相关规定计算。

7.6.2 开裂截面整体受力纵向受拉钢筋的应力由作用(或荷载)频遇组合效应引起的应力 σ_{ss} 和开裂混凝土的拉伸硬化效应引起的附加应力 $\Delta\sigma_s$ 组成，应满足以下要求：

a) 钢筋混凝土板应按下式计算：

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s y_s}{I_{cr}} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

M_s ——形成钢混组合梁后，按频遇值荷载组合效应计算的弯矩值；

y_s ——钢筋截面形心至开裂截面中性轴的距离；

I_{cr} ——开裂截面惯性矩。

b) B类部分预应力混凝土板应按下式计算：

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s \pm M_{p2} - N_p y_p}{I_{cr}'} y_{ps} \pm \frac{N_p}{A_{cr}'} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

M_{p2} ——由预应力在连续钢混组合梁等超静定结构中产生的次弯矩；

N_p ——考虑损失后的预应力合力；

y_p ——预应力钢筋合力点至普通钢筋、预应力钢筋及钢梁形成的组合截面中性轴的距离；

y_{ps} ——预应力钢筋和普通钢筋的合力点至普通钢筋、预应力钢筋及钢梁形成的组合截面中性轴的距离；

I_{cr}' ——由普通钢筋、预应力钢筋及钢梁形成的组合截面的惯性矩；

A_{cr}' ——由普通钢筋、预应力钢筋及钢梁形成的组合截面面积。

c) 开裂混凝土的拉伸硬化效应引起的附加应力计算：

$$\Delta\sigma_s = \frac{0.4 f_{ctm}}{\alpha_{st} \rho_s} \dots\dots\dots (15)$$

$$\alpha_{st} = \frac{A_{cr} I_{cr}}{A_s I_s} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

f_{ctm} ——混凝土抗拉强度平均值 (MPa)，参照欧洲规范4 (EuroCode 4) 取值；

ρ_s ——桥面板配筋率；

A_{cr} 、 I_{cr} ——分别为开裂截面面积和惯性矩；

A_s 、 I_s ——分别为钢梁截面面积和惯性矩。

7.7 桥面板抗剪计算

7.7.1 钢混组合梁混凝土桥面板纵向抗剪验算时，应分别验算图 21 所示的纵向抗剪界面 a-a、b-b、

c-c 及 d-d。

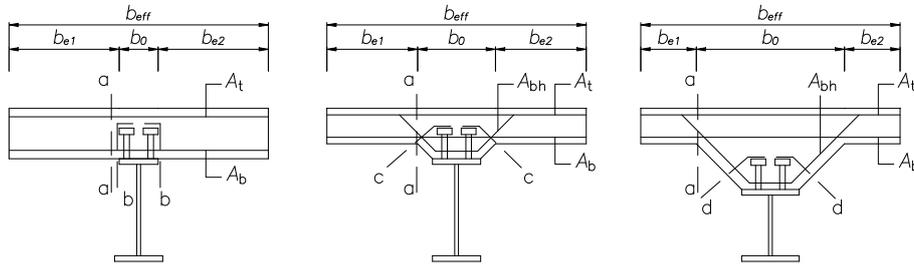


图 21 混凝土板纵向抗剪界面

注： A_t —混凝土板上缘单位长度内垂直于主梁方向的钢筋面积总和（ mm^2/mm ）； A_b 、 A_{bh} —混凝土板下缘、承托底部单位长度内垂直于主梁方向的钢筋面积总和（ mm^2/mm ）。

7.7.2 荷载引起的单位长度内纵向抗剪界面上纵向剪力应符合下列规定：

a) 单位长度上 b-b、c-c 及 d-d 纵向抗剪界面的纵向剪力 V_{ld} 应按下列式计算：

$$V_{ld} = V_1 \dots\dots\dots (17)$$

b) 单位长度上 a-a 纵向抗剪界面的纵向剪力 V_{ld} 应按下列式计算：

$$V_{ld} = \frac{V_1}{b_{eff}} \max(b_{e1}, b_{e2}) \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- V_1 ——单位长度内钢与混凝土结合面上的纵向剪力，按 7.8.1 条计算；
- b_{e1} 、 b_{e2} ——桥面板左右两侧在 a-a 界面以外的混凝土板有效宽度，如图 21 所示；
- b_{eff} ——混凝土桥面板有效宽度。

7.7.3 混凝土桥面板纵向抗剪验算应符合下列规定：

$$V_{ld} \leq V_{IRd} \dots\dots\dots (19)$$

$$V_{IRd} = \min(0.7f_{ld}b_f + 0.8A_c f_{sd}, 0.25f_{cd}b_f) \dots\dots\dots (20)$$

式中：

- f_{ld} ——混凝土轴心抗拉强度设计值（MPa）；
- f_{cd} ——混凝土轴心抗压强度设计值（MPa）；
- A_c ——单位长度内垂直于主梁方向上的钢筋截面积。

7.7.4 预制混凝土板应进行集束式焊钉集中剪力下的抗劈裂验算，单位长度内桥面板的横向钢筋面积，可按下列式计算且不低于 6.2.5 条的规定：

$$A_c \geq \frac{0.25V_b}{d_k f_{sd}} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

- V_b ——单个剪力槽孔内集束式焊钉承载力设计值（N）；
- d_k ——预制混凝土板剪力槽纵向间距。

7.8 连接件计算

7.8.1 钢混组合梁结合面纵向剪力计算应符合下列规定：

- 剪力连接件的作用应根据施工过程确定，包括形成组合截面之后的永久作用和可变作用，不考虑混凝土开裂的影响，按照不同的剪力方向分别进行荷载组合。
- 钢梁与混凝土板结合面单位长度上的纵桥向水平剪力按下式计算。剪力连接件的数量宜按剪力包络图形状进行分段计算，在相应区段内均匀布置。

$$V_1 = \frac{V_g S_1}{I_1} + \frac{V_q S_0}{I_0} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

V_g 、 V_q ——形成组合截面后作用于组合梁上的准永久荷载和可变荷载产生的竖向剪力设计值；

S_1 、 S_0 ——分别为考虑和不考虑荷载长期效应混凝土板对组合截面中性轴的面积矩；

I_1 、 I_0 ——分别为考虑和不考虑荷载长期效应组合梁换算截面惯性矩（未开裂截面）。

- 梁端部结合面上由于预应力束集中锚固力、混凝土收缩徐变变形及温差引起的纵向剪力，由梁端部长度 l_{cs} 范围内的剪力连接件承受。梁端部结合面上单位梁长由集中锚固力、混凝土收缩徐变变形及温差引起的最大纵向剪力 V_{ms} 为：

$$V_{ms} = \frac{2V_h}{l_{cs}} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

V_h ——由预应力束集中锚固力、混凝土收缩徐变变形及温差的初始效应在钢梁和混凝土板结合而产生的纵桥向水平剪力（N）；

l_{cs} ——由预应力集中锚固力、混凝土收缩徐变变形及温差引起的纵桥向水平剪力计算传递长度（mm），取主梁腹板间距和主梁等效计算跨径的1/10中的较小值，主梁等效计算跨径取值参照JTG D64执行。

7.8.2 钢混组合梁剪力连接件应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行计算。

- 承载能力极限状态应按下列式计算：

$$\gamma_0 V_{1d} \leq V_{su} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

V_{1d} ——承载能力极限状态下单个连接件剪力设计值（N）；

V_{su} ——单个剪力连接件抗剪承载力（N）。

- 正常使用极限状态应按下列式计算：

$$s_{max} \leq s_{lim} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

s_{max} ——正常使用极限状态下钢混结合面最大滑移量（mm）；

s_{lim} ——钢混结合面滑移量限值，无规定时可取0.2mm。

7.8.3 承载能力极限状态下，连接件抗剪承载力设计值可按下列要求计算：

- 单个焊钉、开孔钢板连接件抗剪承载力设计值按现行 JTG/T D64-01 的相关规定计算。
- 连续钢混组合梁桥负弯矩区抗剪连接件承载力设计值应乘以折减系数 0.9。
- 集束式焊钉连接件应考虑群钉效应折减系数 η_1 ，计算公式如下：

$$\eta_1 = 0.75 - \frac{0.55}{f_{ck}} - 0.02r + \frac{0.21}{r} + 0.03l_d / d_{ss} \dots\dots\dots (26)$$

式中：

- r ——焊钉连接件的排数， $3 \leq r \leq 7$ ；
 - l_d ——焊钉连接件的纵向间距（mm）；
 - d_{ss} ——焊钉连接件杆部直径（mm）。
- d) 槽钢连接件：

$$V_{su} = 0.26(t_1 + 0.5t_2)l_c \sqrt{E_c f_c} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

- t_1 ——槽钢连接件翼缘平均厚度（mm）；
- t_2 ——槽钢连接件腹板厚度（mm）；
- l_c ——槽钢连接件的长度（mm）。

7.8.4 无试验条件时钢混组合梁剪力连接件的抗剪刚度可按下列规定进行计算，有试验条件时应进行充分研究及论证。

- a) 单个焊钉、开孔钢板连接件的抗剪刚度按现行 JTG/T D64-01 的相关规定计算。
- b) 集束式焊钉连接件的抗剪刚度按下式计算：

$$k_{ss} = \frac{d_{ss} \sqrt{E_c f_{ck}}}{\eta_2} \dots\dots\dots (28)$$

$$\eta_2 = 0.04r + \frac{0.18}{r} + 0.01l_d / d_{ss} - \frac{0.15}{l_d / d_{ss}} - 0.0001f_{ck} \dots\dots\dots (29)$$

- c) 槽钢连接件的抗剪刚度按下式计算：

$$k_{ss} = (4E_s I_w)^{0.25} (\omega E_c)^{0.75} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

- I_w ——槽钢腹板相对于焊接钢梁翼缘边缘线抗弯刚度（mm⁴）；
- ω ——刚度系数， $\omega = 2.5 \times 10^{-3}$ 。

7.8.5 正常使用极限状态下，结合面最大滑移值可按下列要求计算：

$$s_{max} = \frac{V_{su}}{k_{ss}} \dots\dots\dots (31)$$

式中：

- k_{ss} ——剪力连接件抗剪刚度（N/mm）。

8 耐久性设计

8.1 一般规定

8.1.1 钢混组合结构桥梁应根据设计使用年限、环境类别和作用等级进行耐久性设计，包括下列内容：

- a) 明确桥梁的设计使用年限。
- b) 明确桥梁所处的环境类别及其作用等级。
- c) 明确钢材、剪力连接件、混凝土材料的耐久性要求。

- d) 明确桥梁结构耐久性要求的构造与施工措施。
 - e) 明确桥梁结构耐久性所需的养护措施。
- 8.1.2 钢混组合结构桥梁桥面雨水应采用集排方式进行排水，避免雨水直接排在组合梁表面。
- 8.1.3 有条件时，钢混组合结构梁内部宜设置检查车和除湿系统。

8.2 钢梁耐久性设计

- 8.2.1 应基于全寿命周期综合确定钢结构耐久性措施。
- 8.2.2 钢梁对接焊缝均应要求为熔透焊，受拉时焊缝等级应为一级，受压时不应低于二级。
- 8.2.3 钢结构耐久性保障措施可采用耐候钢、热浸（镀）锌、热喷涂金属复合涂层、油漆涂层、牺牲阳极阴极保护法、外加电流阴极保护法、封闭环境设置除湿系统等。
- 8.2.4 钢结构采用耐候钢时，应保证构件通风良好、排水顺畅，伸缩缝梁端可采用局部涂装。
- 8.2.5 浪溅区、水位变动区部位宜采用重防腐涂层、金属热喷涂层加封闭涂层保护等措施，总干膜厚度不宜低于 $280\mu\text{m}$ ，也可采用包覆有机复合层、树脂砂浆、复合耐蚀金属层等。
- 8.2.6 混凝土浇筑前，剪力连接件（焊钉、开孔钢板、槽钢）表面无锈蚀、氧化皮、油脂等缺陷。

8.3 钢混结合面耐久性设计

- 8.3.1 浇筑或安装预制混凝土板前，应对结合面进行除锈，并应清除结合面上的油污等其他杂物。
- 8.3.2 钢混结合面应做好防、排水，防腐范围应深入截面不宜小于 50mm ，必要时可设置密封胶等防水填塞料，如图 22 所示。

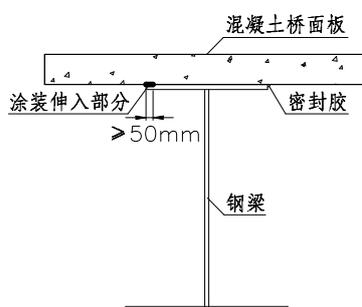


图 22 钢梁防腐涂装及密封示意图

- 8.3.3 钢梁与预制桥面板结合面宜增设粘结涂层（如环氧砂浆等），保证钢与混凝土桥面板紧密结合，满足防水要求。

8.4 混凝土板耐久性设计

- 8.4.1 钢混组合结构桥梁的混凝土板应满足现行国家标准 GB/T 50476 和行业标准 JTG D62 的耐久性设计要求。
- 8.4.2 连续钢混组合结构桥梁负弯矩区的混凝土板处于受拉的不利状态，最大裂缝宽度无法满足耐久性设计的要求，应加强抗裂措施设计，如加密钢筋布置、优化桥面板安装顺序及施加预压力等措施。
- 8.4.3 钢混组合梁混凝土桥面板应设置有效的防水层和必要的滴水槽，避免雨水通过泄水孔外漏。

附录 A
(规范性)
焊接接头疲劳计算

A.1 桁架式横隔系采用管-板焊接接头与钢梁连接疲劳计算时，可建立连接结构精细化有限元模型，采用等效缺口应力方法验算疲劳强度。

A.2 建立精细化有限元模型可以遵循以下原则：

- a) 有限元模型的材料模型可采用线弹性模型。
- b) 有限元模型需要精细化模拟连接结构中主要焊缝位置。
- c) 网格模型精细化过程中，应该分段逐渐细化，焊缝的缺口部分为最精细部分，应避免相邻段之间网格尺寸之差过大，应避免网格单元的过大变形，如图 A.1 所示。
- d) 对于 45°的焊缝的过渡曲线，推荐使用至少三个具有二次位移函数的单元，即若采用 1mm 的弧线半径，弧线和附近的直线处的网格尺寸应至多为 0.25mm。
- e) 建模应采用三维有限元模型，并且在三个方向均根据该方向的应力梯度进行逐级的精细化，并在有限元模拟计算完成后，应检查接近表面的应力分布是否光滑，否则应进一步加密网格进行计算。
- f) 对于实际结构中的制作、加工、焊接缺陷，应该将缺陷于有限元模型中建模加以考虑，或者通过引入应力放大系数加以考虑。

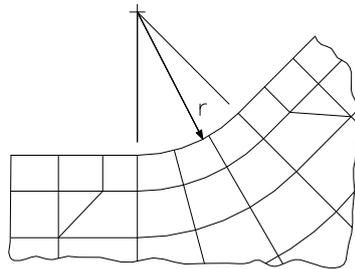


图 A.1 典型缺口应力法分析的焊缝处网格划分示例

A.3 利用等效缺口应力法进行疲劳分析，缺口应力法对于焊缝处采用假想圆角，如图 A.2 所示，假想圆角的半径 ρ_f 可取 1.0mm，也可按下列公式计算：

$$\rho_f = \rho + s\rho^* \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- ρ ——实际缺口半径；
- s ——应力多轴性及强度准则因子，在平面应力状态，取为2.5；
- ρ^* ——替代微观结构长度，对于典型铸铁焊接区域，可取0.4。

A.4 以 200 万次疲劳荷载循环次数对应的应力幅值作为疲劳强度，连接结构的疲劳强度应不低于 225MPa，且保证率为 97.7%。在假想圆角半径为 1mm 时，采用图 A.3 中的 S-N 曲线验算焊接疲劳强度。

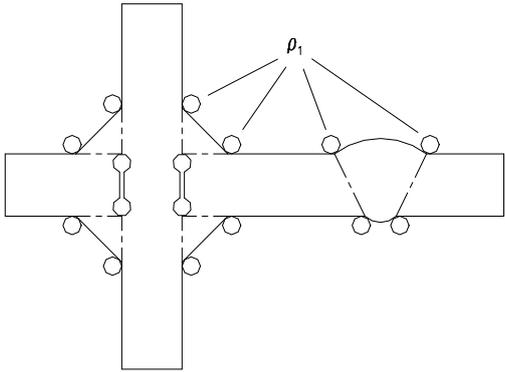


图 A. 2 假想半径圆角

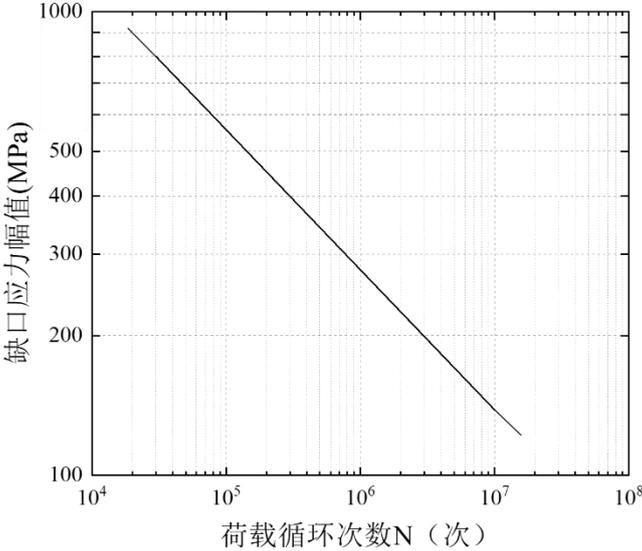


图 A. 3 焊趾焊根破坏的 S-N 曲线

