



T/CECS ××××—202×

中国工程建设标准化协会标准

铁路混合组合梁斜拉桥技术规程

Technical Specifications for Railway Hybrid Girder & Composite Girder
Cable-stayed Bridges

（征求意见稿）

××××出版社

中国工程建设标准化协会标准

铁路混合组合梁斜拉桥技术规程

Technical Specifications for Railway Hybrid Girder & Composite Girder
Cable-stayed Bridges

T/CECS ××××—202×

主编单位：中铁第四勘察设计院集团有限公司

中国铁路经济规划研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202×年××月××日

× × × × 出版社

202× 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2022 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2022]13 号）的要求，标准编制组在深入调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外现行标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本标准共分为 8 章，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、结构设计、结构构造、施工、验收、健康监测。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理，由中铁第四勘察设计院集团有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请反馈给中铁第四勘察设计院集团有限公司（地址：湖北省武汉市武昌杨园和平大道 745 号，邮政编码：430063）。

主编单位： 中铁第四勘察设计院集团有限公司
中国铁路经济规划研究院有限公司

参编单位： 西南交通大学
湖南大学
中南大学
中铁十一局集团有限公司
中铁十六局集团有限公司

主要起草人： ***

主要审查人： ***

目 次

1 总 则	1
2 术语与符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 基本规定	4
3.1 一般规定	4
3.2 孔跨及结构布置	4
3.3 刚度及变形控制	5
4 结构设计	7
4.1 一般规定	7
4.2 材料	7
4.3 荷载及组合	9
4.4 结构计算	10
5 结构构造	16
5.1 一般规定	16
5.2 主梁	16
5.3 连接件	17
5.4 索塔	18
5.5 斜拉索	19
5.6 附属	19
6 施 工	20
6.1 一般规定	20
6.2 钢梁施工	20
6.3 混凝土梁施工	21

6.4 钢混组合梁施工	22
6.5 钢混结合段施工	23
6.6 索塔、斜拉索施工	24
6.7 施工监控	25
7 验 收	27
8 健康监测	30
8.1 一般规定	30
8.2 监测系统设计	30
8.3 监测系统实施与运维	34
8.4 监测数据应用	35
用词说明	37
引用标准名录	38
附：条文说明	40

Contents

1 General provisions.....	1
2 Terms and symbols.....	2
2.1 Terms	2
2.2 Symbols	2
3 Basic requirements	4
3.1 General requirements	4
3.2 Span and structure arrangement	4
3.3 Stiffness and deformation control	5
4 Structural design.....	7
4.1 General requirements	7
4.2 Material	7
4.3 Load and load combinations	9
4.4 Structural Calculation.....	10
5 Structural details.....	16
5.1 General requirements	16
5.2 Girder	16
5.3 Shear connector	17
5.4 Pylon.....	18
5.5 Stay cable	19
5.6 Accessory Structure	19
6 Construction	20
6.1 General requirements	20
6.2 Construction of steel girder	20
6.3 Construction of concrete girder	21

6.4 Construction of steel-concrete composite girder.....	22
6.5 Construction of steel-concrete joint section	23
6.6 Construction of pylon and stay cable	24
6.7 Construction monitoring	25
7 Acceptance	27
8 Health monitoring	30
8.1 General requirements	30
8.2 Health monitoring system design	30
8.3 Establishment and maintance of health monitoring system	34
8.4 Application of monitoring data	35
Explanation of wording	37
List of quoted standards	38
Addition: Explanation of provisions	40

1 总 则

1.0.1 为规范和指导铁路混合组合梁斜拉桥的设计、施工、验收，符合安全可靠、先进成熟、经济合理、保护环境的要求，制定本规程。

1.0.2 本标准适用于跨径不大于 1100m 铁路混合组合梁斜拉桥的设计、施工、验收，对于公路与铁路两用混合组合梁斜拉桥可参照使用。

1.0.3 主体结构设计使用年限为 100 年，对于斜拉索、支座、阻尼器等可更换部件，在确保结构安全的前提下，应注重可更换的要求。应根据其所处环境条件进行钢结构、混凝土结构、钢混结合部位、斜拉索等结构构件的耐久性设计。

1.0.4 设计应统筹考虑施工、运营管理与养护的要求，贯彻全生命周期设计理念。

1.0.5 设计、施工、验收除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 混合梁斜拉桥 cable-stayed bridge with hybrid girder

主梁沿顺桥向分段，分别由钢结构或混凝土等不同材料共同构成的斜拉桥。

2.1.2 组合梁斜拉桥 cable-stayed bridge with composite girder

主梁横断面由钢结构和混凝土结构组合构成的斜拉桥。

2.1.3 混合组合梁斜拉桥 cable-stayed bridge with hybrid-composite girder

主梁沿顺桥向部分采用混凝土梁、钢混组合梁或混凝土板-钢桁组合梁，其余梁段采用钢箱梁、钢混组合梁或钢桁梁的斜拉桥。

2.1.4 钢混组合梁 steel-concrete composite girder

由混凝土桥面板与钢梁通过连接件组合而成的能共同受力的梁。

2.1.5 钢混结合段 steel-concrete joint section

由钢梁过渡区、结合区组成，在顺桥向将钢梁与混凝土梁连接成整体，实现荷载可靠传递和刚度匀顺过渡的梁段。

2.1.6 连接件 connector

将钢与混凝土两种材料连接组合在一起，承受二者之间的剪力和拔力，能抵抗二者相对滑移或分离，保证二者共同受力的部件。

2.2 符号

L	——	主跨跨径；
R_{SH}	——	主梁竖向变形曲率半径；
R_{SL}	——	主梁横向变形曲率半径；
δ_H	——	跨中竖向变形；
δ_L	——	跨中横向变形；
v	——	设计行车速度；
σ	——	钢梁或混凝土梁的正应力值；
$[\sigma]$	——	钢梁或混凝土梁的正应力容许值；
$[\sigma_s]$	——	钢材应力容许值

- τ_s —— 组合梁钢-混结合前的竖向剪应力
 τ_{sb} —— 组合梁钢-混结合后的竖向剪应力
 $[\tau_s]$ —— 钢梁的抗剪容许应力；
 V —— 竖向剪力值；
 S —— 计算点以上部分换算截面面积对构件换算截面重心的面积矩；
 I_m —— 钢梁截面惯性矩；
 δ —— 截面宽度；
 Q_v —— 由竖向剪力引起的界面剪力；
 I_0 —— 组合梁截面的换算截面惯性矩；
 Q_t —— 预应力集中锚固力、收缩、温差引起的单位长度上界面剪力；
 V_t —— 由预应力锚固力，混凝土收缩变形或温差的初始效应在混凝土板中产生的纵桥向截面力；
 l_{cs} —— 混凝土收缩变形或温差引起的纵桥向剪力计算传递长度；
 $[Q]$ —— 单个连接件的容许抗剪承载力；
 A_t —— 栓钉钉杆截面面积；
 E_c —— 混凝土弹性模量；
 E_g —— 钢筋弹性模量；
 f_c —— 混凝土的轴心抗压极限强度；
 f_{ct} —— 混凝土的轴心抗拉极限强度
 f_u —— 焊钉极限抗拉强度；
 $[Q_{pbl}]$ —— 开孔板连接件的单个孔容许抗剪承载力
 f_g —— 开孔板连接件孔中贯通钢筋屈服强度；
 $V_{i,max}$ —— 梁段单位长度内的钢-混结合面最大界面剪力；
 K_t —— 单个焊钉抗剪刚度；
 K —— 开孔板连接件单个孔的抗剪刚度；
 $\Delta \sigma$ —— 钢梁或混凝土梁的应力幅；
 $[\Delta \sigma]$ —— 钢梁或混凝土梁的容许应力幅。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 铁路混合组合梁斜拉桥总体设计应根据使用功能、技术标准、建设条件、经济性等因素，合理确定结构形式、孔跨布置、约束体系。

3.1.2 主梁结构应合理选择材料、结构类型和构造，确保斜拉桥结构的强度、刚度、稳定性和耐久性。

3.1.3 设计应根据建设条件提出合理可行的指导性施工方案，明确制造和施工过程中的关键控制工况、体系转换顺序和线形控制目标，保证施工受力状态和线形满足设计要求。

3.2 孔跨及结构布置

3.2.1 铁路混合组合梁斜拉桥可采用独塔、双塔和多塔等形式，可根据建设条件、结构受力、工程造价以及行车条件等因素设置边跨长度，独塔铁路混合组合梁斜拉桥边跨和中跨跨径比宜在 0.55~1.00，双塔或多塔铁路混合组合梁斜拉桥的边跨与中跨跨径比可参考表 3.2.1。

表 3.2.1 双塔或多塔混合/组合梁斜拉桥的边跨和中跨跨径比

主梁类型		边跨与中跨跨径比
边跨	中跨	
混凝土箱梁	钢箱梁	0.30~0.45
混凝土箱梁	钢混组合梁	0.40~0.5
钢混组合梁	钢箱梁	0.45~0.5
钢混组合梁	钢混组合梁	0.45~0.55
混凝土板-钢桁组合梁	钢桁梁	0.35~0.45

3.2.2 边跨宜结合建设条件和结构受力合理设置辅助墩，提高整体刚度和线路平顺性，改善结构的静、动力性能。

3.2.3 索塔横桥向根据受力和景观要求可采用 A 型、倒 Y 型、H 型等结构形式，斜拉索可布置为平面索或空间索，冬季寒冷地区宜采用平面索。桥面以上塔高与主跨跨径之比：独塔斜拉桥可取 1/3~1/2；双塔或多塔斜拉桥可取 1/4~1/3。

3.2.4 斜拉索梁上索距应根据主梁形式和施工方法选取，钢梁和组合梁上索距可采用 9~15m，

混凝土梁上索距可采用 6~10m。塔上索间距可采用 2~5m。

3.2.5 铁路主梁宽跨比值不宜小于 1/35。

3.3 刚度及变形控制

3.3.1 在 ZK 竖向静活载作用下，主梁竖向变形限值应符合下列规定：

1 主梁的竖向挠度宜小于主跨跨径 L 的 1/500，高速铁路斜拉桥应满足长波不平顺及车-桥耦合动力分析对行车安全性和舒适性的要求。

2 对于有砟轨道桥梁，梁端竖向转角限值不应大于 2‰。对于无砟轨道桥梁，宜尽量控制梁端悬出长度，梁端悬出长度大于 0.55m 时，梁端竖向转角不应大于 1‰；梁端悬出长度小于或等于 0.55m 时，梁端竖向转角不应大于 1.5‰。

3.3.2 主梁竖向变形曲率半径限值应符合下列规定：

1 在收缩徐变、列车运营荷载、风荷载和温度作用下，竖向变形曲率半径应满足下式要求：

$$R_{\text{SH}} = \frac{L^2}{8\delta_{\text{H}}} \geq 0.4v^2 \quad (3.3.2)$$

式中： R_{SH} ——竖向变形曲率半径（m）；

L ——跨径（m）；

δ_{H} ——跨中竖向变形（m）；

v ——设计行车速度（km/h）。

2 竖向变形曲率半径宜按列车运营荷载计，有车风荷载与温度作用组合时，可按 75% 的风荷载和 60% 的温度作用进行组合。

3.3.3 在列车偏载、横向摇摆力、离心力、风荷载和温度的作用下，主梁的横向挠度宜小于主跨跨径 L 的 1/1200。

3.3.4 主梁横向变形曲率半径限值要求应符合下列规定：

1 在列车运营荷载、横向摇摆力、风荷载和温度的作用下，主梁横向变形曲率半径应满足下式要求：

$$R_{\text{SL}} = \frac{L^2}{8\delta_{\text{L}}} \geq 0.8v^2 \quad (3.3.4)$$

式中： R_{SL} ——横向变形曲率半径（m）；

L ——跨径（m）；

δ_L ——跨中横向变形（m）；

v ——设计行车速度（km/h）。

2 横向变形曲率半径宜按列车运营荷载计，风荷载（有车）与温度荷载组合时，可按 0.75 倍的风荷载与 0.6 倍的温度荷载进行组合。

3.3.5 列车静活载作用下，在 3m 长的线路范围一线两根钢轨的竖向相对变形量应小于 1.5mm。

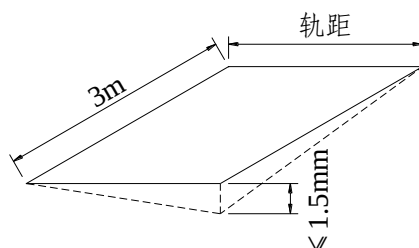


图 3.5.5 桥面扭曲示意图

4 结构设计

4.1 一般规定

4.1.1 铁路混合组合梁斜拉桥在恒、活载作用下各部梁、索、塔处于平衡状态，成桥时根据设定的目标可以是“塔偏梁拱”的平衡状态。

4.1.2 塔梁纵向约束应考虑结构受力性能、行车性能、抗震性能等，可采用纵向弹性约束、阻尼约束、单端固定或固结约束等体系。当桥梁横向地震位移较大时，可采用合适的横向多级减震体系，实现多墩协同抗震效能。

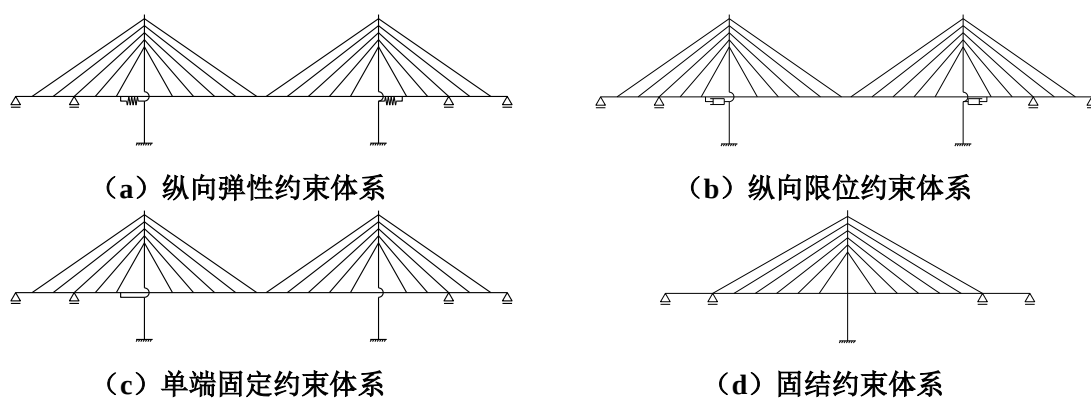


图 4.1.2 塔梁纵向约束体系示意

4.1.3 铁路混合组合梁斜拉桥设计除静力分析外，应进行抗风、抗震、风-车-桥耦合动力分析、稳定分析，确保结构的强度、刚度、疲劳和稳定性满足要求。

4.1.4 设计应列出设计基准条件和指导性施工方案下的预拱度设置、关键控制工序下的斜拉索索力和主梁线形。预拱度宜考虑恒载、混凝土收缩徐变产生的竖向挠度之和，并拟合成平顺曲线。

4.1.5 铁路混合梁斜拉桥混凝土主梁分析计算需考虑恒载，混凝土梁收缩、徐变，张拉索对混凝土梁产生的影响，辅助墩刚度及基础刚度，施工临时荷载，以及温度、风、地震等荷载的影响。

4.1.6 主梁刚度计算应符合现行《铁路桥涵设计规范》TB 10002 的有关规定，组合梁的变形计算应计入施工顺序的影响，并应计入混凝土徐变、收缩和温度等作用的影响。

4.2 材料

4.2.1 钢材应符合下列规定：

- 1 普通钢筋和预应力钢筋类别、抗拉强度标准值、计算强度、容许应力和容许应力幅、弹性模量等，应符合《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092的相关规定
- 2 钢材的技术标准、弹性模量、容许应力和疲劳容许应力幅、质量等级、交货技术条件等应符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091的相关规定。
- 3 桥塔预应力锚固区、索塔钢锚箱等不易检修位置可采用耐候钢或不锈钢，材料技术标准、物理性能及耐久性要求应符合国家标准《耐候结构钢》GB/T 4171的规定。
- 4 钢桥面板可采用不锈钢复合板，复合层不锈钢性能应满足《不锈钢复合钢板和钢带》GB/T 8165的技术标准，基层钢结构性能应满足《桥梁用结构钢》GB/T 714的技术标准。

4.2.2 混凝土材料应符合下列规定：

- 1 混凝土的强度等级、极限强度、容许应力和弹性模量等，应符合《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092的相关规定
- 2 主梁、索塔预应力混凝土构件的混凝土强度等级不应低于C50，钢筋混凝土索塔的混凝土强度等级不应低于C40。
- 3 现浇湿接缝、钢混结合段宜采用补偿收缩纤维混凝土，并应符合《纤维混凝土应用技术规程》JGJ/T 221、《补偿收缩混凝土应用技术规程》JGJ/T178的有关规定。
- 4 主梁在墩顶负弯矩区、钢混结合段等受力较大区域可采用超高性能混凝土(UHPC)，并应符合《超高性能混凝土(UHPC)技术要求》T/CECS 10107的有关规定。UHPC超高性能混凝土中应采用高强度钢纤维，钢纤维掺量 $\geq 1.5\%$ ，其性能指标应符合下表的规定。
- 5 各构件中混凝土应均匀、颜色一致，不得有离析和泌水现象。外加剂匀质性检测应满足《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077、《混凝土外加剂匀质性试验方法》GB/T 8077的相关规定。

表 4.2.2 钢纤维技术指标

序号	项目	技术要求
1	抗拉强度 (MPa)	$\geq 2000\text{MPa}$
2	长度合格率 (12~14mm 比例)	$\geq 96\%$
3	直径合格率 (0.18~0.22mm 纤维比例)	$\geq 90\%$
4	形状合格率	$\geq 96\%$
5	杂质含量	$\leq 1.0\%$

4.2.3 斜拉索应符合下列规定:

1 斜拉索可采用平行钢丝成品索或钢绞线成品索, 斜拉索及锚具的技术指标、物理性能及耐久性设计应符合《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》GB/T 18365、《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》GB/T 30826等规范相关要求。

2 斜拉索锚具钢材应选取优质碳素结构钢或合金结构钢, 并符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091、《合金结构钢》GB/T 3077 及《优质碳素结构钢》GB/T 699 的相关规定

3 斜拉索的外防护材料可采用高密度聚乙烯护套料, 也可采用钢质或其他合适的材料。

4 斜拉索及锚具的安全系数应符合《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095的有关规定。

4.2.4 抗剪连接件应符合下列规定:

1 焊钉机械性能及化学成分应符合《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433的有关规定。

2 开孔板连接件的钢板及钢筋应符合本规程第4.2.1节的规定。

3 焊钉焊接部位钢板和焊钉的疲劳容许应力幅应符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091的有关规定。

4 焊接性能应与基材相匹配, 选用的焊接材料、焊接工艺均应根据设计要求通过焊接工艺评定。

4.2.5 普通螺栓、锚栓、高强螺栓、焊接材料等的技术标准、物理性能及耐久性要求应符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 及现行国家、行业标准的有关规定。

4.2.6 预制混凝土桥面板和钢梁上翼缘结合面宜选用抗老化性能好的优质橡胶垫密封, 并对橡胶垫做压缩性试验, 确定其实际压缩量, 以保证橡胶带受荷载后的实际厚度满足设计要求。橡胶垫的力学性能、试验方法应满足《膨润土橡胶遇水膨胀止水条》JG/T 141 相关要求。

4.3 荷载及组合

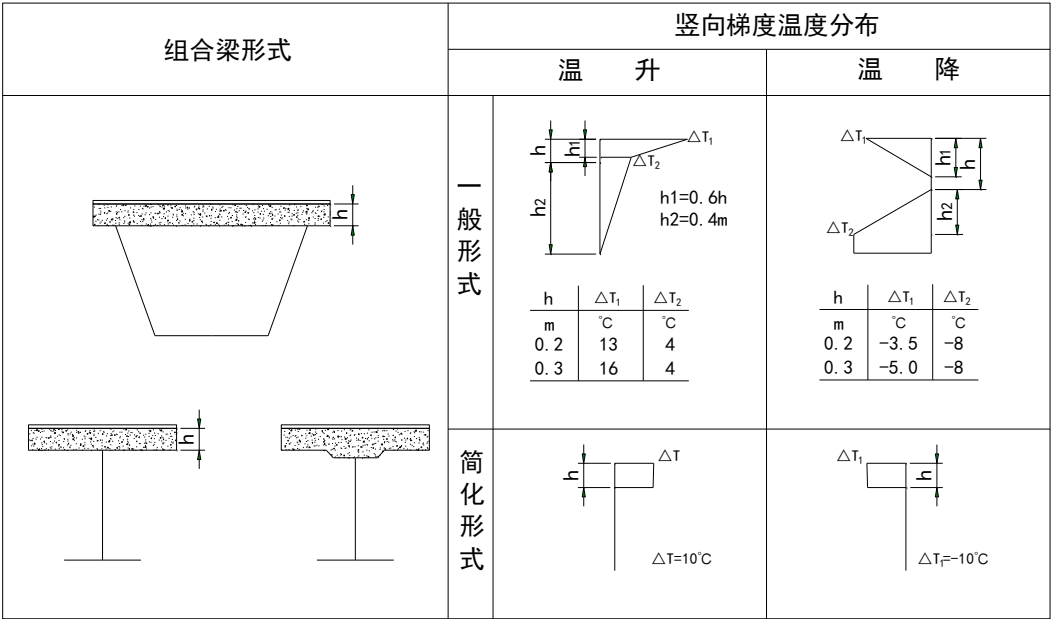
4.3.1 铁路混合组合梁斜拉桥的设计荷载与组合应符合《铁路桥涵设计规范》TB 10002、《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 的有关规定。

4.3.2 各种荷载组合的容许应力在主力组合基础上的容许应力提高系数应符合《铁路桥涵设计规范》TB 10002、《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092、《铁路桥梁钢结构设

计规范》TB 10091 的有关规定。

4.3.3 温度作用应按下列规定计算：

- 1 计算组合梁由于均匀温度作用引起的效应时，应从受到约束时的结构温度开始，计算环境最高和最低有效温度的作用效应。当缺乏实际调查资料时，最高和最低有效温度标准值可按《铁路桥涵设计规范》TB 10002取值；
- 2 应考虑钢材和混凝土线膨胀系数差异引起的温度效应影响。材料线胀系数应按《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092、《铁路桥梁钢结构设计规范》TB10091取值；
- 3 计算组合梁由于梯度温度引起的效应时，宜采用下图所示的竖向温度梯度分布形式。



- 注：1.当设计文件未给出明确的ΔT建议值时，可采用表中建议值及简化算法。
2. ΔT综合考虑了组合梁截面线形温差和非线性温差以及部分均匀温差。

图 4.3.3 钢-混组合梁截面梯度温度计算办法

4.4 结构计算

4.4.1 结构内力及应力、变形计算应计入施工方法和施工顺序的影响；钢混组合梁截面按平面假定，考虑截面形成过程采用叠加法计算正应力和剪应力。

4.4.2 钢混组合主梁正应力按下列原则计算：

- 1 组合梁截面正应力采用线弹性方法进行检算：

$$\sigma_s = \sum_{i=1}^{\text{II}} \left(\frac{\Delta N_{d,i}}{A_{eff,i}} + \frac{\Delta M_{d,i}}{W_{eff,i}} \right)$$
 (4.4.2-1)

$$\sigma_s \leq [\sigma_s]$$
 (4.4.2-2)

式中： i —变量，表示不同的应力计算阶段；其中， $i=I$ 表示未形成组合梁截面（钢梁）的应力计算阶段； $i=II$ 表示形成组合梁截面之后的应力计算阶段；

σ_s —钢梁计算正应力（MPa）；

$\Delta M_{d,i}$ —对应不同应力计算阶段，作用于钢梁或组合梁截面的弯矩变化值（N·mm）；

$\Delta N_{d,i}$ —对应不同应力计算阶段，作用于钢梁或组合梁截面的轴力变化值（N）；

$W_{eff,i}$ —对应不同应力计算阶段，按等效钢结构计算的截面有效换算抗弯模量（mm³）；

$A_{eff,i}$ —对应不同应力计算阶段，按等效钢结构计算的有效换算截面积（mm²）；

$[\sigma_s]$ —钢的应力容许值（MPa）。

2 组合梁截面正应力计算时应考虑剪力滞效应的影响。

3 对于钢混组合梁，在负弯矩区可根据混凝土的开裂情况计入混凝土桥面板的影响。

4. 混凝土截面正应力可按钢与钢与混凝土弹性模量比换算。

4.4.3 钢混组合梁截面剪应力应按下列原则计算：

1 组合梁竖向抗剪强度应按下列式计算：

$$\tau_s = \sum_{i=I}^{II} \left(\frac{\Delta V_{d,i} \cdot S_{d,i}}{I_{eff,i} \cdot \delta_{d,i}} \right) \leq [\tau_s] \quad (4.4.3-1)$$

式中： τ_s —钢梁计算竖向剪应力（MPa）；

$\Delta V_{d,i}$ —对应不同应力计算阶段，作用于钢梁或组合梁截面的竖向剪力变化（N）；

$S_{d,i}$ —对应不同应力计算阶段，按等效钢结构计算的计算点以上部分的换算截面面积对构件换算截面重心的面积矩（mm³）；

$I_{eff,i}$ —对应不同应力计算阶段，按等效钢结构计算的有效换算截面惯性矩（mm⁴）；

$\delta_{d,i}$ —对应不同应力计算阶段，按等效钢结构计算的有效换算腹板厚度（mm）。

$[\tau_s]$ —钢梁的抗剪容许应力（MPa）。

2. 混凝土截面剪应力可按钢与钢与混凝土弹性模量比换算。

3. 组合梁承受正应力和剪应力共同作用时，应考虑两者耦合的影响，腹板最大折算应力应按下列式验算：

$$\sqrt{\sigma_s^2 + 3\tau_s^2} \leq [\sigma_s] \quad (4.4.3-2)$$

式中： σ_s 、 τ_s —钢梁同一点上同时产生的正应力、剪应力（MPa）；

$[\sigma_s]$ —钢材应力容许值（MPa）。

4.4.4 组合梁的纵向剪力应按下列原则计算:

1 钢梁和混凝土板结合面的纵向水平剪力全部由连接件承担, 界面剪力的大小应按照弹性分析计算, 不考虑混凝土开裂和界面滑移引起的剪力重分布。

2 由竖向剪力引起的钢梁与混凝土板之间单位纵向长度的纵向剪力按下式计算:

$$Q_v = \frac{VS}{I_0} \quad (4.4.4-1)$$

式中: Q_v ——由竖向剪力引起的界面剪力 (N/mm)。

V ——形成组合作用之后, 作用于组合梁的竖向剪力 (N)。

S ——组合界面以上换算截面对组合梁弹性中和轴的面积距 (mm^3)。

I_0 ——组合梁截面的换算截面惯性矩 (换算弹模比用 $n=E_s/E_c$) (mm^4)。

3 预应力束集中锚固力、混凝土收缩变形或温差引起的结合面上单位梁长的纵向剪力:

(1) 预应力束在梁跨范围锚固, 锚固点前后均传递纵向剪力:

$$Q_t = \frac{V_t}{l_{cs}} \quad (4.4.4-2)$$

(2) 预应力在梁端部锚固, 以及混凝土收缩、温度变化形成的界面剪力:

$$Q_t = \frac{2V_t}{l_{cs}} \quad (4.4.4-3)$$

式中: Q_t ——预应力集中锚固力、收缩、温差引起的单位长度上界面剪力 (N/mm)。

V_t ——由预应力锚固力, 混凝土收缩变形或温差的初始效应在混凝土板中产生的纵桥向截面力 (N)。

l_{cs} ——混凝土收缩变形或温差引起的纵桥向剪力计算传递长度 (mm); 界面纵向剪力假定为线性分布, 在梁端为 $2V_t$, 在距离梁端 l_{cs} 处为 0; l_{cs} 取主梁腹板间距和 0.1 倍主梁等效计算跨径的较小值。

4 由斜拉索引起的钢梁与混凝土板之间单位长度的纵向剪力, 可认为斜拉索轴向力按 30° 的角度进行扩散。

4.4.5 连接件容许抗剪承载力应按下列式计算:

1 焊钉的容许抗剪承载力应按下列式计算:

$$[Q] = \min\{0.32A_t\sqrt{E_c f_{cd}}k_1k_2, 0.53f_{su}A_tk_1k_2\} \quad (4.4.5-1)$$

式中: $[Q]$ ——焊钉的容许抗剪承载力 (N)。

A_t ——焊钉钉杆截面面积 (mm^2)。

E_c ——混凝土的弹性模量 (MPa)。

f_{cd} ——混凝土的轴心抗压强度设计值（MPa），取值以《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB50917-2013 为准

f_{su} ——焊钉极限抗拉强度最小值，满足《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》GB/T 10433 的要求，可取 400MPa。

k_1 ——焊钉位置因素的折减系数，当连接件位于受拉区，取 0.85；当连接件位于受压区，取 1.0。

k_2 ——群钉效应折减系数，当焊钉间距小于 6 倍焊钉直径，取 0.85，当焊钉间距不小于 6 倍焊钉直径，取 1.0。

2 开孔板连接件的单个孔容许抗剪承载力应按下式计算：

$$[Q_{pbl}] = 1.05 \cdot \frac{\pi}{4} (d_p^2 - d_s^2) f_{cd} + 0.9 d_s^2 f_{sd} \quad (4.4.5-2)$$

式中：[Q_{pbl}]——开孔板连接件的单个孔容许抗剪承载力（N）。

d_p ——开孔板连接件的圆孔直径（mm）。

d_s ——孔中贯通钢筋的直径（mm）。

f_{cd} ——混凝土的轴心抗压强度设计值（MPa），取值以《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB50917-2013 为准。

f_{sd} ——孔中贯通钢筋抗拉强度设计值（MPa），取值以《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB50917-2013 为准。

4.4.6 钢-混结合面抗剪连接件的布置和数量计算应符合下列规定：

1 抗剪连接件个数 n_f 可按下式计算：

$$n_f \geq \frac{V_{i,max} L_i}{[Q]} \quad (4.4.6)$$

式中： $V_{i,max}$ ——该梁段单位长度内的最大界面剪力（N/mm）。

n_f ——单位长度剪力连接件数量。

L_i ——该梁段长度（mm）。

[Q]——单个连接件的容许抗剪承载力（N）。

2 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，每段的单位梁长连接件承载力分布 $V_{i,d}$ 应当大于该段的最大剪力 $V_{i,max}$ 。剪力连接件的布置间距不宜多于3种。

3 桥面板由于预应力锚固、混凝土收缩徐变和混凝土板与钢梁间的温差产生的剪力主要集中在主梁端部，剪力大小由梁端向跨中方向逐渐递减，工程上宜适当加密剪力连接件

数量或采用弹性剪力连接件，改善受力。

4 钢混结合段的剪力连接件布置宜结合实体应力分析及传力规律进行布置。

4.4.7 钢混结合段计算应符合下列规定

1 在简化计算的基础上，宜进行实体分析，实体计算模型应包括钢梁标准段、钢梁过渡段、结合段、混凝土过渡段及混凝土标准段。实体计算模型在构件长度方向的范围应合理取值，钢梁标准段及混凝土标准段长度不宜小于梁高或梁宽的 2 倍。

2 应通过全桥整体计算得出最不利工况下的内力，进行钢混结合段和刚度过渡段的局部分析，保证内力在钢梁与混凝土梁之间可靠、顺畅传递，避免刚度突变。

3 可采用接触单元模拟钢与混凝土间的连接，宜通过连接件抗剪试验或其他可靠方法取用连接件的刚度值，在无具体试验结果的情况下可采用该计算式估算。

(1) 焊钉的抗剪刚度可按下式计算：

$$K_t = 13d_{ss}\sqrt{E_c f_{ck}} k_1 k_2 \quad (4.4.7-1)$$

式中： K_t ——单个焊钉抗剪刚度（N/mm）。

d_{ss} ——栓钉连接件的直径（mm）。

f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值（MPa），取值以《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB50917-2013 为准。

E_c ——混凝土的弹性模量（MPa）。

(2) 开孔板连接件的抗剪刚度可按下式计算：

$$K_{ps} = 29 \sqrt{(d_p - d_s) d_s f_{ck} E_c} \quad (4.4.7-2)$$

式中： K_{ps} ——单个孔的抗剪刚度（N/mm）。

d_p ——开孔板连接件的圆孔直径（mm）。

d_s ——孔中贯通钢筋的直径（mm）。

f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值（MPa），取值以《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB50917-2013 为准。

E_c ——混凝土的弹性模量（MPa）。

4 钢混结合段必要时宜开展整体比例缩尺模型和（或）局部足尺疲劳模型试验研究。

4.4.8 主梁采用钢梁时，计算应考虑整体受力和局部受力，以及两者的叠加效应，考虑各种荷载工况及其组合作用下可能产生的正应力、剪应力，以及不同体系的应力组合与叠加，计算方法应按《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 中相关规定。

4.4.9 主梁稳定计算应符合现行《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091、《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 的有关规定的有关规定。

4.4.10 结构构件与连接件应进行疲劳验算，并满足下列要求：

1 构件与连接件的疲劳计算应符合《铁路桥涵设计规范》TB 10002、《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 及《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 中的相关规定。

2 钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土构件疲劳计算时应考虑列车运营动力系数。钢结构构件和斜拉索疲劳计算时列车运营动力系数按《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091 中规定计算。

3 斜拉索进行疲劳计算时，疲劳加载可采用与桥梁钢结构疲劳计算相同的加载规定。斜拉索设计最大疲劳容许应力幅可采用 190MPa。

4 连接件疲劳计算应采用容许应力幅法，应力应按弹性状态计算，容许疲劳应力幅应按构件与连接件类别以及应力循环次数确定。疲劳计算应满足《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 相关要求。

$$\Delta \sigma \leq [\Delta \sigma] \quad (4.4.7-3)$$

式中： $\Delta \sigma$ ——应力幅；对于常幅疲劳， $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ；对于变幅疲劳， $\Delta \sigma$ 可取为等效常幅应力幅；

$[\Delta \sigma]$ ——容许应力幅。

5 开孔板连接件的容许疲劳剪力幅可取容许抗剪承载力的一半。

4.4.11 铁路混合组合梁斜拉桥车—桥耦合动力响应分析时，轨道不平顺应考虑初始不平顺和桥梁附加变形的叠加，桥梁附加变形应考虑温度、风荷载、沉降、徐变等因素的影响。

4.4.12 铁路混合组合梁斜拉桥抗风设计应满足《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 的有关规范。。

4.4.13 铁路混合组合梁斜拉桥抗震计算应满足《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 的有关规范。

5 结构构造

5.1 一般规定

5.1.1 结构总体布置应满足建筑限界、桥面排水、检修通道、电缆槽、接触网支柱、防抛网、声（风）屏障和风水管路等结构要求，同时应考虑施工及运营维护的便捷性，并应满足《铁路桥涵设计规范》TB 10002 的相关规定。

5.1.2 铁路混合组合梁斜拉桥各组成部分的构造应符合《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095、《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091、《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092 及《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB 50917 中的相关规定。

5.2 主梁

5.2.1 主梁截面形式可选用整体箱型截面、分离式双边箱截面、桁式截面等。

5.2.2 铁路混合梁斜拉桥钢混结合段宜设置于梁体内力和位移变幅均较小的位置，同时应考虑施工方便性等因素。

5.2.3 钢混结合段截面构造应满足下列要求：

1 钢混结合段截面尺寸和构造应满足梁体竖向刚度、横向刚度、抗扭刚度的要求；中跨若为组合梁，中性轴应位于钢梁截面范围内，并与边跨混凝土梁中性轴位置相近，在构造上应使两部分梁体外形协调一致。

2 钢混结合段应使边跨混凝土梁和中跨钢梁可靠连接，两种梁体的重心高度位置宜尽量一致，保证传力顺畅，总长宜为 1~2 倍梁高。钢混结合段构造应方便混凝土的浇筑和振捣施工方便。

3 钢混结合段连接形式宜采用剪压式，并在结合面处设置横隔梁。

4 钢混结合段宜在顶、底板及两侧腹板设置预应力钢束加强钢混连接，预应力钢束一端分批锚固于结合段钢结构的承压板、腹板或钢梁过渡段的顶、底板及腹板，钢束另外一端延伸至混凝土梁段。

5.2.4 斜拉索在主梁上的锚固构造，应结合结构受力、制造难度、检修便捷性、牵引安装的空间需求等综合确定，并应避免积水。对于钢梁可采用内置钢锚箱、外伸锚拉箱或锚拉板等形式；对于混凝土梁，宜优先采用兜底锚，或采用腹板侧面设置牛腿的锚固形式。

5.2.5 当混凝土桥面板采用预制混凝土板或叠合混凝土板时，应采取有效措施保证新老混

混凝土结合并共同受力。并应统筹考虑桥面板及预应力钢束的整体布置，整合板件类型，尽量减少板件种类。

5.2.6 施加预应力的混凝土桥面板，宜通过合理构造措施及施工工艺，提高混凝土板上有效预应力。

5.2.7 预制桥面板湿接缝宽度可取 0.4m~1m。湿接缝内钢筋连接可采用环形钢筋交错对拼、锚固板交错对拼、套筒连接等形式。

5.2.8 对于负弯矩区等桥面板拉应力较大部位，可采用顶落梁措施改善负弯矩区受力，或采用 RC-UHPC 叠合桥面板。

5.2.9 正交异性钢桥面板顶板厚度不宜小于 16mm，铁路行车区域宜采用闭口加劲肋，可采用 U 肋或 V 肋，厚度不应小于 8mm。

5.2.10 主梁应注重耐久性设计，对于钢混结合段的接缝、钢板包覆混凝土、索导管穿出混凝土梁面等结合面应采取可靠措施保证交界处密封性。

5.3 连接件

5.3.1 钢-混凝土组合梁的抗剪连接件宜采用焊钉，也可采用开孔板连接件及型钢连接件或有可靠依据的其他类型连接件。其中焊钉可以根据受力需求选用缓粘结焊钉及抗拔不抗剪焊钉。型钢连接件可采用 T 钢连接件、球扁钢连接件、角钢连接件等。

5.3.2 钢与混凝土结合面存在多向剪力作用时，优先选用焊钉连接件。

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

5.3.4 抗剪连接件距至钢梁翼缘的距离不小于 30mm，至混凝土桥面板边缘的距离不应小于 100mm。

5.3.5 布置抗剪连接件的钢梁翼缘板厚度不应小于 16mm，且应大于抗剪连接件根部最大焊脚高度。

5.3.6 焊钉连接件下表面或槽钢连接件上翼缘下表面高出桥面板底部钢筋顶面宜不小于 30mm。

5.3.7 焊钉布置应符合下列规定：

1 当焊钉焊于钢梁受拉翼缘时，其直径不应大于翼缘板厚度的 1.5 倍；当焊钉焊于无拉应力部位时，其直径不应大于翼缘板厚度的 2.5 倍；主要受力构件宜采用直径 22mm、25mm 的焊钉。

2 焊钉长度不应小于其直径的 4 倍，并不宜大于其直径的 6 倍。

3 焊钉沿梁轴线方向的间距不应小于直径的 6 倍,焊钉垂直于梁轴线方向的间距不应小于直径的 4 倍;当焊钉间距较小时,应计入群钉效应。

5.3.8 开孔板连接件应符合下列规定:

- 1 当开孔板连接件多列布置时,相邻开孔板的间距不宜小于板高的 3 倍。
- 2 开孔板连接件的钢板厚度不宜小于 12mm。
- 3 开孔板连接件孔径不宜小于贯通钢筋直径与骨料最大粒径之和。
- 4 开孔板连接件贯通钢筋应采用螺纹钢筋,直径不宜小于 12mm,且不应大于开孔孔径的 1/2,并宜居中布置。
- 5 开孔板连接件的相邻两孔间距应大于 2.25 倍开孔直径。

5.4 索塔

5.4.1 塔柱截面宜采用多边形或弧线形截面,以减小风阻。

5.4.2 混凝土塔柱空心截面壁厚根据受力要求确定,且不宜大于 2m。索塔截面尺寸应考虑斜拉索安装空间及后期维修的要求。

5.4.3 斜拉索在索塔上的锚固可采用齿块、钢锚梁、钢锚箱及交叉锚固等形式。

5.4.4 塔柱斜拉索导管打断竖向主筋、箍筋时,可采用锚固钢板+圈筋的方式进行补强。

5.4.5 索塔锚固区预应力宜采用钢绞线或缓粘结预应力形式。

5.4.6 上塔柱预应力张拉槽口不应设置于铁路限界上方。

5.4.7 混凝土索塔应根据施工需要在索塔内配置型钢作为劲性骨架。索塔钢筋布置应符合下列要求:

- 1 竖向受力钢筋宜采用大直径钢筋,直径不宜小于 28mm,钢筋连接宜采用机械连接。
- 2 箍筋直径不宜小于 16mm,间距不应大于竖向受力钢筋直径的 10 倍,且不大于 20cm。
- 3 塔柱表面宜布置防裂钢筋网片。

5.4.8 钢索塔外形应满足抗风性能良好的截面形式。宜采用封闭空心箱室截面形式,钢索塔壁板厚度根据受力确定,且不宜小于 20mm。

5.4.9 钢索塔塔柱节段在工地可采用高强度螺栓连接、焊接连接或者高强度螺栓与磨光顶紧组合连接。采用磨光顶紧时,节段接头端面宜在工厂进行加工,节段间金属接触密贴率应大于 50%,其高强度螺栓拼接传力宜按塔柱传递内力的 50%考虑。

5.4.10 钢-混混合塔结合部位应位于船舶撞击点以上,且不低于洪(潮)水位 2m,并考虑浪溅影响。

5.5 斜拉索

5.5.1 根据受力、运输、安装、更换等条件，斜拉索可选用平行钢丝斜拉索或钢绞线斜拉索。

5.5.2 平行钢丝斜拉索锚具应具有一定的长度调整功能，钢绞线斜拉索下料长度应满足多次张拉的要求。斜拉索一般在塔端张拉，特殊情况下为方便施工可预留两端张拉条件。

5.5.3 为避免斜拉索被划伤，可在桥面以上设置斜拉索金属防护管，设置高度不宜低于桥面 2m。

5.5.4 斜拉索应考虑风雨振动、涡激共振和参数共振的影响，斜拉索并排设置时应考虑尾流驰振的影响，必要时采取抑制振动的措施。在施工期间，应对斜拉索采取临时减振措施，宜采用临时减振辅助索和减振木塞相结合的方式。

5.5.5 斜拉索应用完整可靠的密封防护构造，尤其是索端与锚具的结合部。为延长斜拉索使用寿命，可设置除湿系统。

5.5.6 对于公铁合建斜拉桥，斜拉索应采取防火措施。

5.5.7 斜拉索风致振动可采用附加螺旋线、表面加工等措施进行控制，采取措施后斜拉索斯克鲁顿数 Sc 应大于 10。

5.6 附属

5.6.1 主体结构设计时应预留附属设施设置条件。

5.6.2 索塔内应配有照明、防火设备及排水设施。

5.6.3 斜拉桥应根据桥用设备的需求设置相关缆线通道，并采取必要的安全防护措施。

5.6.4 斜拉桥索塔应设置接闪器、引下线和接地装置等防雷保护措施。

5.6.5 通航水域上的斜拉桥应根据航道等级装设助航标志(日标标识和夜标标识)，并设置索塔塔柱及辅助墩防撞设施。

5.6.6 索塔应按相关规定设置航空障碍灯系统。

5.6.7 冰凌易发区的内收索面斜拉桥，斜拉索应采取除冰措施。

6 施 工

6.1 一般规定

6.1.1 铁路混合组合梁斜拉桥的施工应符合现行《铁路桥涵工程施工安全技术规程》TB 10303、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10752 的相关规定。

6.1.2 施工前应根据设计文件、结构特点、受力特性、施工条件等编制专项施工方案和工艺，宜采用信息化技术加强施工过程控制。

6.1.3 应通过施工控制保证结构在施工过程中始终处于安全范围内，使成桥后的线形和内力符合设计要求。

6.1.4 斜拉索在梁上、塔上的安装定位应考虑恒载压缩变形的影响；支座在梁上的安装定位，应考虑主梁恒载压缩变形、温度的影响。

6.2 钢梁施工

6.2.1 钢梁应按试装图进行连续匹配预拼装，预拼装的梁段数不应少于 3 段，未经预拼装检验合格，不得成批生产。

6.2.2 钢梁安装可采用在支架上分段安装、分段顶推及悬臂拼装等。

6.2.3 钢梁在吊装、对位、拼接各环节应采取下列措施：

1 自身刚度较小的敞口钢箱梁、局部受力较大的板件，应采取临时或永久措施，防止吊装、运输、安装过程中产生永久变形。

2 吊具的强度和刚度应满足吊装需要，吊点位置应合理，避免钢梁发生扭转、翘曲和侧倾。

3 吊装应轻吊轻放，支垫平稳，安装前应对临时支架、吊机起吊能力和钢梁结构在不同受力状态下的强度、刚度及稳定性进行验算。

4 钢梁的涂装应进行保护，焊钉、连接板等连接件应进行防护。

6.2.4 支架上分段安装应满足下列要求：

1 支架应具备钢梁就位后平面纠偏、高程及倾斜度调整等功能。

2 支架纵横向线形应与设计要求的梁底线形相符合，同时兼顾支架变形产生的影响。

3 钢梁安装应严格控制其平面精度和高程，钢梁与设计位置的偏差不应大于 5mm。

4 拼装过程中应减少相邻梁段接缝偏差，在纵、横向及高度方向的拼接接口不宜大于2mm。

6.2.5 钢梁顶推施工应根据钢梁的结构特点选择合理的顶推方式，制定专项方案，并满足下列要求：

1 设置导梁时，导梁和钢梁之间宜采用螺栓连接，其长度宜为最大顶推跨度的0.40~0.75 倍，并具有足够的刚度和强度。

2 顶推前，应对临时支撑和钢梁在不同工况下的强度、稳定性进行检算，必要时对钢梁的支点和顶推施工点处采取加固措施，防止在顶推过程产生变形和失稳。

3 正式顶推施工前，应先进行预顶调试；顶推过程中，宜对梁体的轴线位置、墩台的变形、主梁及导梁控制截面的挠度和应力变化等进行施工监测。

6.2.6 悬臂安装施工宜按吊装就位、调整定位、复核坐标、临时固定、连接的顺序进行，其中复核坐标应包括复核轴线、里程和高程，斜拉索的坐标与索力应满足设计和施工监控的要求。

6.2.7 长悬臂施工应避免在不利的大风或台风季节进行，钢梁合龙施工应选择温差较小、温度相对稳定、风速较低的时段。

6.3 混凝土梁施工

6.3.1 混合梁斜拉桥边跨混凝土浇筑施工前宜进行混凝土配合比及工艺试验，确保混凝土匀质性和容重等满足设计要求。

6.3.2 边跨混凝土梁采用支架现浇施工时，应根据主梁的结构构造特点和施工能力，在施工前合理确定其分段浇筑长度及浇筑施工工艺；当条件具备时，可整幅整跨一次进行浇筑施工。

6.3.3 支架上分段浇筑时，应考虑预应力筋张拉时梁体上拱对支架受力的影响，在支架受力增大位置采取加强措施，必要时设置临时刚性支墩。

6.3.4 对纵向预应力长钢束的张拉，宜通过必要的试验确定其张拉程序和各项参数，张拉持荷时间宜增加 1 倍；当钢束的伸长值不能满足要求时，可采取补张拉或多次张拉的措施，但张拉应力不得大于设计规定的最大控制应力。

6.3.5 中跨主梁合龙前，应及时完成边跨混凝土主梁模板的卸载，使现浇支架卸载；卸载时应严格按施工控制的程序进行，防止混凝土主梁受力不均产生开裂。

6.4 钢混组合梁施工

6.4.1 施工前应根据钢混组合梁特点和受力特性确定施工程序和工艺，防止组合梁混凝土桥面板开裂或钢混界面脱离。

6.4.2 钢混组合梁的连接件与钢结构焊接前，应进行焊接工艺试验及评定试验，合格后方可正式实施。宜通过混凝土施工工艺试验确定施工参数，验证混凝土性能及浇筑振捣工艺，连接件与混凝土的结合质量应满足设计要求。

6.4.3 连接件施工应符合下列规定：

1 焊钉施工时，应严格控制焊钉平面位置、间距及焊钉连接件的外侧边缘与钢梁翼缘边缘的距离。

2 开孔板施工时，贯通钢筋安装及定位宜居中布置，并严禁与开孔板焊接。

3 型钢连施工时，应严格控制钢梁顶面高程，不得采用填塞焊形式调整型钢高程。

6.4.4 预制混凝土板施工应符合下列规定：

1 桥面板预制及存放台座基础宜选择坚实地基，对软质地基应进行加固。预制台座的顶面可设置成水磨石或钢板，顶面的平整度在 2m 范围内宜不大于 2mm。

2 桥面板预制所用的侧向模板宜采用定型钢模，并应根据设计图中钢筋和预应力管道的位置在模板上设置相应的槽口，使钢筋和预应力管道能被准确安装定位；侧向模板应便于安装、拆除和调整，连接应平顺、严密、不漏浆。

3 预制板应采用四点起吊，预制板的存放支点宜和吊点位置相吻合；同时 4 个支点应严格调平，保证在同平面内；预制前设计好吊耳，吊耳应有足够的强度和刚度，必要时应对预制板的吊点局部布置加强钢筋。

4 为保证连接件与钢筋的准确匹配，应在底模上标出桥面板钢筋位置。

5 侧模上应开有钢筋定位槽口。侧模制作安装精度：对角线长度允许偏差应为 $\pm 3\text{mm}$ ，钢筋预留槽位置允许偏差应为 $\pm 3\text{mm}$ 。

6. 拆除模板并在混凝土强度达到 2.5MPa 后，应及时对桥面板侧面的混凝土进行凿毛，凿毛可采用人工方式或采用高压水冲法，凿毛的深度宜为 5~8mm，且应露出粗集料。

7 预制板：长宽尺寸允许偏差应为 $\pm 3\text{mm}$ ，厚度允许偏差应为 $\pm 5\text{mm}$ ；连接钢筋预埋位置允许偏差应为 $\pm 5\text{mm}$ 。板面沿板长方向支承面平整度应控制在 2m 范围内小于 2mm。

6.4.5 预制混凝土板吊装和安装应符合下列规定：

1 混凝土强度达到 85%强度后方可吊装，并配置相应的吊具防止吊装受力不均产生裂

纹。

2 吊装和移运过程中应对预制板伸出钢筋进行临时防护，对于锚固板连接筋，应对丝口进行保护。

3 安装预制板时应精确定位，满足在钢梁上的搁置宽度要求，避免与焊钉等连接件抵触。

4 预制板安装允许偏差应为 $\pm 5\text{mm}$ ，相邻两板错开量应小于 3mm 。

6.4.6 混凝土预制板与钢结构边缘宜采用橡胶垫条密封，施工时应应对垫条进行压缩性和施工工艺试验，确定其实际压缩量和施工工艺。

6.4.7 湿接缝施工应符合下列规定：

1 对预制混凝土板各单元之间的湿接缝，宜采用微膨胀补偿收缩混凝土。

2 湿接缝浇筑前，应对安装过程中变形的连接钢筋予以校正和调直，对损伤的连接件予以修补。

3 针对连接件构件对混凝土浇筑带来的影响，应采取相应措施保证湿接缝混凝土密实度、强度和耐久性。

4 浇筑桥面板混凝土前，应清除钢梁上翼缘和连接件上的锈蚀、污垢，保持表面清洁。

5 混凝土应保湿、保温养护不少于 7d ；当气温低于 5°C 时，宜采用保温措施，浇筑完成后应及时覆盖保温。

6 混凝土强度达到 85% 设计强度前，不得在其上进行施工作业。

6.5 钢混结合段施工

6.5.1 结合段钢结构施工前，应制定制造方案和焊接工艺，确保空间狭小的构件可焊性及焊接质量。

6.5.2 钢混结合段宜在稳定性好、变形小的支架上施工。在钢混结合段混凝土浇筑之前，应对钢梁和混凝土梁之间进行临时锁定。

6.5.3 应保证钢混结合段混凝土的密实度，当钢混脱空面积大于所在隔室（截面面积） 10% 或表面钢混缝隙宽度大于 0.15mm 时，应及时灌浆或注浆处理。

6.5.4 结合段混凝土施工应符合下列规定：

1 钢混结合段应配制大流态补偿收缩高性能混凝土，可采用微膨胀钢纤维混凝土或聚丙烯纤维混凝土。

2 宜选择夜间气温较低时段浇筑混凝土，浇筑前应进行降温使钢结构温度与环境温度

一致。

3 宜在不易振捣的钢结构部位预留出气孔或振捣孔，当插入式振捣棒无法使用时，可在钢结构对应部位采用附着式振捣器辅助振捣。

4 对需要保证钢板与混凝土间接触率的部位或构造，宜开展混凝土浇筑或压浆工艺试验。

6.5.5 预应力施工应符合下列规定：

- 1 预应力管道应设定束形控制点，其位置允许偏差应为 $\pm 3\text{mm}$ 。
- 2 施加预应力时，张拉装置不宜直接作用于钢板上，应对钢板进行有效防护。
- 3 钢箱梁侧预应力锚头应锚固于承压板上，宜采用防水帽等装置对其进行密封处理。

6.6 索塔、斜拉索施工

6.6.1 索塔施工根据斜拉桥索塔结构、外形尺寸和设计要求选用合适的施工方法和施工机具。

6.6.2 混凝土索塔塔柱的施工分段应方便混凝土浇筑，并使模板结构简化。索塔的模板系统应具有足够的强度、刚度和稳定性，且宜进行抗风稳定性验算。

6.6.3 混合索塔塔柱结合部的施工应满足下列要求：

- 1 测量、定位和安装工作宜在温度稳定且无日照影响的时段进行。
- 2 结合部混凝土施工前宜按实体比例模型进行混凝土浇筑工艺试验。
- 3 塔柱结合部底座轴线、高程允许偏差均应为 $\pm 3\text{mm}$ 。
- 4 塔柱结合部开孔板连接件贯通钢筋应定位准确，构造主筋同剪力钢筋分层错开绑扎。纵、横向剪力筋间应固定，保证布设位置准确、牢固，同时应防止混凝土振捣时出现位移。
- 5 混凝土分层浇筑厚度宜为 $200\sim 300\text{mm}$ ，相邻隔舱混凝土面高差不宜大于 300mm 。相邻隔舱应预留孔洞，以便于混凝土流动，使剪力键间气泡排出。

6.6.4 斜拉索预埋导管应考虑垂度修正，定位安装时应采取措施进行调整和固定。施工过程中，应加强对斜拉索预埋导管的防护，防止腐蚀及积水。

6.6.5 斜拉索施工应满足下列要求：

- 1 应注意对斜拉索的保护，并应有可靠的防火措施。
- 2 两端锚具和索导管应设置临时防护及密封措施，防止雨水侵入和异物撞击锚头。
- 3 应采取临时抑振措施控制施工阶段斜拉索振动。

6.6.6 在全部施工过程中均应注意对斜拉索的保护，放索、牵引、锚固、张拉及调整的各道

工序中均要避免扭、碰、压、折、刮伤斜拉索。

6.7 施工监控

6.7.1 铁路混合梁斜拉桥应采用多目标几何形态控制法计算施工阶段内力及线形，主跨钢梁以几何参数为基本控制目标，以斜拉索无应力索长为主要调控手段；边跨混凝土梁以力学参数作为基本控制目标，以混凝土梁无应力线形作为主要控制手段。

6.7.2 铁路混合组合梁斜拉桥施工控制宜通过调整立模标高、调整索力、临时配重、增加辅助构件等措施消除现场误差，监测施工过程中的结构状态、环境参数，使大桥施工完成后线形、内力符合设计要求。

6.7.3 施工监控计算应对混凝土弹性模量、容重、道砟重量、温度等参数进行敏感性分析，并应根据实际施工条件进行修正。

6.7.4 现场监测应进行墩、塔、梁的应力与线形监测，斜拉索索力监测，以及主梁钢混结合段局部应力、钢混脱空、钢混界面滑移、边跨混凝土梁墩顶处应力的监测。

6.7.5 钢混结合段应力、钢混脱空及钢混界面滑移监测应满足下列要求：

1 应力监测每个钢混结合段不少于 2 个监测截面，每个截面应包含钢顶底板、PBL 开孔钢板、混凝土、焊钉及 PBL 剪力键等构件测点。

2 钢混脱空监测每个结合段选取 2~6 个测点，测点主要布置于钢顶板或钢格式顶板下及其与腹板等角落位置。

3 钢混界面滑移选取 2~6 个测点，主要布置在钢顶板或钢格式顶板末端与混凝土连接位置；

4 钢混结合段应力可采用振弦式传感器测试。

5 钢混脱空可采用拉线式传感器、超声波，并结合人工锤击随机监测。

6 钢混界面滑移可采用机电式百分表等传感器，并结合人工目检监测。

7 钢混结合段监测宜在每施工一个节段后进行一次全面测试，并在合龙、二期恒载、斜拉索调索前后、铺轨前后各进行 1 次测量。

6.7.6 钢混结合段出现实测应力结果与理论结果出现明显偏差时，应注意检查既有结构受力与线形，并加强监测。

6.7.7 主梁宜采用无应力状态法合龙。合龙口姿态调整后，应进行不少于 24h 合龙口主梁高程、轴线偏位、合龙口宽度及温度场的连续监测。

6.7.8 斜拉索索力实测值与设计值的偏差宜控制在 5% 以内，超过时宜进行调整。调整索力

时应对索塔和相应的主梁梁段进行变形和应力的监测，并做记录。

6.7.9 施工监控传感器的布置宜兼顾后期运营健康监测的需要。

7 验 收

7.1.1 铁路混合组合梁斜拉桥的验收应满足《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095、《高速铁路工程静态验收技术规范》TB 10760、《高速铁路工程动态验收技术规范》TB 10761、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10752、《铁路混凝土工程施工质量验收规范》TB 10424 的相关规定。

7.1.2 主梁高程误差应控制在 $L/10000$ 以内，且不应大于 50mm。

7.1.3 混凝土梁的梁段累计长度允许偏差不应大于 $\pm 15\text{mm}$ ，中线允许偏差不应大于 15mm。

7.1.4 钢梁尺寸及安装偏差应符合下列要求。

表 7.1.4 钢梁尺寸及安装允许偏差

序号	项目	允许偏差(mm)
1	梁高	± 4
2	主梁中心距	± 3
3	上拱度（与设计值比）	+10 -3

7.1.5 组合梁偏差应符合下列要求。

表 7.1.5 组合梁允许偏差

序号	项目	允许偏差(mm)
1	桥梁全长	± 15
2	桥面板厚度	+10 -5
3	桥面板中心线与钢梁中心线	10
4	上拱度（与设计值比）	+10 -3

7.1.6 钢混结合段钢混脱空面积不应大于所在隔室（截面面积）10%，且表面钢混缝隙宽度不大于 0.15mm。

7.1.7 索塔的倾斜度不应大于承台以上塔高的 $1/3000$ ，且不应大于 30mm 或设计文件的规定值。

7.1.8 斜拉索成桥索力偏差应符合下列要求。

表 7.1.8 成桥后斜拉索的允许偏差

序号	项目		技术要求
1	索力		宜控制在 $\pm 5\%$ 或设计允许偏差值
2	拉索长度	$\leq 100\text{m}$	$\pm 20\text{mm}$
3		$> 100\text{m}$	1/20000 索长

7.1.9 高速铁路混合组合梁斜拉桥无砟轨道静态验收应满足下列要求。

1 桥上轨道板精调定位允许偏差应符合表 7.1.9-1 的规定。

表 7.1.9-1 轨道板精调定位允许偏差

序号	检验项目	允许偏差 (mm)	
1	相邻轨道板接缝处承轨台顶面平面位置相对偏差	± 0.5	不允许连续 3 块以上轨道板出现同向偏差。
2	相邻轨道板接缝处承轨台顶面相对高差	± 0.5	

注：① 面向里程增加方向，相邻轨道板接缝处承轨面相对横向偏差，偏向左侧的横向偏差为正（+）、偏向右侧的横向偏差为负（-）；

② 面向里程增加方向，相邻轨道板接缝处承轨面相对高差，前块轨道板承轨面高程减后块轨道板承轨面高程，按计算结果标记正负高差。

2 桥上无砟轨道静态铺设精度标准应符合表 7.1.9-2 的规定。

表 7.1.9-2 桥上无砟轨道静态铺设精度标准

序号	项目	允许偏差		备注
1	轨距	±1mm		相对于标准轨距 1435mm
		1/1500		变化率
2	轨向	2mm		弦长 10m
		2mm/5m(或 8a)m		基线长 30m（或 48a）m *
		10mm/150m(或 240a)m		基线长 300m（或 480a）m *
3	高低	2mm		弦长 10m
		2mm/5m (或 8a)m		基线长 30m（或 48a）m *
		200km/h< v ≤250km/h	10mm	弦长 60m※
		250km/h< v ≤300km/h	8mm	
	300km/h< v ≤350km/h	7mm		
4	水平	2mm		不包含曲线、缓和曲线上的超高值
5	扭曲	2mm		基长 3m 不含缓和曲线上由于超高顺坡所造成的扭曲量
6	与设计高程偏差	10mm		设计基准温度
7	与设计中线偏差	10mm		

- 注：① 表中 a 为扣件节点间距（m）， $8a$ 、 $240a$ 为矢距法检测测点间距；
- ② 轨向偏差不含曲线；
- ③ 带 * 为采用矢距差法测量；
- ④ 带※为中点弦测法测量，采用 200m 高通滤波后 60m 弦测量的正矢值评价；
- ⑤ 高低、轨向静态不平顺应考虑桥梁温度变形和施工偏差的影响。

8 健康监测

8.1 一般规定

8.1.1 健康监测系统应具备对桥址环境、作用、结构响应和表观状况的实时监测、采集、传输、数据处理、异常状态预警等功能，并满足与工务安全生产管理信息系统接入的要求。

8.1.2 监测系统实施应做到安全适用、技术先进、经济合理，且监测设备应具有良好的可靠性、稳定性和耐久性。

8.1.3 监测系统的运维和管理应在不影响铁路运行安全的前提下，确保系统硬件和软件安全可靠、持续、稳定运行，系统软硬件的更换与升级应保障监测数据衔接与分析的连续性。

8.1.4 监测数据应用应为桥梁结构安全使用、列车安全运营提供运维和管养依据。

8.1.5 跨度 200m 以上斜拉桥宜设置健康监测系统，实时掌握大桥的静、动力性能及长期服役状态。

8.2 监测系统设计

8.2.1 监测系统构成

1 监测系统由传感器系统、数据采集和处理系统、数据传输系统、数据存储和管理系统、数据分析系统组成。

2 传感器系统应满足监测的目的和功能，宜优先采用标准成熟的产品，并且其布置宜有一定的冗余度。

3 数据采集和处理系统应具备测量信号拾取、采集及转换为原始数据的功能，并应满足测量范围、精度、使用环境要求。

4 数据传输系统应具备将采集的原始数据按规定格式进行存储及向远方传输与备份的功能，并满足保持数据完整性与远程控制的要求。

5 数据存储和管理系统应具备将实时数据和历史数据进行归档、管理的功能，其数据库设计应遵循可靠性、先进性、开放性、可扩展性、标准性和经济性的基本原则，并保证数据的共享性、数据结构的整体性、数据库系统与应用系统的统一性。

6 数据分析系统应具备将数据按要求进行处理、实时预报警及人机交互的功能，并满足数据的特殊处理要求。

8.2.2 监测内容

监测内容应包括桥址环境、荷载作用、结构响应和其他变化，分为应测项、宜测项、选测项，可根据结构特定需求选择监测内容，具体应符合表 8.2.2 的规定。

表 8.2.2 铁路混合梁斜拉桥监测内容表

监测类别		监测内容	监测要求
桥址环境	温度、湿度	桥址环境温度、湿度	■
		主梁内温度、湿度	■
		索塔锚固区温度、湿度	■
	雨量	降雨量	○
	气体	箱内有害气体、氧气	△
	结冰	斜拉索结冰	○
荷载作用	风速、风向	桥面风速、风向	■
		塔顶风速、风向	■
	结构温度	混凝土和钢结构温度	■
	列车荷载	车速	△
		轮轨力	△
	地震、船撞	承台顶部或桥墩底部振动	■
结构响应	位移	主梁竖向位移	■
		主梁横向位移	■
		支座位移	■
		梁端纵向位移	■
		塔顶偏位	■
		钢轨伸缩器基本轨位移	■
		钢轨伸缩器尖轨位移	■
		轨枕间距	■
		伸缩装置伸缩量	■
	转角	塔顶转角	△
		梁端水平转角	■
		梁端竖向转角	■
	应变	主梁关键截面应变	■
		索塔关键截面应变	△
	索力	斜拉索索力	■

监测类别		监测内容	监测要求
	支座反力	支座反力	△
	振动	主梁竖向振动加速度	■
		主梁横向振动加速度	■
		主梁纵向振动加速度	△
		塔顶水平双向振动加速度	△
		斜拉索振动加速度	△
其他变化	基础冲刷	基础冲刷深度	○
	裂缝	混凝土结构裂缝	△
		钢结构裂缝	△
	腐蚀	墩身、承台混凝土氯离子浓度	○
		墩身、承台混凝土氯离子侵蚀深度	○
	视频	结构表观情况	△
		航道状况	○

注 1: “■”表示应监测参数, “△”表示宜监测参数, “○”为选测项。

8.2.3 监测测点布置应符合下列总体原则

1 测点布置应考虑结构受力特点、理论分析结果及构件重要性, 选取结构性能参数变化敏感的部位进行布设, 并满足预警、监测参数分析和结构状态评估需求。

2 测点布设应该明确传感器编号、类型、安装位置及方向, 便于监测设备的安装、测试、维护、更换以及线缆敷设。

3 桥址环境温湿度测点宜布设于主梁跨中位置。对于桥梁封闭空间内部, 温湿度测点应布设于桥梁结构对温度、温度变化敏感的位置。

4 桥址降雨量监测宜布设于桥梁无遮挡位置。

5 斜拉索结冰视频监测测点可布设于索塔塔顶附近。

6 风速、风向测点宜布设在桥面上下游侧、塔顶等各方向无遮挡位置。

7 结构温度测点布设应综合考虑桥梁结构的温度梯度和温差效应, 对于钢混组合梁, 应在湿接缝位置提前预埋温度测点, 满足钢混组合梁结构温度场整体监测需求。

8 地震测点宜布设在桥梁承台顶部、索塔底部等位置。船撞测点可与地震测点、结构振动测点统一设置。

9 结构位移监测测点布设应综合考虑桥梁位移监测具体需求, 选择有代表性的关键断

面及位置进行监测。

10 塔顶转角监测测点宜布设与塔顶位置，梁端转角监测测点应在主梁梁端上、下游两侧对称布置。

11 应变测点应根据结构计算结果选择受力较大或影响结构整体安全的关键截面和敏感部位，对于钢混结合段位置，应考虑提前预埋应变测点。

12 索力监测测点应选择上、下游斜拉索成对布设。

13 结构振动监测测点应结合桥梁结构模态分析，布设在结构主要振型的关键位置，测点宜左右侧对称布置。

14 腐蚀监测测点可布设在墩台水位变动、浪溅区的混凝土保护层内。

8.2.4 仪器设备选型

1 桥监测系统中传感器、数据采集、传输、存储、分析和展示设备应考虑监测内容、更换便利性、使用寿命、性能稳定性的要求进行选取。

2 预埋在结构内部的传感器的使用寿命应不低于 10 年，附着安装在结构表面的非埋入式传感器的使用寿命应不低于 5 年。

3 传感器的选取应考虑频响范围、量程、分辨率、稳定性、重复性、灵敏度、精度。

4 数据采集设备应根据传感器输出信号类型、范围、兼容性、精度和分辨力等要求进行设备选型。

5 采集设备与传感器之间应有明确的拓扑关系，可选择数据集中采集和分散采集两种模式。监测测点相距较远且较分散时，宜选用分布式数据采集硬件；监测测点相距较近且较集中时，宜选用集中式数据采集硬件。

6 采集设备宜对信号进行放大、滤波、去噪、隔离等预处理。对信号强度量级有较大差异的不同信号，应严格进行采集前的信号隔离。

7 采样频率应根据监测应用分析要求和功能要求自行设定，宜符合表 8.2.4 中的规定。

表 8.2.4 监测内容采样频率表

监测科目	监测内容	采样频率
桥址环境	温度	≤1/600 Hz
	湿度	1/600 Hz
	雨量	1/60 Hz
	结冰	在线：25 FPS

荷载作用	风速风向	超声风速仪：10 Hz 机械式风速仪：1 Hz
	结构温度	1/600 Hz
	列车车速	车速设备：触发采集
	地震、船撞	触发采集加速度：50 Hz
结构响应	位移	动位移：25 Hz 静位移：1 Hz
	转角	1 Hz
	应变	动应变：25 Hz 静应变：1/60 Hz
	索力	压力传感器:1Hz 加速度传感器:50Hz
	支座反力	1 Hz
	振动	50 Hz
其他变化	基础冲刷	在线：1MHz 离线：每年 1 次~2 次
	裂缝	动态：10Hz 静态：1/3600Hz 图像：每周 1 次
	腐蚀	在线：1/3600Hz 离线：每年 1 次~2 次
	视频	25 FPS

8 荷载作用、环境和结构响应监测数据应同步采集，宜采用北斗卫星导航时钟同步技术。动态监测变量的数据采集时钟同步误差应小于 0.1ms，静态监测变量的数据采集时钟同步误差应小于 1ms。

9 数据采集应采取串模干扰抑制、共模干扰抑制、防雷接地技术和屏蔽技术等抗干扰措施。

10 数据传输系统应优先考虑对铁路运行安全影响，同时考虑采集信号类型、抗干扰性能、传输距离确定采用传输设备类型。

11 数据存储与管理模块应具备数据高效存储、数据快速显示及指定时间回放、报表生成、数据归档、容错、数据库容灾备份、故障恢复及日志审计等功能。

8.3 监测系统实施与运维

8.3.1 监测系统实施应符合《铁路工程基本作业施工安全技术规程》TB 10301 等相关标准的规定。

8.3.2 监测系统安装应根据实施方案编制安装作业指导书，技术交底后方可进场实施。

8.3.3 传感器、采集设备的安装位置应符合设计规定，设备安装使用的各类预埋件、连接件及保护件应具有足够的强度、刚度，其材质选择及防腐处理应满足耐久性要求。

8.3.4 传感器、采集设备安装工艺应满足实施方案要求及设备技术要求。

8.3.5 线缆的敷设与防护应符合《铁路信号设计规范》TB 10007 及《铁路通信设计规范》TB 10006 等相关标准的规定。轨旁设备及线缆安装应牢固可靠，避免对行车安全造成影响。

8.3.6 线槽应综合考虑工程环境条件、重要性和耐久性等因素合理选择防腐处理方式，并应设置伸缩节。

8.3.7 监测系统实施完成后，应对供电情况、设备运行状况、采集数据的可靠性和同步性、信号传输的稳定性等项目进行调试。

8.3.8 系统软件开发完成后，应对数据采集与传输软件、数据存储与管理软件、用户端软件的接口、设计要求的各项功能以及稳定性进行调试，软件调试完成后应出具软件测试报告。

8.3.9 监测系统宜在施工过程中同步安装，并在静态验收荷载试验、动态验算试验中进行系统测试与验证。

8.3.10 监测系统运维内容应包含日常检查、专项检查、定期保养和专项维护。

8.4 监测数据应用

8.4.1 监测数据应用内容包括监测数据分析、超限阈值与预警、结构状态评估。

8.4.2 监测数据分析应包含特征值分析和规律分析内容，监测数据分析应剔除错误数据，可采用统计分析、相关性分析、趋势性分析、比对性分析、机器学习等方法。

8.4.3 监测系统超限阈值宜采用橙色和红色两级预警，预警阈值设置原则符合表 8.4.3 的规定。

表 8.4.3 预警阈值设置原则

预警等级	阈值
橙色预警 (警戒值)	根据实测数据统计取值，取具有 97.5%保证率的预警指标分位值
红色预警 (安全值)	结构响应超出设计荷载组合最不利工况的响应值，或相关规范与规程规定的限值，或行车安全限值，或设计允许值，可能影响桥梁结构安全，作为红色预警阈值。

8.4.4 监测系统应建立明确的预警指标体系，设置预警阈值，并进行实时、自动的预警。

8.4.5 监测系统应定期对结构进行状态评估，形成分析评估报告，宜采用季报、年报和特殊

事件专项报告。

8.4.6 结构状态评估宜采用层次分析法，通过对桥梁结构指标体系的合理划分和权重赋值，综合判定结构健康状态，桥梁结构指标层的评分宜根据监测指标占其阈值区间范围进行评分，可采用表 8.4.6 方法确定指标得分。

表 8.4.6 监测指标评估表

评定准则	评分
指标值在小于橙色预警限值的 90%	100
指标值在橙色预警限值的 90%-100%以内	90-99
指标值在橙色预警与红色预警之间，在橙色预警限值 130%以内	60-89
指标值在橙色预警与红色预警之间，超过橙色预警限值的 130%	1-59
指标值超过红色预警限值	0

用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

（1）表示很严格，非这样做不可的词，正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

（2）表示严格，在正常情况下均应这样做的词，正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

（3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的词，正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

（4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的词，采用“可”。

2 引用标准的用语采用下列写法：

（1）在标准总则中表述与相关标准的关系时，采用“除应符合本规范的规定外，尚应符合国家和行业现行有关标准的规定”；

（2）在标准条文及其他规定中，当引用的标准为国家标准和行业标准时，表述为“应符合《××××××》×××的有关规定”；

（3）当引用本标准中的其他规定时，表述为“应符合本规范第×章的有关规定”、“应符合本规范第×.×节的有关规定”、“应符合本规范第×.×.×条的有关规定”或“应按本规范第×.×.×条的有关规定执行”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

- (1) 《铁路斜拉桥设计规范》 TB 10095
- (2) 《铁路桥涵混凝土结构设计规范》 TB 10092
- (3) 《铁路桥梁钢结构设计规范》 TB 10091
- (4) 《耐候结构钢》 GB/T 4171
- (5) 《桥梁用结构钢》 GB/T 714
- (6) 《不锈钢复合钢板和钢带》 GB/T 8165
- (7) 《纤维混凝土应用技术规程》 JGJ/T 221
- (8) 《补偿收缩混凝土应用技术规程》 JGJ/T 178
- (9) 《混凝土外加剂匀质性试验方法》 GB/T 8077
- (10) 《混凝土外加剂匀质性试验方法》 GB/T 8077
- (11) 《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》 GB/T 18365
- (12) 《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》 GB/T 30826
- (13) 《合金结构钢》 GB/T 3077
- (14) 《优质碳素结构钢》 GB/T 699
- (15) 《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》 GB/T 10433
- (16) 《膨润土橡胶遇水膨胀止水条》 JG/T 141
- (17) 《钢-混凝土组合桥梁设计规范》 GB 50917
- (18) 《铁路斜拉桥设计规范》 TB 10095
- (19) 《铁路桥涵工程施工安全技术规程》 TB 10303
- (20) 《铁路桥涵工程施工质量验收标准》 TB 10415
- (21) 《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》 TB 10752
- (22) 《高速铁路工程静态验收技术规范》 TB 10760
- (23) 《高速铁路工程动态验收技术规范》 TB 10761
- (24) 《铁路桥涵工程施工质量验收标准》 TB 10415
- (25) 《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》 TB 10752

(26) 《铁路混凝土工程施工质量验收规范》 TB 10424

中国工程建设标准化协会标准

铁路混合组合梁斜拉桥技术规程

T/CECS ××××—202×

条文说明

制定说明

本规程制定过程中，编制组针对铁路混合/组合梁斜拉桥进行了广泛深入的调查研究，总结了我国铁路建设的实践经验，同时参考了国内外先进技术法规、技术标准，通过大量工程实践取得了铁路混合/组合梁斜拉桥设计、施工、验收和健康监测的技术参数。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程时能正确理解和执行条款规定，《铁路混合/组合梁斜拉桥技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1 总 则	44
3 基本规定	46
3.1 一般规定	46
3.2 孔跨及结构布置	46
3.3 刚度及变形控制	50
4 结构设计	52
4.1 一般规定	52
4.2 材料	53
4.3 荷载及组合	55
4.4 结构计算	58
5 结构构造	62
5.1 一般规定	62
5.3 连接件	68
5.4 索塔	69
5.5 斜拉索	71
5.6 附属	72
6 施 工	73
6.1 一般规定	73
6.2 钢梁施工	73
6.3 混凝土梁施工	73
6.4 钢混组合梁施工	74
6.5 钢混结合段施工	74
6.6 索塔、斜拉索施工	75
6.7 施工监控	76

7 验 收	78
8 健康监测	79
8.2 监测系统设计	79
8.3 监测系统实施与运维	79
8.4 监测数据应用	79

1 总 则

1.0.2 近年来,我国高速铁路大跨度桥梁的快速发展,世界首座铁路混合梁斜拉桥——主跨 468m 宁波枢纽北环线甬江特大桥、世界首座无砟轨道组合混合梁斜拉桥——主跨 300m 昌赣客专赣江特大桥相继建成,相关成果已推广应用于全国 40 余座 200 至 800m 大跨度铁路桥梁中。《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 中规定跨径不大于 1100m。根据混合组合梁斜拉桥结构体系的受力原理,结合目前材料性能、施工设备和技术水平等,铁路混合组合梁斜拉桥的经济合理跨径可以突破 1100m。

表 1.1.1 部分已建（在建）铁路混合组合梁斜拉桥

序号	桥名	建成 通车 时间	孔跨布置 (m)	主梁形式	
				边跨	中跨
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	2014	53+2×50+66+468+66+2×50+53	混凝土箱梁	钢箱梁
2	昌赣客专赣江特大桥	2019	35+40+60+300+60+40+35	混凝土箱梁	钢混组合梁
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	2021	60+60+70+448+70+60+60	混凝土箱梁	钢箱梁
4	南沙港铁路西江特大桥	2021	2×57.5+172.5+600+4×57.5	混凝土箱梁	钢箱梁
5	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	2021	2×50+224+672+174+3×50	混凝土箱梁	钢箱梁
6	湖杭铁路富春江特大桥	2022	30+46+300+97+62.395	混凝土箱梁	钢混组合梁
7	福厦高铁乌龙江特大桥	2023	72+109+432+56+56	混凝土箱梁	钢箱梁
8	福厦高铁安海湾特大桥	2023	40+135+300+135+40	钢混组合梁	
9	福厦高铁泉州湾跨海大桥	2023	70+130+400+130+70	钢混组合梁	
10	沪苏湖铁路斜塘特大桥	2024	40+60+260+60+40	混凝土箱梁	钢混组合梁
11	汉巴南铁路嘉陵江大桥	2024	45+55+58+335+58+49	混凝土箱梁	钢箱梁
12	渝黔铁路太子坪乌江大桥	在建	30+40+60+300+60+40+30	混凝土箱梁	钢混组合梁
13	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	在建	67.5+60+60+350+60+60+67.5	混凝土梁	钢混组合梁
14	深江铁路鸡鸦水道特大桥	在建	50+70+70+408+70+70+50	混凝土梁	钢混组合梁
15	深江铁路磨刀门水道特大桥	在建	56+128+320+128+56	混凝土板-钢桁组合梁	

序号	桥名	建成 通车 时间	孔跨布置 (m)	主梁形式	
				边跨	中跨
16	深江铁路虎跳门水道特大桥	在建	64+80+300+80+64	混凝土板-钢桁组合梁	
17	珠肇高铁西江特大桥	在建	70+148+2×435+148+70	钢混组合梁	

1.0.3 主体结构的设计使用年限与《铁路桥涵设计规范》TB 10002 等规范中的要求相同。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.2 铁路混合梁斜拉桥设计主要需要解决混凝土与钢材两种材料的结合、协调受力问题。钢混结合段是铁路混合梁斜拉桥的关键结构部位，也是该体系桥梁研究的重点和难点，结合段两种材料特性和不同的结构构造会引起结构刚度的突变，结合段接头位置是否合理以及刚度是否匹配，均会影响车桥耦合振动，进而影响行车的安全性和乘坐的舒适性。此外，组合梁中混凝土桥面板与钢梁之间采用抗剪连接件连接，两种材料交界处的变形协调，关系到混凝土板和钢主梁之间的内力分配关系和正常工作状态。

3.1.3 混合组合梁斜拉桥施工过程中经过多次体系转换，结构受力、线形控制等与施工方案和施工顺序密切相关。为保证施工受力状态和线形满足设计要求，制定了本条文。

3.2 孔跨及结构布置

3.2.1 对于铁路混合组合梁斜拉桥，边跨主要起到结构受力与压重的功能。确定合理的边跨和中跨跨径比，可满足中跨满载情况下边跨不出现负反力，缩短边跨长度，降低工程造价。根据对已建大跨度铁路混合组合梁斜拉桥的统计，独塔斜拉桥的边中跨比 0.55~0.70，双塔或斜拉桥的边中跨比 0.30~0.55。独塔混合组合梁斜拉桥边跨和中跨跨径比宜在 0.55~1.00，双塔或多塔混合组合梁斜拉桥边跨与中跨跨径比宜在 0.30~0.55，具体和梁型相关。

表 1 已建（在建）铁路混合/组合梁斜拉桥边跨与中跨跨径比

序号	桥名	孔跨布置（m）	边中跨比	主梁形式	
				边跨	中跨
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	53+2×50+66+468+66+2×50+53	0.47	混凝土箱梁	钢箱梁
2	昌赣客专赣江特大桥	35+40+60+300+60+40+35	0.45	混凝土箱梁	钢混组合梁
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	60+60+70+448+70+60+60	0.42	混凝土箱梁	钢箱梁
4	南沙港铁路西江特大桥	2×57.5+172.5+600+4×57.5	0.48/0.38	混凝土箱梁	钢箱梁
5	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	2×50+224+672+174+3×50	0.48	混凝土箱梁	钢箱梁
6	湖杭铁路富春江特大桥 ^注	30+46+300+97+62.395	0.25/0.53	混凝土箱梁	钢混组合梁
7	福厦高铁乌龙江特大桥 ^{注1}	72+109+432+56+56	0.42/0.26	混凝土箱梁	钢箱梁

序号	桥名	孔跨布置 (m)	边中跨比	主梁形式	
				边跨	中跨
8	福厦高铁安海湾特大桥	40+135+300+135+40	0.58	钢混组合梁	
9	福厦高铁泉州湾跨海大桥	70+130+400+130+70	0.50	钢混组合梁	
10	沪苏湖铁路斜塘特大桥	40+60+260+60+40	0.38	混凝土箱梁	钢混组合梁
11	汉巴南铁路嘉陵江大桥 ^{注1}	45+55+58+335+58+49	0.47/0.32	混凝土箱梁	钢箱梁
12	渝黔铁路太子坪乌江大桥	30+40+60+300+60+40+30	0.43	混凝土箱梁	钢混组合梁
13	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	67.5+60+60+350+60+60+67.5	0.54	混凝土梁	钢混组合梁
14	深江铁路鸡鸦水道特大桥	50+70+70+408+70+70+50	0.47	混凝土梁	钢混组合梁
15	深江铁路磨刀门水道特大桥	56+128+320+128+56	0.58	混凝土板-钢桁组合梁	
16	深江铁路虎跳门水道特大桥	64+80+300+80+64	0.48	混凝土板-钢桁组合梁	
17	珠肇高铁西江特大桥	70+148+2×435+148+70	0.50	钢混组合梁	

注 1：非对称孔跨布置

3.2.2 边跨宜布置 1~3 个辅助墩，与斜拉索构成多点支撑的连续梁结构，减小梁端转角及墩顶折角，提高桥面铺装荷载偏差的冗余度，减少坡段零碎，提高结构整体刚度和线路平顺性，改善结构的静、动力性能。

3.2.3 桥面以上塔高与主跨跨径之比影响体系刚度、拉索索力、主梁轴向力，以及拉索用量。已建大跨度铁路混合梁斜拉索塔高与主跨跨径之比，独塔斜拉桥在 1/3~1/2，双塔斜拉桥在 1/4~1/3。将《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 中的“双塔或多塔斜拉桥可取 1/5~1/3”调整为 1/4~1/3。对于超大跨度桥梁，为了控制塔高，塔高与主跨跨径之比可采用 1/5~1/3。

表 2 已建（在建）铁路混合/组合梁斜拉索塔高与主跨跨径之比

序号	桥名	主跨跨径 (m)	桥面以上塔高与主跨跨径之比
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	468	1/3.31
2	昌赣客专赣江特大桥	300	1/3.41
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	448	1/3.79
4	南沙港铁路西江特大桥	600	1/3.59
5	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	672	1/3.44
6	湖杭铁路富春江特大桥	300	高塔 1/2.77 矮塔 1/4.40

序号	桥名	主跨跨径 (m)	桥面以上塔高与主跨跨径之比
7	福厦高铁乌龙江特大桥	432	高塔 1/3.06 矮塔 1/4.34
8	福厦高铁安海湾特大桥	300	1/3.49
9	福厦高铁泉州湾跨海大桥	400	1/3.65
10	沪苏湖铁路斜塘特大桥	260	1/3.23
11	汉巴南铁路嘉陵江大桥	335	高塔 1/2.89 矮塔 1/3.99
12	渝黔铁路太子坪乌江大桥	300	1/3.23
13	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	350	1/3.21
14	深江铁路鸡鸦水道特大桥	408	1/3.70
15	深江铁路磨刀门水道特大桥	320	1/3.51
16	深江铁路虎跳门水道特大桥	300	1/3.37
17	珠肇高铁西江特大桥	435	1/3.72

3.2.4 根据已建大跨度铁路混合组合梁斜拉桥梁上索间距,并结合《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 中梁上索间距要求,铁路混合组合梁斜拉桥在钢梁和组合梁上的索间距可采用 9~15m,混凝土梁上的索间距可采用 6~10m。塔上索距要求同《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095。

表 3 已建（在建）铁路混合/组合梁斜拉桥梁上索距

序号	桥名	孔跨布置 (m)	边跨		中跨	
			梁型	索距(m)	梁型	索距(m)
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	53+2×50+66+468+66+2×50+53	混凝土箱梁	8~9	钢箱梁	9
2	昌赣客专赣江特大桥	35+40+60+300+60+40+35	混凝土箱梁	10.5	钢混组合梁	12
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	60+60+70+448+70+60+60	混凝土箱梁	8.5~11.5	钢箱梁	12
4	南沙港铁路西江特大桥	2×57.5+172.5+600+4×57.5	混凝土箱梁	8~11.5	钢箱梁	12
5	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	2×50+224+672+174+3×50	混凝土箱梁	6~9	钢箱梁	9~12
6	湖杭铁路富春江特大桥	30+46+300+97+62.395	混凝土箱梁	8.5	钢混组合梁	12
7	福厦高铁乌龙江特大桥	72+109+432+56+56	混凝土箱梁	5~9	钢箱梁	12
8	福厦高铁安海湾特大桥	40+135+300+135+40	钢混组合梁	10.5	钢混组合梁	10.5

序号	桥名	孔跨布置 (m)	边跨		中跨	
			梁型	索距(m)	梁型	索距(m)
9	福厦高铁泉州湾跨海大桥	70+130+400+130+70	钢混组合梁	10.5	钢混组合梁	10.5
10	沪苏湖铁路斜塘特大桥	40+60+260+60+40	混凝土箱梁	8	钢混组合梁	12
11	汉巴南铁路嘉陵江大桥	45+55+58+335+58+49	混凝土箱梁	9	钢箱梁	12
12	渝黔铁路太子坪乌江大桥	30+40+60+300+60+40+30	混凝土箱梁	9	钢混组合梁	12
13	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	67.5+60+60+350+60+60+67.5	混凝土梁	9	钢混组合梁	9
14	深江铁路鸡鸦水道特大桥	50+70+70+408+70+70+50	混凝土梁	9~12	钢混组合梁	12
15	深江铁路磨刀门水道特大桥	56+128+320+128+56	混凝土板-钢桁组合梁	12	混凝土板-钢桁组合梁	12
16	深江铁路虎跳门水道特大桥	64+80+300+80+64	混凝土板-钢桁组合梁	12	混凝土板-钢桁组合梁	12
17	珠肇高铁西江特大桥	70+148+2×435+148+70	钢混组合梁	12	钢混组合梁	12

3.2.5 斜拉桥主梁的高度和宽度是影响斜拉桥竖向和横向刚度的因素之一。对于铁路混合梁斜拉桥，随着梁高的加大，主梁的活载挠度虽然逐渐减小，但变化很小。根据统计数据，主梁的高度可为主跨跨度的 1/50 至 1/150。增加主梁宽度可有效增大结构整体横向刚度主梁，铁路混合梁斜拉桥主梁宽度可考虑为主跨跨度的 1/20~1/30，不宜小于 1/35，具体取值可结合车桥耦合分析等结果综合评判。

表 4 已建（在建）铁路混合组合梁斜拉桥主梁高跨比

序号	桥名	主跨跨径 (m)	主梁形式		中跨主梁梁高(m)	高跨比
			边跨	中跨		
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	468	混凝土箱梁	钢箱梁	5	1/94
2	昌赣客专赣江特大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	4.5	1/67
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	448	混凝土箱梁	钢箱梁	4.5	1/100
4	南沙港铁路西江特大桥	600	混凝土箱梁	钢箱梁	4.5	1/133
5	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	672	混凝土箱梁	钢箱梁	4.79	1/140
6	湖杭铁路富春江特大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	4.25	1/71
7	福厦高铁乌龙江特大桥	432	混凝土箱梁	钢箱梁	4	1/108
8	福厦高铁安海湾特大桥	300	钢混组合梁		4.25	1/71
9	福厦高铁泉州湾跨海大桥	400	钢混组合梁		4.25	1/94

序号	桥名	主跨跨径 (m)	主梁形式		中跨主梁 梁高(m)	高跨 比
			边跨	中跨		
10	沪苏湖铁路斜塘特大桥	260	混凝土箱梁	钢混组合梁	3.8	1/68
11	汉巴南铁路嘉陵江大桥	335	混凝土箱梁	钢箱梁	4.5	1/74
12	渝黔铁路太子坪乌江大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	4.475	1/67
13	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	350	混凝土梁	钢混组合梁	4.472	1/78
14	深江铁路鸡鸦水道特大桥	408	混凝土梁	钢混组合梁	4	1/102
15	深江铁路磨刀门水道特大桥	320	混凝土板-钢桁组合梁		5.9	1/54
16	深江铁路虎跳门水道特大桥	300	混凝土板-钢桁组合梁		5.9	1/51
17	珠肇高铁西江特大桥	435	钢混组合梁		4.25	1/102

表 5 已建（在建）双线铁路混合组合梁斜拉桥主梁宽跨比

序号	桥名	主跨跨径 (m)	主梁形式		中跨主梁 梁宽(m)	宽跨 比
			边跨	中跨		
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	468	混凝土箱梁	钢箱梁	21	1/22
2	昌赣客专赣江特大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	16.3	1/18
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	448	混凝土箱梁	钢箱梁	16.88	1/27
4	南沙港铁路西江特大桥	600	混凝土箱梁	钢箱梁	21	1/29
5	福厦高铁安海湾特大桥	300	钢混组合梁		21	1/14
6	福厦高铁泉州湾跨海大桥	400	钢混组合梁		18.5	1/22
7	汉巴南铁路嘉陵江大桥	335	混凝土箱梁	钢箱梁	19.5	1/17
8	渝黔铁路太子坪乌江大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	15	1/20
9	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	350	混凝土梁	钢混组合梁	16.5	1/21
10	深江铁路鸡鸦水道特大桥	408	混凝土梁	钢混组合梁	17	1/24
11	深江铁路磨刀门水道特大桥	320	混凝土板-钢桁组合梁		14.6	1/22
12	深江铁路虎跳门水道特大桥	300	混凝土板-钢桁组合梁		14.6	1/21
13	珠肇高铁西江特大桥	435	钢混组合梁		16.5	1/26

注：梁宽不含风嘴

3.3 刚度及变形控制

3.3.1 对列车静活载作用下主梁容许挠度的规定，主要是为了满足列车运营条件下的行车安全性和乘车舒适性，容许挠度与桥跨结构、轨道形式及列车速度等因素相关。在《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 中，“铁路斜拉桥的竖向静活载挠度宜小于 $L/500$ ”，没有体

现轨道形式及列车速度的影响。从定性上分析，高速无砟轨道大跨度斜拉桥容许挠跨比较大，无砟轨道桥梁应有所减小。根据我国目前已建高速铁路无砟轨道斜拉桥的工程实践，统计了部分桥梁的刚度指标，挠度均小于 $L/700$ 。本规程对有砟轨道挠跨比的规定同《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095，对高速铁路无砟轨道的挠跨比宜小于 $L/700$ 。

表 6 已建（在建）铁路斜拉桥刚度指标

序号	桥名	主跨跨径 (m)	轨道类型	中跨跨中 竖向挠度	中跨跨中 横向挠度	梁端竖向转角 (rad)
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	468	有砟	$L/705$	$L/5480$	$0.329‰$
2	南沙港铁路龙穴南特大桥	448	有砟	$L/557$	$L/2897$	$0.5‰$
3	南沙港铁路西江特大桥	600	有砟	$L/535$	$L/2197$	$0.69‰$
4	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	672	有砟	$L/684$	——	$0.3‰$
5	福厦高铁乌龙江特大桥	432	有砟	$L/744$	$L/9000$	$1.4‰$
6	深江铁路鸡鸦水道特大桥	408	有砟	$L/689$	$L/5667$	$0.47‰$
7	昌赣客专赣江特大桥	300	无砟	$L/880$	$L/8547$	$0.129‰$
8	湖杭铁路富春江特大桥	300	无砟	$L/852$	$L/23077$	$0.60‰$
9	福厦高铁安海湾特大桥	300	无砟	$L/860$	$L/8772$	$0.256‰$
10	沪苏湖铁路斜塘特大桥	260	无砟	$L/817$	$L/65000$	$0.23‰$
11	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	350	无砟	$L/832$	$L/6275$	$0.73‰$

4 结构设计

4.1 一般规定

4.1.1 对于铁路混合梁斜拉桥，中跨加劲梁相对边跨加劲梁刚度较小，若采用常规的“塔直梁平”的理想成桥状态，其在强大的铁路活载作用下，索塔下塔柱两侧纵向弯矩和跨中钢箱梁上下缘弯矩差值较大，不利于钢箱梁和索塔的受力和设计。“塔偏梁拱”理想成桥状态通过主动调整斜拉索力，使跨中钢箱梁适当上拱、索塔向岸侧偏移，相比常规“塔直梁平”，适应了铁路活载大的特点，同时也提高了边跨斜拉索的应力水平，保证了斜拉索的有效刚度。

该“塔偏梁拱”理想成桥状态通过如下方法实现：（1）通过二次张拉斜拉索，使跨中钢箱梁上挠从而预存部分负弯矩，以平衡跨中活载正弯矩，减小在主力作用下跨中主梁的上下缘变矩差；（2）恒载状态下，索塔往岸侧预偏一定值，以考虑活载的影响，使下塔在主力作用下两侧纵向弯矩基本相等；（3）边跨斜拉索成桥索力主要是与中跨拉索索力协调，保证索塔的良好线形和内力状态。此时，边跨主要体现为预应力混凝土梁连续梁的受力特点，通过调整体内预应力使之满足结构受力要求。

4.1.2 1 纵向无约束体系在温度和混凝土收缩徐变作用下的结构受力响应均较小，但结构的位移、特别是主梁的纵向位移响应相对较大。梁端需要设置大位移梁端伸缩装置，且影响大跨径斜拉桥行车舒适性，故无砟轨道大跨斜拉桥不宜采用。

2 弹性约束和限位约束两种体系可以看作一类约束体系，均是允许梁塔之间发生一定的、受到适当控制的相对位移。弹性约束通常宜采用弹性约束装置来实现，可根据结构设计优化确定合理的纵向约束刚度。限位约束在塔梁纵向设阻尼装置，对温度、活载等引起的小于额定行程的慢速位移不加约束，而当由大风等荷载引起超出额定行程位移时，装置起到限位锁定作用；当发生地震、脉动风和车辆振动等引起的多种动力响应时，装置起阻尼耗能及抑制振动作用。

3 单塔固定约束体系与连续约束类似，可以释放主梁在温度和混凝土收缩徐变作用下的结构内力，固定侧梁端结构位移小，活动侧梁端结构位移大。如固定侧梁端位移满足桥上轨道结构受力要求，可减少设置钢轨伸缩调节器，具有一定的经济性。

4 固结约束是指桥塔和主梁固结的连接方式，通常多用于采用混凝土梁的独塔或双塔高墩斜拉桥，混凝土梁和混凝土塔固结易于实现，可以简化结构构造、方便主梁的悬臂施

工，在塔梁相交处无需设置支座，可以减小梁端纵向位移。

5. 横向多级抗震约束体系。当桥梁横向地震位移较大时，可在边墩、辅助墩处设置多级横向弹性约束和限位约束。

4.1.3 斜拉桥是柔性结构，在列车、风、地震、撞击等作用下容易发生振动和损伤，严重时可能导致桥梁出现安全问题。特别是高速铁路混合组合梁斜拉桥对行车安全性和舒适性要求高，根据需要进行车桥耦合动力仿真分析；对于风速较大、风环境复杂地区的斜拉桥，根据需要进行桥址区风环境研究以及桥梁抗风性能研究；对于桥址区地震烈度高、场地条件复杂的斜拉桥，根据需要进行地震动参数研究以及桥梁抗震性能研究；对于通航环境复杂、船舶撞击力大的斜拉桥，索塔位置的选择尽量避免大型船舶撞击，难以避免时，应进行结构在船撞力下的受力设计及防船撞设施设计。

4.1.4 混合组合梁斜拉桥的预拱度设置、斜拉索成桥索力和主梁成桥线形与设计基准条件、施工方案等密切相关，若基准条件、施工方案及施工荷载等改变，施工单位应重新计算预拱度设置、斜拉索成桥索力和主梁成桥线形。根据已建的一些混合组合梁斜拉桥的经验，混凝土收缩徐变对桥梁挠度有一定影响，因此预拱度设置应计入收缩徐变的影响。

4.1.5 铁路混合梁斜拉桥混凝土主梁分析计算需考如下荷载的影响：（1）恒载：锚固跨和压重跨梁体结构自重、锚固跨梁体箱室内压混凝土重量，以及桥面道砟或轨道板、养护维修通道人行道、电缆槽、栏杆、电气立柱、隔声屏等二期恒载；（2）混凝土梁收缩、徐变变形产生的荷载影响。一般来说，混合梁斜拉桥边跨混凝土梁为多跨连续结构，需要利用施工支架分段和辅助墩及临时支墩进行混凝土梁浇筑施工，或分段预制拼装，混凝土梁在施工期间受环境、温度影响要产生收缩变形，以及分段施工的混凝土梁将会产生徐变变形，这些变形的影响结果将对混凝土结构产生内力；（3）张拉索对混凝土梁产生的影响。张拉索包括边跨布置的斜拉索和边跨预应力混凝土梁体布置的预应力钢索，边跨混凝土梁在斜拉索和梁体预应力钢索强大的张拉力作用下会产生压缩变形，从而引起混凝土梁体内产生轴力和弯矩；（4）边跨各个桥墩由于地质条件原因，以及承受梁体传递的荷载情况不同，各个桥墩基础的沉降不同而出现支点的沉降差值，这种沉降差值或移动会对多跨超静定结构产生内力。

4.2 材料

4.2.2.1 钢混结合段钢构件纵横交叉连接，容易存在钢顶板下、PBL 开孔板、横隔板等处局

部混凝土浇筑不密实；与此同时，在剪力钉下、钢构件端头及角点处易存在局部应力集中。为保证结合段混凝土浇筑密实并具有良好的局部抗裂受力性能，宜采用补偿收缩纤维混凝土。

2 铁路混合组合梁斜拉桥采用 UHPC 超高性能混凝土时，超高性能混凝土抗压强度、抗拉性能应满足《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107 的规定，并参考《铁路桥涵混凝土结构设计规范》TB 10092，以混凝土的抗压及抗拉极限强度为基础除以不同的安全系数得出该强度等级的材料容许应力。其中，轴心受压安全系数 2.5，弯曲受压及偏心受压的安全系数采用 2.0；有箍筋及斜筋时的主拉应力是以混凝土的抗拉极限强度乘以系数 0.9 得出，无箍筋及斜筋时的主拉应力的安全系数采用 3.0；梁部分长度中全由混凝土承受的主拉应力的安全系数采用 6.0；纯剪应力的安全系数采用 2.0；光钢筋与混凝土之间粘结力的安全系数采用 2.4；局部承压应力考虑应力提高系数 β 。

表 7 超高性能混凝土抗压强度等级划分

等级	UC1	UC2	UC3	UC4
抗压强度 f_{cu} /MPa	$100 \leq f_{cu} < 120$	$120 \leq f_{cu} < 150$	$150 \leq f_{cu} < 180$	$f_{cu} \geq 180$

表 8 超高性能混凝土抗拉性能等级划分

项目	UT1	UT2	UT3	UT4
抗拉强度/MPa	≥ 5	≥ 5	≥ 7	≥ 10
残余抗拉强度/弹性极限抗拉强度	≥ 0.7	/	/	/
抗拉强度/弹性极限抗拉强度	1	> 1.0	≥ 1.1	≥ 1.2
抗拉应变/ $\mu\epsilon$	/	≥ 1000	≥ 1500	≥ 2000

注：1 UT1 代表超高性能混凝土在单轴拉伸过程中只表现出应变软化现象，UT2、UT3、UT4 代表超高性能混凝土具有不同程度拉伸应变硬化现象，详见《超高性能混凝土（UHPC）技术要求》T/CECS 10107 的规定。

2 残余抗拉强度取超高性能混凝土拉应变为 1500 $\mu\epsilon$ 时的拉应力。

4.2.3 1 平行钢丝应采用 $\Phi 5\text{mm}$ 或 $\Phi 7\text{mm}$ 的热镀锌或热镀锌铝合金钢丝，其标准强度可采用 1770MPa、1860MPa 或 2000MPa，性能应符合《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》GB/T 18365 和《大跨度斜拉桥平行钢丝斜拉索》JT/T 775、《桥梁缆索用热镀锌钢丝》GB/T 17101 的相关规定。

2 钢绞线应采用高强低松弛预应力镀锌、环氧涂层或其他防护钢绞线，其标准强度不

宜低于 1860MPa，性能应满足现行《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》GB/T 30826 的要求。还应符合下列规定：（1）热镀锌钢绞线应符合 YB/T 152 的规定；（2）单丝涂覆环氧涂层钢绞线应符合 GB/T 25823 的规定；（3）填充型环氧涂层钢绞线应符合 GB/T 21073 和 JT/T 737 的规定。

3 斜拉索锚具宜采用冷铸锚式的拉锚体系锚具，锚具钢材应采用优质碳素结构钢或合金结构钢，技术要求应符合《铁路桥梁钢结构设计规范》TB 10091、《优质碳素结构钢》GB/T 699 及《合金结构钢》GB/T 3077 的相关规定。

4 斜拉索外防护材料应采用在直接承受大气环境因素的作用下，具有较长的抗老化寿命，性能应符合相应国家标准或行业标准要求的高密度聚乙烯护套料或其他合适的材料。

4.2.6 预制混凝土桥面板和钢梁上翼缘结合面可采用传统橡胶垫条、硬质泡沫垫条以及橡塑共混高性能垫条。其中橡塑共混高性能垫条在相同载荷作用下，比传统橡胶垫条具有更大的形变和更好的压缩性能，能适应组合桥面结构的制造误差、安装误差和施工误差，确保在累计误差作用下的良好的密封性能。

表 9 橡塑共混高性能垫条执行标准及技术参数

检测项目	执行标准	性能参数
吸水率	ASTM C272	<4%
弹性模量	GB/T 8813-2020	3500-6000KPa
压缩强度	GB/T 8813-2020	>0.5MPa
臭氧老化	ISO 1431-1 2012 程序 A	无裂纹
脆性温度	GB/T 1682-2014	-45 ℃无裂纹

4.3 荷载及组合

4.3.3 局部温差（不含主梁温差项）取值可参照《公路斜拉桥设计细则》JTG/T D65-01 办理；组合梁梯度温度可参考欧洲规范《EN1991-1-5》组合梁梯度温度计算办法，采用简化算法时，顶板升温 10℃，及负效应顶板降温-10℃；混凝土梁采用类似原则，顶板升温 10℃，负效应顶板降温-10℃。

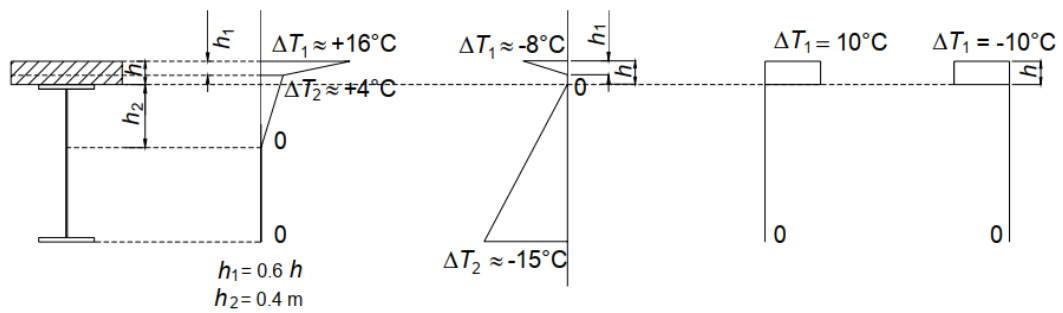
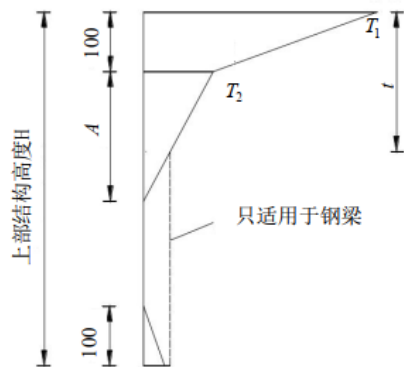


图 1 欧洲规范《EN1991-1-5》组合梁梯度温度计算办法图示

美国 AASHTO 公路桥梁设计规范有关组合梁桥的竖向温度分布规定如下图所示，当梁高 $H \geq 400mm$ ， $A=300mm$ ；当 $H < 400mm$ ， $A=H-300mm$ ； t 为混凝土桥面板厚度。AASHTO 将美国国土分为 4 个区域，按区域确定竖向温度基数。负温差取-0.3；如果桥面采用沥青混凝土铺装，日照反温差正温差的 0.2~0.3 倍。



分区	T1	T2
1（美国西部）	30	7.8
2（美国中部）	25	6.7
3（美国东部）	23	6
4（阿拉斯加）	1	5

图 2 美国规范 AASHTO 组合梁梯度温度计算办法图示

英国桥梁设计和施工规范 BS5400 有关组合梁桥的竖向温度分布规定与与欧洲规范基本相同， h 及 h_1 、2、3 为桥面板厚度及桥梁截面上温度变化点处对应的高度。

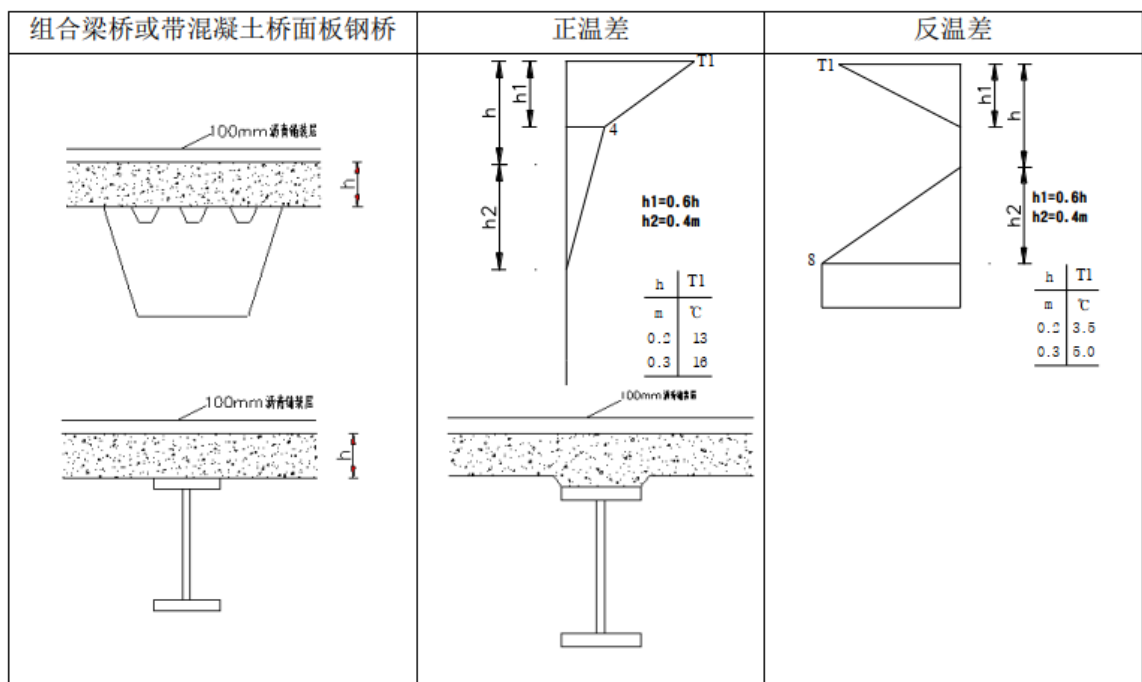


图 3 英国规范 BS5400 组合梁梯度温度计算办法图示

我国《钢-混凝土组合桥梁设计规范》GB50917 中对于组合的竖向温度梯度分布的加载方式与欧规、BS5400 基本相同。

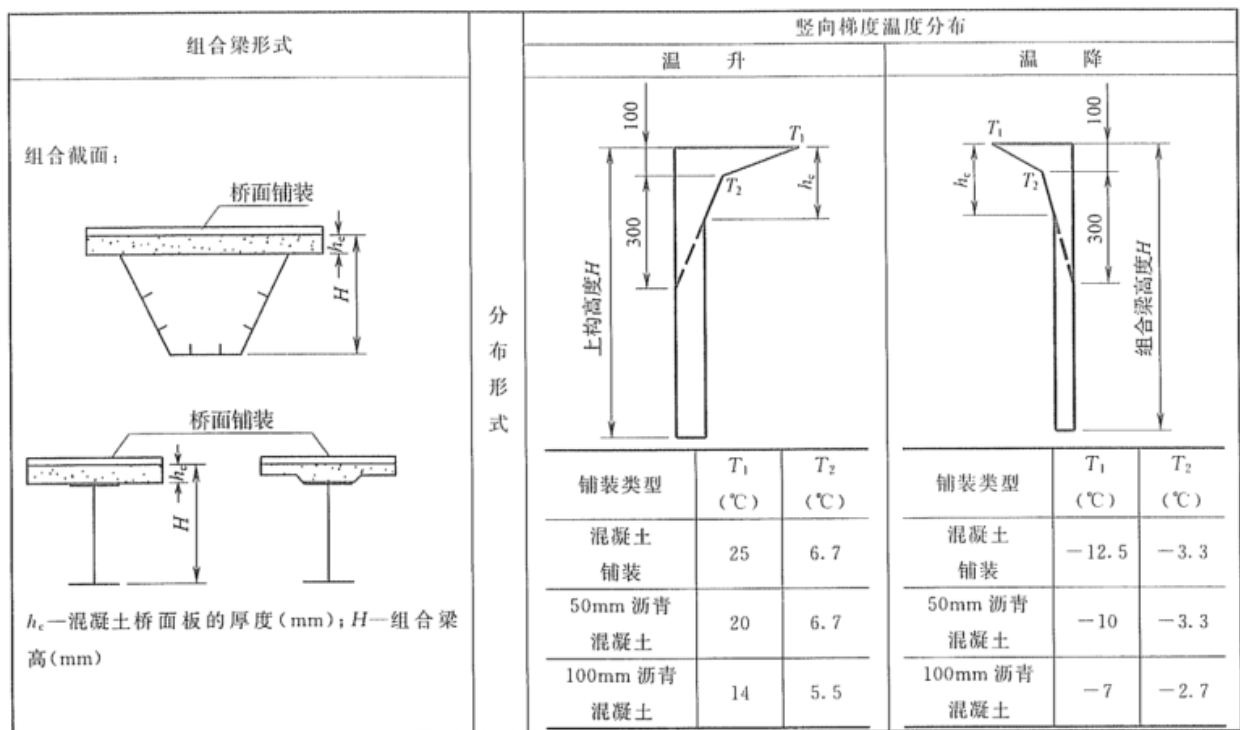


图 4 《钢-混凝土组合桥梁设计规范》组合梁梯度温度计算办法图示

我国《铁路结合梁设计规定》TBJ24-89 中规定：组合梁应根据钢梁和钢筋混凝土板之间

实际的温度差值计算温度变化引起的内力，在缺乏足够的技术资料时，可以不考虑梁和板内的温度在各自高度方向的变化，只考虑钢梁和板的温差，其差值可用 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。

日本规范中关于组合的竖向温度梯度分布规定：混凝土板与钢梁的温度差原则上取 5°C ，在主梁设计中,可和其他荷载组合。但在联结器（钢混连接处）设计中，温度差应以 10°C 为标准。温度分布在混凝土与钢中，均可认为是不变的。

4.4 结构计算

4.4.2 铁路混合组合梁斜拉桥主梁计算应采用线弹性方法进行计算，截面上任意一点应力均应小于材料应力容许值。钢-混凝土主梁在建造过程中经历多次体系转换，强度和刚度是逐步形成的，应力叠加法考虑了主梁各施工阶段的荷载分布和截面特点，对各构件截面应力计算更加准确，因此，结构计算应考虑施工方法及顺序的影响，并应对施工过程进行验算，施工阶段荷载组合应符合现行《铁路斜拉桥设计规范》TB 10095 的规定。

4.4.3 主梁构件的剪力 V 假定全部由钢梁承受，即按上式验算组合梁竖向剪应力时，计算结果偏于安全。斜拉桥主梁承受弯、剪共同作用，组合梁抗剪承载力随截面所承受的弯矩的增大而减小，由于截面抗力计算基于弹性方法，因而以最大折算应力的方式考虑组合梁弯剪共同作用。

4.4.4 1 在计算纵桥向剪力作用时，按弹性理论假设混凝土板和钢梁完全结合来计算不计钢与混凝土间的黏结力及摩擦作用，不考虑负弯矩区混凝土开裂的影响。

3 桥面板由于预应力锚固、混凝土收缩徐变和混凝土板与钢梁间的温差产生的剪力主要集中在主梁端部，剪力大小由梁端向跨中方向逐渐递减，各国规范中对纵桥向剪力计算传递长度有不同的规定。本规程与《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64、日本《道路桥示方书》规定一致，偏保守地采用主梁间距与 $1/10$ 等效计算跨径中的较小值。

4 斜拉桥在斜拉索轴向力作用下，按照一定的扩散角度，传递到整个截面上。轴力传递的计算参考美国 AASHTO 及相关的研究结论，大致可认为轴力按 30° 的角度进行扩散。主梁在斜拉索轴向力作用下的影响是局部的，在传递一定范围内全截面受压。

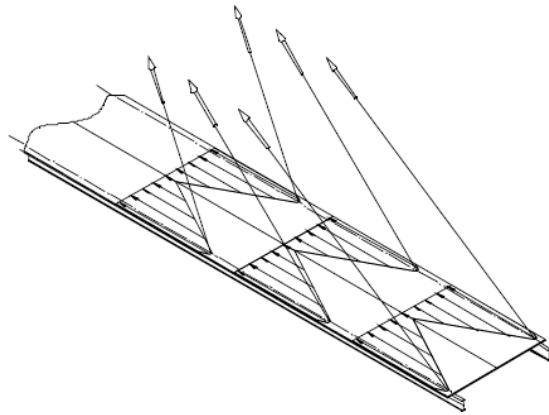


图 5 斜拉索轴力传递示意图

4.4.5 1 根据《钢-混凝土组合结构在铁路桥梁工程应用关键技术研究》和《铁路结合梁规范修订补充试验研究》的研究课题成果并结合欧洲规范 4 的规定制定本条规定。

在连接件设计中也可根据采用设计方法的不同，按承载力极限状态设计，即按塑性方法设计；或按正常使用极限状态设计，即弹性方法设计。若按弹性方法或正常使用极限状态设计时，可由上述式确定的抗剪承载力设计值再除以安全系数 K ，得到各类连接件的抗剪承载力容许值。

由于在连接件的抗剪承载力计算（参考 GB50917-2013 第 7.2.1 条、JTGTD64-01-2015 第 9.3.4 条）中已考虑了各种材料安全系数的影响，因此安全系数 K 应主要考虑荷载作用的分项系数。考虑到分阶段受力的钢—混凝土组合梁桥的二期恒载作用所占比重较小且以承受可变荷载为主，可将永久作用效应的变异性近似放大为可变作用效应的变异性，并将其作适当折减，参考人民交通出版社书籍《桥梁钢-混凝土组合结构设计原理》第四章第三节“连接件的抗剪设计承载力计算”，取 $K=1.30\sim 1.35$ ，该取值相当于栓钉连接件的抗剪承载力容许值取其抗剪承载力设计值的 $0.77\sim 0.741$ ，可近似取其为 0.75 。这取值对于一阶段受力的钢—混凝土组合梁桥也是偏于安全的。

4.4.6 计算剪力连接件配置数量时，可将梁上的剪力分段处理，求出每个区段上单位长度纵向剪力的平均值（或该区段的最大值）和区段长度，该区段内的剪力连接件均匀布置；当按区段单位长度纵向剪力平均值进行设计时，应保证单个剪力连接件所受到的最大剪力小于容许值。

4.4.7 1 由于钢混结合段构造和受力的复杂性，应建立空间模型，进行结合部节段和局部受力计算分析。空间模型节段计算用以分析结合部总体在各种荷载组合作用下的传力机理、应力分布及大小，为局部计算提取荷载及边界条件。空间模型局部计算用以分析结合部各

部构件的承载分担比例、应力分布及大小，以合理设计承压板和连接件。对节段模型在构件长度方向的范围规定的目的是消除模拟节段边界条件对计算结果的影响。一般情况下，混合梁的计算节段模型在钢构件侧和混凝土构件侧的长度范围分别不小于截面高度的 4 倍和结合部长度的 8 倍。

2 混结合段为长宽高尺寸相近的实体结构，单纯的空间杆系有限元模型不足以反映钢混结合段受力特性，应通过空间杆系有限元模型，提取最不利工况下的内力，及边界条件，或通过嵌套模型，进行钢混结合段的局部应力计算，分析钢混结合段的轴力、剪力和弯矩的传递途径、截面正应力和横向应力分布规律、前后承压板两侧力的传递规律以及混凝土、钢格室的承担比例等，以合理设计钢格室、承压板及连接件。

3 连接件的抗剪刚度定义为相对滑移 0.2mm 所对应剪力的割线倾斜度,用以衡量连接件抵抗剪切变形的能力。对连接件滑移量的控制实质上就是对连接件的抗剪刚度的控制,两者应是等效的。《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/TD64-01-2015)基于国内外 146 个栓钉连接件以及 45 个开孔板连接件的模型试件的试验结果给出了计算式。在无进一步实测结果的情况下，栓钉连接件和配有贯通钢筋的开孔板连接件抗剪刚度可参照其计算。

4 鉴于钢混结合段受力复杂以及铁路桥梁疲劳问题突出，宜开展整体比例缩尺模型和（或）局部足尺模型试验研究，以指导或验证设计。

4.4.8 铁路混合梁斜拉桥中跨钢梁钢桥面板应按照如下三个体系进行计算：（1）第一体系是钢梁作为斜拉桥的组成部分参与全桥共同受力，承受荷载作用，按照材料力学初等梁理论计算。该体系的箱梁作用力包括竖向荷载、横向荷载和温度荷载作用的弯矩、剪力和扭矩；（2）第二体系是由纵向加劲肋、横向加劲肋和桥面板共同组成，承受桥面上的恒载和列车活载作用；（3）第三体系是把桥面板作为支承在纵向加劲肋和横向加劲肋上的连续各向同性板，直接承受列车活载作用。

通常全桥整体计算采用杆系有限元模型，分析计算得到构件内力，可以得到钢梁板件的应力，但不能直观反映剪力滞效应，以及正交异性钢桥面板第二体系、第三体系应力的影响。一般采取另建局部应力分析模型的方法，得到的结果与整体结构第一体系应力进行叠加，这种方法不能准确计算钢梁板件的应力，难以有效评估钢薄壁板件受力状态，因此有必要建立钢梁节段三维空间模型进行强度、稳定性及疲劳分析。

4.4.11 1 大跨度桥梁除应进行正常条件下的车桥动力响应计算，尚应将除列车活载外各种荷载作用下的变形值进行包络计算，叠加到初始轨道不平顺时程曲线进行车桥耦合动力响

应分析，车辆响应和桥梁响应满足相关规定。

2 我国《铁路桥涵设计规范》其主要适用于较小跨度桥梁，结构一般由活载控制，温度和风效应较小，结构的变形也主要由活载引起。大跨桥梁的结构变形由活载、温度和风共同作用，宜采用分级评估模式。根据发生概率、作用时间、桥梁变形为周期性变化还是单调变化，根据工程特点进行合理的荷载组合，可参考下表所给出了各级荷载组合下的车辆动力响应限值。

表 10 动力响应限值分级评估表

荷载或作用	一级评估	二级评估	三级评估
实际列车	△	△	△
温度	△	△	△
横风	——	△	△
多线行车	——	△	△
沉降、徐变等	——	——	△
车体竖向加速度(m/s ²)	1.3	1.6	1.8
车体横向加速度(m/s ²)	1.0	1.2	——
竖向斯佩林指标	良	合格	——
横向斯佩林评价等级	良	合格	——
轮重减载率	0.6	0.6	0.65
脱轨系数	0.8	0.8	0.8

5 结构构造

5.1 一般规定

5.2.1 调研了国内外已建或在建的铁路混合组合梁斜拉桥，其基本截面形式有整体箱型截面、分离式双边箱截面、桁式截面等。昌赣客专赣江特大桥采用单箱多室流线型截面、深江铁路鸡鸦水道特大桥采用双边箱矩形截面、深江铁路磨刀门及虎跳门特大桥采用混凝土板-钢桁组合梁的桁式截面。

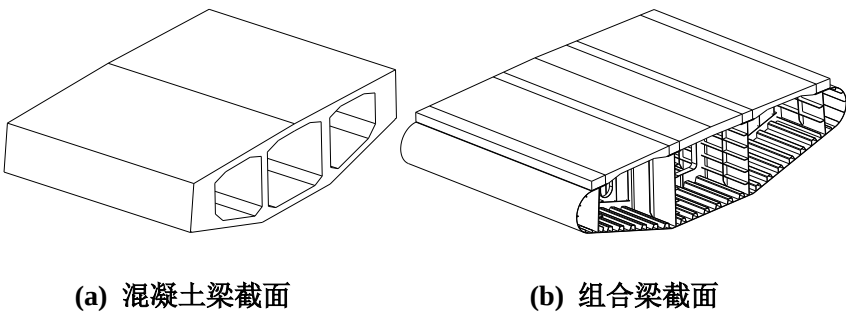


图 6 整体箱型截面（昌赣客专赣江特大桥）

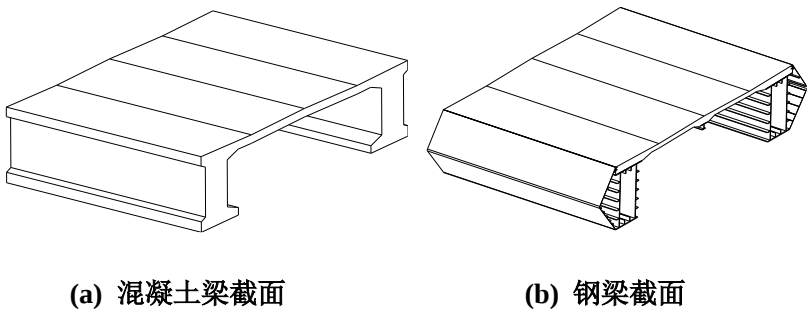


图 7 分离式双边箱截面（深江铁路鸡鸦水道特大桥）

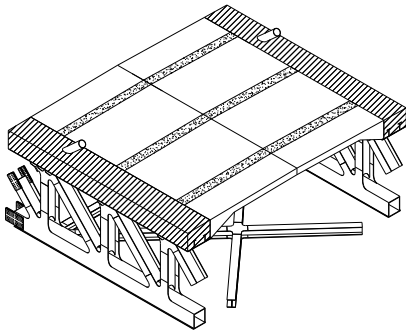


图 8 桁式截面（深江铁路磨刀门特大桥）

边中跨主梁在纵桥向常用的组合形式有：中跨采用钢梁、边跨采用混凝土梁；中跨采用钢梁、边跨采用钢混组合梁；中跨采用钢混组合梁，边跨采用混凝土梁；中跨采用单结合桁式组合梁、边跨采用双结合桁式组合梁。

5.2.2 钢混结合段布置需要结合全桥受力考虑。首先，静力方面，钢混结合面应设置于主梁内力（幅）和位移幅均较小的位置，以确保其自身的抗疲劳性和结构耐久性；其次，结合段受力方面，应优先保证运营状态列车活载下结合部弯矩幅值和轴力幅值较小，以确保钢混结合段的抗裂性和抗钢-混脱离性能；第三，设置位置尚需考虑能起到平衡锚固跨、使锚固跨受力合理的作用。如伸入中跨过多，将使索塔横梁顶主梁负弯矩区受力不利，若伸入跨度过小，则达不到平衡紧邻的锚固跨跨中正弯矩的作用。此外，钢混结合段设置位置还应结合地形、水文条件等因素合理确定，以便施工和质量控制。

目前国内外混合梁斜拉桥钢混接头布置主要有两种形式：一种是边跨部分采用混凝土梁，钢梁和混凝土梁的接头设在边跨内的某个辅助墩附近；另一种是边跨全部采用混凝土梁，钢-混接头设在索塔向跨中方向的某个位置。我国铁路混合梁斜拉桥钢混结合段位置统计见下表。

表 11 已建（在建）铁路混合梁斜拉桥钢混结合段位置

序号	桥名	主跨跨径（m）	主梁形式		结合段位置
			边跨	中跨	
1	宁波枢纽北环线甬江特大桥	468	混凝土箱梁	钢箱梁	伸入中跨 24.5m
2	昌赣客专赣江特大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	伸入中跨 20m
3	南沙港铁路龙穴南特大桥	448	混凝土箱梁	钢箱梁	边跨辅助墩附近
4	南沙港铁路西江特大桥	600	混凝土箱梁	钢箱梁	大里程侧：伸入中跨 26m 小里程侧：边跨辅助墩附近
5	安九铁路鳊鱼洲长江大桥	672	混凝土箱梁	钢箱梁	边跨辅助墩附近
6	湖杭铁路富春江特大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	大里程侧：边跨辅助墩附近 小里程侧：伸入中跨 9m
7	福厦高铁乌龙江特大桥	432	混凝土箱梁	钢箱梁	大里程侧：伸入中跨 22m 小里程侧：边跨辅助墩附近
8	沪苏湖铁路斜塘特大桥	260	混凝土箱梁	钢混组合梁	伸入中跨 8m
9	汉巴南铁路嘉陵江大桥	335	混凝土箱梁	钢箱梁	大里程侧：伸入中跨 17m 小里程侧：伸入中跨 20m
10	渝黔铁路太子坪乌江大桥	300	混凝土箱梁	钢混组合梁	边跨辅助墩附近

序号	桥名	主跨跨径 (m)	主梁形式		结合段位置
			边跨	中跨	
11	广湛高铁佛山特大桥跨东平水道桥	350	混凝土梁	钢混组合梁	伸入中跨 24m
12	深江铁路鸡鸦水道特大桥	408	混凝土梁	钢混组合梁	伸入中跨 33m

5.2.3 1 由于斜拉桥轴向力较大，若形心轴变化较大，由此产生的附加弯矩将不可忽略。依据全桥纵向计算，得到成桥轴向力 N 和弯矩 M ，计算由于形心轴变化引起的附加弯矩 ΔM ，以及附加弯矩 ΔM 占成桥总弯矩的比值。一般认为，附加弯矩 ΔM 占成桥总弯矩的比值小于 10%，可认为由于截面形心轴变化引起的附加弯矩值及其应力值均影响较小。因此，钢混结合段应检算钢梁过渡段、钢混过渡段及混凝土梁段典型截面的惯性矩 I_x 、中性轴至截面顶缘的距离 y 、截面抗弯刚度 EI 以及截面抗压刚度 EA ，分析混凝土梁、钢箱梁、结合段及过渡段截面特性变化规律。

2 截面相对应的顶板、底板、腹板的重心位置设置一致，以避免钢侧截面的顶板、底板、腹板产生屈曲和失稳。在与结合部两侧钢、混凝土截面重心一致难以同时满足的情况下，以首先满足后者为主。

3 相比公路钢混结合段，铁路列车荷载集度高，对钢混结合段受力、传力、变形及构件疲劳性能要求更高。目前铁路桥梁钢混结合段均采用剪压式构造，复合使用承压板、钢梁顶底板及剪力连接件传递主梁内力，钢梁顶底板插入混凝土段强化结合段的整体性及竖向传剪能力。该结构传力流畅，刚度过渡平稳，适合于铁路斜拉桥的传力需求，可分为有格室与无格室两种形式。

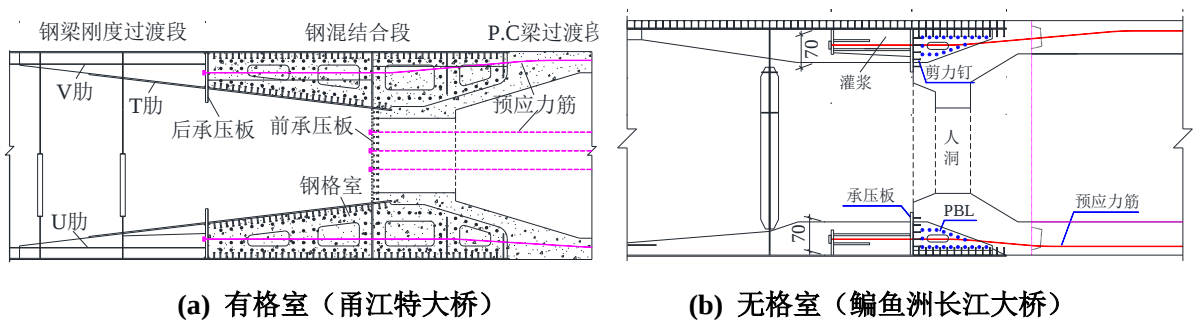


图 9 铁路桥梁典型钢混结合段形式

5.2.4 索梁锚固是主梁的关键构造，应优先选择传力可靠、便于加工及制造、方便维修的成熟结构。并应便于检修维护，避免有积水腐蚀，以延长使用寿命。同时当梁端的拉索锚固区处于封闭结构空间时，必须预留斜拉索安装及牵引所需空间，避免在斜拉索安装过程

中对斜拉索造成损伤。钢梁上的钢锚箱、锚拉箱及锚拉板等构造在斜拉桥上均应用广泛。对于混凝土梁，从受力角度考虑应优先采用兜底锚或侧面设置牛腿的锚固方式。

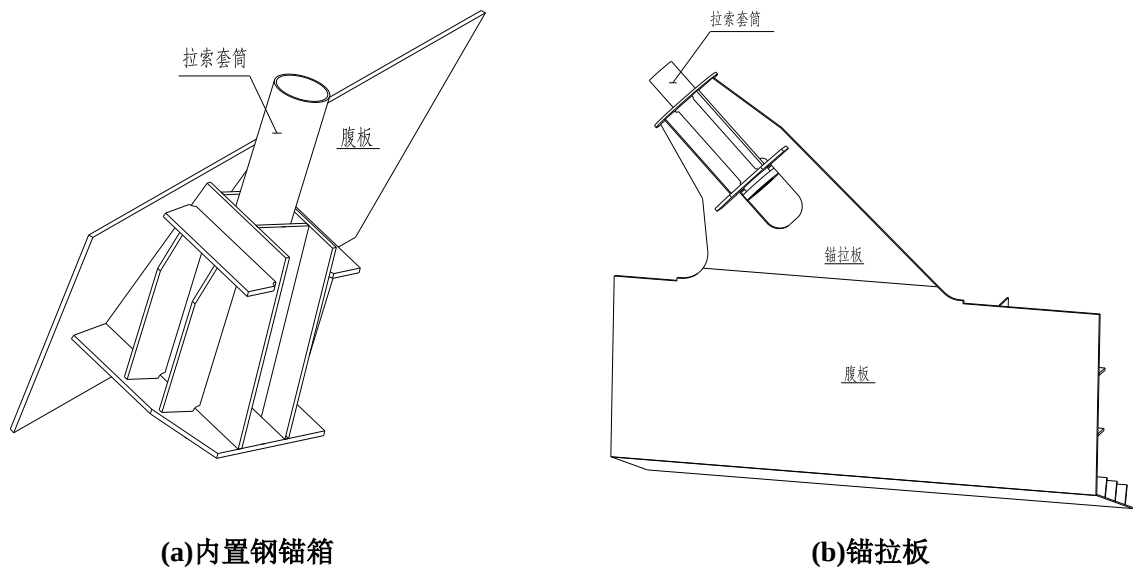


图 10 钢梁上的锚固形式

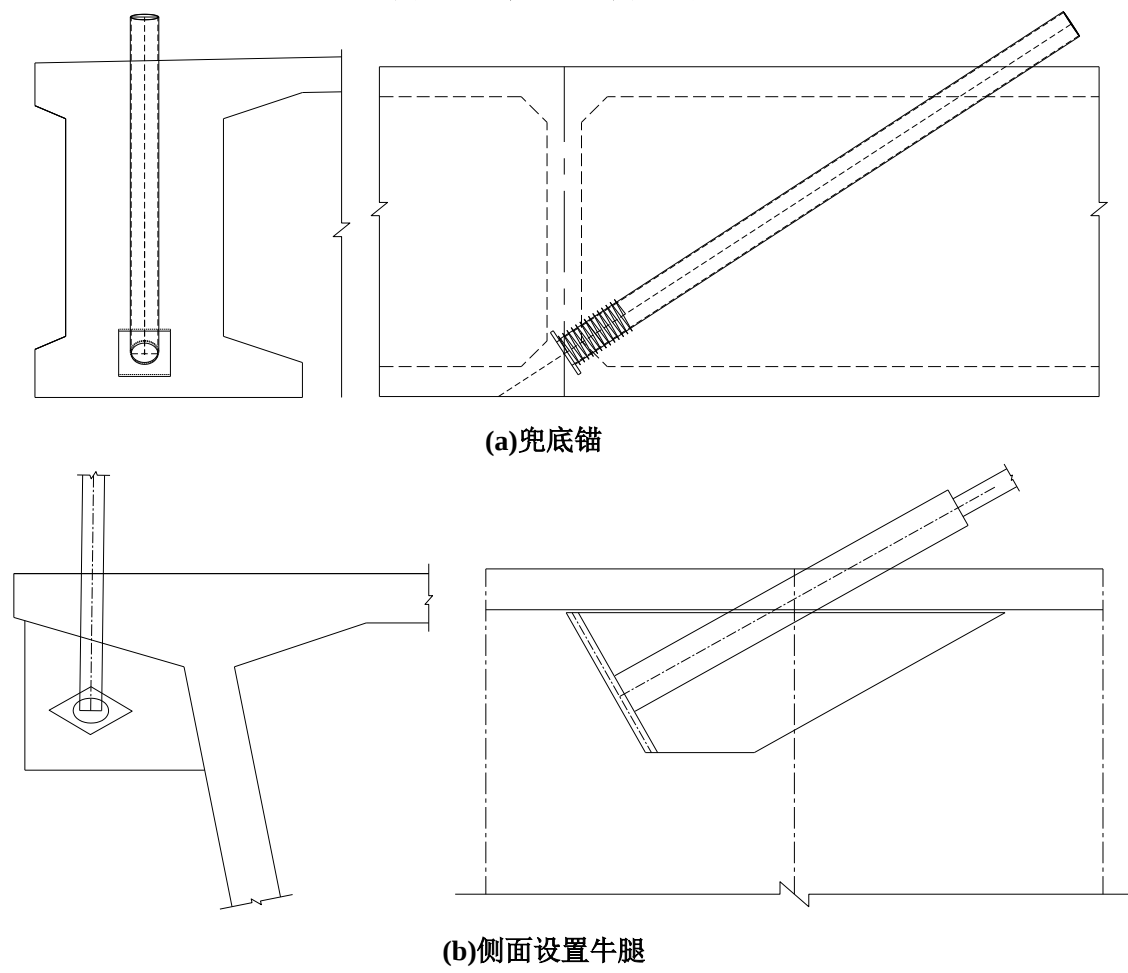


图 11 混凝土梁上的锚固形式

5.2.5 当采用预制混凝土板或叠合混凝土板时，为保证桥面板具有良好的整体工作性能，新

旧混凝土截面处应设有足够的抗剪构造，如表面凿毛、设置抗剪钢筋等。

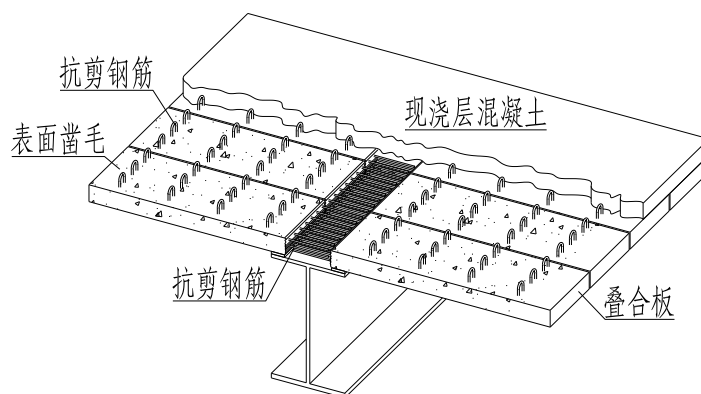


图 12 叠合板的表面处理

5.2.6 提高板内有效预应力的核心思想是先将预应力施加于桥面板，后使桥面板与钢结构完全结合。

可采用缓粘结焊钉，在焊钉上围裹套筒，套筒内填充缓粘结剂形成缓粘结焊钉。在缓粘结剂尚未固化时施工混凝土板并张拉预应力，之后缓粘结剂固化，钢与混凝土板结构共同受力。

此外，还可通过横向胶接缝将混凝土预制板连接后张拉预应力，预应力施加完成后浇筑纵向湿接缝结合桥面板与钢结构。

5.2.7 钢筋锚固板应符合《钢筋锚固板应用技术规程》JGJ 256 的要求。

5.2.8 对于索塔、桥墩等支点负弯矩区部位的组合梁桥面板会产生较大的拉应力，若只通过预应力筋消除拉应力主要存在两个问题：（1）组合梁预应力度相对较低，相当一部分预应力施加在钢结构上，反而增加了用钢量；（2）大量预应力筋的管道对混凝土板削弱较大，减少了有效截面积。在负弯矩区可采用 RC-UHPC 叠合桥面板，减少预应力钢束数量，不仅更为经济，也方便施工，减少了对桥面板截面的削弱，增加了结构的可靠性。

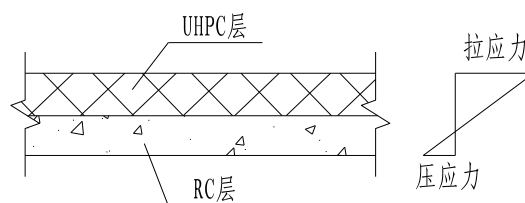


图 13 RC-UHPC 叠合桥面板

5.2.9 铁路行车区域对正交异性桥面板的局部刚度、抗疲劳性能要求高，其加劲肋宜采用刚度大、加劲肋效率高的闭口加劲肋。U 肋目前在正交异性桥面板上广泛采用。根据宁波枢纽甬江特大桥的研究结果，V 肋应用于铁路行车区域范围内时，加劲肋及横隔板开孔处的

应力较 U 肋小，且抗疲劳性能更优，因此 U 肋或 V 肋均是合理的闭口加劲肋构造。正交异性钢桥面板顶板厚度一般采用 16mm，当铺装层参与结构受力时，可适当减小顶板厚度，但需满足整体及局部的受力和刚度要求。



图 14 常用闭口加劲肋截面形式

5.2.10 钢结构与混凝土的结合面是混合组合梁耐久性设计的重点与难点，可通过在结合面处混凝土形成反坡、接缝处通过填塞腻子、布置防水钢板、涂抹密封材料及涂刷防水涂层等方式保证其密封性及不积水性，提高其耐久性能。

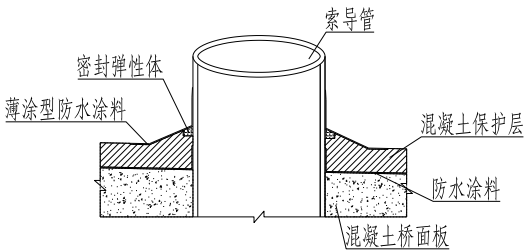


图 15 索导管穿出混凝土处结合面处理

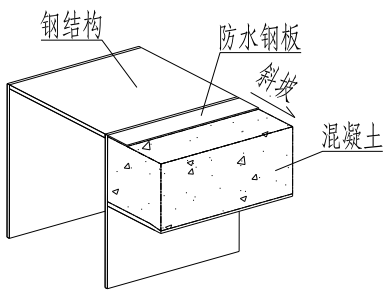


图 16 钢板包覆混凝土结合面处理

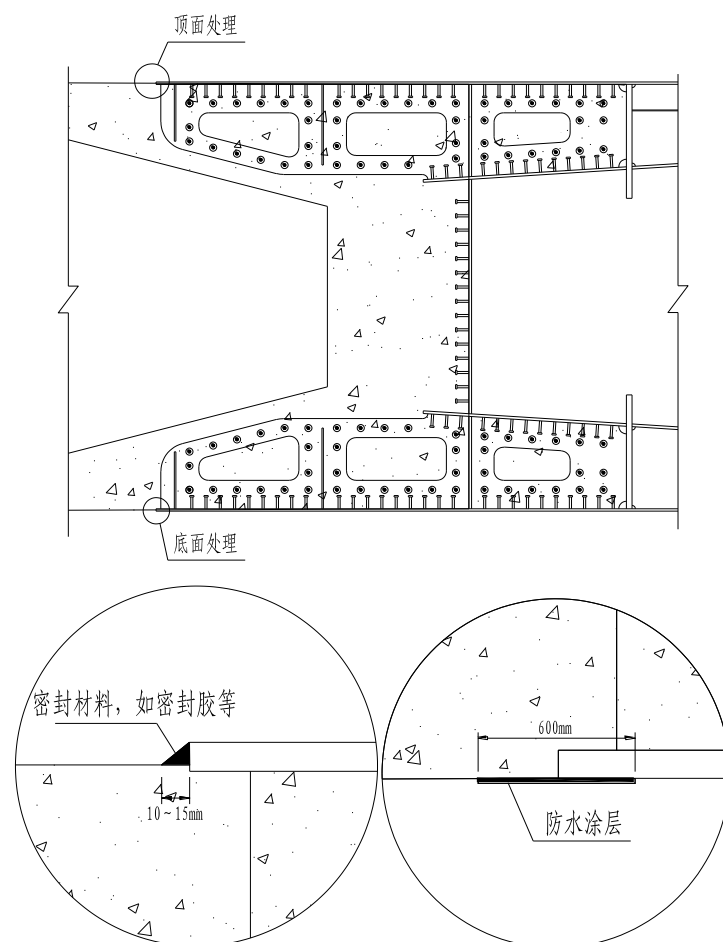


图 17 钢混结合段的接缝处结合面处理

5.3 连接件

5.3.1 钢与混凝土组合结构的力学性能不仅受到两种材料各自材质的影响，而且与结合面的连接形式有较大关系。选择连接形式时，要考虑结构性能、施工条件以及结合面的受力特点。

5.3.2 焊钉连接件抗剪性能不具有方向性，且抗拉拔性能良好。

5.3.3 开孔板连接件的破坏模式是孔中混凝土的破坏，疲劳问题并不突出，适用于对抗疲劳性能要求较高的铁路混合桥梁中。

5.3.5 在厚度较小的钢板上焊接连接件，容易引起钢板变形。

5.3.6 该条是为了保证连接件能抵抗混凝土桥面板与钢梁之间的掀起作用。

5.3.7 焊钉的力学性能不具有方向性，可承受面内任意方向的剪力。焊钉高度大于 4 倍直径后，对其抗剪承载力不再产生明显影响。考虑到焊钉承受面内任意方向剪力，按 45° 传力，认为受影响混凝土范围为 $4d$ 的圆环，故中心间距取 $4d+4d+d=9d$ 时，相邻焊钉集中力作用

混凝土区域恰好不重合，另外再考虑一定的富余量，得到相关构造数据。

5.4 索塔

5.4.2 索塔截面尺寸,除应当满足计算需要的最小尺寸外，还须保证张拉、调索的空间满足孔洞、预应力管道及千斤顶行程与移动需要的空间。一般主塔混凝土强度等级较高，混凝土塔柱截面及壁厚尺寸过大,大体积混凝土效应明显，混凝土易开裂。

5.4.3 调研了目前铁路斜拉桥的索塔锚固构造，索力较小的情况下一般采用齿块+预应力（环形或井字形布置）的形式；索力较大的情况下一般采用钢结构，如钢锚梁、钢锚箱等。索力更大的情况下可采用交叉锚固构造，充分发挥混凝土的受压性能，具有显著的经济效益。目前国内常泰长江大桥和深江铁路洪奇沥水道公铁大桥的索塔锚固均采用交叉锚固的形式。

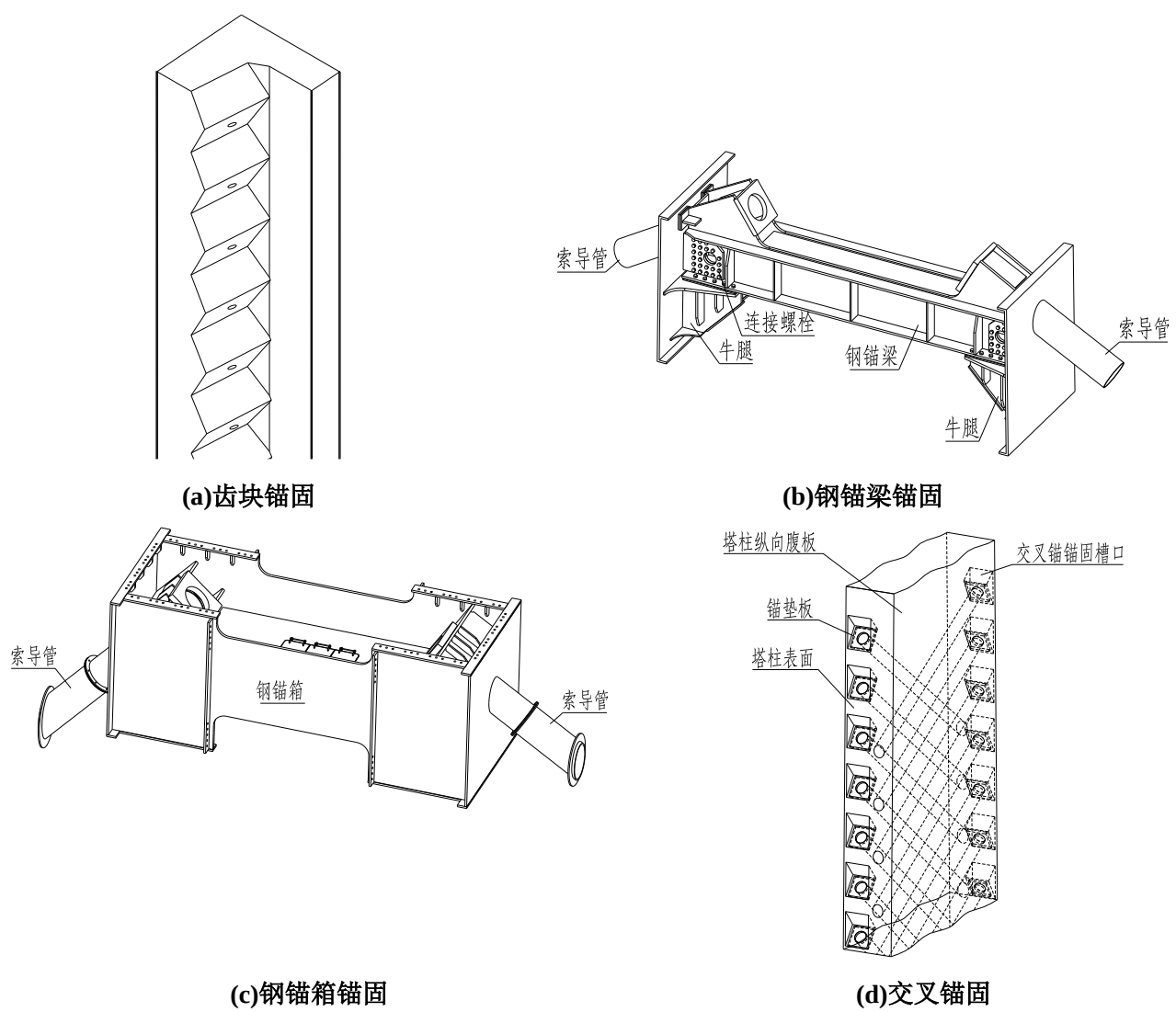


图 18 索塔锚固构造图

5.4.4 锚固钢板+圈筋构造如下图所示。其中锚固钢板焊接在索导管上，用于连接断掉的箍筋；竖向主筋弯折与索导管焊接，并采用圈筋套箍补强。

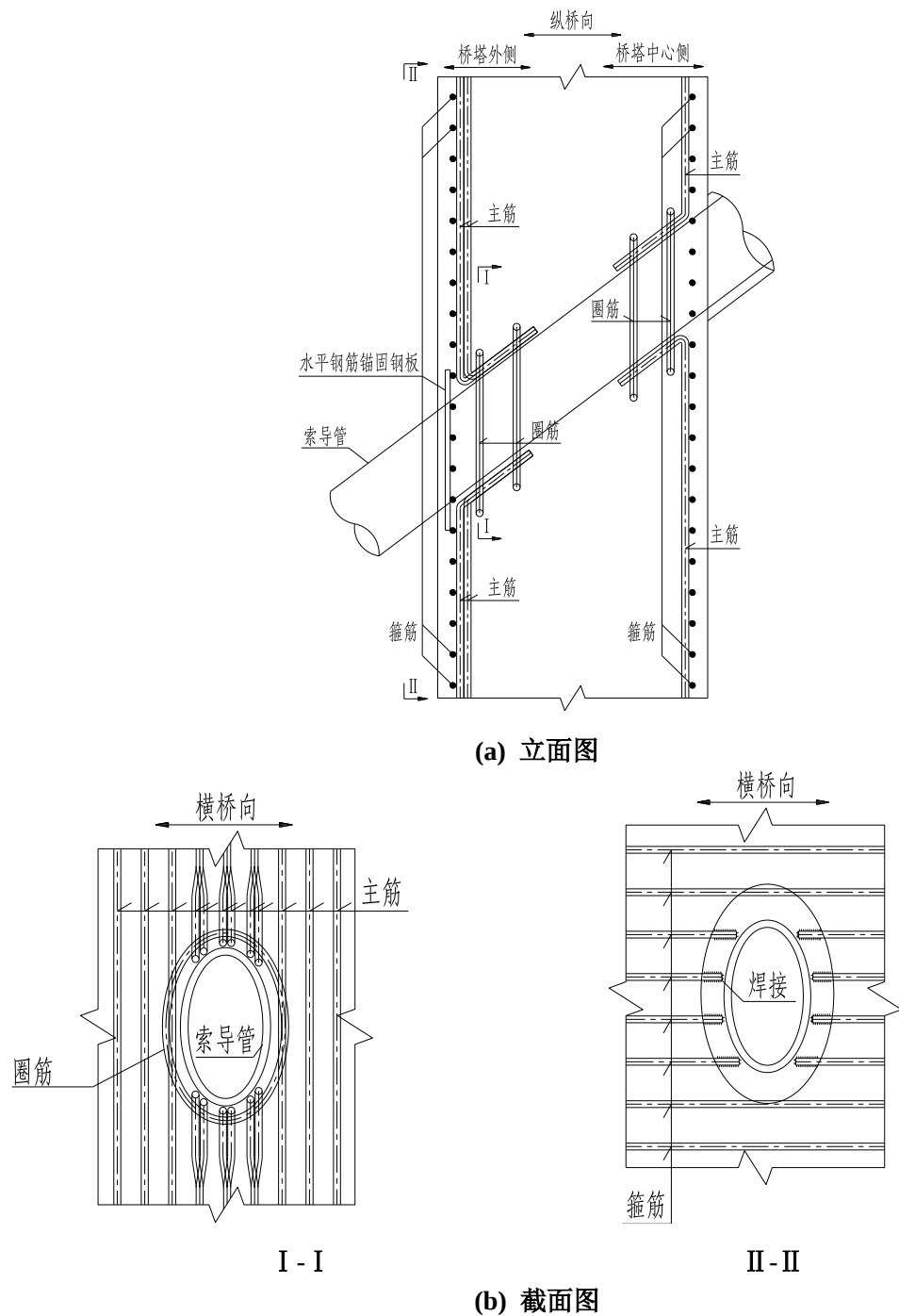


图 19 钢筋补强构造图

5.4.7 索塔是斜拉桥的主要承重结构,索力的垂直分力引起塔柱轴向力和水平力对塔柱产生的弯矩和剪力。此外温度变化、日照影响、支座沉降、风荷载、地震力、混凝土收缩徐变等都将对塔柱产生轴向力、水平力、扭矩和横、顺桥向的弯矩，因此塔柱配筋较多应尽量采用大直径竖向钢筋，并提高钢筋含量。钢筋接头宜采用机械连接，由于主塔钢筋较粗，

双根一束时由于钢筋接头影响施工，故尽量采用大直径单根钢筋。

5.4.9 钢索塔塔柱节段在工地可采用高强度螺栓连接、焊接连接或者高强度螺栓与磨光顶紧组合连接。采用磨光顶紧时，节段接头端面宜在工厂进行加工，节段间金属接触密贴率应大于 50%，其高强度螺栓拼接传力宜按塔柱传递内力的 50%考虑。

5.4.10 浪溅影响高度主要包括浪溅区和水位变动区。按照港工相关标准，浪溅区范围上限为设计高水位+设计高水位时的重现期 100 年的波峰面高度+1m；下限为设计高水位-设计高位时的重现期 100 年的波峰面高度。水位变动区的上限为浪溅区下限，下限为设计低水位-1m。

5.5 斜拉索

5.5.1 根据材料及制作方法不同,目前斜拉索分为工厂整体制作、现场整体安装的平行钢丝斜拉索和工地分散安装的平行钢绞线斜拉索。平行钢丝斜拉索在工厂整体制作,质量有保证、拉索直径较小，拉索安装效率高，但用于大跨斜拉桥上存在单根拉索体量大,运输、起吊、安装难度大等缺点；平行钢绞线斜拉索运输、安装张拉灵活便捷，但存在拉索直径较大、索力测量困难等缺点。两种形式斜拉索各有优缺点，设计时可根据实际情况予以采用。

5.5.2 为满足斜拉索安装过程中多次张拉要求以及适应斜拉桥的制造与安装误差,斜拉索锚具应当具有调整索长的功能。大跨度斜拉桥斜拉索较长，同样索力调整对于大跨度斜拉桥斜拉索伸长量较大。目前斜拉索技术标准中，锚杯尺寸只是与拉索规格类型有关,与斜拉索长度没有关联，因此对于大跨度斜拉桥斜拉索设计时其锚杯长度应当考虑适当加长。

5.5.3 斜拉索的耐久性及安全性与其防护结构体系是否完善可靠密切有关。斜拉索防护最薄弱的地方是索体与锚具的连接处。在斜拉索的设计制造时,应当采取可靠的索端密封防护措施：在安装时，尤其是长期运营状况下，应当特别注意保护索端的密封结构不受破坏，这是提高斜拉桥的耐久性和安全性、延长使用寿命的重要措施。设置可靠的防水、防潮措施很重要，如外防护罩、下端锚垫板应当设置防水槽等。桥面以上一定范围内设置金属套管主要是为了防止人为损伤。

5.5.4 大跨度斜拉桥在施工阶段，由于未安装斜拉索的减振阻尼器，斜拉索易发生风致振动，影响施工阶段结构的安全和施工质量。根据工程实践，可采取在“梁上索导管内塞楔形木块+拉索间张拉连接索”等临时措施，控制施工阶段的拉索振动。

5.5.5 斜拉索耐久性和安全性与其防护结构体系是否完善可靠有关。斜拉索整个构件中防

护最复杂、最薄弱的索体与锚具的连接处，也是防护最容易出问题的地方。在设计制造时，需要采取可靠的索端密封防护措施，在安装尤其是长期运营状况下特别注意保护索端的密封结构不受破坏以及设置除湿系统保持索体干燥，是提高斜拉索的耐久性和安全性，延长使用寿命的重要措施。

5.5.6 随着我国交通量的逐年增加，交通意外导致的缆索体系桥梁火灾事故时有发生。斜拉索作为斜拉桥的关键受力构件，其组成材料中的高强钢丝、聚酯纤维带、护套、防腐涂层等的耐火性能较差，当桥面出现火灾事故（特别是油罐车火灾事故）时，极易出现护套燃烧，钢丝温度持续升高，防腐层脱落、钢丝性能退化等火灾损伤病害，给铁路桥梁的安全营运造成严重威胁。因此对于存在火灾风险的公铁合建斜拉桥，斜拉索应采取防火措施。

5.5.7 大跨度斜拉桥的斜拉索具有质量轻、刚度小、结构柔的特点，容易发生风致振动，增加螺旋线能够有效控制斜拉索和风致振动。研究表明，斜拉索表面周期性振荡的雨线或雨膜是诱发斜拉索发生风雨振的主要原因。国内外大量试验和工程实践证实增加合理螺旋线可以破坏雨线或雨膜的形成，有效地抑制斜拉索风雨振。

5.6 附属

5.6.3 斜拉桥应根据桥用设备的使用需求设置相关缆线通道，并采取必要的安全防护措施。不同用途的缆线通道间通常设置物理隔离防护。缆线通道通常设置于检修走道下方、箱形梁体内部等位置，便于人员安装、运检。在缆线上(下)桥、桥梁伸缩缝等特殊位置通常考虑缆线冗余敷设的条件。

5.6.5 对于通航孔桥梁，应当按航道有关规定设置航标灯,使船舶能够及早地发现并避开墩台防止发生事故。从标志灯本身性能要求而言,应当具有使用寿命长、维修方便、气候适应好的特点。对于有被船撞风险的索塔塔柱和辅助墩，应设置防撞设施，设计时应允许有较大的变形，以吸收较多的能量，减少船舶和防撞结构的损坏。防撞结构物在满足其功能的前提下，应尽可能地减少平时维修养护的费用，并应考虑其在被撞坏后较易修复。

5.6.6 《民用机场飞行区技术标准》MH5001 要求在飞行区域内高度超过 45m 的独立建筑物,都需要设置不能中断照明的夜间航空障碍灯,障碍灯的布设应当事先与民用或军用航空管理部门协调确定。

5.6.7 近年来斜拉索表面结冰后冰凌掉落影响交通安全的现象时有发生。为避免该风险，斜拉索可采用涂刷疏水涂料、除冰装置等措施。

6 施 工

6.1 一般规定

6.1.2 设计提供了指导性施工方案,结构内力、位移及线形也是基于指导性施工方案进行计算。施工单位可根据现场建设条件和施组设计调整施工方案,但施工单位应对施工阶段及成桥运营的结构内力,预拱度、位移及线形等重新计算,并需获得设计单位认可。

6.1.3 对施工过程的控制,是保证斜拉桥特别是大跨度斜拉桥按设计期望成功建成的一项必要条件,控制目的是使成桥后的线形和内力尽可能地符合设计的要求。

6.1.4 施工时应基于桥塔、主梁的恒载压缩变形,结合现场施工监控,对桥塔进行预抬高,使斜拉索锚点成桥高程与设计高程相符;对主梁进行压缩补偿,使斜拉索梁上锚点成桥位置和支座安装位置与设计相符。

6.2 钢梁施工

6.2.2 钢梁安装应综合结构特点、桥址特点、运输条件、施工设备等因素确定,若具备整节段运输条件和大吨位吊装设备,为减少现场安装工作量,优先采用工厂整节段制造,运抵现场安装。

6.2.5 边跨组合梁的钢梁部分、浅水区或受其它运输条件限制的钢梁可采用顶推施工,混合梁斜拉桥边跨多辅助墩的特点也能较好适应该施工方法。

6.3 混凝土梁施工

6.3.1 混合梁斜拉桥边跨混凝土梁兼具结构受力和压重作用,混凝土匀质性和容重直接影响支座反力和主梁线形,故在浇筑施工前宜进行混凝土配合比及工艺试验。

6.3.2 混合梁斜拉桥的边跨混凝土主梁采用支架现浇施工时,受混凝土徐变收缩支架变形和不均匀沉降等因素的影响,如果所采取的措施不当,主梁混凝土很容易产生开裂,施工的难度和风险均较大,因此在施工前需要根据主梁的结构构造特点和施工能力,合理确定其分段浇筑的长度以及相应的浇筑施工工艺。施工能力足够时,采用整幅整跨一次性浇筑的方式进行施工是可行的;但当主梁长度和宽度均较大时,整幅整跨一次性浇筑施工的方式还是存在一定的风险,则需采用分段施工以保证施工质量。

6.3.4 长钢束的张拉,最易发生的问题是预应力筋的伸长值达不到设计要求,这与管道的安

装定位不准确导致摩阻力加大等因素有关。对此,在实际施工时,需要采取诸如补张拉、多次张拉、增加持荷时间等措施予以解决,但最好的办法是在管道安装时使其定位准确,减小管道的摩阻损失。

6.3.5 边跨混凝土主梁的模板支架在卸载的过程中,如果不严格按施工控制要求的程序进行,可能会使主梁的混凝土因受力不均而产生开裂。

6.4 钢混组合梁施工

6.4.1 在组合梁混凝土的施工过程,应优化钢梁、混凝土桥面板的施工顺序,在满足施工工艺可实施的条件下,尽量降低组合梁受弯和混凝土板受拉,避免组合梁混凝土桥面板开裂或钢混界面脱离。

6.4.3 严格控制钢梁顶面高程是为了保证型钢及连接钢筋进入受压区混凝土的高度满足要求。

6.4.6 橡胶垫条可保证混凝土预制板和钢结构之间的密贴,避免湿接缝浇筑时漏浆,起到保证连接部混凝土质量的作用。

6.4.7 1 湿接缝中采用微膨胀补偿收缩混凝土是为了减少混凝土浇筑后在硬化过程中的收缩,新浇筑混凝土与龄期不同的混凝土之间能更好地结合。

3 连接部混凝土尺寸小,构造复杂,加之连接钢板、贯通钢筋、焊钉、连接型钢等构件的设置,严重影响了混凝土浇筑振捣和流动性,易产生早期开裂、混凝土浇筑不密实、漏浆离析及质量不均匀等病害。区别于常规混凝土浇筑,需采取针对性措施以保证混凝土密实度、强度和耐久性。

6.5 钢混结合段施工

6.5.1 钢混结合段处,为实现钢混间传力,钢结构构件尺寸明显大于标准段,且设置了更多更大的加劲肋、开孔板等板件,通常还有众多的剪力钉布置,既有的结合段钢结构施工也表明,结合段钢构件众多、连接复杂,导致焊接空间狭小,焊接质量难以保证。因此在结合段钢结构施工前,应细致分析结构构造、优化各板件焊接顺序,确保空间狭小的构件可焊接及良好的焊接质量;对主要焊缝及焊接困难位置,应开展焊缝质量试验评估,检核实际焊接质量;可通过工艺试验,确定施工参数,验证混凝土性能及浇筑振捣工艺。

6.5.3 钢混凝土结合段构造及受力均较复杂,施工难度大,应保证结合段的施工质量。

6.5.4 1 根据结合部的构造与受力特点，其填充混凝土设计重点：

- (1) 大流态，易于灌注密实。
- (2) 收缩小，利于钢箱梁与混凝土箱梁的结合。
- (3) 刚度大、韧性好、疲劳强度高，保证钢箱梁与混凝土箱梁间的力学匹配。

钢混结合段的混凝土配合比设计以提高混凝土抗裂性和体积稳定性为原则，综合考虑胶凝材料用量、砂率及用水胶比，同时考虑到结合段施工的质量和可操作性，配制流动性好、体积稳定性好的高性能混凝土，以实现混凝土的易密性和防止脱粘。可采用微膨胀钢纤维混凝土或聚丙烯纤维混凝土提高钢筋混凝土的抗裂性。掺加纤维后会使流动性降低，宜通过试配和浇筑工艺试验进行验证。

4 钢板与混凝土间的密贴或有效接触是承压传力效果的根本保障，混凝土材料品质、浇筑施工工艺及质量直接影响到两者间的接触率。鉴于工程实践尚少，考虑到不同工程施工的特点，宜开展混凝土浇筑或压浆工艺试验研究，以保证钢板与混凝土间的接触率，进而有效承压传力。

6.6 索塔、斜拉索施工

6.6.2 索塔的分段原则主要为简化模板结构和方便混凝土的浇筑，索塔施工分段一般应考虑塔柱变截面的位置、横梁的位置及其与索塔的连接方式、劲性骨架和爬架高度，大型预埋件位置等。横梁与索塔根据设计情况可以采用同时施工，也可采取分开施工然后浇筑接头混凝土合拢。

塔柱一般分为标准节段和特殊节段。标准节段是索塔在施工过程中，每节索塔都可使用同一套标准模板，其高度一般为3~6m；特殊节段的模板需要单独设计。

混凝土索塔横梁施工应根据结构、重量及支撑高度设置可靠的模板和支撑系统，并应考虑混凝土浇筑时支撑的弹性和非弹性变形、支承下沉、温差及日照等影响，必要时应设置调控设施。

6.6.3 1 结合部钢结构变形对稳定，故所有测量、定位和安装工作宜在温度稳定且无日照影响的时段进行，以消除局部温差所引起的误差。

4 剪力键钢筋与构造主筋交错密集，应分层错开绑扎。

6.6.4 在拉索预埋导管定位安装的施工实践中，出现过未考虑拉索垂度修正的现象，其后果是严重的，因此需要在施工前认真复核施工图中拉索的垂度修正值；如果设计的施工图中

未明确规定，则需自行修正。

6.7 施工监控

6.7.1 由于铁路混合梁斜拉桥的边跨混凝土主梁与主跨钢梁之间存在较大的刚度差异，而施工误差和材料参数误差总是存在，因而结构响应也会明显不同。在混合梁斜拉桥采用几何形态控制法进行施工控制时，对于主跨钢梁因刚度比较小，即使施工成桥线形与设计成桥线形之间存在一定的误差，钢梁的实际内力也能接近成桥设计内力；而对于边跨混凝土梁因刚度远大于钢梁，若指定成桥目标状态时没有考虑或没有完全考虑混凝土施工过程的收缩徐变影响，而仅仅简单地以设计成桥索长进行控制，则施工成桥状态与设计就会有偏差，导致混凝土应力与设计不符。因此铁路混合梁斜拉桥应以结构无应力几何参数为主要控制对象，主跨钢梁以几何参数为基本控制目标，以斜拉索无应力索长为主要调控手段；边跨混凝土梁以力学参数作为基本控制目标，以混凝土梁无应力线形作为主要控制手段，以索长、索力双控作为调控方法实现成桥主梁设计成桥线形和内力。

6.7.2 为确保成桥时实现桥梁的设计状态，需要进行施工监控。斜拉桥的主梁、索塔以及拉索之间的刚度存在很大差距，线形控制会受到来自拉索垂度、天气、温度、施工的临时负载、混凝土收缩等多种因素的干扰。施工监控就是从施工、测量、数据计算、分析修正、下达监控指令，其目的就是要保障工程的安全，使主梁的线形与内力符合设计要求。

6.7.3 实际施工时，施工温度、桥梁结构刚度、道砟容重等难以与理论设计值保持一致，故应根据实际施工条件进行修正，以尽量减小结构成桥线形和内力与设计的差别。

6.7.4 针对铁路混合梁斜拉桥的结构特点，除常规的墩、塔、梁结构的应力与线形监测外，斜拉索索力监测尤为重要，其张拉控制准确性直接影响大桥成桥线形及受力状态。对于铁路混合梁斜拉桥，主梁钢混结合段，连接钢、混两种材料主梁，构造复杂，是大桥的典型薄弱环节。因此，在施工监控中，应针对钢混结合段设置监测截面，并开展局部钢混应力、钢混脱空、钢混滑移的监测。边跨混凝土梁在墩顶负弯矩较大，常配置大量预应力以消除拉应力，构造复杂，需加强监测。

6.7.5 既有的公路、铁路混合梁桥的施工经验表明，结合段钢构件众多，施工空间狭小，在现场的混凝土浇筑施工过程也有诸多不便，均容易出现施工质量问题。因此，为保证钢混结合段的施工质量，可从结合段钢混构件应力、钢混脱空、钢混滑移三个方面开展监测。为全面获取结合段的技术状况，对具体的结合段监测截面、截面处具体构件、监测测点、

监测的频率提出具体的要求。

6.7.6 铁路混合梁斜拉桥的钢混结合段，为施工质量不良易发结构。当施工过程中，经监测发现相应的缺陷，应及时处理。在此，对施工缺陷作了量化评判标准，为施工及时处治提供参考。

6.7.7 大跨斜拉桥在施工时易受到环境条件的影响，为了保证在成桥时结构的主梁应力状态、线形、塔偏等均符合设计要求施工，需要采取措施以实现合龙的主动性和可控性。

主梁合龙段虽然有设计制造尺寸，但其是在设计基准温下且不考虑制作误差的长度。而在实际施工中，合龙温度与设计温度存在偏差，同时施工中存在误差，使得合龙口宽度（顶、底面宽度及左、右侧宽度）跟合龙段设计不符。因此，需准确计算合龙段制造长度，即合龙段的无应力制造尺寸。

7 验 收

7.1.9 《高速铁路轨道工程施工质量验收标准》TB 10754 第 17.2.1 条规定了无砟轨道静态铺设要求，本规范暂参照执行。根据已建成通车的大跨度无砟轨道斜拉桥工程实践和理论成果，大跨度斜拉桥线形受温度影响较大，基线长（48a）m 和（480a）m 的高低和轨向偏差多不满足《高速铁路轨道工程施工质量验收标准》TB 10754 的要求，但实际运营状态良好。因此，本标准取消基线长（48a）m 和（480a）m 的高低和轨向偏差要求。

8 健康监测

8.2 监测系统设计

8.2.3 主梁位移监测测点布设一般不少于主跨四分之点，同时宜结合桥上 CPIII 点位置进行布设，测点间距应满足测试精度要求；支座位移、主梁梁端纵向位移测点宜布设在墩顶、梁端支座处，宜根据具体情况选择支座位移监测方向；塔顶偏位监测测点应分别布设于索塔顶部。

钢轨伸缩调节器位移监测宜采用非接触式监测方法。基本轨位移监测点宜布置于基本轨跟端，尖轨位移测点宜布置于尖轨尖端，梁端伸缩装置测点宜布置于活动钢枕间、活动钢枕与相邻混凝土轨枕间、伸缩标尺等处。

8.3 监测系统实施与运维

8.3.4 埋入式传感器宜与钢筋牢固绑扎，并设有可靠的保护措施，防止混凝土浇筑过程中损坏传感器。混凝土中引出线缆应采用软管保护，软管与结构钢筋绑扎牢固，光纤类传感器的光缆端头应有密封保护措施。

结构表面传感器宜采用基座与结构连接。钢构件表面安装传感器时，应将基座与结构焊接固定，基座宜与构件在工厂同步加工，疲劳敏感区宜采用粘贴方式与结构固定；混凝土构件表面安装传感器时，宜在施工过程中将基座埋入混凝土或用特定螺栓将基座牢靠锚固在结构表面，螺栓应采取防松动措施。

采集设备安装不宜安装于桥面，当条件不具备时采集站应布置于桥梁防护墙外侧，避开梁缝，且箱体门背向来车方向朝线路外侧开启。采集站与结构间的连接件应牢固稳定，采用防松脱螺栓，采集站设备箱内线缆应绑扎牢固，接线端子接触可靠、连接牢固。

8.4 监测数据应用

8.4.2 特征值分析时应应对数据进行数据解耦和特征指标提取，并完成数值统计。规律分析时应分析监测数据及其特征值的变化趋势。对静态参量，应给出以日、月、年为统计间隔的统计值，分析结构在相对稳定环境条件下的长期变化规律，以及特殊事件发生前后结构的变化规律。对于动态参量，应以过车时段为单位，给出以日、月、年为统计周期的特征量，分析列车通过桥梁前后、特殊事件发生前后结构的变化规律。

8.4.5 应对监测及识别结果进行历史趋势对比、分析与预测，并生成评估报告，给出相应的养护管理建议。在遭受洪水、撞击、地震、强风、风致振动、火灾等突发事件时，应及时对结构进行专项评估，形成专项分析报告。