T/CECS G XXX-XX：2024

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

# 公路预应力混凝土部分斜拉桥技术规程

# Technical Specifications for Prestressed Concrete Partially Cable-Stayed Bridges on Highways

（征求意见稿）

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

# 公路预应力混凝土部分斜拉桥技术规程

Technical Specifications for Prestressed Concrete Partially Cable-Stayed Bridges on Highways

（征求意见稿）

T/CECS G：XXX-XX-2024

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：2024 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

北京

# 前　　言

根据中国工程建设标准化协会《关于开展2021年第一批工程建设协会标准(CECS G)制修订项目编制工作的通知》（中建标公路[2021]88号）的要求，招商局重庆交通科研设计院有限公司承担《公路预应力混凝土部分斜拉桥技术规程》（以下简称本标准）的制定工作。

编写组在总结国内外部分斜拉桥的结构特点、应用技术经验和相关科研成果的基础上，以完善和提升预应力混凝土部分斜拉桥应用技术为核心，完成了本标准的编制工作。

本规程分为10章，主要内容包括1总则、2术语和符号、3基本规定、4材料、5总体设计、6构造设计、7结构分析计算、8施工、9施工监控、10质量验收。

本标准基于通用的桥梁检测理论及原则编制，适用于本标准提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本标准相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本标准由中国工程建设标准化协会公路分会归口管理，由招商局重庆交通科研设计院有限公司负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路8号；邮编：100088；联系电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或招商局重庆交通科研设计院有限公司（地址：重庆市南岸区学府大道33号动力楼；联系电话：18008377898；邮编：400067；电子邮箱：chenbin@cmhk.com），以便修订时参考。

**主 编 单 位：**招商局重庆交通科研设计院有限公司
广西路建工程集团有限公司

**参 编 单 位：**中铁长江交通设计集团有限公司
中交第一公路勘察设计研究院有限公司
重庆交通大学

**主　　编：**王鹏

**主要参编人员：**王鹏 江羽习 耿波 陈奉民 王江波 张坤球 郑罡 熊邵辉 陈斌 李育林 曾勇 黄云 黄成 邓国军 朱俊良 黄文武 刘杰 游佐巧 汪宏 刘佳辉 吴晓武

**主　　审：**袁洪

**参与审查人员：**田克平 彭元诚 丁汉山 梁立农 谭邦明 黄金文 李德坤 裴宾嘉

**参 加 人 员：**

# 目　　次

1 总则 ..... 1
2 术语、符号 ..... 4
3 基本规定 ..... 7
4 材料 ..... 9
4.1 混凝土 ..... 9
4.2 钢筋与钢材 ..... 9
4.3 拉索 ..... 9
5 总体设计 ..... 12
5.1 一般规定 ..... 12
5.2 基本结构形式 ..... 13
6 构造设计 ..... 23
6.1 一般规定 ..... 23
6.2 主梁 ..... 23
6.3 墩塔 ..... 26
6.4 斜拉索 ..... 28
6.6 锚固系统 ..... 29
6.7 附属工程 ..... 31
6.7 养护条件设计 ..... 32
7 结构分析计算 ..... 34
7.1 一般规定 ..... 34
7.2 成桥状态静力分析 ..... 35
7.3 施工阶段静力分析 ..... 38
7.4 静力稳定分析 ..... 39
7.5 动力分析 ..... 39

8 施工 ..... 41
8.1 一般规定 ..... 41
8.2 墩塔 ..... 41
8.3 索鞍 ..... 42
8.4 主梁悬臂浇筑 ..... 43
8.5 斜拉索 ..... 46
8.6 附属工程 ..... 50
9 施工监控 ..... 52
9.1 一般规定 ..... 52
9.2 监测控制 ..... 52
9.3 控制精度 ..... 54
10 质量检验 ..... 55

# 1 总则

**1.0.1** 为规范和指导公路预应力混凝土部分斜拉桥的设计与施工，按照安全可靠、耐久适用、绿色环保、经济合理、技术先进的要求，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于跨径在 300m 及以下的新建公路预应力混凝土部分斜拉桥的设计与施工。

**条文说明**

预应力混凝土部分斜拉桥是以预应力混凝土主梁为主体的承重结构，斜拉索为在体内索基础上加设的体外索，由此降低主梁高度，控制主梁下挠。因而它兼有连续梁桥与斜拉桥的优点。

与连续梁桥/连续刚构桥相比，它有如下优点：

1 跨越能力大，梁高小，可降低建筑高度。

2 跨径 200m 以上部分斜拉桥比连续梁/刚构桥经济。

3 通过索力主动调整主梁内力和线形，避免了主梁下挠和开裂。

与斜拉桥相比，部分斜拉桥有如下优点：

1 塔高较低，塔身结构简单，施工较方便。

2 拉索应力变化幅度较小，可施加较高应力。

3 主梁抗弯刚度大，极大地方便了施工。

4 整体刚度大，变形小，行车舒适性更好。

近年来，国内外已修建了或正在建设多座跨径 200m 以上预应力混凝土部分斜拉桥（表 1-1），本次修订充分总结吸收了近年来公路预应力混凝土部分斜拉桥工程建设经验和技术成果，将适用跨径提高到 300m，以体现我国公路斜拉桥设计行业的技术发展水平。

表 1-1 国内外跨径超过 200m 的公路预应力混凝土部分斜拉桥不完全统计表

| 序号 | 桥梁名称 | 地点 | 建成时间 | 主跨布置 (m) | 主梁类型 | 桥址 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 木曾川桥（Kiso） | 日本爱知县 | 2001 | 160+3×275+160 | 钢-PC 混合 | 河流 | |
| 2 | 揖斐川桥（Ibi） | 日本爱知县 | 2001 | 154+4×271.5+157 | 钢-PC 混合 | 河流 | |
| 3 | 三户望乡大桥（Sannohe） | 日本青森县 | 2005 | 99.9+200+99.9 | PC | 河流 | |

| 序号 | 桥梁名称 | 地点 | 建成时间 | 主跨布置 (m) | 主梁类型 | 桥址 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 德山桥（Tokuyama） | 日本 | 2006 | 139.7+220+139.7 | PC | 河流 | |
| 5 | Golden Ears 桥 | 加拿大 | 2009 | 121+3×242+121 | PC | 河流 | 等截面梁 |
| 6 | Maha Chesadabodindranusorn 桥 | 泰国 | 2015 | 130+200+130 | PC | 河流 | |
| 7 | Puente Barra Vieja 桥 | 墨西哥 | 2016 | 30+40+90+220+90 | PC | 河流 | 板索、等截面梁 |
| 8 | Kwidzyn 桥 | 波兰 | 2013 | 70+130+2×204+130+70 | PC | 河流 | 等截面梁 |
| 9 | Ostrda 高速公路桥 | 波兰 | 2017 | 132.5+2×206+132.5 | PC | 沟谷 | |
| 10 | 考若-巴贝度浦桥 | 帕劳 | 2002 | 82+247+82 | PC | 海湾 | |
| 11 | 惠青黄河公路大桥 | 中国山东 | 2006 | 133+220+133 | PC | 河流 | |
| 12 | 江珠高速荷麻溪大桥 | 中国珠海 | 2007 | 125+230+125 | PC | 河流 | |
| 13 | 济阳黄河公路大桥 | 中国山东 | 2008 | 107+195+216+195+107 | PC | 河流 | |
| 14 | 广州沙湾大桥 | 中国广东 | 2010 | 137.5+248+137.5 | PC | 河流 | |
| 15 | 舟山三礁港大桥 | 中国浙江 | 2010 | 120+210+210+115+30 | PC | 海洋 | |
| 16 | 江肇高速西江大桥 | 中国广东 | 2011 | 128+3×210+128 | PC | 河流 | |
| 17 | 兰渝线新井口嘉陵江双线铁路特大桥 | 中国重庆 | 2011 | 118+228+118 | PC | 河流 | |
| 18 | 泸州茜草长江大桥 | 中国四川 | 2012 | 128+248+128 | PC | 河流 | |
| 19 | 大连长山大桥 | 中国大连 | 2014 | 140+260+140 | PC | 海港 | |
| 20 | 南澳大桥主桥 | 中国汕头 | 2015 | 126+238+126 | PC | 海港 | |
| 21 | 陈村特大桥主桥 | 中国广东 | 2015 | 120+218+120 | PC | 河流 | |
| 22 | 金门大桥 | 中国台湾金门 | 2016 | 140+5×280+140 | PC | 海峡 | |
| 23 | 扶典口西江特大桥 | 中国广西 | 2018 | 145+270+145 | PC | 河流 | |
| 24 | 东洲湘江大桥 | 中国湖南 | 2019 | 120+2×210+120 | PC | 河流 | |
| 25 | 闫营子特大桥 | 中国河北 | 2022 | 115+200+115 | PC | 河谷 | |
| 26 | 王家河大桥 | 中国陕西 | 2021 | 125+4×230+125 | PC | 沟谷 | |
| 27 | 培森柳江特大桥 | 中国广西 | 2023 | 145+280+145 | PC | 河流 | |
| 28 | 磨寨乌江特大桥 | 中国重庆 | 在建 | 153+296+153 | PC | 河流 | |

注：柔梁系指等截面梁高与跨径比小于 L/45 的情况，或变截面梁根部梁高小于 L/45 的情况。

**1.0.3** 本规程采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，按分项系数的设计表达式进行设计。

**1.0.4** 公路预应力混凝土部分斜拉桥设计与施工应积极稳妥推广应用新技术、新材料、新工艺和新设备。

**1.0.5** 公路预应力混凝土部分斜拉桥设计与施工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。

**条文说明**

本规程以现行《公路工程技术标准》（JTG B01）、《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）和《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）、《公路钢结构桥梁设计

规范 》（JTG D64）、《公路桥涵施工技术规范》(JTGT 3650）为主要依据。

# 2 术语、符号

**2.0.1** 部分斜拉桥 partially cable-stayed bridge

一种拉索承载相对较小且应力幅相对较低，而主梁承载相对较大的斜拉桥。

**条文说明**

“部分斜拉桥”的名称存在不同说法。法国设计师 Jacgues Mathivat 最初命名为“extra-dosed PC bridge”，直译为“超剂量预应力混凝土桥梁”；日本工程界一直沿用这一名称；在美国，该桥型被称为“extra-dosed PC bridge”或“extradosed cable-stayed bridge”的；国内对该桥型的称呼一直存在争议，学者严国敏将其称为“部分斜拉桥”，认为该桥型受力特性介于斜拉桥和连续梁之间，桥的刚度主要由梁体提供，斜拉索主要起体外预应力的作用；王伯惠、顾安邦、陈从春等认为应称为“矮塔斜拉桥”。

《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01-2020）统一称为“部分斜拉桥”，涵盖了“矮塔斜拉桥”。

**2.0.2** 主梁 girder

由斜拉索和支座支承，直接承受由桥面传递的交通荷载的构件。

**2.0.3** 预应力混凝土部分斜拉桥 prestressed concrete partially cable-stayed bridge

主梁结构采用预应力混凝土建造的部分斜拉桥。

**2.0.4** 索塔 pylon

用于锚固或支承斜拉索，并将其索力传递给下部结构的构件。

**2.0.5** 斜拉索 stay cable

承受拉力并支承主梁的缆索构件。

**2.0.6** 多塔部分斜拉桥 multi-span partially cable-stayed bridge

多于两个索塔的部分斜拉桥。

**2.0.7** 索梁荷载比 cable beam load ratio

拉索分担竖向荷载与主梁分担竖向荷载的比值。

**2.0.8** 索梁活载比 cable beam live load ratio

拉索分担竖向活载与主梁分担竖向活载的比值

**2.0.9** 塔梁固结体系 fixed system between pylon and girder

塔梁固结、主梁在墩处设支座的结构体系。

**2.0.10** 塔墩固结体系 fixed system between pylon and pier

塔墩固结、主梁在墩处设支座的结构体系。

**2.0.11** 塔梁墩固结体系 rigid frame system

塔、梁、墩固结在一起的结构体系。

**2.0.12** 无索区 no cable area

主梁上不设置拉索的区段。

**2.0.13** 多塔部分斜拉桥 multi-tower partially cable-stayed bridge

多于两个索塔的部分斜拉桥。

**2.0.14** 索鞍 pylon saddle

设置在索塔内供拉索穿过索塔，并使拉索平顺地改变方向的转向支撑装置。

**2.0.15** 分丝管索鞍 strand-separation tube saddle

在索鞍内布置的供单根钢绞线穿过的管道，多根分丝管集束形成的鞍体可使拉索钢绞线逐一穿过索塔转向，该索鞍装置称为分丝管索鞍。

**2.0.16** 等张拉力法 equal tension method

在平行钢绞线拉索采用单根张拉方式时，对先期单根张拉的钢绞线进行不

同程度的超张拉，并通过精确测试出先期钢绞线上的拉力，确定后续钢绞线的张拉力，从而控制索内各根钢绞线拉力均匀的方法。

# 3 基本规定

**3.0.1** 公路预应力混凝土部分斜拉桥主体结构设计使用年限为 100 年。

**3.0.2** 公路预应力混凝土部分斜拉桥设计应采用全寿命设计理念，应在确保安全运营的前提下，满足可检、可养、可修。

**3.0.3** 公路预应力混凝土部分斜拉桥设计应考虑施工方法、施工步骤和结构体系转换的程序对总体布局、构造设计和施工及运营安全的影响。

**3.0.4** 设计应明确主体结构以及拉索、阻尼装置、支座、伸缩装置等可更换部件的设计使用年限，可更换部件的设计使用年限不应低于表 3.0.4 的规定。

表 3.0.4 主要可更换部件的设计使用年限

| 部件 | 设计使用年限（年） |
|---|---|
| 拉索 | 25 |
| 斜拉索外置式阻尼装置 | 25 |
| 盆式橡胶支座 | 25 |
| 钢支座 | 50 |
| 伸缩装置 | 15 |

**条文说明：**

考虑拉索材料及防腐技术的更新，且预应力混凝土部分斜拉桥拉索应力变化幅值相对较小，故建议适当提高拉索设计使用年限。

**3.0.5** 对拉索等需更换部件，在确保结构安全的前提下，设计应充分考虑更换的便捷性和可操作性。

**3.0.6** 作用及作用组合应按现行《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）、《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）的规定执行。

**3.0.7** 抗震设计应按现行《公路桥梁抗震设计规范》（JTG 2231-01）、《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）的规定执行。

**3.0.8** 应重视施工监控和运营养护，可根据需要设置必要的结构监测设施。

**3.0.9** 设计、施工应注意保护生态环境，减少对环境的不利影响。

# 4 材料

## 4.1 混凝土

**4.1.1** 用于预应力混凝土部分斜拉桥各部分构件混凝土的强度、弹性模量和耐久性设计要求等，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定采用。

**4.1.2** 主梁和索塔所采用的混凝土强度等级不应低于 C40。

4.1.3 主梁 0 号块、1 号块可采用纤维混凝土。

## 4.2 钢筋与钢材

**4.2.1** 钢筋混凝土及预应力混凝土构件所采用的普通钢筋与预应力钢筋类别、设计强度、标准强度和弹性模量，应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定采用。

**4.2.2** 钢板、型材、普通螺栓、锚栓、高强螺栓、焊接材料等的技术要求、物理性能指标及耐久性设计要求，应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定采用。

## 4.3 拉索

**4.3.1** 拉索用高强钢丝应采用 5 mm 或 7 mm 钢丝，其性能应满足现行《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》（GB/T 17101）的要求。钢丝抗拉强度设计值按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定采用，标准强度不宜低于 1770MPa。钢丝防护镀层或涂层的性能应满足国家或行业现行有关标准的规定。

**条文说明：**

目前，国内预应力混凝土部分斜拉桥大都采用钢绞线拉索，但作为可能选项，仍考虑将平行钢丝拉索用高强钢丝列入。

**4.3.2** 拉索用钢绞线应采用高强度低松弛钢绞线，单根钢绞线应进行镀锌和环氧树脂涂覆等防腐处理，且外部包挤高密度聚乙烯护套；单丝涂覆环氧涂层钢绞线应符合现行《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》（GB/T 25823）的规定，填充型环氧涂层钢绞线应符合《环氧涂层七丝预应力钢绞线》（GB/T21073）的规定；抗拉强度设计值应按现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定采用，标准强度不宜低于 1860MPa。

**4.3.3** 拉索用锚具材料性能应满足现行《优质碳素结构钢》（GB/T 699）或《合金结构钢》（GB/T 3077）的要求，锚具应做防腐处理。

**4.3.4** 平行钢丝拉索成索技术条件应满足现行《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》（GB/T 18365）及《大跨度斜拉桥平行钢丝拉索》（JT/T 775）的规定。

**4.3.5** 钢绞线拉索成索技术条件应满足现行《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》（GB/T 30826）及《无粘结钢绞线斜拉索技术条件》（JT/T 771）的规定。

**4.3.6** 拉索整束钢绞线外护套可采用高密度聚乙烯管。

**4.3.7** 斜拉索静载试验或疲劳试验应满足现行《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》（GB/T 18365）及《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》（GB/T 30826）的要求。斜拉索疲劳试验的应力上限应满足 0.65 倍的斜拉索抗拉强度标准值。对于通过弧形索鞍弯折的拉索，应模拟实桥条件进行拉索抗滑移静载和疲劳试验。

**条文说明**

《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》（GB/T 18365）疲劳试验规定的钢丝应力上限为 0.4 倍的钢丝抗拉强度标准值，《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》（GB/T 30826）疲劳试验规定的钢丝应力上限为 0.45 倍的钢绞线抗拉强度标准值，均为针对常规斜拉桥斜拉索的要求，部分斜拉桥的斜拉索应力使用上限更高，其受力特性与体外预应力钢束体系类似。

根据《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）第 7.2.4 条，斜拉索的承载力公式，部分斜拉桥的结构体系修正系数为 1.5，因此将部分斜拉桥疲劳试验

的应力上限统一为 0.65 倍的斜拉索抗拉强度标准值。

试验方法可参考斜拉索设计、测试和安装条例——美国后张法协会斜拉桥委员会发布的拉索设计、试验指南（Post-Tensioning Institute(PTI), 2001, Recommendations for stay cable design, testing, and installation）以及 CEB-FIP FIBBUL-89-2019 Acceptance of stay cable systems using prestressing steels, Recommendation。

# 5 总体设计

## 5.1 一般规定

**5.1.1** 预应力混凝土部分斜拉桥应根据桥梁使用功能、技术标准、建设条件、景观、环保等要求，考虑全寿命周期成本，进行总体设计。

**5.1.2** 总体设计应对路线布设、桥跨布置、横断面布置、结构体系、景观设计、施工方案以及主梁、斜拉索、索塔和基础等进行综合比选。

**5.1.3** 桥轴线总体走向应顺直、合理，同时为两岸接线布置创造良好的顺接条件，应满足《公路路线设计规范》（JTG D20）的相关要求。

**5.1.3** 桥梁平面布置应采用较高的平曲线技术指标，当桥位受限时，可根据需要并结合桥跨布置确定平曲线参数。

**5.1.4** 桥梁纵断面设计的各项技术指标应符合路线布设的规定，并满足桥梁规范最低设计标准和最大纵坡限制的要求。跨中应避免布置在凹曲线中，宜布置在凸曲线内。

**5.1.6** 桥跨布置应充分满足通航或跨线净空等要求，当有通航时与航道的交叉角度应符合《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60）的相关要求。

**5.1.7** 设计应充分考虑水下地形、水文、地质、桥型结构、施工等特点和要求，考虑抗风、抗震、防撞等复杂因素影响，必要时进行专题研究，保证结构安全、可靠。

**5.1.8** 景观设计应力求线条连续、均衡、简洁、优美，应突出大桥的整体景观效果和地标意义，并使大桥与周围的环境相协调。

**5.1.9** 设计应明确施工过程中结构体系转换的顺序及应采取的措施，并应对

预应力混凝土部分斜拉桥的运营、养护提出技术要求。

**5.1.10** 梁、塔、墩应设置必要的检查通道，以便后期检查。

**5.1.11** 合理设计桥面排水，桥面最小纵坡不宜小于 0.5%。当桥梁跨线或跨越环境保护水体时，其排水构造应避免直排。

## 5.2 基本结构形式

**5.2.1** 预应力混凝土部分斜拉桥主要由主梁、斜拉索、索塔、墩台及基础等部分构成。

**5.2.2** 预应力混凝土部分斜拉桥塔、墩、梁连接方式有：塔梁固结、塔墩固结、塔梁墩固结。

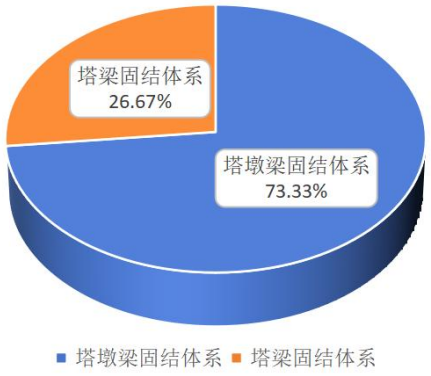
**条文说明**

部分斜拉桥结构体系特点及适用性见表 5.2.2。彭晶蓉对国内外 134 座部分斜拉桥设计参数和构造类型进行统计，结果显示，2000 年前，部分斜拉桥仅有塔梁固结体系和塔墩梁固结体系，二者分别占比 26.67%和 73.33%。2000 年之后，由于设计技术进步，体系中开始出现塔墩固结体系，结构体系分布如图 5.2.2 所示。

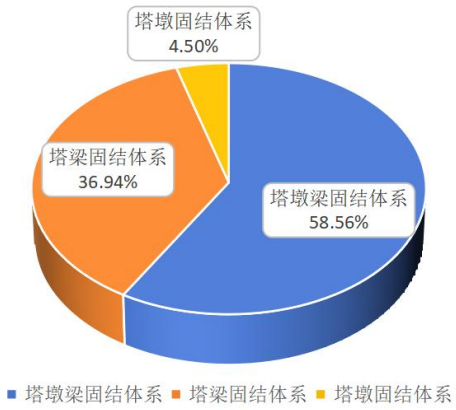
一般而言，当墩高大于 30m，上部结构连续长度小于 1000m，主墩宜采用塔墩梁固结体系；当墩高小于 30m，或墩较高但上部结构连续长度大于 1000m 时，宜采用塔梁固结体系或塔墩固结体系。随着建造跨径日益增大，塔梁墩固结体系的使用更加普遍。

**表 5.2.2 部分斜拉桥结构体系特点及其适用性**

| 体系 | 固结方式 | 优点 | 缺点 | 适用性 |
|---|---|---|---|---|
| 塔梁固结 | 塔梁固结，塔墩分离 | 塔墩弯矩可降低，主梁轴向拉应力可减小 | 需设置大吨位支座 | 小跨径部分斜拉桥 |
| 塔墩固结 | 塔墩固结，塔梁分离 | 墩对主梁有竖向支撑力 | 塔墩处主梁有峰值负弯矩，温度和收缩徐变产生较大内力 | 矮墩大跨部分斜拉桥 |
| 塔墩梁固结 | 塔梁墩三者互为固结 | 主梁挠度小，无需安装大吨位支座 | 主梁固结处负弯矩大 | 高墩大跨部分斜拉桥 |




（a）2000 年前部分斜拉桥结构体系




（b）2000 年后部分斜拉桥结构体系分布

**图 5.2.2 不同时期部分斜拉桥结构体系**

**5.2.3** 预应力混凝土部分斜拉桥依据桥梁长度、跨径、宽度等需求，其总体布置可采用以下形式：

1 根据索塔在纵桥向的布置，可采用独塔、双塔、多塔桥。

2 部分斜拉桥拉索横桥向可采用单索面、双索面及多索面布置。

3 拉索在纵桥向宜采用扇形，也可采用竖琴形布置。

**条文说明**

**1 拉索纵桥向布置**

部分斜拉桥索面内布置形式分为辐射形、竖琴形和扇形。辐射形由于其构造缺点已很少采用；竖琴形拉索与主梁夹角相等，塔上锚固点间距大，各锚固点构造相同，简洁美观、便于施工、利于索塔受力，但不适用于大跨径部分斜拉桥设计；扇形拉索布置介于辐射形和竖琴形之间，相比竖琴形拉索布置，塔上锚固点间距减小，适于大跨径部分斜拉桥设计，因此扇形拉索布置适用性更强。

陈从春、杨洪波等对扇形、竖琴形索面布置塔梁墩固结体系部分斜拉桥结构受力进行了对比分析，在相同基础条件下，主梁跨中活载弯矩扇形索面为竖琴形索面的 98%，主梁塔、梁交接处弯矩扇形索面为竖琴形索面的 93%，塔根弯矩为竖琴形索面的 1.14 倍，主梁跨中挠度为竖琴形索面的 96%，塔顶水平位移竖琴形的 1.03 倍；二者跨中恒载弯矩，相差可达 9%，主支点处弯矩，相差可达 23%。彭晶蓉以实际工程为依托，从拉索用钢量方面分析，研究得出在相同的索梁活载比下，用索量对比为辐射形：扇形：竖琴形=1:1.27:1.81。刘凯以龙井河大桥为依托，分析得出在部分斜拉桥塔跨比特征值内，竖琴形布置比扇

形的用钢量增加了 4%~14%。

编写组对国内外 129 座部分斜拉桥索面布置形式进行了调研统计。扇形索面共计 108 座，占 83.7%；竖琴索面共计 19 座，占 14.7%，辐射型索面 1 座（Riga South Bridge），单根索结构 1 座（福州浦上大桥）。可见，扇形索面布置优于竖琴形索面。

**2 拉索横桥向布置**

在调研的 108 座扇形索面部分斜拉桥中，扇形索面中单索面共计 26 座采用单索面结构，占比 24.1%；77 座采用双索面结构，占比 71.3%；1 座采用三索面结构，4 座采用四索面结构。竖琴型索面中 9 座采用单索面结构，8 座采用双索面结构，2 座采用四索面结构（澳门澳凼三桥）；如图 5.2.3 所示，调研的全部 129 座部分斜拉桥中，扇形单索面、扇形双索面、扇形三索面、扇形四索面、竖琴单索面、竖琴双索面、竖琴四索面、辐射索面、单根索占比分别为 20.15%、59.69%、0.78%、3.1%、6.97%、6.20%、1.55%、0.78%、0.78%。现代桥梁设计中，已基本不再采用辐射形索面。

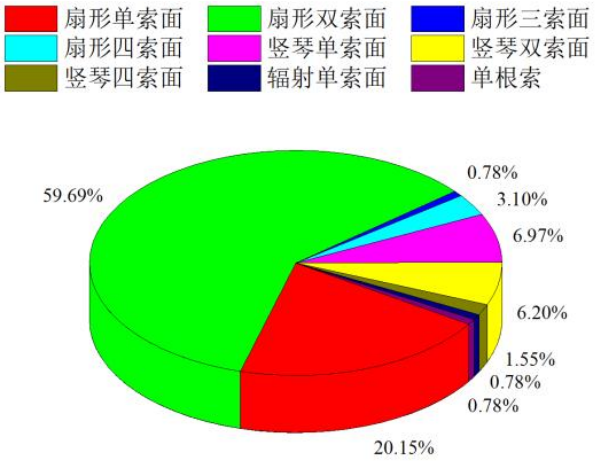



图 5.2.3 部分斜拉桥拉索布置形式统计

**5.2.4** 预应力混凝土部分斜拉桥索塔布置基本参数宜符合如下规定：

1 独塔预应力混凝土部分斜拉桥两跨宜采用等跨布置或者接近等跨布置，双塔预应力混凝土部分斜拉桥的边中跨比可取 0.46~0.65，多塔预应力混凝土部分斜拉桥的各中跨为等跨布置，边中跨比可取 0.50~0.71。

2 独塔两跨预应力混凝土部分斜拉桥桥面以上塔高与主跨跨径比宜为 1/8.3~1/3.3，双塔三跨、多塔多跨预应力混凝土部分斜拉桥桥面以上塔高与主跨跨径比宜为 1/12.5~1/5。

**条文说明**

**1 边中跨比**

1）规范规定

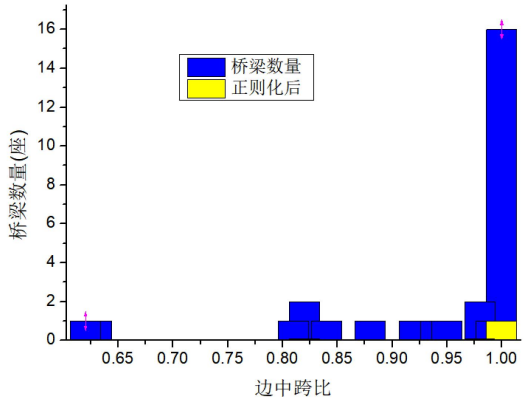
《公路斜拉桥设计规范》（JTGT 3365-01-2020）规定，对于塔高较小、采用塔梁墩固结体系或塔梁固结体系的混凝土部分斜拉桥，边跨与主跨跨径比宜采用 0.5~0.76。

2）已有研究

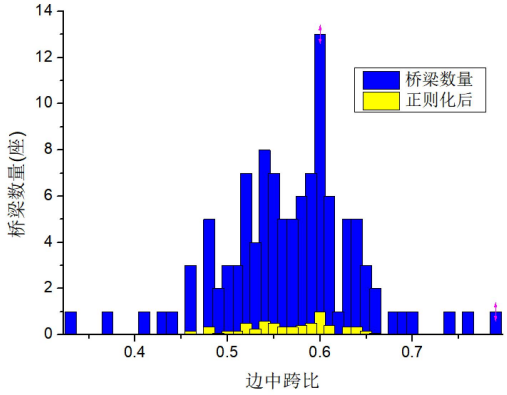
杨鸿波通过选取边/中跨比分别为 0.45、0.513、0.55、0.6、0.65，其他参数不变，对塔梁墩固结体系和塔梁固结墩顶设支座体系两种基本体系进行了受力分析，其研究结果认为边中跨比取 0.5~0.6 比较合理。董水英通过对已有的研究对比分析，得出曲线部分斜拉桥的边中跨比的使用范围为 0.5~0.6。王彬通过 midas 对边中跨比为 0.5、0.55、0.60、0.65、0.7 的部分斜拉桥进行了成桥状态分析，其研究结果认为边中跨比的合理取值范围在 0.5~0.65。韩飞飞、任伟新以瓦埠湖特大桥为背景，通过建立数值模型，对结构参数对受力性能影响进行了分析，其结果认为部分斜拉桥塔梁墩固结体系合理边中跨比在 0.45~0.65 之间。

3）统计分析

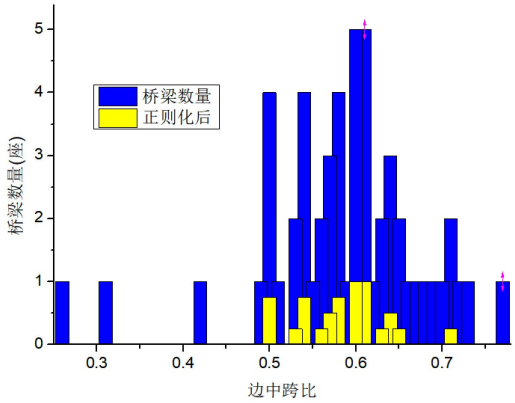
编写组共统计了 195 座部分斜拉桥，其中两跨部分斜拉桥共计 29 座，三跨部分斜拉桥共计 111 座，多跨部分斜拉桥共计 55 座，统计结果如图 5.2.4-1 所示。两跨部分斜拉桥边中跨比最大值为 1.00，最小值为 0.62，中位数为 0.94，绝大多数两跨部分斜拉桥边中跨比为 1.00，个别两跨部分斜拉桥受地势影响不能等跨布置时边中跨比时也接近于 1.00；三跨部分斜拉桥边中跨比最大值为 0.79，最小值为 0.33（帕劳友好桥，主梁为混合梁），中位数为 0.60，边中跨比主要集中在 0.46~0.65 之间；多跨部分斜拉桥边中跨比最大值为 0.77，最小值为 0.26，中位数为 0.60，边中跨比主要集中在 0.50~0.71 之间。与《公路斜拉桥设计规范》（JTGT 3365-01-2020）规定及前述研究基本吻合。




（a）两跨部分斜拉桥边中跨比




（b）三跨部分斜拉桥边中跨比




（c）多跨部分斜拉桥边中跨比

图 5.2.4-1 国内外部分斜拉桥边中跨比

**2 塔跨比**

索塔高度是指桥面至塔顶的结构高度，决定着拉索布置和桥梁整体受力，是影响部分斜拉桥特性的重要因素之一。

1）规范规定

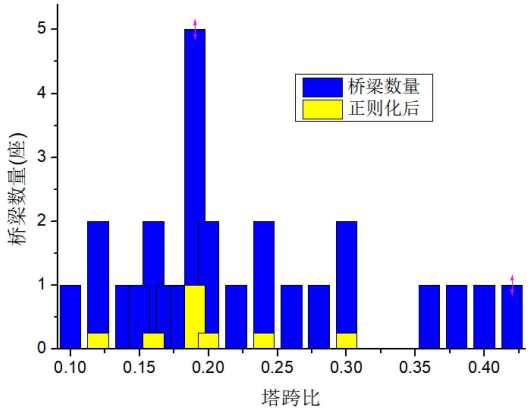
《公路斜拉桥设计规范》（JTGT 3365-01-2020）规定，对于塔高较小、采用塔梁墩固结体系或塔梁固结体系的混凝土部分斜拉桥，桥面以上塔高与主跨跨径比宜采用 1/10~1/6。

2）既有研究

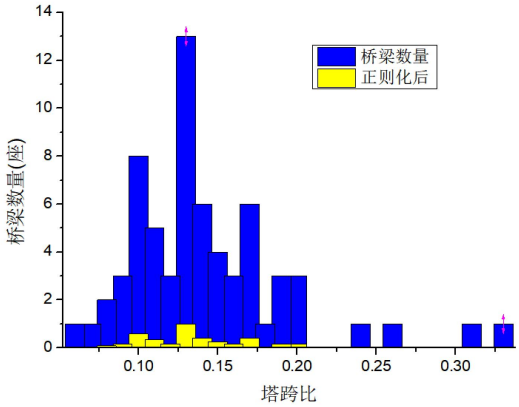
孙东利通过保证塔上锚固间距不变，仅调整塔高对石湾特大桥进行受力分析，得出的部分斜拉桥塔跨比宜在 1/8~1/6 之间。田野认为合理的桥塔高度一般为 1/12~1/6 倍主跨跨径，并依托南澳大桥通过数值模拟方式，对比了塔跨比为 1/10~1/6.25 之间的结构受力，得出塔跨比为 1/7.93 时，原设计的塔高较为合理，且有利于节省材料。

3）统计分析

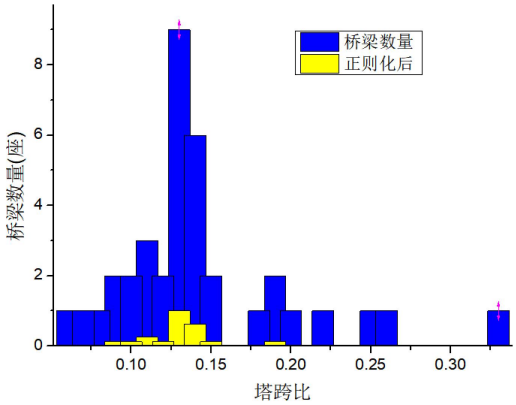
编写组调研了国内外共计 130 座部分斜拉桥，对其主塔塔高和主跨跨径之比进行了统计分析，统计结果如图 5.2.4-2 所示，两跨部分斜拉桥塔跨比最大值为 0.42，最小值为 0.10，中位数为 0.19，塔跨比主要集中在 0.12~0.30，即 1/8.3~1/3.3；三跨部分斜拉桥塔跨比最大值为 0.33，最小值为 0.06，中位数为 0.13，塔跨比主要集中在 0.08~0.20 之间，即 1/12.5~1/5；多跨部分斜拉桥塔跨比最大值为 0.33，最小值为 0.06，中位数为 0.13，塔跨比主要集中在 0.08~0.19 之间，即 1/12.5~1/5.3。根据图 5.2.4-2，塔跨比在双塔和多塔部分斜拉桥之间差异并不明显，单塔塔跨比则较三跨和多跨略有增加。与《公路斜拉桥设计规范》（JTGT 3365-01-2020）规定及前述研究基本吻合。




（a）两跨部分斜拉桥塔跨比




（b）三跨部分斜拉桥塔跨比




（c）多跨部分斜拉桥塔跨比

图 5.2.4-2 国内外部分斜拉桥塔跨比

**5.2.5** 预应力混凝土部分斜拉桥拉索布置基本参数宜符合如下规定：

1 斜拉索布置规定：

1）拉索倾角在 11°~35°范围内。

2）梁上拉索常用索距宜为 3.5~8m。索距不宜大于 12m。

3）索塔上拉索间距宜为 0.5~1.2m。

2 无索区长度

1）索塔附近无索区长度宜采用 0.11～0.28 倍主跨跨径。

2）中跨跨中无索区长度宜采用 0.06～0.21 倍主跨跨径。

3）边跨端部无索区长度宜采用 0.07～0.27 倍主跨跨径。

**条文说明**

**1 拉索倾角与间距**

在预应力混凝土部分斜拉桥拉索的布置中，拉索倾角是拉索轴线与水平面的交角，该角度是影响拉索材料使用效率及控制水平力大小的重要因素。由于塔高较小，拉索倾角相较于斜拉桥总体偏小。刘凯通过对国内外 48 座部分斜拉桥的拉索倾角进行了统计分析，得出斜拉索最大倾角平均值 21.5°，最小倾角平均值为 14°。编写组调研的 48 座部分斜拉桥中，拉索倾角为 8°~35°，一般为 11°~35°。

拉索在梁、塔上的索距与选择的布置形式有关。根据对国内外已建的部分斜拉桥调研统计，主梁上拉索间距 3~12m，一般采用 3.5~8m。塔上的拉索间距为 0.3~2.8m，一般采用 0.5~1.2m。

**2 无索区长度**

相较常规的斜拉桥，部分斜拉桥主梁上较长的无索区段是其鲜明特点之一，设计中通过无索区长度的变化，可调整主梁弯矩和主塔处墩顶负弯矩，为主梁预应力束的布置提供空间。无索区间距包括塔根处无索区长度、主跨跨中无索区长度、边跨无索区长度，都是部分斜拉桥设计重要参数。

1）规范规定

《公路斜拉桥设计规范》（JTGT 3365-01-2020）规定，对于塔高较小、采用塔梁墩固结体系或塔梁固结体系的混凝土部分斜拉桥，主梁上的无索区长度，索塔附近宜采用 0.15~0.20 倍主跨跨径，中跨跨中宜采用 0.2~0.35 倍主跨跨径，边跨宜采用 0.20~0.35 倍边跨跨径。

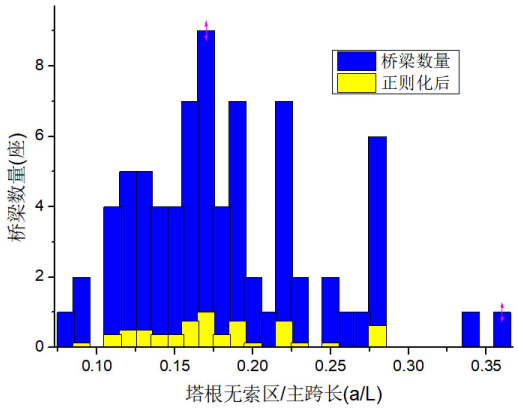
2）既有研究

刘凯以龙井河大桥为背景，通过设置不同无索区长度对结构受力影响进行了分析，得出塔根无索区长度与主跨跨径比宜控制在 0.16~0.35，跨中无索区长

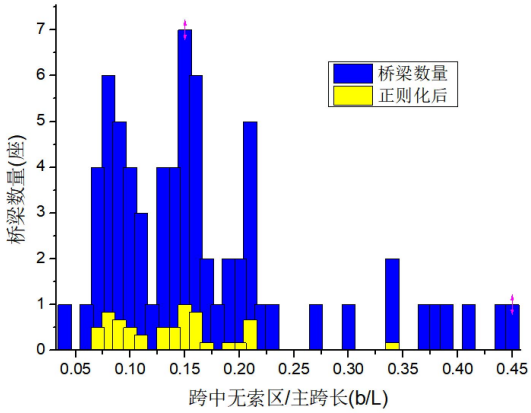
度与主跨跨径比宜控制在 0.06~0.25，边跨无索区长度与主跨跨径比宜控制在 0.05~0.16。彭彬通过结构有限元分析，对无索区长度对部分斜拉桥活载效应的影响进行了研究，得出大跨径部分斜拉桥塔根无索区长度与主跨跨径的合理比值为 0.15~0.20，跨中无索区长度与主跨跨径的合理比值为 0.06~0.13。刘文会以兰州小西湖黄河大桥为依托，通过调整结构参数来分析部分斜拉桥结构体系主梁最大正负弯矩变化规律，研究无索区变化对其影响，得出塔根无索区长度与主跨跨径比值宜在 0.11~0.22，中跨无索区长度与主跨跨径比值宜在 0.09~0.35。

3）统计分析

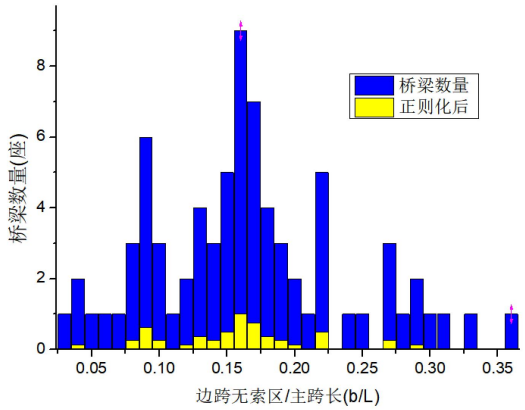
编写组共调研搜集了 76 座桥无索区长度数据（其中 76 座有塔根和边跨无索区长度信息、70 座有跨中无索区长度信息），包括 13 座两跨部分斜拉桥、45 座三跨部分斜拉桥、18 座多跨部分斜拉桥。以塔根无索区长度 a、跨中无索区长度 b、边跨无索区长度 c 与主跨跨径 L 的比值进行统计分析，统计结果如图 5.2.5 所示。根据统计结果两跨部分斜拉桥无索区长度/主跨跨径较三跨和多跨部分斜拉桥偏高，三跨和多跨部分斜拉桥差别则较小；统计分析得到，a/L 最大值为 0.36，最小值为 0.08，中位数为 0.17，主要集中在 0.08~0.26；b/L 最大值为 0.45，最小值为 0.04，中位数为 0.15，主要集中在 0.07~0.34；c/L 最大值为 0.36，最小值为 0.03，中位数为 0.16，主要集中在 0.04~0.29。




（a）塔根无索区长度/主跨跨径




（b）跨中无索区长度/主跨跨径




（c）边跨无索区长度/主跨跨径

图 5.2.5 无索区长度数据统计

**5.2.6** 预应力混凝土部分斜拉桥主梁梁高应根据跨径、索面布置、截面形式、纵横向受力特点等综合确定，宜符合如下规定：

1 主梁高度沿纵桥向可采用等截面或变截面，当主跨不超过 120m 时，可采用等截面形式。

2 主梁采用等截面时，梁高与主跨跨径之比宜采用 1/30～1/45；采用变截面时，根部梁高与主跨跨径之比宜采用 1/20～1/40，跨中梁高与主跨跨径之比宜采用 1/50～1/75。

**5.2.7** 主梁宜采用封闭式箱形截面。

**5.2.8** 主梁采用变截面时，梁体下缘顺桥向应为一条平顺的曲线，对于主跨跨径小于 150m 的可采用二次抛物线设置，或主塔根部无索区段采用直线变截面，其余区段采用等截面；大于 150m 的可采用 1.5～1.8 次抛物线设置，无索区段可采用等截面。

**5.2.9** 预应力混凝土部分斜拉桥索梁刚度比宜小于 30。

**条文说明**

部分斜拉桥竖向外荷载由主梁和斜拉索共同承担，索对主梁起加劲作用，可看作的弹性支承连续梁。日本学者山崎淳等提出部分斜拉桥的特征指标之一为索梁刚度比：

$$\gamma = \sum_i \frac{1/\delta_{si}}{1/\delta_{Gi}} = \sum_i \frac{\delta_{Gi}}{\delta_{si}} \tag{1}$$

式中，$\delta_{si}$ 为 $i$ 号拉索单位张力的伸长量的竖直分量；$\delta_{Gi}$ 为该拉索处主梁在单位竖向力作用时的竖向位移。

根据龚匡敏、黄侨对部分斜拉桥结构体系及多座实桥的研究，部分斜拉桥索梁刚度比宜小于 30，可为设计参考。

# 6 构造设计

## 6.1 一般规定

**6.1.1** 预应力混凝土部分斜拉桥各主要组成部分的构造，应保证结构具有足够的强度和刚度，同时使内力传递顺畅，减少应力集中，便于施工和养护。

**6.1.2** 预应力混凝土部分斜拉桥构造设计时应考虑斜拉索等可更换部件的维护和更换，预设必要的操作空间及构造措施。

## 6.2 主梁

**6.2.1** 除混凝土梁外，主梁还可采用波纹钢腹板-混凝土组合梁、钢-混混合梁。主梁的截面形式宜按照如下原则选取：

1 对于双索面部分斜拉桥，当桥面宽度不大时，可采用单箱单室截面；当桥面宽度较大超过 12m 时，可采用单箱双室或单箱多室截面。

2 对于单索面沿桥梁轴线布置的部分斜拉桥，可采用单箱三室及以上截面，中央箱室用于布置拉索下锚点。

**条文说明**

波纹钢腹板-混凝土组合梁、钢-混混合梁可参照《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）、《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）、《波形钢腹板组合梁桥技术标准》（CJJ/T 227）。

**6.2.2** 主梁端部无索区段构造可参照连续梁桥主梁端部设计。

**条文说明**

由于部分斜拉桥主梁边跨端部无斜拉索布置，有较长的无索区段，主梁端部处理方式与连续梁相同。

**6.2.3** 主梁有索区段拉索下锚点处可对应设置锚固齿板和横隔构造。

**条文说明**

主梁有索区段拉索下锚点处对应设置横隔构造，目的是为了增加箱梁的整体性，确保拉索锚点向箱梁的有效传力。

**6.2.4** 主梁跨中底板考虑配置纵向预应力筋的要求，可取 28～32cm；桥墩附近底板厚度应适当加大，可取梁高的 1/5～1/7。顶板厚度可取 30~32cm。边腹板厚度可取 45~65cm，中腹板可取 40~55cm，在靠近桥墩附近的箱梁根部腹板需适当加厚。横隔板厚度可取 25~35cm。

**条文说明**

预应力混凝土部分斜拉桥采用悬臂法施工，桥墩附近负弯矩数值较大，主梁底板承受着较高的压应力，加大底板厚度可降低压应力值，防止出现底板局部压屈失稳，因此桥墩附近厚度应适当加大。单箱多室的部分斜拉桥存在边、中腹板受力不均现象，需根据空间分析分别确定边中腹板厚度。

**6.2.5** 主梁刚度宜尽可能的渐变，渐变段长度宜不少于一个梁段。

**条文说明**

主梁刚度通过顶、底、腹板厚度调整，例如，0 号块与 2 号梁段的腹板，底板的厚度宜通过 1 号梁段过渡，在腹板突变处也宜设置渐变段。

**6.2.6** 当采用塔梁墩固结体系或塔梁固结体系时，主梁 0 号块横隔板宜与桥墩或索塔合理衔接过渡。

**6.2.7** 主梁翼板悬臂长度不宜大于 5m，确需采用宽幅翼板时，应在翼板下设置横向加劲肋。

**条文说明**

主箱梁翼板悬臂长度较大时，存在活载在悬臂端部引起的双向挠曲效应。所以需要控制翼板宽度或增设横向加劲肋。

**6.2.8** 拉索下锚点、预应力齿板尺寸应满足局部抗压和张拉施工的尺寸要求，当张拉总吨位较大时，应通过空间有限元程序仿真分析进行尺寸优化。

**6.2.9** 主梁合龙段长度可取 1.5~3.0m，临时固结措施可采用劲性钢骨架， 必要时可施加预应力。

**6.2.10** 主梁内预应力布置应满足整体受力要求，并充分考虑局部受力要求和构造要求；应考虑预应力空间传递的合理性，并采取相应的措施。拉索区范围内纵向预应力布置应考虑斜拉索效应对主梁共同作用。

**条文说明**

在拉索区范围内，纵向预应力一般布置在远离斜拉索的腹板内，靠近斜拉索的腹板不布置纵向预应力，使主梁断面各腹板的纵向预应力钢束与斜拉索效应等效布置，保证主梁断面各腹板受力均匀。

**6.2.11** 主梁纵、横、竖三向预应力钢束应适当错开布置。

**条文说明**

主梁纵、横、竖三向预应力钢束错开布置，以避免钢束的锚头、管道相互干扰，或锚头管道与普通钢筋干扰，影响预应力的效果。三者的重要性排序由大到小依次为纵向、竖向、横向预应力。

**6.2.12** 顶板和底板纵向预应力钢束应尽可能布置在靠近腹板处，且宜通过平弯及竖弯锚固在顶板与腹板交界梗腋处。

**6.2.13** 纵向预应力管道的平弯和竖弯半径在有足够空间的情况下，应尽可能采用较大半径。顶板或底板的平弯半径 R 不宜小于按式（6.2.13）计算的半径。

$$R \geq \frac{N}{500(h-d)f_{tk}} \qquad (6.2.13)$$

式中：R——预应力钢束的平弯半径，单位：m；

N——一束预应力钢束的张拉控制吨位，单位 kN；

$f_{tk}$———混凝土轴心抗拉强度标准值，单位 MPa;

h——顶板/底板厚度，单位 m;

d ——预应力管道外直径，单位 m。

**6.2.14** 预应力管道间净距不得小于 6cm，在直线段两管道竖向可以叠置。

**6.2.15** 底板钢束宜按如下规定执行：

1 箱梁底板钢束顺桥向各点均应设在一条平顺的曲线上。

2 箱梁中跨、边跨合龙段的纵向预应力管道宜尽量靠近底板上缘布置，并设置防崩钢筋。

3 边跨底板预应力钢束应有 20％且至少 2 束的预应力钢束按直束布置通过支座外，其余底板束应上弯锚固于腹板与底板梗腋处齿板。

**6.2.16** 主梁纵向分段悬浇时，在分段线处主梁纵向预应力钢绞线的连接接头不宜超过其总数的 50%。

**6.2.17** 主梁钢筋构造宜按如下规定执行：

1 主梁纵向钢筋和横向钢筋的间距不宜大于 20cm，纵向钢筋和底板横向钢筋直径不宜小于 16mm，腹板箍筋直径不宜小于 12mm。

2 当顶板设有横向预应力时，顶板上层钢筋和箱内顶板下缘横向钢筋直径不宜小于 16mm，悬臂板下缘和箱中承托下缘钢筋直径不宜小于 12mm。

3 人洞边缘钢筋直径不宜小于 16mm，间距不宜大于 15cm。

**6.2.18** 主梁纵向连接构造应符合下列规定：

1 主梁纵向采用预制分段悬拼时，混凝土主梁断面应设计成企口缝形式，并宜设置定位预（埋）制件，主梁接缝应采用胶接缝，构件接触应平整、密贴并做好防水处理，跨径较大时可增加湿接缝。

2 混合梁主梁纵向不同材料梁的连接处应按现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）的规定执行。

## 6.3 墩塔

**6.3.1** 部分预应力混凝土斜拉桥墩塔的结构设计除应满足施工及运营阶段结构强度、刚度、稳定性等要求外，尚应考虑经济合理、施工方便、造型美观及便于维修养护等要求。

6.3.2 索塔结构形式应按照如下原则选取：

1 索塔的纵桥向形式可采用截面相等式、向下加宽式、向上加宽式、变形形式等，如图 6.3.2-1 所示。索塔宜设计成竖直式，也可以根据需要设计成倾斜式。

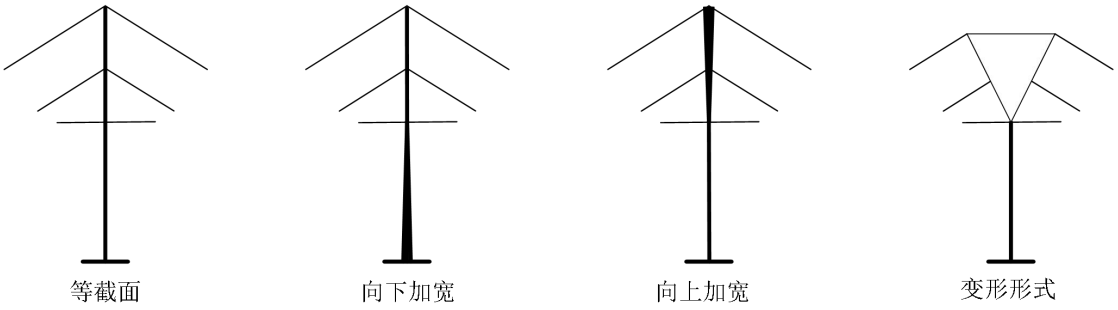



图 6.3.1-1 索塔纵桥向的基本形式

2 索塔的横桥向形式可采用单柱式、双柱式、门形、H 形、变形双柱式等，如图 6.3.2-2 所示。

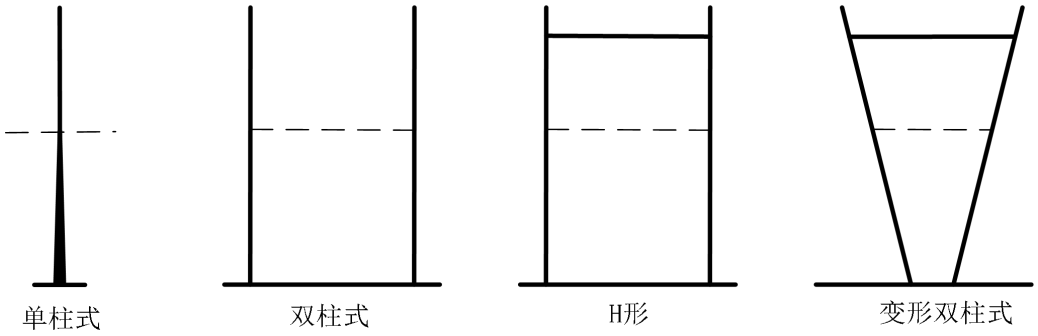



图 6.3.1-2 索塔横桥向的基本形式

3 索塔塔柱的横截面形式有矩形、圆形、椭圆形、H 形、花萼形等，一般为实心截面，当截面尺寸较大时，可做成空心截面。

4 索塔可根据景观设计采用受力合理的异形结构。

5 索塔主墩的形式应结合跨径、跨数、墩高等选择单肢墩、双肢墩或其组合形式等。

**6.3.2** 空心桥墩墩底宜设置 2.5～3m 实心段。

**条文说明**

空心墩墩底设置实心段以便承台和墩体之间刚度合理过渡。

**6.3.3** 当桥墩横桥向宽度较大时，可采用单箱双室截面。

**6.3.4** 当采用塔梁墩固结体系或塔梁固结体系时，应在梁内设置宽腹板、横隔板等必要的构造与塔或墩合理衔接。

**6.3.5** 主墩桩基宜做成嵌岩桩，当在地质条件较差而只能做摩擦桩时，对于200m 以上的跨径情况宜进行试桩。

**6.3.6** 混凝土索塔宜根据施工需要在索塔内配置型钢劲性骨架。

**6.3.7** 混凝土索塔钢筋构造应符合下列规定：

1 在墩顶一个墩壁厚度范围内宜增设封闭箍筋以提高该区域的墩身混凝土承压强度。

2 竖向受力钢筋的直径不宜小于 25mm。

3 竖向受力钢筋的截面积不宜小于混凝土截面积的 1%。

4 箍筋直径不应小于 16mm，间距不应大于 200mm。

## 6.4 斜拉索

**6.4.1** 斜拉索应结合生产、运输和安装等条件选用钢绞线斜拉索，当索塔尺寸空间适宜锚具布置时也可选用平行钢丝斜拉索。

**6.4.2** 斜拉索应有完整可靠的密封防护构造，尤其是索端与锚具的接合部。斜拉索应便于张拉、养护和更换。

**6.4.3** 斜拉索索端应考虑施工期和运营期的排水、防潮措施。

**6.4.4** 桥面以上的斜拉索应设置有效防护，其竖向防护高度应不小于 2.5m。

**条文说明**

为了防止斜拉索受到人为或车撞损坏，故规定在桥面以上一定范围内对斜拉索设置有效的防护措施。

**6.4.5** 斜拉索索端宜根据需要设置内置式减振装置或外置式阻尼器。

**6.4.6** 平行钢丝斜拉索锚具宜采用冷铸锚，锚具外表面应进行防护处理。

**6.4.7** 钢绞线斜拉索锚具应考虑整体张拉要求，可采用夹片群锚或其他成熟锚具，其结构形式及规格应符合现行《预应力筋用锚具、夹具和连接器》（GB/T 14370）的要求。

**6.4.8** 小角度拉索构造与主梁预应力筋、钢筋等位置发生冲突，可采用以下措施进行处理：

1 优化结构设计，改变拉索或预应力筋、钢筋的位置。

2 采用过渡件等特殊构造措施。

3 应充分考虑拉索和其他结构元素的位置和需求，合理设计预留齿块、槽口的位置、尺寸和强度。

**6.4.9** 对拉索面积估算，可按拉索承担相应主梁节段不超过 30%恒载以及按索梁活载比 0.5 分配的部分活载估算。

**6.4.10** 预应力混凝土部分斜拉桥拉索可采用下列气动稳定性措施：

1 增大单索面两排拉索间距、减小拉索截面面积；

2 斜拉索设内置或外置式阻尼器。

**条文说明**

日本生野大桥摩设置了摩擦型阻尼器为拉索减振。国内预应力混凝土部分斜拉桥钢绞线拉索一般均设了内置式减振装置。

## 6.6 锚固系统

**6.6.1** 斜拉索与混凝土主梁的锚固宜采用箱内或梁体两侧顶板锚固等形式。

**6.6.2** 混凝土索塔与斜拉索的锚固宜采用贯通式索鞍锚固、交叉锚固、钢锚箱锚固等形式。锚固的基本构造应符合下列规定：

1 贯通式转向索鞍锚固方式宜采用分丝管式或双套管式索鞍。

2 实体塔上的交叉锚固，宜在塔柱中埋设钢管，并设置锚垫板。

3 钢锚箱锚固，由锚垫板、承压板、锚腹板、套筒及若干加劲肋构成。钢锚箱用剪力连接键使之与混凝土塔身连接，可采用内置式或外露式。

**6.6.3** 索鞍应满足拉索通过索塔的转向、锚固和承载需求，并控制拉索在偏载作用下不发生滑移。

**6.6.4** 分丝管索鞍抗滑装置由抗滑键和抗滑隔固块、锁紧螺母等组成，宜采用双侧混合交叉布置形式固定钢绞线拉索。

**条文说明**

我国早期修建的部分斜拉桥以双套管式索鞍为主，在分丝管式结构出现后，以分丝管式索鞍为主。

双套管式转向索鞍特点：索鞍由内管和外管组成，相对简单，制作索鞍的成本较低。鞍下接触应力过大，拉索的受力不均匀，内管下层钢绞线在张拉完成后，会受到上面和侧面钢绞线的挤压；难于检查防腐质量，拉索施工困难、换索困难。

分丝管式转向索鞍特点：分丝管索鞍可分散、均匀传递载荷作用，转向鞍下部混凝土的接触应力分散，应力分布比较均匀；1 根无粘结钢绞线只通过 1 根小钢管，不存在相互挤压问题，受力情况得到明显改善；由于索鞍内设置有可分丝的小钢管，容易穿索，施工便利，换索及单根调索便利；索鞍的加工工艺稍复杂，成本相对较高。

分丝管索鞍抗滑键通过冷挤压工艺固定在钢绞线上，把带有挤压型抗滑键的单根钢绞线斜拉索从转向鞍的一边穿入另一边，抗滑键前端面支承在分丝管转向鞍的端面，抗滑键后端面抵在隔固块上，通过隔固块将力传递到锚固套筒，进而传递到索塔上，形成单边双向抗滑装置。但当所有的抗滑键布置在索塔一侧时，偏载作用下，锚固套筒、固定螺栓及索塔局部会承受较大的拉力。为此，建议抗滑键交叉布置在索塔两侧，以达到转向鞍两侧抗滑作用，这种结构为交叉抗滑键装置。

综合考虑受力、施工难易程度、后期养护、更换难易程度等因素，一般均建议采用分丝管式结构，不再推荐双套管式结构。

**6.6.6** 转向索鞍锚固区构造应符合下列规定：

1 索鞍端部锚下局部区段内应增设加强钢筋网，其构造与配筋设计应满足现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的要求。

2 索鞍锚下钢垫板尺寸应根据张拉吨位、索鞍形式等确定，厚度不宜小于20mm，且应设置锚固套筒安装螺栓孔；套管壁厚不宜小于 6mm，分丝管壁厚不宜小于 3mm。

3 索鞍和锚下钢垫板之间应采用加强板加强。

4 索塔索鞍的间距，应保证锚固套筒、隔固块及穿索、调索的空间。

5 索塔弧形转向索鞍曲率半径不宜小于 2.5m。

**条文说明**

国内外预应力混凝土部分斜拉桥索塔弧形转向索鞍曲率半径一般取2.5~5.0m。

**6.6.7** 斜拉索锚固区构造应符合下列规定：

1 在混凝土主梁上应设置锚固段实体构造；锚固区内的构件截面尺寸应满足设置穿索管道及锚下垫板的需要；锚下局部区段内应增设加强钢筋网或螺旋钢筋。其构造与配筋设计应满足现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的要求。

2 锚下钢垫板尺寸应根据张拉吨位、张拉机具大小和锚具形式等确定，厚度不宜小于 20mm，斜拉索锚管的壁厚不宜小于 10mm。

3 斜拉索锚管和锚下钢垫板之间应采用加强板加强。

4 索塔锚固区斜拉索的间距，除应满足计算高度要求之外，还应保证张拉及调索的空间，满足孔洞、管道及千斤顶行程与移动需要的高度要求。

## 6.7 附属工程

**6.7.1** 预应力混凝土部分斜拉桥应合理选择支座类型和限位装置，支座处应预留更换时放置千斤顶的空间，并应满足局部承压要求。

**6.7.3** 应根据桥梁伸缩量，按现行《公路桥梁伸缩装置通用技术条件》

（JT/T 327）要求选择伸缩装置。伸缩装置锚固部分宜采用高性能混凝土，混凝土强度等级不得低于 C40，并做好接缝处理。

**6.7.4** 预应力混凝土部分斜拉桥设计应满足以下防雷、航空、航道的要求：

1 应按现行《大型桥梁防雷设计规范》（QX/T 330）的相关规定设置防雷设施。

2 根据航空管理的要求，必要时应根据现行《航空障碍灯》（MH/T 6012）设置航空障碍标志灯。

3 有通航要求时，通航孔处应按航道部门要求和现行《内河助航标志》（GB5863）设置桥涵标、导航装置。

**6.7.5** 预应力混凝土部分斜拉桥应设置检修设施，主梁、索塔以及交界桥墩宜设置检查平台、通道、围栏、扶梯等专门供检查和养护用的设施。

## 6.7 养护条件设计

**6.7.1** 在预应力混凝土部分斜拉桥施工图设计中应考虑运营期间的养护检修需求，并应提出后期养护重点。

**6.7.2** 设计中应设定养护工况，考虑养护设施及养护人员荷载以及养护中结构重力的变化，进行养护工况的验算。

**6.7.3** 依据主梁的不同结构形式及跨越障碍的环境条件，应沿主梁设置检修通道。

**6.7.4** 索塔采用空心塔时，索塔内宜设置养护及检修等用的电梯、爬梯和工作平台等，并配备照明及防火设备。索塔为实心塔时，索塔外侧宜设置爬梯和工作平台等，并配备照明及防火设备。

**6.7.5** 索塔上应预留用于斜拉索检修、更换相应设施的预埋构件。

**6.7.6** 应设置防雷系统、导航灯标、航空障碍标志灯的检修通道和工作平台。

**6.7.7** 应设置支座、伸缩缝、阻尼器等可更换部件的检修通道及工作平台。

**6.7.8** 检修通道及工作平台应设置安全护栏。

**6.7.9** 设计中应提出斜拉索换索的原则和程序。

**6.7.10** 养护检修设施的耐久性设计应包含下列内容：

1 不可更换的养护检修设施应与桥梁主体结构同寿命，可更换的养护检修设施应确定其使用年限。

2 提出养护检修设施的耐久性技术方案和措施。

3 提出养护检修设施的检修及维护要求。

# 7 结构分析计算

## 7.1 一般规定

**7.1.1** 预应力混凝土部分斜拉桥应进行结构的静力分析、稳定分析和动力分析，施工阶段和成桥状态下结构的强度、刚度和稳定性应满足要求。

**条文说明**

在设计阶段，预应力混凝土部分斜拉桥结构的主要分析和计算内容如下表所列。

表 7.1.1 预应力混凝土部分斜拉桥结构分析计算内容

| 项目 | 分析内容 | 计算内容 |
|---|---|---|
| 成桥状态静力分析 | 基于设计成桥状态，分析在永久作用和可变作用下主要构件的最不利内力、应力和变形 | 检验基础、索塔、桥墩、主梁、斜拉索和支承连接装置的承载力 |
| | | 检验主梁的挠度、支承连接装置的位移 |
| | 在永久作用和可变作用下，典型应力扰动区的受力情况 | 检验索塔与横梁连接区、索塔与主梁连接区、索塔的锚固部位、主梁的锚固部位等应力扰动区的承载力 |
| 施工阶段静力分析 | 在永久作用和施工荷载作用下，主要构件的最不利内力和应力 | 检验基础、索塔、桥墩、主梁、斜拉索和支撑连接装置的承载力 |
| | 在永久作用和施工荷载作用下，典型应力扰动区的受力情况 | 检验索塔与横梁连接区、索塔与主梁连接区、索塔的锚固部位、主梁的锚固部位等应力扰动区的承载力 |
| 稳定分析 | 在永久作用和可变作用下，结构的整体稳定 | 检验结构的稳定性系数 |
| | 在永久作用和施工荷载作用下，结构的整体稳定 | 检验结构的稳定性系数 |
| 动力分析 | 在地震作用下结构的内力和变形 | 检验基础、索塔、桥墩和支撑连接装置的承载力、延性性能和变形性能 |
| | 在船舶撞击作用下结构的内力、变形 | 检验基础、索塔和桥墩的承载力 |

**7.1.2** 预应力混凝土部分斜拉桥的结构计算模型、几何特性、边界条件应反映实际结构状况和受力特征，并应符合下列规定：

1 预应力混凝土部分斜拉桥结构的总体静力分析、局部静力分析、稳定分析和动力分析宜采用空间结构计算模型。

2 进行局部受力仿真分析时，计算区域应满足圣维南原理。

**条文说明**

按照圣维南原理，边界条件施加位置需要尽量远离计算分析所关心的部位，以避免边界对计算结果产生较大的影响。

**7.1.3** 设计计算中宜考虑施工规范容许范围内的自重施工误差对结构的影响，包括结构自重误差±5%、铺装层超厚 2cm，同时考虑施工误差对混凝土收缩徐变挠度的影响。

## 7.2 成桥状态静力分析

**7.2.1** 预应力混凝土部分斜拉桥结构的总体静力分析应符合下列规定：

1 预应力混凝土部分斜拉桥结构分析宜考虑斜拉索垂度效应、P-Δ效应、大位移效应，计入几何非线性的影响。计算作用效应时斜拉索垂度效宜在桥梁结构空间模型中采用柔索单元直接模拟的方法，或采用公式（7.2.1）斜拉索换算弹性模量的方法计入。

$$E=\frac{E_0}{1+\frac{(\gamma S\cos\alpha)^2}{12\sigma^3}E_0} \tag{7.2.1}$$

式中：$E$ —— 考虑垂度影响的斜拉索换算弹性模量（MPa）；

$E_0$—— 斜拉索钢材弹性模量（MPa）；

$\gamma$ —— 斜拉索单位体积的重力（kN/m$^3$），取每米斜拉索及防护结构重力除以斜拉索面积（m$^2$）；

$S$ —— 斜拉索长度（m）；

$\alpha$ —— 斜拉索与水平线的夹角（°）；

$\sigma$ —— 确定工况斜拉索应力（kPa）。

2 预应力混凝土部分斜拉桥结构分析，宜考虑基础变位对结构的影响。当有限元模型将基础与其他结构按施工形成过程一并考虑时，应计入桥墩、索塔施工偏心对基础的影响和桥梁横向荷载对基础的影响。当基础单独分析时，除应计入桥墩、索塔施工偏心和桥梁横向荷载的影响外，还应计入上部结构作用效应对基础产生的二次效应。

3 箱形主梁应考虑扭转翘曲影响。主梁为钢腹板-混凝土组合结构时，应考虑主梁的两种材料不一致而引起的结构内力重分布。

4 对主梁较宽或位于平曲线上的中央索面预应力混凝土部分斜拉桥，应对结构进行弯扭效应影响分析。

5 预应力混凝土部分斜拉桥的梁和索塔，应按施工过程，根据现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定计算混凝土收缩、徐变效应。

**条文说明**

本条参考《公路斜拉桥设计规范》(JTG 3365-01—2020)。

**7.2.2** 预应力混凝土部分斜拉桥结构的局部受力分析应符合下列规定：

1 塔梁连接区、拉索锚固部位等受力复杂部位应进行局部分析。

2 局部分析和应力计算宜采用空间有限元方法，其计算模型边界条件应能真实反映实际结构的受力状况。

3 索塔锚固部位配置预应力钢筋时，可按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定，采用拉杆-压杆模型进行锚固部位结构验算。

**条文说明**

本条参考《公路斜拉桥设计规范》(JTG 3365-01—2020)。

**7.2.3** 确定设计成桥状态时，预应力混凝土部分梁斜拉桥应计入预应力效应和汽车荷载效应。

**条文说明**

预应力混凝土部分斜拉桥的设计成桥状态是指成桥时主梁和塔的线形符合设计状态，而且各计算截面弯矩较小，斜拉索受力相对均匀，各斜拉索应力水平大致相同。混凝土材料自重较大、受拉能力差，混凝土主梁的应力往往成为设计控制因素之一，因此，在确定预应力混凝土部分斜拉桥的设计成桥状态时，需要计入主梁的预应力效应和汽车荷载效应。

**7.2.4** 预应力混凝土部分斜拉桥主要构件的强度计算应符合下列规定：

1 基础计算应符合现行《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTG 3363）的规定。

2 索塔和主梁的强度计算应符合下列规定：

1）混凝土索塔和混凝土主梁的强度计算，应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）的规定。

2）钢混混合主梁和钢腹板-混凝土组合结构主梁的强度计算，应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）、《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》（JTG/T D64-01）、《波形钢腹板组合梁桥技术标准》（CJJ/T 227）等相关规范的规定。

3 斜拉索的强度计算应符合下列规定：

1）斜拉索的承载力应满足下式要求：

$$\frac{\gamma_0 N_d}{A} \leq \emptyset_d f_d \qquad (7.2.4)$$

式中：$\gamma_0$ ——结构重要性系数；

$N_d$——斜拉索的轴向拉力设计值（N）；

$A$ ——斜拉索的截面面积（$mm^2$）

$\emptyset_d$——斜拉桥的结构体系修正系数，对于预应力混凝土部分斜拉桥，$\emptyset_d$=1.5；

$f_d$——斜拉索的抗拉强度设计值（MPa），在短暂状况，斜拉索的抗拉强度设计值宜提高 25%。

2）斜拉索的疲劳计算，应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）的规定。

**条文说明**

本条参考《公路斜拉桥设计规范》(JTG 3365-01—2020)。

**7.2.5** 主梁的刚度计算应符合下列规定：

1 预应力混凝土梁　　$f_{ll} \leq L/500$　　（7.2.5-1）

2 组合梁和混合梁　　$f_{ll} \leq L/400$　　（7.2.5-2）

式中：$f_{ll}$——汽车荷载（不计冲击力）引起的竖向挠度，当汽车荷载作用于一个跨径内引起该跨径正负挠度时，$f_{ll}$ 取正负挠度绝对值之和。

**7.2.6** 设计预拱度不宜小于主梁的混凝土收缩、徐变产生的竖向挠度及 1/2

汽车荷载产生的竖向挠度之和，并拟合成平顺曲线。

**7.2.7** 在正常单根拉索更换工况下，索塔、主梁和斜拉索应满足成桥状态的强度、刚度和稳定性要求。

## 7.3 施工阶段静力分析

**7.3.1** 施工阶段划分及计算应符合下列规定：

1 各施工阶段的计算简图应与施工流程的划分一致。

2 预应力混凝土部分斜拉桥的体系转换计算应考虑下列阶段：

1）悬臂施工挂篮和合龙施工挂篮的安装和拆卸；

2）采用满堂支架施工工艺初次张拉斜拉索；

3）边跨合龙、中跨合龙。

3 部分斜拉桥的施工阶段不平衡荷载应考虑下列因素：

1）主梁悬臂两端设计不对称产生的不平衡荷载；

2）因施工工序产生的不平衡荷载；

3）因施工误差产生的不平衡荷载；

4）悬臂施工时悬臂两端的不平衡风荷载。

4 施工阶段应计算：斜拉索索力、结构内力、截面应力、支座反力、索塔及主梁变位等。

5 施工阶段构件验算应遵照现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）、《公路钢结构桥梁设计规范》（JTG D64）等规范的有关规定执行。

**条文说明**

施工阶段划分及计算要求参考了《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）的规定。

**7.3.2** 预应力混凝土部分斜拉桥的墩梁临时锚固时，应满足最大双悬臂状态和最大单悬臂状态的受力 要求，宜考虑下列工况：

1 最大竖向不平衡受力工况：主梁不平衡荷载+不对称风荷载。

2 最大纵向不平衡受力工况：索塔两侧不对称的斜拉索张拉力+纵向风荷载。

3 最大横向受力工况：索塔两侧对称横向风荷载作用。

4 最大横向不平衡受力工况：索塔两侧不对称横向风荷载作用。

## 7.4 静力稳定分析

**7.4.1** 预应力混凝土部分斜拉桥的静力稳定分析主要是整体稳定，稳定分析应涵盖主要体系转换过程和主要作用组合。

**7.4.2** 预应力混凝土部分斜拉桥的整体稳定分析应符合下列规定：

1 预应力混凝土部分斜拉桥整体稳定分析，应计入斜拉索垂度的影响。

2 预应力混凝土部分斜拉桥结构体系第一类稳定，即弹性屈曲的结构稳定安全系数应不小于 4；第二类稳定，即计入材料非线性影响的弹塑性强度稳定的安全系数，应不小于 2.5。

## 7.5 动力分析

**7.5.1** 预应力混凝土部分斜拉桥的结构动力特性计算，应分析斜拉桥的自振特性——振型和频率。结构计算模式应正确反映桥梁质量、刚度的实际分布，并计入非线性影响。

**7.5.2** 预应力混凝土部分斜拉桥的抗震设计应参照《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）、《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）规定执行。

**条文说明**

《公路斜拉桥设计规范》第 4.2.6 条规定，斜拉桥 E1 地震作用宜采用 100 年超越概率 10%的地震动，E2 地震作用宜采用 100 年超越概率 4%的地震动，也未明确是否适用于部分斜拉桥。由于预应力混凝土部分斜拉桥一般以梁式桥的受力为主，结构自重大，地震效应大，若采用超越概率过高的地震，容易造成工程建设费用增加过多，因此 E1、E2 地震作用按《公路桥梁抗震设计规范》（JTG/T 2231-01）的规定采用。

**7.5.3** 预应力混凝土部分斜拉桥的抗风计算应符合《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）、《公路桥梁抗风设计规范》（JTG/T 3360-01）规定。

**条文说明**

相关研究表明，预应力混凝土部分斜拉桥不易出现涡激共振现象，基本无空气动力稳定问题；拉索不易产生涡激共振、风雨振，故拉索无需进行专门的减振处理；调研未见预应力混凝土部分斜拉桥拉索风雨振的相关研究。

**7.5.4** 部分斜拉桥防船撞设计宜按现行《公路桥梁抗撞设计规范》（JTG/T 3360-02）的要求执行。

# 8 施工

## 8.1 一般规定

**8.1.1** 公路预应力混凝土部分梁斜拉桥应符合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650）的规定。

**8.1.2** 预应力混凝土部分斜拉桥施工前应全面了解设计要求，根据结构特点和受力特性，制订专项施工方案。施工时应做好施工过程控制，成桥线形、内力应符合设计要求。

## 8.2 墩塔

**8.2.1** 墩塔的施工方法宜根据结构特点、施工环境和设备能力等综合确定。索塔施工期间，宜设置必要的起重设备、工作电梯和安全通道。

**8.2.2** 混凝土索塔的施工应符合下列规定：

1 塔柱节段施工长度的划分，宜根据索塔结构形式、钢筋定尺长度和施工条件等因素确定；塔柱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。

2 塔座及塔柱实心段施工时，除应控制好模板的平面位置和倾斜度外，尚应对混凝土采取降低水化热和温度控制的措施；同时宜采取适当措施缩短塔座与承台、塔柱与塔座之间浇筑混凝土的间隔时间，间歇期宜不大于 15d。

3 索塔与主梁不宜同时交叉施工，必须交叉施工时应采取保证质量和施工安全的措施。

4 索塔塔柱施工时宜设置采用型钢制作劲性骨架，所设置的劲性骨架应能起到保证钢筋架立、模板安装和拉索预埋导管或弧形转向索鞍空间定位精度的作用。

5 在起吊条件具备时，塔柱节段的钢筋可整体制作成骨架、整体安装；但在起吊安装时，应对钢筋骨架采取适当的临时加固措施，增加其刚度，防止变

形。

6 混凝土应根据索塔的高度及混凝土供应能力选择适宜的输送方式，采用输送泵时宜一泵到顶；浇筑混凝土时，分层布料应均匀，应控制混凝土的自由倾落高度不超过 2m，保证混凝土不产生离析，并应采取有效措施避免上部塔体施工时对下部已完成塔体的表面造成污染。混凝土浇筑完成后，应及时养护，养护的方法和措施应根据结构特点、气温、环境条件等因素综合确定，每一节段现浇混凝土的养护时间应不少于 7d。

7 对拉索预埋导管或弧形索鞍的安装，应在施工前认真复核施工图中拉索的垂度修正值；定位安装时宜利用劲性骨架控制导管或转向索鞍进出口处的中心坐标，并应采取其他辅助措施进行调整和固定。

**条文说明：**

采用劲性骨架施工定位，便于索鞍的调整就位以及模板的调整。

**8.2.3** 预应力混凝土部分斜拉桥钢锚箱的制造加工要求及施工应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）中钢结构工程的有关规定。

**8.2.4** 安装拉索的索鞍前，应检查分丝管数量是否正确、有无孔洞等；对钢制分丝管应检查管内及管口是否有毛刺及焊瘤，并进行处理。安装应保证索鞍位置符合设计规定的精度要求。

**8.2.5** 在浇筑索鞍区混凝土时，应按索鞍分排的情况依次浇筑；振捣混凝土时不得碰撞索鞍区的预埋钢管或索鞍，并应采取措施保证索鞍区下方混凝土的密实性。

## 8.3 索鞍

**8.3.1** 抗滑锚块灌环氧砂浆时，应封闭索鞍管口，采用专用环氧砂浆灌浆机进行灌浆。

**8.3.2** 采用双套管索鞍时，应确保内管压浆密实性。

**8.3.3** 采用分丝管索鞍时，应确保抗滑键、隔固块和螺母的紧密安装和拧紧。

## 8.4 主梁

**8.4.1** 主梁应严格按照预定的程序、方法和措施进行施工。

**条文说明：**

主梁严格按照预定的程序、方法和措施进行施工，是保证斜拉桥成桥后的线形、内力和变形符合设计期望要求的重要前提。

**8.4.2** 混凝土主梁施工时的控制宜以调整挂篮立模高程为主。

**条文说明：**

由于部分斜拉桥的索塔一般不高，塔的刚度较大，拉索与主梁的夹角较小，依靠拉索的索力来调整主梁高程效果不明显，故规定如条文。

**8.4.3** 悬臂浇筑施工应符合下列规定：

1 悬臂浇筑施工应对称、平衡地进行，两端悬臂上荷载的实际不平衡偏差不得超过设计规定值；设计未规定时，宜不超过梁段重的 1/4；悬臂梁段应全断面一次浇筑完成，并应从悬臂端开始，向已完成梁段推进分层浇筑。

2 主梁悬浇挂篮重量宜小于主梁现浇节段最大重量的 0.5。

3 悬臂浇筑的施工过程控制宜遵循变形和内力双控的原则，且宜以变形控制为主。

4 悬臂浇筑施工时，立模高程的误差应不大于±5mm，立模轴线的偏位应不大于 5mm。

5 挂篮前移时，宜在其后方设置控制其滑动的装置或在滑道上设置止动装置；前移就位后，应立即将后锚固点锁定。

6 每一节段悬臂浇筑施工完成后，除应进行质量检验外，尚应对预应力孔道进行检查，防止有杂物堵塞孔道的情况发生。

7 悬臂浇筑施工时，应严格控制桥面上的各种临时施工荷载。

8 当悬臂浇筑施工跨越铁路、公路、航道及其他建筑物时，应采取有效的安全施工防护措施。

**8.4.4** 悬臂浇筑时预应力的施工除应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）中预应力混凝土工程的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 预应力管道的安装定位应准确，备用管道和长束的管道应采取措施保证其在使用时的有效性。

2 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，但张拉应力不得超过设计规定的最大控制应力。竖向预应力宜采用多次张拉的方式进行，多次张拉的次数应以钢束的伸长值是否达到要求且是否可靠锚固而定。

3 对钢束施加预应力时，不得随意将锚具附近的普通钢筋切断；当该处的钢筋影响到张拉操作不能进行正常作业时，应会同设计人员协商处理。

4 对竖向预应力孔道，压浆时应从下端的压浆孔压入，压力宜为 0.3~0.4MPa，且压入的速度不宜过快。

**条文说明：**

1 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。竖向预应力因钢束相对较短，张拉后预应力筋的回缩足以抵消其拉出的量，从而造成回缩的损失，采用多次张拉的方式能解决此问题。

3 规定本款是为了限制随意切断普通钢筋的错误做法。

**8.4.5** 悬臂浇筑预应力混凝土梁的合龙和体系转换应符合下列规定：

1 合龙的程序和顺序应符合设计规定。

2 合龙施工前应对两端悬臂梁段的轴线、高程和梁长受温度影响的偏移值进行观测，并应根据实际观测值进行合龙的施工计算，确定准确的合龙温度、合龙时间及合龙程序。.

3 对主梁两端的悬臂梁段采用施加水平推力的方式调整梁体的内力时，千斤顶的施力应对称、均衡。

4 合龙时，宜采取措施将合龙口两侧的悬臂端予以临时刚性连接后，再浇筑合龙段混凝土。宜在合龙口两侧的梁体顶面设置等重压载水箱，并在浇筑合龙段混凝土时同步卸载。

5 合龙段的混凝土宜在一天中气温最低且稳定的时段内浇筑，浇筑后应及时覆盖洒水养护，养护时间宜不少于 14d。

6 合龙时在桥面上设置的全部临时施工荷载应符合施工控制的要求：对对塔梁固结体系的预应力混凝土部分斜拉桥，合龙后应在规定的时间内尽快拆除墩梁临时固结装置，按设计规定的程序完成体系转换和支座反力调整。

**8.4.6** 混凝土主梁采用悬臂浇筑法施工时，除应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）中悬臂浇筑的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 主梁 0 号梁段及相邻梁段浇筑施工时，应设置可靠的支架系统。支架系统应进行专门设计，其强度、刚度和稳定性应满足使用要求，同时应考虑变形、地基的不均匀沉降和日照温差等因素对支架系统的不利影响：施加在支架上的临时施工荷载应包括悬浇挂篮的重力。辅助跨梁段的现浇支架亦应符合上述规定。

2 用于悬浇施工的挂篮应进行专门设计，挂篮应满足使用期的强度和稳定性要求，同时应考虑主梁在浇筑混凝土时抗风振的刚度要求。挂篮的全部构件制作完成后应进行检验和试拼，合格后再运至现场整体组装，并应按设计荷载及技术要求进行预压。挂篮在预压时应测定其弹性挠度的变化、高程调整的性能及其他技术性能。

**条文说明：**

2 混凝土主梁悬浇施工的挂篮除需满足与梁式桥悬浇挂篮相关的一般要求外，还要满足预应力混凝土部分斜拉桥施工的特殊要求，如挂索、张拉等工序要求，故需要进行专门设计。

**8.4.7** 预应力混凝土部分斜拉桥的主梁采用支架现浇、转体等方法施工时，应按《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）相关规定执行。

**8.4.8** 主梁的合龙施工应符合下列规定：

1 主梁的合龙应按设计和施工控制的要求进行，施工前应确定施工程序并进行合龙施工计算，制定详细的施工工艺及各项保障措施的方案。

2 对合龙前最后若干个悬臂施工梁段的高程、线形、轴线偏差及索力应进

行严格控制，使合龙口两侧主梁的自然相对偏差满足合龙的误差要求。

3 主梁合龙施工期间，应对桥面上的临时施工荷载进行严格控制，不得随意施加除合龙施工需要的其他附加荷载。

4 边跨合龙应根据主梁的结构特点按本条的相关要求进行施工。

5 主梁中跨合龙后，应按设计要求的程序在规定时间内拆除塔梁临时固结装置，保证结构体系的安全转换。

6 多塔预应力混凝土部分斜拉桥主梁的合龙顺序应符合设计的规定。

**条文说明：**

主梁合龙后如果塔梁临时固结装置未及时解除，将有可能因气温的变化而导致在结构中产生较大的温度应力，给结构的体系转换带来极不利的影响，因此需要按照预定的合龙程序在规定时间内及时解除。

## 8.5 斜拉索

**8.5.1** 拉索及其附件应符合设计规定，进场后应进行质量验收。成品拉索在出厂前应做放索试验，同时应做 1.2 ~ 1.4 倍设计索力的超张拉检验，检验后冷铸锚板的内缩值宜不大于 5mm；成品拉索和钢绞线应缠绕成盘进行运输，在起吊、运输和存放时应采取措施防止其产生破损、变形或腐蚀。

**8.5.2** 拉索在安装施工前，应按设计要求及拉索结构的不同制订相应的专项施工方案和施工工艺。安装前尚应全面检在预埋拉索导管的位置是否准确，发现问题应及时采取措施予以处理，同时应将导管内可能有的杂物清理干净。

**条文说明：**

目前主要有平行钢丝和钢绞线两种拉索体系，因两种拉索体系的安装施工方法是不尽相同的，故在施工前需要按设计要求制订相应的施工方案和工艺措施。拉索预埋导管的位置发生较大偏差时，会导致拉索索体与导管之间产生摩擦，这将直接影响到拉索的受力状况和耐久性，因此在拉索安装施工前，需要对预埋导管的位置进行一次全面检查复测，如有问题需及时处理。

**8.5.3** 拉索的安装施工应按设计和施工控制的要求进行，在安装和张拉拉索

时应采用专门设计制作的施工平台及其他辅助设施进行操作。张拉拉索用的千斤顶、油泵等机具及测力设备应按《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）中预应力混凝土要求进行配套校验；为施工配备的张拉机具，其能力应大于最大拉索所需要的张拉力。

**条文说明：**

拉索的安装和张拉属于高处作业，因此需要采用专门设计制作的施工平台及其他辅助设施进行操作，保证施工安全，特别是保证施工操作人员的安全。要求张拉机具的能力要大于最大拉索所需要的张拉力，主要是考虑到施工时有可能需要超张拉，且在任何情况下均能满足施工的要求。

**8.5.4** 拉索张拉的顺序、级次数和量值应符合设计和施工控制的规定，并应符合下列规定。

1 跨索鞍拉索应在索塔两侧主梁锚固端进行张拉；

2 张拉宜以测定的索力或油压表量值为准，以延伸值作为校核。

3 对于分丝管索鞍，张拉施工过程中应通过索塔两侧张拉力差控制抗滑键始终抵紧在锚垫板端面，并进一步拧紧锚固筒的内螺母，最后再张拉至设计索力；

4 张拉时应按索塔的顺桥向两侧及横桥向两侧对称同步进行；

5 索塔两侧不对称或设计拉力不同的拉索，应按设计规定的索力分级同步张拉，各千斤顶同步之差不得大于油表读数的最小分格。

**条文说明：**

部分斜拉桥在塔上索鞍处锚固，因此需要在两侧主梁锚固端进行同步张拉。对称同步是拉索张拉时的基本原则，一般均需要遵守，设计上有特殊规定的则要符合其规定。以索力为主延伸值作为校核是拉索张拉的一般原则，但有的设计也可能会采取以延伸值为主而以索力作为校核的做法，在设计无特殊规定时，按本条的要求进行控制：对大跨度的斜拉桥，由于其具有明显的非线性效应，一般会采用无应力索长和索力双控的方法进行控制。

**8.5.5** 平行钢丝拉索的安装和张拉施工应符合下列规定：

1 施工前应根据索长、索重、斜度和风力等因素，计算拉索在安装时锚头

距索管口不同距离以及满足锚环支承时的牵引力；张拉杆、连接套和软牵引等施工辅助设施应经专门设计，并应在正式使用前进行 1.2 倍设计牵引力的对拉试验。

2 吊装时不宜使用起重钩或容易对索体产生集中应力的吊具直接挂扣拉索，宜采用带胶垫的管形夹具和尼龙吊带并设置多吊点进行起吊。放索时索体应在柔软的滚轮或皮带输送机上拖拉，并应控制索盘的转速，防止转速过快导致索盘倾覆。

3 安装施工时不得挤压、弯折索体，不得损伤索体的保护层、挤压型抗滑键和索端的锚头及螺纹：应在索管管口处设置对中控制的装置或限位器进行调控，防止锚头和索体在穿入索管时偏位而产生摩擦受损。当拉索的索体防护层和锚头已发生不影响使用的损伤时，应及时进行修复并记录在案，施工结束后对损伤部位尚应进行跟踪维护。

4 拉索的内置式减振圈和外置式抑振器未安装前，应采取有效措施，保证塔、梁两端的索管和锚头不受到水或其他介质的污染和腐蚀。

5 张拉平行钢丝拉索时，其施工的方法和设备应根据索型、锚具、布索方式、塔和梁的构造特点确定。

**8.5.6** 钢绞线拉索的安装施工应符合下列规定：

1 安装施工前，应在桥面上的适当位置设置钢绞线的放线架、导向轮和切割工作平台，以及切割和镦头的相关设备；并应在塔柱外的顺桥向两侧附近安装操作平台和起吊设备。

2 拉索外套管的连接接长采用热熔焊接接头时，热熔焊接的温度应符合外套管材料的要求。对外套管进行移动时，不得将其在未加支垫保护的桥面上拖拽；起吊过程中，其下方严禁站人。与外套管有连接关系或承套关系的所有部件均应与其临时固定，临时固定时宜在塔、梁两端各留出 1m 左右的空间。

3 钢绞线的下料长度应计入牵引、张拉时的工作长度；下料时对钢绞线的切割应采用砂轮锯，不得采用电弧焊或氧乙炔进行切断。

4 牵引安装钢绞线时，其牵引装置必须安全可靠，牵引过程中钢绞线不得产生弯折，转向时应通过导向轮实现。每根钢绞线安装就位后，均应及时采用夹片锁定。

**8.5.7** 钢绞线拉索的张拉施工应符合下列规定：

1 钢绞线拉索宜采用单根安装、单根张拉、最后再整体张拉的施工方法。单根钢绞线的张拉应按分级、等值的原则进行，整体张拉时应以控制所有钢绞线的延伸量相同为原则。拉索整体张拉完成后，宜对各个锚固单元进行项压，并安装防松装置。

2 采用挤压型抗滑锚固装置单侧布置时，应先单根张拉无挤压型抗滑键侧至一定的初始张拉力，使得抗滑键均匀顶紧在转向索鞍端面；而后再整体张拉无抗滑键侧至一定张拉力，而后再在拉索两侧同时进行整体张拉；始终保持有抗滑键侧和无抗滑健侧存在一定的索力差；当整体张拉无抗滑键侧至成桥索力后，再张拉有抗滑键侧至成桥索力值。

3 在一根斜拉索中，单根张拉后各钢绞线索力的离散误差宜不超过±2%；整体张拉完成后，各钢绞线索力的离散误差宜不超过±1%。

4 拉索的张拉工作全部完成后，应及时对塔、梁两端的锚固区进行最后的组装以及抗震防护与防腐处理。

**8.5.8** 拉索索力实测值与设计值的偏差宜为±5%，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。

**8.5.9** 拉索安装施工期间，应及时将索塔内张拉工作面处的油污和各种杂物清理干净，并应有可靠的防火措施：

**8.5.10** 张拉拉索时，对平行钢丝拉索每张拉完一根拉索，或对钢绞线拉索每张拉完一根钢绞线，均应对索鞍两侧的管口进行封堵。

**8.5.11** 钢绞线斜拉索宜采用等张拉力法进行张拉；单根张拉时，宜采用防扭转装置。斜拉索塔端采用单边挤压型抗滑键交叉锚固时，宜先初张拉抗滑键端的钢绞线，使抗滑键与索鞍顶紧后，再两端对称张拉。

**8.5.12** 抗滑锚块压注环氧砂浆时，应封闭索鞍管口，采用专用的环氧砂浆压浆机进行压注；采用内外管索鞍时，应采取有效措施保证内管压浆的密实性。

**8.5.13** 预应力混凝土部分斜拉桥的施工允许偏差除应符合一般斜拉桥相应

的规定外，对索鞍的预埋钢管或转向索鞍尚应符合下列规定：管口高程的允许偏差为±10mm；管口坐标的允许偏差为±10mm，且两边同向。

## 8.6 附属工程

**8.6.1** 混凝土防撞护栏、金属防撞护栏的施工应符合现行《公路交通安全设施施工技术规范》(JIG F71)的有关规定。

**8.6.2** 支座、伸缩装置等桥梁专用产品应由具有资质的专业厂家制造，且在进场时应按相应产品标准的要求进行抽样复验检测。桥面防水材料的进场抽样复验检测，应按相应产品标准的要求进行。

**条文说明：**

本规范条文中提及的产品标准，均系指该产品相应的国家标准或行业标准。

**8.6.3** 桥面铺装施工时，运料车辆的等候排队应按施工组织设计的规定保持足够的距离，应避免车辆过于集中导致超载或偏载，损伤桥梁结构。

**8.6.4** 支座的规格、性能应符合设计要求，并应符合相应产品标准的规定。板式橡胶支座应符合现行《公路桥梁板式橡胶支座》(JTT4) 的规定，盆式支座应符合现行《公路桥梁盆式支座》(JIT391) 的规定，球型支座应符合现行《桥梁球型支座》(GBT 17955)的规定。

**8.6.5** 支座进场检查、存放、安装应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）有关规定。

**8.6.6** 当桥梁体系转换需要切割临时锚固装置，或施工过程中需要在支座附近进行焊接作业时，应在支座周围采取有效的隔热措施，避免损伤支座部件。

**条文说明：**

在支座附近进行焊接和热切割等作业时，均有可能会对支座的部件产生不利影响，故需要在支座周围采取有效的隔热措施。

**8.6.7** 拉力支座、防腐支座、竖向和横向限位支座、减隔震支座等具有特殊

功能和规格的支座，除应符合本节的规定外，尚宜按相应产品推荐的方法进行安装施工。

**8.6.8** 伸缩装置的规格、性能应符合设计要求，并应符合现行《公路桥梁伸缩装置通用技术条件》(JI/T327)的规定。

**8.6.9** 伸缩装置进场检查、存放、安装应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）有关规定。

**8.6.10** 桥面防水层的层数和采用的材料应符合设计要求，材料的性能和质量应符合产品相应标准的规定。

**8.6.11** 桥面防水层铺设应符合现行《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）有关规定。

**8.6.12** 泄水孔的顶面不宜高于水泥混凝土调平层的顶面，且在泄水孔的边缘宜设渗水盲沟，使桥面上的积水能顺利排出。泄水管的安装施工应符合设计规定，并应合理设置泄水口的位置，使排水不会冲刷墩台的基础。

# 9 施工监控

## 9.1 一般规定

**9.1.1** 预应力混凝土部分斜拉桥施工中应进行施工监控。施工控制应以设计的施工流程为基础，根据实际施工方案，进行施工过程模拟分析，形成各施工阶段的控制目标，使大桥施工完成后线形、内力符合设计要求。

**条文说明**

施工监控包括监测和控制两方面工作内容，施工控制通过加力、调整安装位置等控制手段消除现场误差，使线形和内力符合设计要求，施工监测跟踪观测施工过程中的结构状态、环境参数，为施工控制提供依据。

**9.1.2** 施工监控应实测施工时的结构几何尺寸、重度、弹性模量等结构参数，并估算收缩徐变；严格监测预加应力、斜拉索张拉力、结构变形等结构的受力状态；按照实测值进行跟踪计算分析，判别本阶段施工是否达到控制精度要求，确定后续施工所需控制措施，使成桥时尽可能接近设计成桥状态。

## 9.2 监测控制

**9.2.1** 施工前，应确定部分斜拉桥的施工技术方案、施工工艺、施工程序和施工步骤，作为编制施工控制方案的依据；应对施工过程进行计算模拟，得到索力及线形等指标的计算值，并与设计计算值核对。

**9.2.2** 施工过程中，应严格执行施工控制的指令，对各项参数进行监测和控制。应根据计算结果对应力和线形两个指标实行双控，宜以控制主梁、索塔截面应力和索力满足设计要求为目标，对主梁线形和索塔变位进行控制。

**9.2.3** 预应力混凝土部分斜拉桥的索塔施工时，应对其平面位置、倾斜度、应力和线形等进行监测和控制；上部结构施工时，应对节段安装前后主梁高程、纵向位移、索塔变位、索力大小、结构控制截面的应力、基础沉降等参数进行

监测和控制。

**条文说明**

应考虑索塔的预偏、预抬高、沉降对全桥线形的影响。

**9.2.4** 施工中应监测日照温差对主梁和主塔线形的影响，掌握温度影响规律，有效修正温度的影响。

**9.2.5** 施工控制应贯穿斜拉桥施工的全过程，除施工应按确定的控制程序进行外，对各类施工荷载应加强管理，并应对施工过程中的变形、应力和温度等参数进行监控测试，且采集的数据应准确、可靠。监控测试时应满足下列要求：

1 选择无风或微风的天气进行测试，减小风对量测的不利影响。

2 测试时应停止桥上的机械施工作业，消除机械设备的振动及不平衡荷载等对测试产生的不利影响。

3 各种测试均应在尽可能短的时间内完成，应避免测试条件产生较大的变化。测量宜在夜间气温相对稳定的时段进行。

**条文说明：**

监控测试是施工控制的重要组成部分。通过测试所获得的部分斜拉桥在施工各阶段结构内力和变形的第一手资料，是施工控制、调整的主要依据，同时也是监测施工、改进设计、保证结构在施工过程中安全的重要手段。环境条件对测试数据的准确性和可靠性有直接影响，温度变化特别是日照温差的变化对于斜拉桥结构内力和变形的影响尤其显著，因此在对施工过程进行监控测试时，需要满足环境条件的要求，最大限度地保证施工测试实测值的真实性。

**9.2.6** 悬臂浇筑施工监控应符合下列规定：

1 施工监控应考虑环境温度、桥上施工设备及临时荷载的影响；监控测量应考虑日照温差、季节性温差、大风等因素的影响：施工荷载应不超出规定的限值。

2 每节段施工应在混凝土浇筑后、预应力张拉后、挂篮前移就位后等阶段，测量梁段的高程，并据此预测、确定下一梁段的立模高程。应力监测应按预定的频次实施，不得随意改变。

3 当需要改变施工顺序、进度和作业条件时，应复核施工监控的可行性，并制定措施保证桥梁线形和应力符合设计要求。如果施工顺序、进度或作业条件发生了重大偏差，应重新进行施工监控结构分析，确定目标高程和应力控制标准。

## 9.3 控制精度

**9.3.1** 预应力混凝土部分斜拉桥在成桥时的线形控制标准应符合设计规定，设计无规定时实测线形与控制目标线形的偏差应满足下列精度要求：

1 桥面铺装前主梁顶面高程允许偏差±L/5000，L 为跨径，主梁相邻节段相对高程误差应不大于节段长度的±0.3%。

2 索塔轴线平面误差应控制在 H/3000 以内，H 为承台顶面至塔顶高度，且不大于 30mm。

**9.3.2** 预应力混凝土部分斜拉桥成桥后的实测索力与理论计算索力差值的控制标准宜为±5%，钢绞线斜拉索索内各钢绞线拉力差值控制标准宜为-2%~8%。

**9.3.3** 混凝土主梁恒载重力与理论计算值的误差不应大于 2%，混合梁钢主梁节段重量与理论计算值的误差不应大于 1%。

# 10 质量检验

**10.0.1** 公路预应力混凝土部分斜拉桥施工阶段及成桥的质量检查应符合现行《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（ JTG F80/l ）的规定。

**10.0.2** 索塔的索鞍或锚箱位置、拉索孔道及锚固平面与水平面的交角均应控制准确，锚垫板与孔道应垂直。

**10.0.3** 混凝土索塔实测项目应符合表 10.1.2 规定。

**表 10.1.2 部分斜拉桥混凝土索塔柱实测项目**

| 项次 | 检查项目 | 规定值或允许偏差 | 检查方法和频率 |
|---|---|---|---|
| 1 | 混凝土强度(MPa) | 在合格标准内 | 参见 JTG F80/l 附录 |
| 2 | 塔柱轴线偏位(mm) | ≤15，且相对前一节段≤8 | 全站仪、测每节段顶面边线与两轴线交 |
| 3 | 全高竖直度(mm) | ≤H/3000，且≤30 | 全站仪：横向各测 2 处 |
| 4 | 外轮廓尺寸(mm) | ±20 | 尺量：每段测 1 个断面 |
| 5 | 壁厚(mm) | ±10 | 尺量：每段顶面测 5 处 |
| 6 | 索鞍安装高程(mm) | ±5 | 全站仪：测索鞍下缘 |
| 7 | 孔道位置（mm） | ≤5，且两端同向 | 尺量：测每孔道 |
| 8 | 预埋件位置（mm) | ≤5 | 尺量：测每件 |
| 9 | 节段间错台(mm) | ≤3 | 尺量，每节段接缝每侧面最大处 |
| 10 | 平整度(mm) | ≤8 | 2m 直尺：检查竖直和水平两个方向，每节段每侧面测 2 处 |

注: 1. *H* 为塔高，计算规定值或允论偏差时以 mm 计

2.设置锚箱时不检查项次 6

**10.0.4** 贯通式转向索鞍制作实测项目应符合表 10.0.4 的规定。

**表 10.0.4 索塔索鞍制作实测项目**

| 项次 | 检查项目 | | 规定值或允许偏差 | 检查方法和频率 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 圆弧半径 | 分丝管轮廓圆弧半径(mm) | ±2 | 跳动测量仪：测 6 处 |
| 2 | 分丝管尺 | 外径( mm) | ±1%D 或±0.5，取 | 游标卡尺：测 6 处 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 寸 | | 其中的较大值 | |
| | | 壁厚( mm) | ±10%D 或±0.20，取其中的较大值 | |
| 3 | 高度 | 索鞍底缘对分丝管下缘的高度(mm) | ±2 | 平行度测量仪：每节段测 6 处 |
| 4 | 锚点坐标(mm) | | ±2 | 全站仪、钢尺：检查每锚垫板，由水平及相互垂直的锚孔中心线与锚垫板边线交点坐标推算 |
| 5 | 锚面角度(°) | | ±0.2 | 角度仪：检查每锚垫板与水平面、立面的夹角，各测 3 处 |
| 6 | 焊缝尺寸 | | 满足设计要求 | 量规：检查全部，每条焊缝检查 3 处 |
| 7 | 焊缝探伤 | | | 超声法：检查全部<br>射线法：按设计要求;设计未要求时按 10%抽查，且不少于 3 条 |
| 8 | 栓钉焊接弯曲裂纹 | | 均无裂纹 | 目测，弯曲 30°后观察焊缝和热影响区：各栓钉群测 1%，且不少于 1 个 |

**10.0.5** 索塔贯通式转向索鞍安装实测项目应符合表 10.0.5 的规定。

**表 10.0.5 索塔转向索鞍安装实测项目**

| 项次 | 检查项目 | 规定值或允许偏差 | 检查方法和频率 |
|---|---|---|---|
| 1 | 纵、横向偏位( mm) | ≤5 | 全站仪：每鞍纵、横向各测 2 点 |
| 2 | 索鞍底缘高程(mm) | ±5 | 全站仪：测 4 角 |
| 3 | 锚面角度(°) | ±0.2 | 角度仪：检查每锚垫板与水平面、立面的夹角，各测 3 处 |
| 4 | 管口高程（mm） | ±10 且两边同向 | 全站仪：测两端 |
| 5 | 管口坐标 | ±10 且两边同向 | 全站仪：测两端 |

**10.0.6** 拉索索力实测值与设计值的偏差宜为±5%，超过时宜进行调整。钢绞线斜拉索索内各钢绞线拉力差值控制标准宜为-2%~8%。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。