



T/CECS XXX-202X

中国工程建设标准化协会标准

钢与混凝土组合梁斜拉桥设计标准

Design Standard of Composite Cable-stayed Bridge

(征求意见稿)

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

钢与混凝土组合梁斜拉桥设计标准

Design Standard of Composite Cable-stayed Bridge

T/CECS XXX—202X

主编单位：上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

执行日期：202x 年 xx 月 xx 日

中国计划出版社

202x 北 京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2018 年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2018]030 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，制定本标准。

本标准共分为 12 章，主要技术内容包括：总则、术语、材料、总体设计、作用、总体计算、主梁、索塔及基础、斜拉索、附属结构、结构耐久性设计、设计对施工、监控和管养的要求等。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会城市交通专业委员会归口管理，由上海市市政工程设计研究总院（集团）有限公司负责具体技术内容的解释。本标准在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄往解释单位（地址：上海市中山北二路 901 号，邮政编码：200092），以供修订时参考。

主编单位：上海市市政工程设计研究总院（集团）有限公司

参编单位：同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司

同济大学

安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司

广州市市政工程设计研究总院有限公司

中国市政工程西北设计研究院有限公司

上海市基础工程集团有限公司

主 编：邵长宇

主要起草人：陈 亮 顾民杰 周伟翔 张洪金 姜 洋 汤 虎
吴 霄 常付平 孙海涛 曾明根 邓青儿 赵佳男
罗喜恒 肖汝诚 贾丽君 孙 斌 苏庆田 徐 晨
徐宏光 王胜斌 杨善红 熊正元 郭建民 朱安静
庞 伟 金东华 苗 林 赵建钢

主要审查人：

目 次

1	总则.....	1
2	术语.....	3
3	材料.....	7
3.1	钢材.....	7
3.2	混凝土、钢筋及预应力筋.....	7
3.3	斜拉索.....	8
4	总体设计	9
4.1	一般规定.....	9
4.2	基本结构体系与形式.....	9
4.3	其它结构体系与形式.....	22
4.4	容许变形.....	25
5	作用.....	26
5.1	一般规定.....	26
5.2	各类作用.....	26
5.3	作用组合.....	29
6	总体计算	31
6.1	一般规定.....	31
6.2	静力计算.....	32
6.3	稳定分析.....	35
6.4	动力特性计算.....	37
6.5	抗风计算.....	37
6.6	抗震计算.....	39
6.7	施工过程计算.....	39

7	主梁	44
7.1	一般规定	44
7.2	组合钢板梁	45
7.3	组合钢箱梁	47
7.4	组合钢桁梁	49
7.5	混凝土桥面板构造	53
7.6	正交异性组合桥面板构造	53
7.7	斜拉索梁端锚固构造	54
7.8	结构计算及模型试验	55
8	索塔及基础	59
8.1	一般规定	59
8.2	索塔的形式	59
8.3	构造要求	61
8.4	斜拉索塔端锚固构造	65
8.5	结构计算	69
9	斜拉索	72
9.1	一般规定	72
9.2	构造要求	72
9.3	结构计算	74
10	附属结构	75
10.1	桥面铺装	75
10.2	桥面排水	75
10.3	护栏和栏杆	76
10.4	伸缩装置	76
10.5	支座及限位装置	76
10.6	除湿系统	77

10.7 防雷、航空、航道	77
10.8 检修养护设施	77
11 结构耐久性设计	79
11.1 一般规定	79
11.2 钢结构耐久性设计	79
11.3 斜拉索耐久性设计	80
11.4 混凝土耐久性设计	80
11.5 钢混结合部耐久性设计	80
11.6 附属结构耐久性设计	81
12 设计对施工、监控和管养的要求	82
12.1 一般规定	82
12.2 施工及施工监控要求	82
12.3 管养要求	83
本规范用词说明	84
引用标准名录	85

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	3
3	Materials	7
3.1	Steel.....	7
3.2	Concrete, reinforcement bar and prestressing tendon	7
3.3	Stay cable	8
4	General design	9
4.1	General requirements	9
4.2	Basic structural systems and forms	9
4.3	Other structural systems and forms	22
4.4	Allowable deformation	25
5	Action	26
5.1	General requirements.....	26
5.2	Various action	26
5.3	Combination of effect of action	28
6	General calculation	29
6.1	General requirements.....	29
6.2	Static calculation	30
6.3	Stability analysis	35
6.4	Dynamic characteristic calculation	37
6.5	Wind-resistant calculation	37
6.6	Seismic calculation	38
6.7	Construction process calculation.....	39
7	Girder	44
7.1	General requirements.....	44
7.2	Composite steel plate girder	45

7.3	Composite steel box girder	47
7.4	Composite steel truss	49
7.5	Constructional detail of concrete deck	53
7.6	Constructional detail of orthotropic composite deck	54
7.7	Constructional detail of anchorage of stay cable at girder end	54
7.8	Structural calculation and model test	55
8	Pylon and foundation	59
8.1	General requirements.....	59
8.2	Pylon Form	59
8.3	Constructional detail requirements	61
8.4	Constructional detail of anchorage of stay cable at pylon end	64
8.5	Structural calculation.....	68
9	Stay cable.....	71
9.1	General requirements.....	71
9.2	Constructional detail requirements	71
9.3	Structural calculation.....	72
10	Accessory structure	73
10.1	Bridge deck pavement	73
10.2	Bridge deck drainage	73
10.3	Guardrail and rail.....	74
10.4	Expansion joint	74
10.5	Bearing and restrainer	74
10.6	Dehumidification system	75
10.7	Lightning protection, aviation, waterway	75
10.8	Maintenance facilities	75
11	Structural durability design	77
11.1	General requirements	77
11.2	Durability design of steel structure.....	77
11.3	Durability design of stay cable	78
11.4	Durability design of concrete structure	78

11.5	Durability design of connection part	78
11.6	Durability design of accessory structure	79
12	Design requirements for construction, monitoring and maintenance.....	80
12.1	General requirements	80
12.2	Requirements for construction and construction monitoring	80
12.3	Requirements for maintenance	81
	Explanation of wording in this specification.....	82
	List of quoted standards	83

1 总则

1.0.1 为规范和指导组合梁斜拉桥的设计，按照安全、耐久、适用、环保、经济和美观的原则，制定本标准。

条文说明

组合梁斜拉桥的设计原则与现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 采用同一提法。

1.0.2 本标准适用于跨径 1000m 以下的新建和改建公路、城市道路组合梁斜拉桥的设计。

条文说明

现代斜拉桥技术取得了巨大的进步，表现出适用跨径和竞争范围扩大化趋势。现代斜拉桥的跨径在最近的 20 年左右的时间里突飞猛进，这得益于设计理论与方法、施工技术与装备、工程材料等方面的不断进步，更离不开经济和社会的发展。从斜拉桥与其他桥型的竞争看，在大跨径桥梁领域，斜拉桥已经成为悬索桥强有力的对手，当前建造 1500m 跨的斜拉桥已经不存在重要的技术问题。在较小的跨径范围，甚至百米级的跨径上，斜拉桥和梁式桥相比也常能够展现竞争力。从斜拉桥自身不同主梁形式的竞争看，在钢箱梁斜拉桥跨径快速推进一举迈上千米大关的同时，混凝土梁斜拉桥止步于约 500m 的跨径，可以预见，由于重量大、施工周期长、工程质量控制要求高以及随跨径增加经济性下降等原因，混凝土梁斜拉桥的跨径不会再有大的发展；钢箱梁斜拉桥的跨径有望继续攀升并在更大范围与悬索桥展开竞争；组合梁斜拉桥在 1993 年杨浦大桥以 602m 跨径创造斜拉桥世界纪录，国内组合梁斜拉桥最大跨径已突破 700m，可以预期，随着组合钢箱梁在斜拉桥中应用与实践技术的成熟，组合梁斜拉桥的跨径将会得到进一步的发展，并在更大的跨径范围展现竞争力。

对组合梁斜拉桥的极限跨径研究表明：主梁面内屈曲稳定性、主力作用下主梁强度、极限风作用下主梁强度是限制组合梁斜拉桥跨径增大的主要因素。具体极限跨径与场地风速及组合梁混凝土桥面板强度等相关，常规条件下组合梁斜拉桥极限跨径在 1100m 以上。斜拉桥由主梁、斜拉索、桥塔、桥墩及基础等组成，在斜拉桥的总造价中，梁、索、塔等不同构件所占比重各不相同，总体而言主梁造价所占比例最高，对于钢箱梁斜拉桥，主梁的造价甚至超过总造价的 50%。研究表明，斜拉桥跨径在 1000m 以内时，组合梁的造价将低于钢箱梁。重量较大的组合梁必然会引起斜拉索、桥塔及其基础造价的增加，斜拉索的增加量基本与所受荷载成比例关系；桥塔及基础则不同，主梁重量的增加，只是增加了其所受的轴力，并不会对其所受弯矩造成明显的影响。特别是斜拉索、塔墩及基础的造价在总造价中的比例较低，所以组合梁斜拉桥在较大的跨

径条件下将能够展现经济优势。研究表明，与钢斜拉桥相比，当组合梁采用普通混凝土时，其技术经济合理跨径可以达到 800m 左右，当组合梁采用 UHPC 材料组合桥面板时，其技术经济合理跨径可以达到千米级以上跨径。

1.0.3 本标准采用以概率理论为基础的极限状态设计方法，按照分项系数的设计表达式进行设计。

条文说明

本条要求与现行《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、《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 保持一致。

1.0.4 组合梁斜拉桥主体结构设计使用年限为 100 年，对斜拉索等可更换部件，在确保结构安全的前提下，应注重更换的可行性。

条文说明

根据现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60，斜拉桥跨径一般均在 40m 以上，即都属于大桥、特大桥，相应的设计使用年限不应低于 100 年。

1.0.5 钢混组合斜拉桥设计应贯彻全寿命设计理念、统筹考虑施工及运营养护的需求。应积极、稳妥推广应用新材料、新技术、新工艺和新设备。

条文说明

桥梁全寿命设计是针对规划、设计、施工、运营、管养、拆除或回收再利用的全过程实现桥梁总体性能最优的设计。设计需要考虑施工的可行性和合理性，还要注重运营养护的便利性，以实现桥梁结构“可视、可达、可检、可修”。也包括环境保护设计、耐久性设计、景观设计、风险评估等专项设计，还包括设计中需考虑的节能减排，设计对施工及监控、运营期安全监测等的要求。

1.0.6 组合梁斜拉桥设计除应符合本标准的规定外，尚应符合《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01 等国家和行业现行有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 斜拉桥 cable-stayed bridge

将斜拉索分别锚固在梁、塔或其他载体上，形成共同承载的结构体系。

2.0.2 钢与混凝土组合梁斜拉桥 composite cable-stayed bridge

主梁由钢梁与混凝土桥面板或与钢-混凝土组合桥面板组合而成，共同承载的斜拉桥，本规范简称组合梁斜拉桥。主梁主要分为组合钢板梁、组合钢箱梁及组合钢桁梁。

条文说明

1956 年，由 Dischinger 设计主跨 183m 的瑞典 Strömsund 桥建成，拉开了现代斜拉桥发展的序幕。该桥主梁是将混凝土板搁置在钢主梁的上翼缘，但混凝土行车道板仅承受车轮的局部荷载，并不参与主梁的总体受力。德国著名桥梁专家莱翁哈特（Leonhardt）教授于 1980 年在日照桥（Sunshine Skyway）提出了钢-混凝土组合梁斜拉桥方案，采用剪力焊钉使桥面板与钢梁形成整体共同受力，加劲主梁为真正意义上的组合结构。

一般情况下，组合梁斜拉桥中桥面板为混凝土结构。根据最新钢混组合桥面板研究，拓宽组合梁斜拉桥范围及相关定义。通过理论研究和试验，证明组合桥面板具有承载力高、耐久性好、重量轻、施工方便等优势。组合桥面板根据构造的不同，大体可分为压型钢板-混凝土组合板、平钢板-混凝土组合桥面板、正交异性组合桥面板等形式。根据混凝土材料的不同，组合桥面板可以分为两种类型，一类为普通混凝土组合桥面板，一类为超高性能混凝土（UHPC）组合桥面板。对于压型钢板-混凝土组合板与平钢板-混凝土组合桥面板，更多考虑是为方便混凝土现浇施工兼顾结构受力，在斜拉桥上应用较少。因此，本规范不考虑这两种组合桥面板构造形式，即本规范所指的组合桥面板仅限定为正交异性组合桥面板形式。

2.0.3 部分斜拉桥 extra-dosed bridge

拉索承载相对较小且应力幅相对较低、主梁承载相对较大的斜拉桥。

2.0.4 多塔斜拉桥 multi-span cable-stayed bridge

具有多于两个索塔的斜拉桥。

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

边跨的一部分或全部采用混凝土梁，主跨的大部分或全部采用钢梁或组合梁的斜拉桥；或者边跨的一部分或全部采用组合梁，主跨的大部分或全部采用钢梁的斜拉桥。

条文说明

现行《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01 将混合梁斜拉桥定位为：主梁在边跨的一部分或全部采用混凝土梁，其余梁段采用钢梁或组合梁的斜拉桥。2019 年建成的宁波中兴大桥斜拉桥边跨为组合梁，主跨为钢梁，因此拓宽混合梁斜拉桥定义。本规范名称为《钢与混凝土组合梁斜拉桥设计标准》，就混合梁斜拉桥而言，规范适用范围为边跨的一部分或全部采用混凝土梁，主跨的大部分或全部采用组合梁的斜拉桥。

2.0.6 斜拉索 stay cable

承受拉力并支承主梁的构件。

2.0.7 索塔 pylon

用以锚固或支承斜拉索，并将其索力传递给下部结构的构件。

2.0.8 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。

2.0.9 正交异性组合桥面板 orthotropic composite deck

在正交异性钢桥面板上按一定规则设置剪力连接件，再浇筑混凝土后形成共同受力的桥面板。

2.0.10 超高性能混凝土（ultra-high performance concrete，简称 UHPC）

超高性能混凝土是指兼具超高力学性能和抗渗性能的水泥基复合材料。

2.0.11 过渡墩 transition pier

联跨分界处的桥墩。

2.0.12 辅助墩 auxiliary pier

为提高结构整体刚度，改善结构受力而在边跨内设置的桥墩。

2.0.13 飘浮体系 floating system

塔墩固结，主梁在索塔处不设竖向支座，全桥不设纵向约束的结构体系。

2.0.14 半飘浮体系 semi-floating system

塔墩固结，主梁在塔墩上设置竖向支座，纵向不约束或者弹性约束的结构体系。

2.0.15 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。

2.0.16 刚构体系 rigid frame system

塔、梁、墩均固结的结构体系。

2.0.17 地锚体系 ground anchoring system

边跨斜拉索全部或部分锚固在地锚上的结构体系。

2.0.18 限位装置 limited movement bearing

为防止主梁水平位移过大而采用限制纵、横向水平位移的装置。

2.0.19 边跨径 side span length

边索塔中心线至离最外一根斜拉索最近的墩中心线间的距离。

2.0.20 钢锚梁 steel anchorage beam

索塔上锚固斜拉索的钢结构梁式装置。

2.0.21 钢锚箱 steel anchorage box

索塔和主梁上锚固斜拉索的钢结构箱形装置。

2.0.22 分丝管 strand-separation tube

在索塔鞍座内布置的供单根钢绞线穿过的管道。

2.0.23 合理成桥状态 reasonable state of completed bridge

斜拉桥成桥时结构受力、线形等均为合理的状态。

条文说明

斜拉桥的合理成桥状态包括成桥内力状态和成桥线形状态两个方面。由于成桥线形可以通过施工过程中调整预拱度或钢梁制造线型来满足，通常提到的斜拉桥合理成桥状态仅指成桥内力状态。

一般按照如下原则确定合理成桥内力状态。恒载下，主梁和主塔弯矩不应太大，可兼顾活载等的影响；拉索索力分布相对均匀，运营期不产生张力松弛现象；边墩和辅助墩顶支座反力应有一定的压力储备，运营期不出现负反力。

2.0.24 合理施工状态 reasonable state of constructing bridge

为达到合理成桥状态，按一定的施工流程和方法控制结构应力、线形误差，使其符合相关规范要求的施工状态。

条文说明

合理施工状态应满足两方面的要求，一是要满足施工过程的结构安全性和施工便利性；二是成桥后能满足合理成桥状态的要求，包括结构受力和成桥线形。

2.0.25 斜拉索涡激共振 vortex-induced resonance of stay cable

风流经斜拉索时会发生漩涡脱落，当漩涡脱落频率接近或等于斜拉索的自振频率时，由周期性涡激力所激发出的斜拉索共振现象。

2.0.26 斜拉索尾流驰振 wake galloping of stay cable

后排斜拉索处在前排斜拉索尾流不稳定的驰振区内而发生的风致振动。

2.0.27 斜拉索参数共振 parametric resonance of stay cable

当桥面的振动频率与斜拉索的横向振动频率满足倍数条件时，斜拉索发生的振动。

2.0.28 斜拉索风雨振 wind and rain-induced vibration of stay cable

在一定的临界风速下，雨水沿斜拉索流动引起的斜拉索的驰振。

2.0.29 斜拉索减振装置 damping devices of stay cable

减小斜拉索风振或风雨振的措施或装置。

3 材料

3.1 钢材

3.1.1 组合梁斜拉桥所采用的钢材、螺栓、圆柱头焊钉、焊接材料等的技术要求应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定。

3.1.2 用于组合梁斜拉桥钢材、螺栓、焊缝等的强度指标应按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定采用。

3.2 混凝土、钢筋及预应力筋

3.2.1 用于组合梁斜拉桥各构件混凝土的强度等级、标准强度、设计强度、弹性模量、剪切模量等，应符合现行行业标准《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。

3.2.2 主梁和索塔中混凝土强度等级不应低于 C40。

3.2.3 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、标准强度、设计强度和弹性模量，应符合现行行业标准《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。

3.2.4 UHPC 强度等级按现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的规定采用。

条文说明

立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 是 UHPC 各项力学性能指标的基本代表值。现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 规定，活性粉末混凝土立方体抗压强度试验的标准试件采用 100mm 的立方体试件。为此，本标准建议 UHPC 的强度等级应根据 100mm 立方体抗压强度标准值划分。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362，轴心抗压强度标准值 f_{ck} 为棱柱体抗压强度，其与混凝土强度等级 $f_{cu,k}$ （立方体抗压强度标准值）的关系为 $f_{ck}=0.88\alpha_1\alpha_2f_{cu,k}$ ，系数 0.88 为考虑实际工程构件与立方体试件超高性能混凝土强度之间差异的折减系数； α_1 为脆性折减系数，超高性能混凝土掺入了 2%左右的钢纤维，其脆性明显低于普通混凝土，故取为 1.0； α_2 为棱柱体与立方体试件强度的比值，根据湖南大学统计国内外总计 142 组强度范围在 77MPa~189MPa 范围内的 UHPC 立方体抗压强度和棱柱体抗压强度试验

结果，其取值范围为 0.78~0.82，可近似取中值 0.80。抗压强度设计值 f_{cd} 由混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 除以混凝土材料分项系数 $\gamma=1.45$ 获得。

由于实际工程中所采用钢纤维、混凝土原材料品种和养护方法较多，难以标准化，且抗拉强度测试时的离散性较大，故规定 UHPC 轴心抗拉开裂强度（轴心抗拉强度标准值）宜根据工程所采用的材料由试验确定。抗拉强度设计值 f_{td} 由混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 除以混凝土材料分项系数 $\gamma=1.45$ 获得。

3.2.5 UHPC 弹性模量宜根据现行国家标准《活性粉末混凝土》GB/T 31387 的相应规定进行测试，剪切变形模量可取相应弹性模量值的 0.4 倍。泊松比按 0.2 采用，温度线膨胀系数取 $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

3.3 斜拉索

3.3.1 斜拉索用高强钢丝应采用 $\phi 5\text{mm}$ 或 $\phi 7\text{mm}$ 钢丝，其性能应满足现行国家标准《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应按现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定采用，其标准强度不宜低于 1670MPa。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。

3.3.2 斜拉索用钢绞线应采用高强度低松弛预应力钢绞线，其性能应满足现行《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152 的要求。斜拉索用钢绞线的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，其标准强度不宜低于 1770MPa。钢绞线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

3.3.1-3.3.2 斜拉索一般采用高强度钢丝或钢绞线，钢丝或钢绞线防护一般采用镀锌、环氧涂层、锌铝合金镀层等方式。

3.3.3 斜拉索用锚具材料性能应满足现行国家标准《优质碳素结构钢》GB/T 699 或《合金结构钢》GB/T 3077 的要求。

3.3.4 斜拉索外防护材料性能应满足现行行业标准《桥梁缆索用高密度聚乙烯护套料》CJ/T 297 的要求。

4 总体设计

4.1 一般规定

4.1.1 总体设计时，应根据使用功能、技术标准、建设条件、景观、环保等要求，对桥位、桥跨、结构体系、主梁、斜拉索、索塔、桥墩及基础等进行综合比选。

条文说明

建设条件一般包括地形、地质、地震、气象、水文、通航、防洪等。总体设计是指在充分考虑建设条件的基础上，使斜拉桥综合性能最优。

4.1.2 组合梁斜拉桥设计必须确保结构和构件满足强度、刚度、稳定性和耐久性要求。

4.1.3 总体设计必须考虑抗风、抗震的要求，必要时进行专题研究。

4.1.4 跨越通航水域的斜拉桥，总体设计应考虑防、抗船撞的要求。索塔位置的选择应避免大型船舶撞击，难以避免时，应进行结构防撞设计和防撞设施设计。

4.1.5 设计中应明确施工过程中结构体系转换的顺序及应采取的相应措施。

4.2 基本结构体系与形式

4.2.1 斜拉桥的基本构成

斜拉桥可由主梁、斜拉索、索塔、墩台及基础等部分构成，在边跨内可根据需要设置辅助墩。

4.2.2 斜拉桥的结构体系

1 外部约束

1) 边跨斜拉索锚固方式

按照边跨斜拉索锚固方式，斜拉桥可分为自锚式斜拉桥、地锚式斜拉桥和部分地锚式斜拉桥。一般情况下宜采用自锚式斜拉桥；在受地形条件限制，边中跨比很小时，可采用地锚式或部分地锚式斜拉桥。

条文说明

自锚式斜拉桥全部拉索均锚固在主梁上，除跨中及梁端无索区外，主梁均受压。对于双塔斜拉桥，可考虑设置锚碇并将部分斜拉索锚于锚碇上，形成部分地锚式斜拉桥体系。地锚式斜拉桥主梁受力与其约束方式有关，当主梁两端固定、跨中设铰时，主梁受压；当主梁两端可活动时，主梁受拉。自锚式、部分地锚式、地锚式斜拉桥主梁轴力分布分别见图 4.2.2-1~4.2.2-3，其中“+”表示受拉，“-”表示受压。

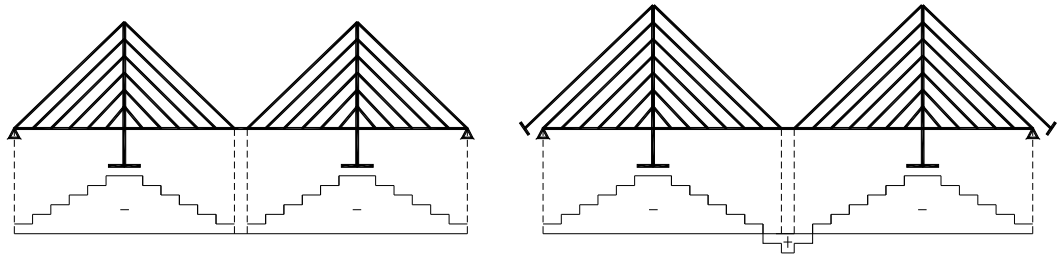


图 4.2.2-1 自锚式斜拉桥主梁轴力分布示意 图 4.2.2-2 部分地锚式斜拉桥主梁轴力分布示意

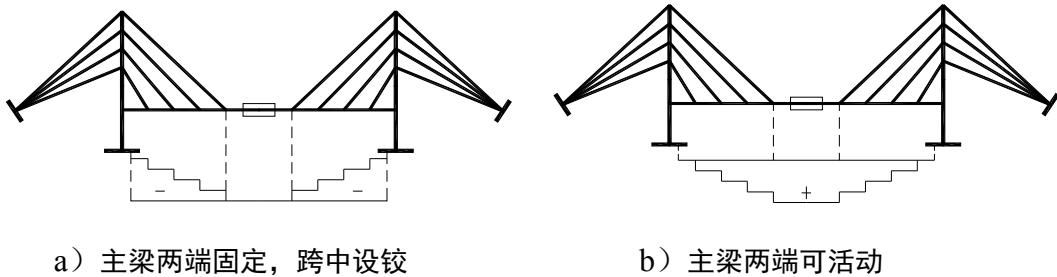


图 4.2.2-3 地锚式斜拉桥主梁轴力分布示意

2) 塔墩约束

桥面以上的塔柱和桥面以下的塔墩构成的整体结构，可采用与基础承台固结或铰接的支撑约束方式。

条文说明：

桥塔底部铰接的约束方式也有工程应用，但不适合在大跨径桥梁中使用，实际应用也较少。

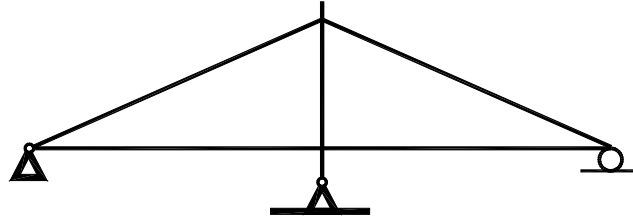


图 4.2.2-4 塔底铰接约束示意

2 内部约束

1) 塔梁约束

斜拉桥塔梁之间的约束设计应包括纵、竖、横三个方向。

塔梁纵向约束可采用纵向无约束、弹性或限位约束、固结或固定约束体系。

塔梁竖向约束可采用竖向支座约束体系或零号拉索体系。

塔梁横向约束可采用横向固定、弹性约束或横向减隔震约束体系。

条文说明：

塔梁纵向约束

纵向无约束体系包括飘浮体系及半飘浮体系。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。纵向无约束体系在地震时允许主梁纵向摆动，可以有效增加主梁纵向飘移振动模态的自振周期，有时可以有效减小地震响应。但对于大跨径斜拉桥，风荷载、制动力作用下的纵向位移较大，若在塔梁间设置水平连接装置，不仅可以约束主梁的纵向位移，同时可以减小制动力以及主梁所受静风荷载（包括斜拉索传递到主梁上静风荷载）引起的塔墩弯矩。此外，塔梁间纵向不加约束的飘浮体系，将导致较大的梁端纵向位移。对于公路桥梁，需要使用造价和养护更为昂贵的大位移伸缩缝；对于轨道交通桥梁或者公路与轨道交通合建桥梁，不仅是需要使用昂贵伸缩装置的问题，可能会成为大跨径斜拉桥行车安全的控制条件。

弹性约束和限位约束两种体系可以看做一类约束体系，均是允许梁塔之间发生一定的、受到适当控制的相对位移。弹性约束通常采用水平弹性钢索来实现，根据斜拉桥结构多方面的需求，优化确定弹性约束的刚度。约束刚度的大小可以通过改变钢索的面积和长度实现，这除了需要兼顾运营、极限静风荷载及抗风抗震等多种斜拉桥受力需求外，还需要兼顾钢索自身的受力与安装便利。限位约束装置是能够更好满足斜拉桥需求的一种约束体系，阻尼器对温度、活载等引起的小于额定行程量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。因此，针对具体工程情况，可以适当选择阻尼器参数，以满足斜拉桥的各项受力要求。

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。该体系较适合于独塔双跨式斜拉桥，对于双塔斜拉桥而言，温度、混凝土收缩徐变引起的次内力较大，有可能控制设计，一般仅用于塔墩较高的双塔斜拉桥中，必要时采用双薄壁柔性墩以减小温度等荷载的不利影响。当塔梁之间采用固结约束成为合适的选择，但是实施固结导致结构与构造非常复杂时，比如钢箱梁与混凝土桥塔的固结，可以考虑在塔梁交叉处，采用支座、联杆或销铰连接主梁和桥塔，限制其纵向相对位移，类似于连续梁的纵向固定支座，在此称之为“固定约束”，以示与固结约束的区别。对于双塔斜拉桥，通常会在其中一座桥塔采用固定约束、另一座桥塔处放松的约束形式。对于三塔斜拉桥，也可能只在中间桥塔采用固定或固结约束，两座边塔处放松的约束形式。

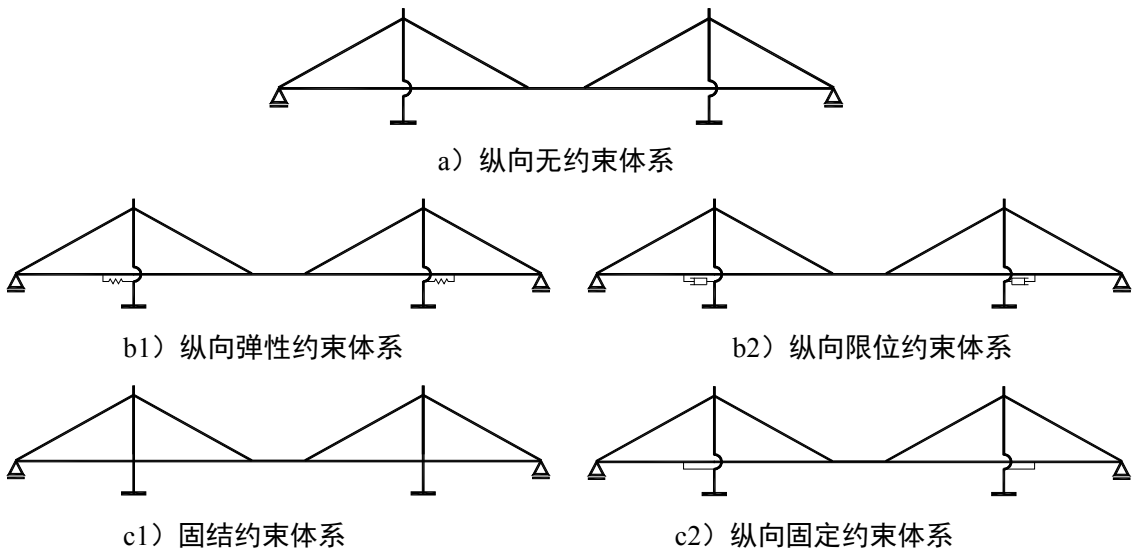


图 4.2.2-5 塔梁纵向约束体系示意

塔梁竖向约束

在桥塔上设置支座来支承主梁的方法，在温度及混凝土收缩、徐变作用下主梁内力较大，通常须加强塔下区域主梁的截面。从塔柱设置零号拉索来支承主梁，可以有效减小温度及混凝土收缩、徐变内力，避免主梁在塔下区域受力的突变，但有时拉索在塔上的锚固会受到一定的限制。当然，也有竖向支座及零号拉索均不设置的情况。因此，采用何种约束方式，需要结合具体工程情况择优选用。

塔梁横向约束

由于斜拉索一般不能对主梁提供有效的横向支承，在主梁和桥塔之间需要施加横向约束，通过设置支座限制主梁的横向位移，传递主梁的横向反力。塔梁间的横向约束一般采用限制其横向相对位移的固定约束方式，当结构抗震有特殊需要时，可以根据实际需要配置阻尼器，发挥阻尼耗能及抑制振动作用，满足斜拉桥抗震要求。

2) 塔墩约束

塔墩约束可采用塔墩固结体系或塔梁固结、塔墩分离体系。

条文说明:

塔梁固结、塔墩分离体系见图 4.2.2-6 所示, 塔梁支承在桥墩上, 使得塔柱和主梁的温度内力较小。随着跨径增大, 上部结构反力迅速增加, 大吨位支座的构造复杂、制作困难。因此, 这种体系不适合在大跨径桥梁中使用。

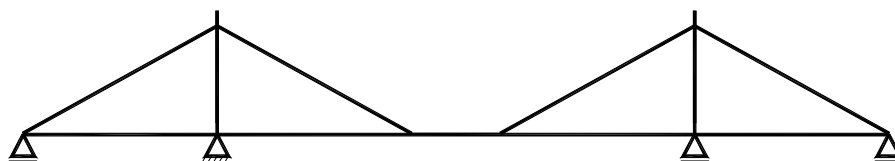


图 4.2.2-6 塔梁固结、塔墩分离约束示意

3) 梁墩约束

主梁与桥墩(包括边墩和辅助墩)之间的约束方式可采用在墩顶设置支座, 限制梁体的竖向位移, 或根据需要限制梁体的纵向、横向、转角位移。

条文说明:

斜拉桥主梁与桥墩之间的约束方式比较简单, 一般通过在墩顶设置支座, 限制梁体的竖向位移和横向位移、放松梁体的纵向位移。这种方式是一般桥梁的做法, 但并不是唯一的选择。实际工程就有在边墩或辅助墩顶设置纵向固定支座, 使之参与分担纵向地震荷载、限制梁端纵向位移。再如在梁端桥台处设置水平约束支座或阻尼器, 以限制梁端位移、减小桥塔受力。对于横桥向的约束, 处于地震烈度较高地区的斜拉桥, 甚至在桥塔、边墩同时设置横向阻尼器, 以便减小横向地震反应。当条件合适时, 如桥墩较高可以满足温度作用下的受力要求时, 主梁与边墩、辅助墩可以采用固结, 一般仅在斜拉桥边跨主梁为混凝土结构时才会采用固结, 既简化了连接构造, 也有利于增强斜拉桥刚度。

3 选择原则

跨径较大、索距较密或在有抗震要求的地区修建的斜拉桥宜选择纵向无约束体系, 必要时可设置纵向弹性约束或限位约束, 以控制梁塔之间的纵向相对位移; 独塔或双塔高墩和对变形要求较高的斜拉桥宜选择固结约束体系或纵向固定约束体系。对一些特殊的结构体系, 如地锚体系、矮塔体系以及斜拉桥与其他桥型协作体系, 应根据桥址条件、适用情况、技术经济以及美观要求来选定。

4.2.3 组合钢板梁斜拉桥适用的跨径范围宜为 600m, 跨径大于 600m 的宜采用半封闭组合钢箱梁或全封闭组合钢箱梁。主梁形式应根据桥址所在风环境条件及斜拉桥跨径进行力学性能、经济性能综合比较后确定。

条文说明

在组合梁斜拉桥的合理跨径范围内，不同断面型式组合梁各有其力学及经济合理区间。可根据场地风速条件及经济性，分别选用组合钢板梁、半封闭箱组合梁、全封闭箱组合梁。开口断面主梁风致稳定会成为制约因素，组合钢板梁斜拉桥的经济合理跨径范围为 600m 左右，这已被青州闽江大桥等多个工程所证实。全封闭箱组合梁可以很好地满足颤振稳定性要求，但跨径较小难以充分发挥钢底板的材料性能。因此，组合钢板梁适用于主跨 600m 及以下的斜拉桥，全封闭箱组合梁适合于主跨 700m 以上的斜拉桥，半封闭箱组合梁适合的斜拉桥跨径介于两者之间。根据桥址所在风环境条件，三种主梁形式所适合的斜拉桥跨径将会有所交叉。

组合钢桁梁通常用于公路与铁路合建双层桥梁，在单层公路桥梁中可用于山区等施工运输条件收到限制等情况。

国内外部分组合梁斜拉桥主梁形式和主跨跨径情况见表 4.2.4-5 所示。

4.2.4 总体布置及基本参数

1 总体布置

1) 边中跨比例应按恒载平衡的设计原则确定，边跨辅助墩应根据建设条件、结构受力、施工安全及造价等因素进行设置。

2) 根据跨越需要，索塔可布置为独塔、双塔或多塔形式。

3) 根据结构受力、施工条件、耐久性能等，索塔可采用混凝土索塔、钢索塔、钢-混凝土混合索塔或钢-混凝土组合索塔。

4) 斜拉索横桥向布置可采用单索面、双索面或多索面，索面布置可采用空间索面布置或平面索面布置；单索面斜拉桥跨径范围宜控制在 500m 以内。

5) 斜拉索纵桥向布置宜采用扇形，也可采用竖琴形、辐射形、星形等。

6) 斜拉索作为一个独立构件，设计时应进行综合比较，选用平行钢丝斜拉索或钢绞线斜拉索，并考虑其可更换性。

7) 斜拉桥主梁的截面形式应根据跨径、索距、桥宽、索面数等，并综合考虑结构受力、抗风稳定和施工方法进行选用。常用的组合梁截面形式有组合钢板梁、半封闭箱组合梁、全封闭箱组合梁和组合钢桁梁。

条文说明

斜拉桥的索面布置与主梁形式、桥塔形式等相互关联。单索面最适合与箱型梁配合使用，在组合钢桁梁斜拉桥中也有应用；双索面可与组合钢板梁、全封闭箱组合梁、组合钢桁梁配合使用；三索面的实际应用不多，在具有三片主

桁的钢桁梁铁路斜拉桥中得到应用；采用四索面的目的在于减少主梁的横向跨距，一般用于桥宽和风速较大的情况。

单索面斜拉桥由于桥面的抗扭性能主要依靠主梁自身，从控制桥面扭转角、斜拉桥抗风稳定性以及经济合理性考虑，应用范围宜控制在 500m 跨径以内。

斜拉索纵桥向布置形式如图 4.2.4-1 所示。

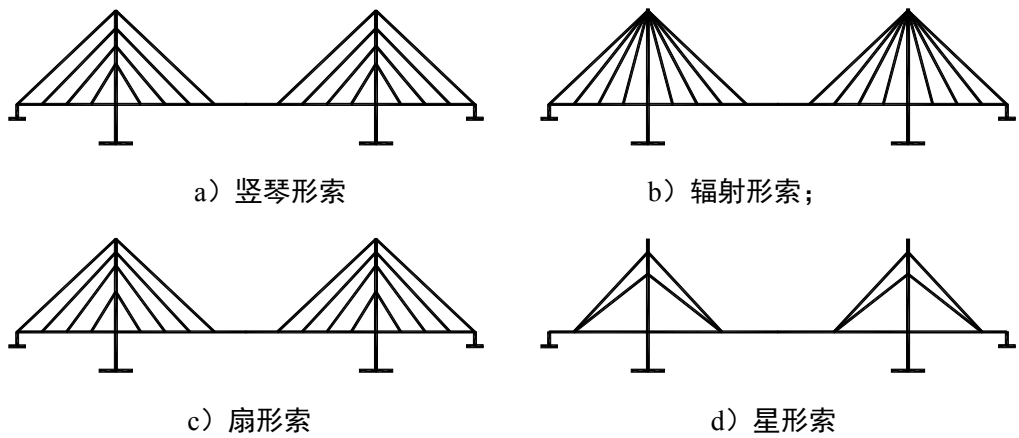


图 4.2.4-1 斜拉索纵桥向索面布置

星形布置在美学上虽很引人注目，但它违反了斜拉桥的一个重要原则，即斜拉索在主梁上的锚固点应尽可能分散。因此，这种形式很少被采用。

2 跨径比

边跨径应为边索塔中心线至离最外一根斜拉索最近的墩中心线间的距离，见图 4.2.4-2 所示（边跨径为 L_s ）。

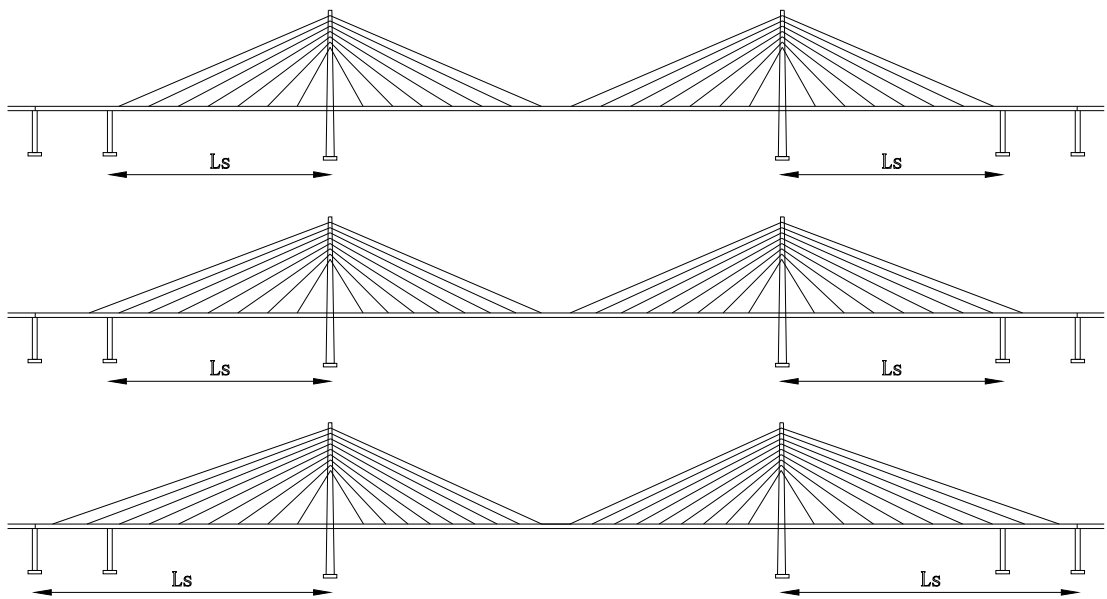


图 4.2.4-2 边跨径示意图

1) 双塔组合梁斜拉桥的边跨与主跨跨径比, 组合钢板梁宜为 0.35~0.5, 半封闭箱及全封闭箱组合梁宜为 0.4~0.6, 组合钢桁梁宜为 0.4~0.7。中跨为组合梁、边跨为混凝土梁的混合梁宜为 0.3~0.45。在特殊的地形条件下, 可采用更小的跨径比或采用地锚式斜拉桥。

2) 独塔斜拉桥的两侧跨径比应考虑地形条件及跨越能力, 组合梁可取 0.75~1.0, 混合梁可取 0.3~0.7。

3) 多塔斜拉桥适用于各种跨径的桥梁结构, 边跨与主跨跨径比可参照双塔斜拉桥选用。

4) 当边墩或辅助墩出现负反力时, 可根据主梁形式选择设置拉力支座(拉力装置)、梁体压重、利用相邻跨压重或与相邻跨主梁形成连续协作体系等边跨压重方式。

条文说明

组合梁斜拉桥边孔跨径的确定需要考虑多方面的影响, 包括边孔是否有通航要求、桥址地形和地质特点、结构整体受力性能与使用性能、边跨锚墩负反力及抵抗措施、边跨尾索的抗疲劳性能以及桥梁景观等, 无论采用何种布置方式, 都要充分考虑工程的经济性。

由于全封闭箱组合梁及组合钢桁梁截面承载能力相对组合钢板梁高, 结合既有斜拉桥统计资料, 其边中跨比上限值可适当提高。部分已建大跨径组合梁斜拉桥边中跨比统计情况见表 4.2.4-1~4.2.4-3 所示。

表 4.2.4-1 双塔组合梁斜拉桥边中跨比

桥名	跨径布置 (m)	主跨 (m)	边跨 (m)	边中跨比	主梁形式	备注
青州闽江大桥	40+250+605+25+40	605	250	0.413	组合钢板梁	
美国 Jonh James Audubon 桥	48.5+195.5+482.5+195.5+48.5	482.5	195.5	0.405	组合钢板梁	
加拿大 Annacis 桥	50+183+465+183+50	465	183	0.394	组合钢板梁	
巢湖大桥	54+216.5+460+216.5+65+55+55	460	225.5	0.490	组合钢板梁	
海南洋浦大桥	58.5+63+58.5+460+58.5+63+58.5	460	180	0.391	组合钢板梁	
英国 Seven 二桥	181+456+181	456	181	0.397	组合钢板梁	
江津观音岩长江大桥	35.5+186+436+186+35.5	436	186	0.427	组合钢板梁	
南浦大桥	76+94+423+94+76	423	170	0.402	组合钢板梁	
鄱阳湖第二公路大桥	68.6+116.4+420+116.4+68.6	420	185	0.440	组合钢板梁	
美国 Baytown 桥	147.8+381+147.8	381	147	0.386	组合钢板梁	
西固黄河大桥	67+110+360+110+67	360	177	0.492	组合钢板梁	
河口大桥	77+100+360+100+77	360	177	0.492	组合钢板梁	
灌河特大桥	32.9+115.4+340+115.4+32.9	340	148.3	0.436	组合钢板梁	
哈尔滨松花江大桥	44+136+336+136+44	336	180	0.536	组合钢板梁	
厦漳大桥 (南汊)	135+300+135	300	135	0.450	组合钢板梁	

美国 USGrant 大桥	140.2+259.1+106.7	259.1	140.2	0.541	组合钢板梁	
杨浦大桥	40+99+144+602+144+99+44	602	243	0.404	窄幅边箱组合梁	
韩国西海大桥	200+470+200	470	200	0.426	窄幅边箱组合梁	
清水浦大桥	54+166+468+166+54	468	220	0.470	窄幅边箱组合梁	
西班牙 Rande 桥	147.42+400.14+147.42	400	147	0.368	窄幅边箱组合梁	
望东长江大桥	78+228+638+228+78	638	306	0.480	半封闭箱组合梁	
台州湾跨海大桥	85+145+488+145+85	488	230	0.471	半封闭箱组合梁	
椒江二桥	70+140+480+140+70	480	210	0.438	半封闭箱组合梁	
泉州湾跨海大桥	70+130+400+130+70	400	200	0.500	半封闭箱组合梁	
乐清湾跨海大桥	70+90+365+90+70	365	160	0.438	半封闭箱组合梁	
西班牙 La Papa 桥	120+200+540+200+120	540	320	0.593	全封闭箱组合梁	
东海大桥主通航孔桥	73+132+420+132+73	420	205	0.488	全封闭箱组合梁	
七都大桥北叉桥	58+102+360+102+58	360	160	0.444	全封闭箱组合梁	
瑞典 Oresund 桥	141+160+490+160+141	490	301	0.614	组合钢桁梁	
韩国 Geogum 大桥	120+198+480+198+120	480	198	0.413	组合钢桁梁	
委内瑞拉 Puente Mercosur 桥	120+120+360+120+120	360	240	0.667	组合钢桁梁	
墨西哥 Baluarte 桥	250+520+354	520	250	0.481	组合钢板梁	混合梁
宜昌香溪河大桥	48+48+78+470+78+48+48	470	174	0.370	组合钢板梁	混合梁
广州鹤洞大桥	28.2+2×36+43.8+360+43.8+2×36+28.2	360	115.8	0.322	组合钢板梁	混合梁
上海徐浦大桥	2×40+3×39+45+590+45+3×39+2×40	590	202	0.342	窄幅边箱组合梁	混合梁
宜宾盐坪坝长江大桥	45+51+97+480+97+51+45	480	193	0.402	窄幅边箱组合梁	混合梁
洸府河大桥	60+80+320+80+66	320	140	0.438	窄幅边箱组合梁	混合梁
香港汲水门大桥	70+2×80+430+2×80	430	160	0.372	组合钢桁梁	混合梁

表 4.2.4-2 独塔组合梁斜拉桥边中跨比

桥名	跨径布置 (m)	主跨 (m)	边跨 (m)	边中跨比	主梁形式	备注
尼泊尔 Karnali 桥	325+175	325	175	0.538	组合钢桁梁	
泰国 RamaⅧ桥	300+175	300	175	0.583	组合钢板梁	混合梁
索同坡黄河特大桥	260+64+48+48	260	160	0.615	组合钢板梁	混合梁
哈尔滨松浦大桥	268+208	268	208	0.776	窄幅边箱组合梁	
郑州郑北大桥	221+221	221	221	1.000	窄幅边箱组合梁	
法国 seysse 桥	115+110	115	110	0.957	半封闭箱组合梁	
曹妃甸工业区 1 号桥工程	138+138	138	138	1.000	全封闭箱组合梁	

表 4.2.4-3 多塔组合梁斜拉桥边中跨比

桥名	跨径布置 (m)	主跨 (m)	边跨 (m)	边中跨比	主梁形式	备注
希腊 Rion-Antirion 桥	286+3×560+286	560	286	0.511	组合钢板梁	
平塘特大桥	249.5+550+550+249.5	550	249.5	0.454	组合钢板梁	
汀九大桥	127+448+475+127	475	127	0.267	组合钢板梁	
墨西哥 Mezcala 桥	57+80+311+300+84+68+40	311	137	0.441	组合钢板梁	
越南 Nhat Tan 桥	150+4×300+150	300	150	0.500	组合钢板梁	
英国福斯三桥	89+104+221+650+650+221+104+99	650	325	0.500	全封闭箱组合梁	
洞庭湖特大桥	98+140+406+406+140+98	406	238	0.586	钢箱钢桁组合梁	
武汉二七长江大桥	90+160+616+616+160+90	616	250	0.406	组合钢板梁	混合梁

当边墩或辅助墩出现负反力时，可选择与相邻跨主梁形成连续协作体系的边跨压重方式，如图 4.2.4-3。

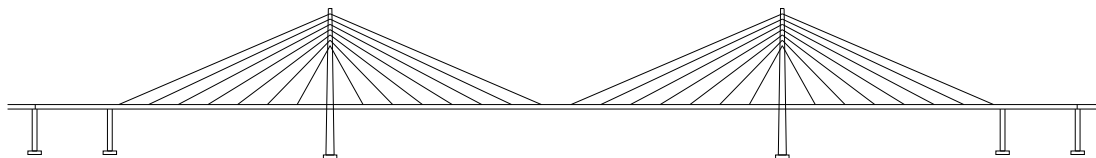


图 4.2.4-3 连续协作体系示意图

3 索塔

双塔、多塔斜拉桥桥面以上索塔的有效高度与主跨跨径之比宜为 $1/3.5 \sim 1/6$ ；独塔斜拉桥桥面以上索塔的有效高度与主跨跨径之比宜为 $1/2 \sim 1/3$ ，外索的水平倾角不宜小于 22° 。

条文说明

桥塔在高度范围可以分为两部分，桥面以下部分的高度由通航和地形地貌等条件决定，桥面以上部分的高度需要做出合理选择。桥面的以上有效高度（拉索在桥塔上的最高锚固点至桥塔处桥面的距离）是斜拉桥整体刚度的控制因素。塔高太小会降低斜拉索的倾角，影响斜拉索的使用效率；塔高太大则会增加索塔的材料用量，同时增加施工难度。此外，塔高还对斜拉桥结构所承受的风荷载以及主梁的受力稳定等有着重要影响。因此，合理的索塔高度应该由力学及经济比较确定。

部分已建大跨径组合梁斜拉桥桥面以上索塔有效高度和塔跨比见表 4.2.4-4 所示。

表 4.2.4-4 组合梁斜拉桥塔跨比

桥名	桥塔数	主跨(m)	桥面以上索塔有效高度(m)	塔高跨比	主塔形式
英国福斯三桥	3	650	118.4	1/5.5	独柱
望东长江大桥	2	638	163.3	1/3.9	倒 Y
武汉二七长江大桥	3	616	156.3	1/3.9	宝石型
青州闽江大桥	2	605	126.5	1/4.8	宝石型
杨浦大桥	2	602	157.1	1/3.8	宝石型
上海徐浦大桥	2	590	156.3	1/3.8	A 型
青海哇加滩黄河特大桥	2	560	132	1/4.2	花瓶型
希腊 Rion-Antirion 桥	4	560	153.5	1/3.6	四塔腿空间四面体
平塘特大桥	3	550	140.5	1/3.9	独柱
西班牙 La Papa 桥	2	540	126.4	1/4.3	菱型
瑞典 Oresund 桥	2	490	127.6	1/3.8	H 型
台州湾跨海大桥	2	488	122.1	1/4	H 型
美国 Jonh James Audubon 桥	2	482.5	106.4	1/4.5	开字型
椒江二桥	2	480	105	1/4.6	宝石型
韩国 Geogeum 大桥	2	480	118.2	1/4.1	宝石型
宜宾盐坪坝长江大桥	2	480	118.5	1/4.1	梭型
汀九大桥	3	475	126.1	1/3.8	十字型
韩国西海大桥	2	470	112.3	1/4.2	H 型
宜昌香溪河大桥	2	470	113.1	1/4.2	宝石型

清水浦大桥	2	468	101.1	1/4.6	宝石型
加拿大 Annacis 桥	2	465	93.9	1/5	H 型
巢湖大桥	2	460	115.5	1/4	A 型
海南洋浦大桥	2	460	109.2	1/4.2	花瓶型
平南相思州特大桥	2	450	108	1/4.2	宝石型
江津观音岩长江大桥	2	436	97.9	1/4.5	宝石型
香港汲水门大桥	2	430	88.3	1/4.9	H 型
南浦大桥	2	423	101.7	1/4.2	花瓶型
鄱阳湖第二公路大桥	2	420	101	1/4.2	花瓶型
东海大桥主通航孔桥	2	420	105.4	1/4	倒 Y
瑞典 Sunningsund 桥	2	414	85	1/4.9	宝石型
齐齐哈尔公路大桥	2	410	93.8	1/4.4	门型
洞庭湖特大桥	3	406	108.7	1/3.7	独柱
樟树市赣江二桥	2	400	100	1/4	花瓶型
西班牙 Rande 桥	2	400	73.1	1/5.5	H 型
泉州湾跨海大桥	2	400	97.1	1/4.1	三柱式门型
美国 Baytown 桥	2	381	77.8	1/4.9	菱型
乐清湾跨海大桥	2	365	100.1	1/3.6	宝石型
西固黄河大桥	2	360	66.4	1/5.4	宝石型
河口大桥	2	360	75.4	1/4.8	A 型
七都大桥北叉桥	2	360	81.9	1/4.4	独柱型
委内瑞拉 Puente Mercosur 桥	2	360	79.4	1/4.5	宝石型
广州鹤洞大桥	2	360	91	1/4	宝石型
灌河特大桥	2	340	92.4	1/3.7	H 型
哈尔滨松花江大桥	2	336	83.6	1/4	H 型
洸府河大桥	2	320	72.8	1/4.4	H 型
墨西哥 Mezcala 桥	3	311	50.6	1/6.1	H 型
厦漳大桥（南汊桥）	2	300	89.8	1/3.3	宝石型
越南 Nhat Tan 桥	5	300	69.1	1/4.3	宝石型
美国 USGrant 大桥	2	259.1	63.1	1/4.1	独柱型
尼泊尔 Karnali 桥	1	325	117.7	1/2.8	H 型
泰国 RamaVIII 桥	1	300	140.6	1/2.1	倒 Y
哈尔滨松浦大桥	1	268	131.3	1/2	宝石型
索同坡黄河特大桥	1	260	120.1	1/2.2	宝石型
郑州郑北大桥	1	221	110.4	1/2	H 型
曹妃甸工业区 1 # 桥工程	1	138	73.1	1/1.9	独柱
法国 seyssal bridge	1	115	50.3	1/2.3	倒 Y

4 斜拉索

1) 应根据主梁的形式和施工方法选取组合梁上的斜拉索索距，组合钢板梁的标准间距宜为 8m~14m，半封闭和全封闭组合钢箱梁宜为 8m~16m，组合钢桁梁宜为 10m~20m。

2) 索塔锚固区斜拉索的间距，应保证张拉及调索的空间。

5 主梁

1) 组合梁斜拉桥的梁高与跨径之比, 组合钢板梁和全封闭箱组合梁不宜小于 1/300, 组合钢桁梁不宜小于 1/100。

2) 组合梁斜拉桥梁宽与跨径之比不宜小于 1/40。

条文说明:

梁高是影响大跨径斜拉桥结构力学性能的一个重要参数。通过近千米级组合箱梁斜拉桥研究, 增加梁高, 斜拉桥静力稳定性能显著提高, 但梁高增加会显著增加风荷载下结构响应。

主梁宽跨比是影响大跨径斜拉桥结构力学性能的又一重要参数。增加主梁宽度可显著改善极限静横风下主梁受力性能, 可进一步提升结构侧向静力稳定性能及颤振稳定性能。对于千米级组合梁斜拉桥, 混凝土材料强度成为控制主梁宽跨比的主要因素, 相同设计条件下, 组合梁斜拉桥主梁宽跨比指标应大于钢梁斜拉桥。总体而言, 对沿海风速较大地区斜拉桥, 主梁宽跨比宜取大值, 对内陆风速较小地区斜拉桥, 主梁宽跨比可取小值。

国内外部分已建大跨径组合梁斜拉桥主梁设计参数如表 4.2.4-5 所示。

表 4.2.4-5 组合梁斜拉桥主梁参数统计表

桥名	主跨 (m)	主梁形式	梁高 (m)	高跨比	梁宽 (m)	宽跨 比	备注
武汉二七长江大桥	616	组合钢板梁	3.76	1/164	29.5	1/20.9	混合梁
青州闽江大桥	605	组合钢板梁	3.22	1/188	29	1/20.9	
希腊 Rion-Antirion 桥	560	组合钢板梁	2.45	1/229	27.2	1/20.6	
平塘特大桥	550	组合钢板梁	3.36	1/164	30.2	1/18.2	
墨西哥 Baluarte 桥	520	组合钢板梁	2.82	1/184	19.76	1/26.3	混合梁
美国 Jonh James Audubon 桥	482.5	组合钢板梁	2.31	1/209	23.2	1/20.8	
汀九大桥	475	组合钢板梁	1.98	1/240	43	1/11	
宜昌香溪河大桥	470	组合钢板梁	3.31	1/142	25.9	1/18.1	混合梁
加拿大 Annacis 桥	465	组合钢板梁	2.32	1/200	32	1/14.5	
巢湖大桥	460	组合钢板梁	2.27	1/203	34.5	1/13.3	
海南洋浦大桥	460	组合钢板梁	3.27	1/141	31.4	1/14.6	
印度 Hooghly II 桥	457	组合钢板梁	2.23	1/205	35	1/13.1	
英国 Seven 二桥	456	组合钢板梁	2.95	1/155	34.6	1/13.2	
江津观音岩长江大桥	436	组合钢板梁	3.542	1/123	36.2	1/12	
南浦大桥	423	组合钢板梁	2.36	1/179	30.5	1/13.9	
鄱阳湖第二公路大桥	420	组合钢板梁	3.12	1/135	32	1/13.1	
瑞典 Sunningesund 桥	414	组合钢板梁	2.44	1/170	26.5	1/15.6	
美国 Baytown 桥	381	组合钢板梁	2.03	1/188	47.66	1/8	
河口大桥	360	组合钢板梁	2.83	1/127	26	1/13.8	
广州鹤洞大桥	360	组合钢板梁	2.42	1/149	30.3	1/11.9	混合梁
灌河特大桥	340	组合钢板梁	3.41	1/100	36.6	1/9.3	
哈尔滨松花江大桥	336	组合钢板梁	2.47	1/136	33.2	1/10.1	
墨西哥 Mezcala 桥	311	组合钢板梁	2.99	1/104	18.1	1/17.2	
厦漳大桥 (南汉桥)	300	组合钢板梁	3.705	1/81	40	1/7.5	
泰国 Rama VIII 桥	300	组合钢板梁	2.1	1/143	29.2	1/10.3	混合梁
越南 Nhat Tan 桥	300	组合钢板梁	3.26	1/92	35.6	1/8.4	
美国 USGrant 大桥	259.1	组合钢板梁	2.134	1/121	21.4	1/12.1	

杨浦大桥	602	窄幅边箱组合梁	3.26	1/185	32.5	1/18.5	
上海徐浦大桥	590	窄幅边箱组合梁	3.26	1/181	35.95	1/16.4	混合梁
宜宾盐坪坝长江大桥	480	窄幅边箱组合梁	3.5	1/137	40	1/12	混合梁
韩国西海大桥	470	窄幅边箱组合梁	3.11	1/151	34	1/13.8	
清水浦大桥	468	窄幅边箱组合梁	2.84	1/165	53.3	1/8.8	
齐齐哈尔公路大桥	410	窄幅边箱组合梁	3	1/137	38	1/10.8	
西班牙 Rande 桥	400	窄幅边箱组合梁	2.4	1/167	23.8	1/16.8	
洸府河大桥	320	窄幅边箱组合梁	2.7	1/119	42	1/7.6	混合梁
哈尔滨松浦大桥	268	窄幅边箱组合梁	3.255	1/82	39.5	1/6.8	
望东长江大桥	638	半封闭箱组合梁	3.5	1/182	35.2	1/18.1	
台州湾跨海大桥	488	半封闭箱组合梁	3.5	1/139	38.5	1/12.7	
椒江二桥	480	半封闭箱组合梁	3.76	1/128	39.6	1/12.1	
平南相思州特大桥	450	半封闭箱组合梁	3.5	1/129	33.5	1/13.4	
泉州湾跨海大桥	400	半封闭箱组合梁	3.5	1/114	27.41	1/14.6	
乐清湾跨海大桥	365	半封闭箱组合梁	3.2	1/114	38.5	1/9.5	
法国 seyssal 桥	115	半封闭箱组合梁	2.5	1/46	13.6	1/8.5	
英国福斯三桥	650	全封闭箱组合梁	4.9	1/133	41.6	1/15.6	
西班牙 La Papa 桥	540	全封闭箱组合梁	3	1/180	34.3	1/15.7	
东海大桥主通航孔桥	420	全封闭箱组合梁	4.28	1/98	33	1/12.7	
瑞典 Oresund 桥	490	组合钢桁梁	10.2	1/48	30.5	1/16.1	
韩国 Geogeeum 大桥	480	组合钢桁梁	6	1/80	15.3	1/31.4	
香港汲水门大桥	430	组合钢桁梁	7.72	1/56	35.2	1/12.2	混合梁
委内瑞拉 Puente Mercosur 桥	360	组合钢桁梁	12	1/30	19.9	1/18.1	
尼泊尔 Karnali 桥	325	组合钢桁梁	3.23	1/101	11.3	1/28.8	

6 辅助墩

辅助墩的数量一般以单侧 1 个~3 个为宜，通常设于离边墩 0.2~0.6 倍边跨长度范围内。

条文说明

边跨辅助墩的设置须考虑多方面的因素，主要包括通航要求、桥址地形与地质特点、结构体系静力和动力性能上的要求、施工条件与施工风险、斜拉桥与引桥在跨径上的协调以及工程的经济性等。

对于大跨径斜拉桥，在边跨适当位置设置一个或多个辅助墩，可以增加边跨乃至主跨的刚度，改善成桥状态下的静、动力性能，减小索塔弯矩及中跨跨中挠度，分担横向地震力以及横向或斜向风荷载效应等。对于组合梁斜拉桥，可以减小边跨主梁负弯矩峰值，改善桥面板受力状况。对于沿海风环境恶劣地区，大跨径斜拉桥主梁双伸臂安装状态的风致稳定性常成为控制因素。辅助墩设置可为边跨提前合龙提供有利条件，减小斜拉桥主梁安装双悬臂长度。因此，设置辅助墩不仅可以改善结构的受力，而且可以降低施工风险。

当斜拉桥边跨辅助墩处于岸上或浅水区时，设置辅助墩不仅可以改善结构的力学性能，而且辅助墩造价一般相对较低，总体上常常具有工程经济性。同时，处于岸上或浅水区的主梁不具备浮运吊装条件，设置辅助墩可以方便主梁的安装，可以免除或部分免除临时支架。对于斜拉桥边跨处于深水中，需考虑船撞、下伏不良地基等情况时，应权衡辅助墩的支承效率和经济性，但对于大跨径斜拉桥，设置辅助墩通常具有工程经济性。设置辅助墩后，配合梁上索距

布置的调整，可以减小斜拉索的最大应力幅，分散边墩的负反力，有利于边跨施工及压重实施。

设置辅助墩后，根据现场条件可以有多种施工方法进行辅助墩至边墩范围的主梁的施工。为了降低施工难度，可以采用钢梁和桥面板分开进行安装。钢梁可以采用顶推法、滑移法、整孔钢梁浮运吊装等，钢梁安装就位后，再安装预制桥面板，或采用现浇法完成桥面板施工。

需要指出的是，设置辅助墩后，收缩徐变引起的边跨拉索减载更为严重，使组合梁斜拉桥整体时变效应更为明显。单纯从结构受力性能上看，600m 以下组合梁斜拉桥可不设置辅助墩，如 2004 年建成的希腊 Rion-Antirion 桥为组合梁多塔斜拉桥，跨径布置为 286+3×560+286m，边跨未设置辅助墩。对于主跨 600m 左右的组合梁斜拉桥，当设置 1 个辅助墩时，在活载作用下，对塔、梁受力性能的改善以及斜拉桥刚度提高效果显著；当设置 2 个辅助墩时，和设置 1 个辅助墩相比，梁塔的总体受力性能有显著的变化。对 600m 以上特大跨径组合梁斜拉桥，可根据结构受力、施工需要等多方面的需求，考虑设置 1 个或更多的辅助墩。

4.3 其它结构体系与形式

4.3.1 多塔斜拉桥

1 多塔斜拉桥宜采用飘浮体系或半飘浮体系。

2 多塔斜拉桥的设计和构造，可采取下列措施调整或增强结构支承体系刚度：

- 1) 增大主梁、中间索塔的刚度；
- 2) 采用辅助索对中间索塔顶加劲；
- 3) 采用交叉索布置方式；
- 4) 在边孔设辅助墩，增大边孔斜拉索的面积，减少边孔索距；
- 5) 减小塔墩高度。

条文说明

部分已建大跨径多塔组合梁斜拉桥情况如下。

表 4.3.1 多塔组合梁斜拉桥统计表

桥名	跨径布置 (m)	主跨 (m)	桥塔数	结构体系	提高刚度措施	备注
英国福斯三桥	89+104+221+650+650+221+104+99	650	3	中塔固结	中跨交叉索	
武汉二七长江大桥	90+160+616+616+160+90	616	3	半飘浮	增加中塔刚度	混合梁
希腊 Rion-Antirion 桥	286+3×560+286	560	4	半飘浮	增加中塔刚度	

平塘特大桥	249.5+550+550+249.5	550	3	中塔处主梁纵向固定	增加中塔刚度	
汀九大桥	127+448+475+127	475	3	半飘浮	辅助索	
洞庭湖特大桥	98+140+406+406+140+98	406	3	半飘浮	辅助索	
墨西哥 Mezcala 桥	57+80+311+300+84+68+40	311	3	半飘浮	边孔设辅助墩	
越南 Nhat Tan 桥	150+4×300+150	300	5	半飘浮	减小塔墩高度	

多塔斜拉桥不乏工程实例，组合梁斜拉桥三塔及以上桥塔数量的斜拉桥都有应用。既有为满足分散多孔通航而采用的多塔斜拉桥，也有为跨越宽阔山谷或河海而选择多塔斜拉桥。多塔斜拉桥的中间桥塔在活载作用下，由于没有双塔斜拉桥桥塔对应边跨斜拉索的锚固效应，将发生较大的塔顶偏位并引起主梁挠度和自身弯矩过大问题。

实际工程中如有需要，可以采用刚度较大的桥塔，如希腊的 rion-antirion 桥；可以采取辅助索控制中间桥塔的偏位，如香港的汀九桥；可以采用交叉索的布置方式，改善结构的受力性能，如英国苏格兰福斯三桥；可以在边跨设置辅助墩，加强边跨锚索的锚固效应，如墨西哥 Mezcala 桥；也可以降低塔墩高度，以提高桥塔刚度，如越南 Nhat Tan 桥。

4.3.2 地锚式斜拉桥

1 地锚可采用重力式锚、抗拔桩锚或岩锚。

2 地锚式斜拉桥为适应温度引起的梁体的伸缩，主跨中部应设有允许梁体纵向移动的装置：只传递剪力不传递弯矩、轴力的剪力铰，或同时能传递剪力和弯矩的变位装置。

3 地锚式斜拉桥或部分地锚式斜拉桥，当组合梁承受拉力时，可采用在受拉主梁段施加预应力或先由组合梁的钢梁承担施工过程的拉力作用，再进行混凝土桥面板的施工的方法，确保混凝土的抗裂性能。

条文说明

已建成的地锚式独塔斜拉桥一般为单跨结构，塔后侧的拉索集中锚固在岩体或锚块上，拉索在梁体内的水平分力由梁体传递到基础，如日本的松山桥（主跨 96.6m，锚长 32.5m）。

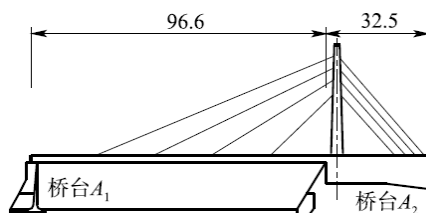


图 4.3.2 地锚式独塔斜拉桥实例（日本松山桥）

在特定的条件下，独塔双跨斜拉桥可布置成部分地锚式，即一部分拉索锚固在边跨，其余的索锚固在重力式大体积桥台上。拉索的不平衡水平力一部分由边跨梁体传递给桥台或索塔，另一部分在梁体内平衡。

双塔地锚式斜拉桥主梁受力与其约束方式有关，如图 4.2.2-3 所示。当主梁两端固定、跨中设铰时，主梁受压；当主梁两端可活动时，主梁受拉。

随着跨径的增加，为了减小双塔自锚式斜拉桥主梁轴力，可以将一部分轴力转移出去，由单独设立的锚碇承担，减轻主梁的负担，从而形成了双塔部分地锚斜拉桥体系。如西班牙 Luna 桥，跨径 67m+440m+67m，边跨另设 35m 长地锚，在主跨中部设剪力铰，可以允许梁体伸缩，可以传递剪力，但不能传递弯矩，桥面不平顺，不利于行车。我国郧阳汉江大桥，跨径 43m+414m+43m，边跨另设 43m 长地锚，在主跨中部设可伸缩的、可传递剪力及弯矩的装置。推荐用这类既有利于受力，又有利于行车的装置。

4.3.3 部分斜拉桥

- 1 部分斜拉桥结构体系主要是塔、梁、墩固结体系或塔、梁固结体系。
- 2 部分斜拉桥的跨径适用范围不宜大于 300m。
- 3 双塔部分斜拉桥桥面以上塔高与跨径之比宜采用 1/8~1/12。
- 4 主梁宜采用箱形截面，采用等截面时，梁高与主跨跨径比宜采用 1/35~1/45。
- 5 部分斜拉桥的边跨与主跨跨径比宜取 0.50~0.76，当采用混合梁时，边中跨比可适当减小。
- 6 部分斜拉桥主梁上的无索区长度，索塔附近宜取 0.15~0.20 倍主跨跨径，中跨跨中宜取 0.20~0.35 倍中跨跨径，边跨部宜取 0.20~0.35 倍边跨跨径。
- 7 斜拉索可按体外索设计，在施工中可不作索力调整。
- 8 斜拉索在索塔处宜布置为通过索，设置双套管或分丝管抗滑锚等类型的索鞍。
- 9 其他构造要求可参照其他斜拉桥和连续梁桥与连续刚构桥。

条文说明

按通常比例设计的斜拉桥，其主梁梁高小，在大跨径斜拉桥中，结构的竖向刚度主要由缆索系统提供。但对于中小跨径可通过增大主梁梁高，使主梁承担更多的荷载，便可有效提高体系的竖向刚度，从而成为部分斜拉桥体系。常规斜拉桥的主梁是以受压为主的压弯构件，而部分斜拉桥主梁是以受弯为主、拉索辅助受力的压弯构件。

采用箱型主梁的部分斜拉桥，利用拉索的竖向分力平衡部分梁体自重，并将部分活载传递给索塔，由于主梁刚度大，拉索的应力幅小，可采用较低的安全系数以减少拉索用材；而拉索的水平分力在梁体内产生压应力，减小了索塔附近主梁段由负弯矩引起的拉应力，因此一般采用预应力混凝土主梁，近年来也有采用波形钢腹板组合梁的工程实例。跨径较大时，可采用钢梁、组合梁或混合梁。2019年建成的宁波中兴大桥由于机场限高原因，采用部分斜拉桥体系，跨径布置为 64+86+400+86+64m，边中跨比为 0.375。采用钢主塔，边跨主梁为组合箱梁，中跨主梁为钢箱梁，塔梁固结、塔墩分离结构体系。主塔高 37.3m，塔高跨比 1/10.7，主梁高 4.5~10.5m，跨中高跨比为 1/88，支点高跨比为 1/38。中跨标准索距 12m，边跨标准索距 9m。

部分斜拉桥体系还常用于具有双层桥面的桥梁结构，由于双层交通的需要，主梁一般采用梁高很大的钢桁梁，并采用全跨等梁高布置以利于轻轨或铁路通行，且便于工厂预制和现场施工。拉索为辅助受力构件，在满足主梁受力的前提下，拉索的布置形式和索力优化目标可以有多种选择，设计自由度较大。因此，在成桥状态索力优化时，还应考虑可施工性的影响，如可采用竖琴式索面，使得索塔上所有锚固点采用相同的设计，或采用一致的拉索索力，使得所有拉索截面相同以便于拉索的标准化生产。

由于航空限高，芜湖长江大桥采用双塔钢桁组合梁部分斜拉桥体系，跨径布置为 180+312+180m，边中跨比 0.577，主梁桁高 13.5m，高跨比 1/23，梁宽 23.4m，宽跨比 1/13.3。桥面以上桥塔高度 37.2m，塔跨比 1/8.4。

重庆千厮门大桥上层桥面为双向四车道城市快速路，下层为双线轨道城市交通，采用独塔钢桁组合梁部分斜拉桥体系，跨径布置为 88+312+240+80m，边中跨比 0.769，主梁桁高 11.74m，高跨比 1/26.6，梁宽 24m，宽跨比 1/13。桥面以上桥塔高度 100m，塔跨比 1/3.12。

4.4 容许变形

4.4.1 主梁在车道荷载（不计冲击力）作用下的竖向挠度应不大于 $l/400$ ，其中 l 为计算跨径，当汽车荷载作用于一个跨径内，引起该跨径正负挠度时，应取正负挠度绝对值之和。

4.4.2 混凝土桥面板及正交异性组合桥面板在车辆荷载下的最大挠度跨中应不大于 $l_f/600$ ，其中 l_f 为板的行车方向计算跨径；正交异性组合桥面板在纵肋间相对挠度不应超过 0.2mm，变形曲率半径不应小于 40m。

5 作用

5.1 一般规定

5.1.1 设计采用的结构重要性系数、作用及其组合，除本章有明确规定外，应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。

5.1.2 城市桥梁可变作用中的设计汽车荷载与人群荷载应符合现行行业标准《城市桥梁设计规范》CJJ 11 的规定。

5.2 各类作用

5.2.1 永久作用计算应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定。结构重力计算时，当钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土体积含筋率（含普通钢筋和预应力钢筋）大于 2% 时，其重度可按单位体积中扣除钢筋体积的混凝土的自重与所含钢筋的自重之和计算。

5.2.2 总体计算考虑汽车冲击力时，结构基频应取主梁的竖向弯曲基频。局部计算时冲击系数应采用 0.3。

5.2.3 斜拉桥主梁的专用检修道，人群荷载可取 1.5kN/m^2 。

条文说明

现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 对于主梁设置的专用检修道上的人群荷载集度并未做具体规定，本条参考国外有关标准和国内已设置检修道的具体情况，推荐采用此集度标准。

5.2.4 作用在桥上的风荷载标准值计算应符合现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 的规定。在风环境比较复杂的地区，应进行专题研究。

5.2.5 温度作用

1 应同时考虑均匀温度、梯度温度以及斜拉索的温度变化作用引起的结构效应。

2 考虑温度作用时，应根据当地的具体情况，结构物使用的材料和施工条件等因素计算由温度引起的结构效应。

3 均匀温度，应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定，气温变化值应自结构合龙时的温度起算。

4 主梁、主塔梯度温度应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 的规定；没有实测数据资料时，可按下述范围取值：

- 1) 混凝土索塔左右侧面温差可采用 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- 2) 组合梁内钢梁与混凝土桥面板间的温差可采用 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ；
- 3) 四车道以上宽幅无悬臂主梁，宜考虑横桥向温度梯度作用的影响。

5 斜拉索的温度变化作用应考虑拉索颜色的影响，可按下述范围取值：

- 1) 白色或浅色斜拉索与主梁、索塔间的温差可采用 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ；
- 2) 黑色斜拉索与主梁、索塔间的温差可采用 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ；
- 3) 其它颜色斜拉索可根据现场观测值确定，无实测数据资料时，可采用 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。

条文说明

斜拉桥结构体系是一个高次超静定结构，因而温度内力不容忽视，一般情况下温度变化产生的内力可归纳为下列两种情况：

(1) 杆件两边缘发生的均匀温度，即认为主梁的上、下翼缘及主塔的左、右侧的温度变化相等，只与斜拉索的温度变化不相等。这主要是考虑到斜拉索的结构尺寸比主梁及索塔结构尺寸小很多，同时斜拉索的导热性能比主梁和索塔的大很多，因而斜拉索的温度变化幅度要比主梁及索塔温度变化幅度大很多。这样，它们之间就产生了温度差异。所以该项计算主要为了考虑整个环境温度的变化对由两种不同材质组成的斜拉桥的影响。规范在编制时将这种情况划分为均匀温度变化以及斜拉索的温度变化两个温度变化值。

(2) 杆件两边缘发生不均匀温度变化，这种计算主要是考虑日照造成的主梁上下翼缘之间、主梁左右两侧之间、索塔左右两侧之间温度变化不相同的情况。规范在编制时将这种情况定义为梯度温度，包括主梁及索塔的梯度温度作用。主梁横桥向温度梯度作用一般根据桥梁的地理位置、环境条件等因素确定。无实测数据时，参考现行《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 相关条文及说明。

斜拉索的温度变化作用考虑了拉索外包颜色的影响。

5.2.6 混凝土收缩徐变应按实际施工成桥过程计算混凝土收缩徐变影响效应。混凝土收缩徐变计算应符合现行行业标准《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，UHPC 收缩徐变计算应根据具体材料特性进行考虑。

条文说明

组合梁斜拉桥主梁是由性质不同的两种材料结合在一起的整体结构。由于混凝土的收缩徐变影响，将在钢和混凝土的结合面上产生相互作用力，导致内力重分布，并致使结构产生大量的附加变形。另外，由于斜拉桥本身的高次超静定，混凝土收缩徐变将在不同构件内产生次内力。运营期间，主梁桥面板收缩徐变将引起索力的变化，特别是边跨拉索索力会较大幅度减小。索力改变将使主塔上塔柱水平力不再平衡，并使结构产生如下变化：①塔顶向中跨偏移；②塔底出现向中跨侧顺桥向弯矩；③主梁中跨下挠；④主梁全长产生不同程度的负弯矩；⑤主梁全长产生不同程度的轴向拉力。其中后面两项均会使主梁桥面板产生不同程度的拉应力；对钢梁下缘而言，负弯矩产生压应力一般远大于轴向力产生的拉应力，故钢梁下缘压应力会有较大幅度的增加。收缩徐变将使钢结构部分压应力增加，混凝土部分压应力降低，甚至引起开裂。总体而言，混凝土收缩徐变对结构的影响是不利的，钢混组合结构斜拉桥必须考虑混凝土收缩徐变的影响。根据香港昂船洲大桥及苏通大桥经验，即使这两座桥主梁均采用钢结构，由于主塔徐变可对拉索索力产生较大影响，因此其对斜拉桥总体受力的影响不可忽略。

根据主跨 800m 组合梁斜拉桥不同结构体系时效对比研究，在收缩徐变作用下，塔处设置竖向支座、边跨设置辅助墩均将使主梁出现负弯矩峰值。辅助墩的设置将使组合梁斜拉桥整体时效效应更为明显。在体系确定时，单纯从时效效应角度来讲，全漂浮体系（主塔处不设置竖向支座、不设置辅助墩）较其它体系更为合理。

现代斜拉桥除了它的高次超静定的特点外，它的结构是逐步形成的，结构的荷载效应具有历时性，结构的混凝土收缩、徐变效应与结构逐步形成有关，因此，本条强调按实际施工成桥过程仿真计算混凝土收缩、徐变影响效应。文献《Erection Geometry and Stress Control of Composite Decked Cable-Stayed Bridges》强调了对组合梁斜拉桥收缩、徐变精确模拟的重要性。斜拉桥混凝土桥面板多为预制板+现浇湿接缝的方式，应根据具体施工过程考虑桥面结构重量的变化、组合截面形成前后截面刚度的不同、同一截面现浇与预制桥面板龄期的不同、桥面板预应力及斜拉索分批张拉引起的徐变等。

此外，斜拉桥的主塔和主梁的受力特点是压弯构件，承受巨大的压力，研究表明，当受压混凝土的压应力小于 $0.5f_{cd}$ 时，混凝土的徐变可以认为是线性的，否则混凝土的徐变则是非线性的，因此在计算中要注意。

在混凝土收缩、徐变计算理论方面，按龄期调整的有效模量法虽然自身较为完美，但存与其它几何非线性效应难以结合的缺点。目前高性能计算机非常普及，结合初应变法的逐步计算方法可以实现与几何非线性效应的同步计算。

5.2.7 地震作用力的计算应符合现行行业标准《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T2231-01 或《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 的规定，对于地震动峰值加速度系数大的地区或重要的斜拉桥，地震作用计算应考虑结构的非线性影响。

5.2.8 需要考虑船舶或汽车撞击作用时，撞击作用的设计值应符合现行行业标准《公路桥梁抗撞设计规范》JTG/T 3360-02 的规定。

5.2.9 施工荷载

1 进行施工计算时，应计入施工中可能出现的施工荷载，包括架设机具和材料、施工人群、桥面堆载、临时配重以及风荷载、温度荷载等。

2 对于现浇混凝土桥面板组合梁，应计入混凝土湿重、模板及可能的机械或其他设备重量，该重量应考虑桥面板的结合顺序，分别由钢梁截面及组合梁截面承担。

5.2.10 斜拉索换索与断索

1 斜拉桥的设计应满足任意一根拉索的换索需要，验算换索工况时，可适当考虑所更换拉索区域活载的折减。索塔、主梁和斜拉索应满足成桥状态下强度、刚度和稳定性要求。

条文说明

斜拉桥设计时应考虑将来换索的需要，并对换索时的桥面交通组织提出具体要求。

本规范参考美国 PTI 编《Recommendations for Stay Cable Design, Testing, and Installation》中第五章的 5.4 条内容，在按照承载力极限状态对换索工况进行验算时，至少一个邻近更换斜拉索的车道应封闭交通。

2 斜拉桥应保证至少一根拉索断裂后结构的安全，拉索突然断裂引起的动力荷载可取为静力荷载的 2 倍，或根据断索工况的非线性动力分析确定该动力荷载，但在任何情况下该值均不得低于静力荷载的 1.5 倍，该动力荷载应同时施加在拉索的梁上锚固点和塔上锚固点处。

条文说明

斜拉索断索对桥梁结构的效应影响较大。因此参考美国 PTI 编《Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation》中第五章的 5.5 条内容提出斜拉索断索的要求。断索工况验算时应考虑拉索突然断裂引起的动力荷载效应，采用静力弹性分析方法进行分析时，全部的恒载以及活载应当作用在断索之前体系之上，拉索突然断裂引起的动力荷载应当作用在断索之后的体系之上，采用非线性动力分析时，初始刚度应考虑全部的恒载和活载。

5.3 作用组合

5.3.1 作用组合应符合现行行业标准《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 有

关效应组合的规定。

5.3.2 斜拉桥抗震计算作用组合应符合现行行业标准《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T2231-01 或《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 的规定。

5.3.3 斜拉桥防船撞计算作用组合应符合现行行业标准《公路桥梁抗撞设计规范》JTG/T3360-02 的规定。

5.3.4 斜拉索断索工况按照《公路桥涵设计通用规范》JTG D60 中作用偶然组合进行计算。

6 总体计算

6.1 一般规定

6.1.1 在组合梁斜拉桥的设计计算中，除进行静力分析外，还应进行动力分析、稳定分析，确保结构的强度、刚度和稳定性满足要求。

6.1.2 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 总体计算采用车道荷载并应考虑多个车道荷载的横向偏载作用。
- 2 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。
- 3 在方案设计阶段，总体静力分析可采用平面杆系计算模型，并应考虑下列因素：
 - 1) 荷载横向分布；
 - 2) 空间斜拉索体系简化为平面索体系的索力换算；
 - 3) 若拉索锚固点与主梁（索塔）形心位置不同时，宜考虑拉索偏心对主梁（索塔）受力的影响。
- 4 进行局部静力分析时，计算区域应满足圣维南原理，并应注意总体计算与局部效应计算的叠加。

条文说明

现代斜拉桥是高次超静定体系，其结构是逐步形成的，结构的作用效应具有历时性，因此，结构计算模式、几何特性、边界条件等的正确与结构分析计算结果的正确与否关系十分密切。

现代斜拉桥，具有桥面宽、跨径大、空间柔性的特点，平面内的分析不能完全反映桥梁的动力和稳定等的真实性，对于梁板式（肋板式、边主梁式）主梁或扁平箱梁主梁更是如此。研究表明，斜拉桥的动力问题、稳定问题不是单方面的面内或面外的问题，一般都是面内、面外和扭转耦合问题。因而，强调动力分析和稳定分析宜采用空间结构计算模型，同时考虑空间布索、结构扭转、活载偏载、横向风载、不对称空间索力调整及支座不均匀变位等因素。

在方案设计阶段，总体静力分析主要反映斜拉桥结构的受力特点，正确反映各重要工况下的结构特性及荷载状况，如结构形成、体系转换、斜拉索

张拉和索力调整、偶然作用等，可以采用平面杆系模型，这被我国大量斜拉桥设计实践证明是可行的。当采用平面杆系模型计算时，要考虑荷载横向分布的影响。当空间索体系（如 A 形塔、倒 Y 形塔、钻石形塔等）简化为平面索体系进行计算时，简化后平面索体系的作用效应为空间索体系作用效应的平面分量，修正与实际情况的差异。

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。

6.2 静力计算

6.2.1 结构计算原则

1 斜拉桥计算应计入几何非线性影响，并符合下列规定：

1) 斜拉桥成桥阶段的计算可采用斜拉索等效弹性模量方法，千米级斜拉桥成桥阶段及斜拉桥施工阶段的计算，宜采用柔索单元。

2) 千米级斜拉桥应考虑恒载对运营期荷载效应计算的影响，运营期荷载效应包络值计算时，应慎用叠加原理。

条文说明

斜拉桥的几何非线性影响来源于三个方面：①斜拉索的垂度效应；②主梁或索塔在巨大的轴压力作用下的 P- Δ 效应；③结构的大位移效应。主跨 1000m 组合梁斜拉桥几何非线性影响研究成果表明：

1) 活载作用下，全非线性与线性计算相比，结构响应均有不同程度增加，几何非线性最大影响系数为 11.6%。三个几何非线性影响因素中，梁柱效应最大，大位移效应次之，而拉索垂度效应最小。

2) 考虑几何非线性影响后，在斜拉桥成桥初期及后期计算得到的活载效应有所不同，但最大偏差小于 1%，即运营期收缩徐变效应与活载效应之间可采用叠加原理。

3) 运营阶段收缩徐变工况几何非线性影响的幅度较活载工况为小，全非线性与线性相比，最大影响系数为 3.7%。

斜拉索垂度效应对结构的非线性影响较大，不论跨径大小，均需要考虑这项修正。目前，主要有 4 种方法模拟索的非线性：等效弹性模量法、多段杆单元法、等参索单元法、柔索单元法，其中等效弹性模量法最为常用，对于超大跨径的超长斜拉索，需要更加精确的理论来计算它的响应。

处理 P- Δ 效应的经典方法是稳定函数法，其核心是引用稳定函数系数对单元线性刚度矩阵系数加以修正来体现弯矩与轴力的耦合效应。结构大位移效应可以用大位移刚度阵或基于 UL 列式（拖动坐标法）的有限位移理论来考虑。

根据相关文献，本标准建议斜拉桥几何非线性计算可按下表规定进行：

表 6.2.1 斜拉桥几何非线性计算建议

程序	分类	P- Δ	索垂度		大位移
			柔索单元	等效模量	
1	中小跨径结构 成桥体系	√		√	
2	中小跨径结构 施工阶段	√	√		
3	特大跨径结构 成桥体系	√	√		√
4	特大跨径结构 施工阶段	√	√		√

斜拉桥几何非线性研究表明：

1) 对于中小跨径的斜拉桥，等效弹性模量法在斜拉桥成桥阶段拉索应力较大时具有较高的计算精度，可以采用。根据苏通大桥经验，对于特大跨径斜拉桥，采用斜拉索等效弹性模量法，对成桥累积位移计算误差较大，可能导致主梁施工线形出现严重的偏差。

2) 对千米级斜拉桥，在成桥运营阶段，同线性计算比较，完全几何非线性对主梁、索塔断面控制应力的影响程度约为 10~20%，对活载挠度的影响程度约为 10~30%。其中拉索垂度效应贡献较大，梁柱效应次之，大位移影响最小。

3) 通过施工过程非线性影响分析，与悬链线单元法相比，在给定斜拉索施工张拉控制力情况下，等效弹性模量法将导致苏通大桥成桥线形偏离理论设计值最大达 0.538m。对千米级斜拉桥，不宜采用传统的等效弹性模量法模拟斜拉索进行非线性施工仿真分析和施工控制计算。因此，对特大跨径必须基于完全非线性理论确定合理施工状态和施工架设控制几何要素。

4) 关于荷载组合，为了计算各种荷载组合下的荷载总效应，通常先分别计算出某荷载下的响应值，然后根据规范采用分项系数进行叠加。苏通大桥即使采用容许应力法设计，将某组合工况中各个荷载同时作用下按荷载全量计算求解，与单独计算各项响应后再进行叠加的结果也是不同的。以过渡墩支座反力为例，若以各单项荷载响应叠加，则支座压力总和比荷载全量结果高 24%，从而可能使压重储备不足。另以“恒载+活载+体系升温组合+有交通纵风”组合为例，由于塔梁之间阻尼器的预留间隙为 $\pm 750\text{mm}$ ，若单项荷载效应相叠加，塔梁间总相对位移最大值为 983mm，但阻尼装置的限位作用未能在各单项计算中得到体现，使塔根弯矩总响应偏大 47%，结果严重失真。总之，对于特大跨径斜拉桥，由于结构非线性的影响，荷载组合计算时应慎用叠加原理。尤其是当结构中存在某些接触类的非线性间隙单元时，必须使用荷载全量进行非线性分析，以求得精确解。

2 在组合梁斜拉桥结构计算中，必须考虑主梁上下两种材料的不一致而引起的结构内力重分配。

条文说明

在组合梁斜拉桥结构计算中，作为整体结构的活载内力等的结构计算分析，与单纯的钢斜拉桥或混凝土斜拉桥相同。由于混凝土桥面板和钢梁材料不同，

桥面板存在收缩、徐变，桥面板和钢梁通过剪力键联结，变形相互约束，存在内力重分配；同理，在温度影响下，也存在内力重分配；此外，后期桥面板预应力压缩也存在内力重分配。这里仅列举几项因素产生的内力重分配，对于其他因素产生的内力重分配，设计工程师应根据具体情况考虑。

3 在组合梁斜拉桥结构计算中，可忽略钢混界面滑移对结构受力的影响。

条文说明

同济大学博士论文《大跨度钢-混凝土组合梁斜拉桥关键技术研究》，基于考虑滑移的组合梁单元，进行了主跨 800m 组合梁斜拉桥主梁钢混界面滑移影响研究。研究结论为：在实际工程设计时，关于剪力钉滑移，主要是要考虑其对剪力钉自身受力的影响，而基本不需考虑对主梁钢结构及混凝土桥面板等其它结构静力响应的影响；当剪力钉承载力满足要求时，剪力钉滑移对结构几何非线性效应、结构稳定的影响均较小。

4 在结构计算中，宜考虑基础刚度对总体结构受力的影响。

条文说明

斜拉桥结构仿真分析时不考虑基础刚度将带来较大的计算误差，只有在基础刚度很大的时候，才可以忽略基础刚度的影响。具体可将基础作为结构分析的计算单元或是子结构，并考虑桩—土之间的复杂关系与边界条件。另外，也可将群桩基础简化为等效双柱刚架结构或其他等效弹簧刚度的方式来模拟基础刚度的影响。

5 主梁为箱形结构时，应考虑扭转翘曲影响。

6.2.2 设计计算时应首先确定合理成桥状态。

条文说明

斜拉桥的合理成桥状态应包括成桥内力和成桥线形两个方面要求。主梁成桥线形一般可通过施工过程中的预拱度调整来满足，因此，在进行方案试设计时，通常更关注斜拉桥合理成桥内力状态。预先给定斜拉桥合理成桥内力状态的目的和意义在于，通过给定最终成桥目标，据此进行施工过程分析，计算出各个施工阶段的斜拉索张拉值以及相对应的立模标高，确定出施工内力及其线形状态。理论上，按照理想的拟定施工状态，斜拉桥成桥后受力状态即可满足或逼近既定的成桥合理状态要求。

国内外许多学者对斜拉桥合理成桥内力状态进行了相关研究，目前对合理成桥状态的认识存在两种观点：一种认为合理成桥状态应使斜拉桥在各种荷载作用下，保证各部件应力包络合理，这样可充分发挥构件材料；另一种则认为塔、梁在恒载作用下应无弯曲或只受局部弯曲，这样可减少收缩徐变的影响、且方便设计。前者隐含着“域”的概念，后者更加强调与混凝土收缩徐变相关的“稳定张拉力”。鉴于斜拉桥是由塔、梁、索等构件组成的复杂结构体系，评价

其合理成桥受力状态应当综合考虑各部件的受力性能。总体上以“梁平塔直”为基本原则，兼顾梁、塔受力。

关于合理成桥状态分析方法，目前主要有以下几种：①指定受力状态的索力优化，如刚性支承连续梁法和零位移法；②无约束的索力优化，如弯矩平方和最小法、弯曲能量最小法、最小徐变法；③有约束的索力优化，如用索量最小法和最大偏差最小法；④应力平衡法；⑤影响矩阵法。其中有些方法例如刚性支承连续梁法、最小弯曲能量法不能考虑活载效应，此时可与其他方法结合起来，确定设计成桥状态。

6.2.3 以合理成桥状态为基础计算时，可通过施工状态分析，求得施工阶段斜拉索的初拉力和调整力。

条文说明

目前，确定施工状态的方法主要有：前进分析法、倒退分析法、正装迭代法、前进-倒退迭代法和无应力状态法。以 Leonhardt 首创的用于斜拉桥施工计算的倒拆分析法影响较为深远，该法为确定斜拉桥初始张拉力开辟了一种方便、实用的计算途径。实际上内力和位移不可能一次满足要求，可采用正装迭代法进行大循环计算。前进-倒退迭代法可有效地解决除分析状态不闭合以外的结构状态不闭合问题。秦顺全提出的无应力状态控制法，精确计算出各单元无应力尺寸后，剩余的工作只是“搭积木”。由于短索对误差很敏感，(Marchetti M, 1999) 指出了采用无应力状态法时的注意事项。随着计算力学的发展，基于索力影响矩阵的调值优化原理与方法逐渐被引入斜拉桥的成桥状态与施工过程正装迭代计算分析中，这类方法对各种结构型式和状态目标均具有较强的适用性，已用于苏通大桥等设计实践。

6.3 静力稳定分析

6.3.1 斜拉桥的静力稳定分析应包括整体稳定和局部稳定，稳定分析应涵盖主要体系转换过程和主要作用组合。

条文说明

斜拉桥的墩、塔、梁承受巨大的轴力和弯矩，在施工阶段和成桥状态可能会出现结构失稳现象。这里说的稳定仅指静载稳定，抗风稳定另有所述。稳定分析需要涵盖主要体系转换过程和主要荷载组合，并需要结合具体情况进行弹性和弹塑性稳定分析。施工阶段取结构体系和边界条件发生变化的关键施工阶段，进行弹性和弹塑性稳定分析，作用组合取恒载、施工活荷载、静风荷载等荷载作用组合。成桥状态作用组合取恒载、温度荷载、活荷载、静风荷载等荷载作用组合。

6.3.2 斜拉桥的整体稳定分析应符合下列规定：

1 斜拉桥整体稳定分析，应计入斜拉索垂度的影响。

2 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，组合梁斜拉桥应不小于 2.0。

条文说明

本条参考《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01 关于斜拉桥稳定的规定，并根据国内已建成大跨径组合梁斜拉桥结构稳定性评估经验，对组合梁斜拉桥非线性稳定安全系数提出要求。

国内外研究文献表明，第一类稳定问题的真正内涵在于其对应的分支点失稳现象，也就是理想中心压杆阐述的内容。对于工程中的实际问题，由于制造误差等因素的影响，不可能出现如理想中心压杆的受力构件，也就不存在随遇平衡即分支点失稳问题。因此实际工程问题都应该是第二类稳定问题即极值点失稳问题。但由于第一类稳定问题表达式理论明确、简单便于计算，国内规范根据第一类弹性稳定问题的表达式作为基础验算结构的稳定性。

根据斜拉桥中主梁、索塔的梁-柱受力特性，参考国外有关规范，也可按压弯杆件计算理论验算结构整体稳定。

在按相关设计规范中的压弯杆件进行稳定计算时，构件的计算长度是一个重要的设计参数。基于有限元法及特征值数值计算的整体屈曲分析方法可用来得到斜拉桥主梁、索塔构件的计算长度：

$$L_{eff,i} = \pi \sqrt{\frac{E_i I_i}{N_{cr,i}}} = \pi \sqrt{\frac{E_i I_i}{\phi N_i}}$$

其中， $L_{eff,i}$ ——构件的计算长度； $N_{cr,i}$ ——构件的临界屈曲力； ϕ ——构件屈曲特征值； N_i ——初始单元轴力。

根据以上公式，分别计算主塔及主梁一阶屈曲特征值，即可得到各构件计算长度，进而计算压弯构件整体稳定折减系数，按相关规范进行承载能力计算。需要指出的是上式在计算时假定整体屈曲与各节段局部屈曲同时发生，在一阶屈曲特征值一定的情况下，各节段临界屈曲力主要与其初始单元轴力有关，因此该方法对斜拉桥中承受较小轴力的节段可能得到偏大的计算长度，例如主跨跨中梁段或者边跨尾跨附近等。文献《Improved system buckling analysis of effective lengths of girder and tower members in steel cable-stayed bridges》提出，通过在单元中施加虚拟轴力进行迭代计算，可以得到各个节段比较准确的计算长度。

采用计入材料非线性影响的弹塑性稳定分析方法，被一致认为是计算斜拉桥极限荷载的精确方法，然而，该方法对计算机软件及硬件的要求均较高，并且需要桥梁工程师具备复杂非线性理论方面的知识，应根据需要选择合适的分析方法。

在计算稳定时，存在两种加载方式，其区别主要体现在对恒载的处理上，方式一指导思想是，结构稳定性分析应考虑结构上所有荷载的变异情况，即稳定安全系数 λ 所对应的的稳定荷载等于 $\lambda (W+H_1+H_2+\dots+H_n)$ ，其中， W 指结构自重； H_1 、 H_2 、 $\dots$ 、 H_n 是指外加荷载，如风荷载、施工荷载及车辆荷载等。方式二与方式一区别在于，方式二认为工程实际中恒载的变异性很小，基本上属于确定性荷载，因此稳定分析中可不考虑恒载的变化，仅考虑其他外加荷载的变异性，即当稳定安全系数为 λ 时，所对应的稳定荷载等于 $W+\lambda (H_1+H_2+\dots+H_n)$ 。我国桥梁设计规范弹性稳定性分析规定遵循加载方式一。

6.3.3 斜拉桥的局部稳定分析应符合下列规定：

钢主梁、钢索塔的受压板件局部稳定验算应符合现行行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定。

6.4 动力特性计算

6.4.1 抗风、抗震及其他动力荷载响应计算时，应建立全桥空间动力计算模型，进行斜拉桥的自振频率及相应振型的自振特性计算。

6.4.2 动力计算模型应能正确反映全桥的刚度特征、质量及质量惯性矩分布、边界约束条件。

1 组合梁斜拉桥采用开口断面时，应考虑主梁翘曲扭转刚度效应的模拟。

2 斜拉桥动力特性分析应考虑几何非线性影响。

条文说明

斜拉桥结构的动力特点反映了斜拉桥的刚度指标。斜拉桥结构一般较柔，在地震、风荷载和车辆等荷载作用下，必然会发生振动，轻则影响行车、行人，严重时则使桥梁破坏。斜拉桥结构的抗震、抗风设计计算，一般都要进行斜拉桥结构的动力模态（振型、频率）分析，因此，本条文规定强调了采用计算模型的正确性。此外，对带有人行道的斜拉桥，应尽可能使设计的斜拉桥结构频率避开人感频率。

开口断面是组合梁斜拉桥最常见主梁形式之一，可采用三梁式模型进行动力特性计算，以较好的模拟主梁翘曲扭转刚度效应。

6.5 抗风计算

6.5.1 斜拉桥结构与构件设计应进行施工期及运营期内包括静风稳定性、驰振稳定性、尾流驰振、颤振稳定性在内的抗风承载能力极限状态分析，分析手

段包括数值分析、节段模型风洞试验、虚拟风洞试验、全桥气弹模型试验等，可按现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 相关条款进行检验。

6.5.2 斜拉桥结构与构件应考虑在风作用下的正常使用极限状态其设计和检验，包括 W1 风作用水平下结构刚度、耐久性、行车或行人安全性及舒适性等，以及 W2 风作用水平及以下结构疲劳易损构件的抗疲劳性能，可按现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 相关条款进行检验。

6.5.3 斜拉桥抗风性能不满足承载能力极限状态或正常使用极限状态设计要求时，应通过优化构件气动外形、增设气动措施、附加阻尼装置、改变结构体系和刚度等措施予以满足，可按现行行业标准《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 规定的相关措施进行风致振动控制。

6.5.1~6.5.3 条文说明

斜拉桥是柔性结构体系，有敏感的风动力稳定特性，在设计时应重视结构的风动力稳定问题。实际中，虽不是所有的斜拉桥都要求进行风动力稳定分析，但应根据斜拉桥的重要性、跨径大小、结构体系的刚度和桥址处的风速情况等来确定。设计时可根据《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 的有关条款计算斜拉桥结构临界风速，必要时通过风洞试验确定。

斜拉索的风致振动，在斜拉桥中是普遍现象，国内外均有记载。斜拉索的风致振动虽然不会使斜拉索直接破坏，但会使索在索锚接合处引起疲劳破坏，由于斜拉索疲劳破坏而使全桥换索的报道已有多起，因此，在斜拉桥的设计中必须考虑斜拉索的风致振动。在斜拉索的风致振动方面，国内外有较多的研究，但多在振动机理和起因方面研究，再就是通过风洞试验提出减振措施。在目前的研究中，斜拉索的风致振动主要有涡激共振、尾流驰振、风雨振和参数共振等几类。由于斜拉索风振的复杂性，在这些研究报告中，对斜拉索风振现象的认识有共性，但对斜拉索风振的致因本质的认识不尽相同，因此，在斜拉索的抗风设计中，参照《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 有关条款进行，必要时通过风洞试验确定。

随着结构向大跨、轻柔方向发展，风的静力和动力作用愈加显著。值得一提的是，斜拉桥主孔跨径在 800m 以上时，可能出现空气静力失稳风速低于颤振临界风速的现象。就目前抗风理论而言，斜拉桥通过合理的结构布置（如塔型、索面）、断面选型与气动措施等已经基本上可以避免由颤振导致的稳定性和非线性静风失稳的发生。主要的问题是悬臂施工阶段桥面的风振和长拉索的风雨激振，需要采用一些被动控制措施加以抑制。虽然一些分析理论或减振机理尚不够精确，但工程实践中利用施工期临时阻尼器、拉索阻尼器、TMD、拉索表面刻痕或凹坑等多项气动与制振措施来消除或限制振幅等已取得一些成功的经验。总之，对于斜拉桥这种刚度较好的体系，跨径 1500m 以内的斜拉桥在抗风方面还是完全有信心解决的。

主梁常用的气动措施一般包括附加导流板、抑流板、风嘴、分流板、中央稳定板、气动翼板、断面开槽、气动格栅、风鳍板等。国内多座桥梁在抗风设计中通过采用气动措施提高了颤振稳定性，改善了涡激共振性能。

6.6 抗震计算

6.6.1 斜拉桥应进行抗震概念设计，确保桥梁结构布置合理、抗震体系明确、塔梁约束方案合适。

6.6.2 斜拉桥抗震计算、强度与变形验算、抗震措施应遵照现行行业标准《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01 或《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166 有关规定执行。

6.7 施工过程计算

6.7.1 施工阶段划分及计算

1 各施工阶段的计算简图应与施工流程的划分一致。

条文说明

组合梁斜拉桥主梁根据施工条件的不同一般可分为三种施工方式：悬臂拼装、顶推和整体化大型浮吊安装，也有局部较小跨径桥梁采用落地支架法。其中悬臂拼装的施工方式应用较为广泛。而顶推施工与整体化大型浮吊安装由于其对施工场地、施工设备等要求较为特殊，使用较少。法国塞塞勒桥采用了顶推法，厄勒海峡大桥采用了整体化大型浮吊架设了主梁。

传统的组合钢板梁斜拉桥技术成熟，常采用先安装工字形钢梁，再分块吊装预制桥面板，然后浇注湿接缝形成整体的施工过程。对于采取纵横梁体系的钢板组合梁，可以通过反顶横梁的方式来避免纵向裂缝的出现。希腊里翁-安蒂里翁桥等部分钢板组合梁斜拉桥采用了主梁节段全断面整体预制安装方法，很好地解决了钢混结合面的耐久性问题，当然对施工机具的要求也相对较高。

钢-混凝土箱形组合梁斜拉桥一般采用箱梁全断面悬臂拼装法施工。箱梁全断面在预制厂制作完成，工厂化程度高，质量易保证；整节运抵桥位由梁上吊机起吊安装，拼接时先进行钢结构拼装，再浇注桥面板接缝混凝土，具有安装速度快的优点。东海大桥全封闭箱型组合梁、台州市椒江二桥半封闭组合钢箱梁均采用该施工工艺。

组合钢桁梁根据施工场地条件和施工设备的不同，主要分为两种不同的悬臂施工工艺，一种是全节段整体预制，然后采用大型浮吊整体吊装，如丹麦厄勒海峡大桥；一种是钢梁与桥面板分别预制，先吊装钢梁，然后安装桥面板，实现悬臂拼装，如芜湖长江大桥。

对于采用悬臂拼装施工的组合梁斜拉桥，主梁的合龙也是一个关键的问题。目前组合梁斜拉桥合龙主要采用自然降温合龙和强制顶推合龙方法。国内目前已建成的组合梁斜拉桥大部分采用自然降温合龙，如南浦大桥、杨浦大桥主跨、东海大桥主通航孔的主跨等；也有部分桥梁采取了强制顶推合龙，如武汉二七长江大桥等。

斜拉桥作为一种设计与施工之间“高度耦合”的桥型，组合梁斜拉桥施工工序复杂、内容繁多，最终的成桥结构内力及线形与施工过程密切相关。合理的施工工序是保证施工过程结构安全性及实现设计意图的关键。对于组合梁斜拉桥不同的工序会导致钢主梁与桥面板的内力分配不同，如考虑不充分，桥面板混凝土可能在施工及运营过程中开裂，影响结构安全性及耐久性。设计计算阶段不应遗漏主要施工阶段，否则易造成施工完后的结构实际内力状态与设计不符，形成永久性的结构不安全状态。必须使各阶段的计算简图与施工阶段划分一致，使最终完成的结构符合设计预计的受力状态。

2 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，并应考虑几何非线性影响。

条文说明

为准确地控制整个施工过程，应将各施工阶段出现的荷载不遗漏地纳入计算，同时将各阶段产生的内力、应力、索力及位移计算结果列出，以便在施工过程中进行检查核对。对悬臂拼装施工的桥梁，在进行施工工期安排时尽量将悬臂施工阶段安排在接近合龙温度且温度变化不大的季节里进行，可以减少温度变化对悬臂施工的影响。

3 施工阶段截面验算应遵照现行《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 的有关规定执行。

4 体系转换计算

斜拉桥在以下几种阶段应进行体系转换计算：

- 1) 施工过程中的临时支座（墩）安装和拆卸；
- 2) 悬臂施工挂篮和合龙施工挂篮的安装和拆卸；
- 3) 临时斜拉索转为永久斜拉索；
- 4) 采用满堂支架施工工艺初次张拉斜拉索；
- 5) 边跨合龙、中跨合龙；
- 6) 组合梁在形成组合截面前后的不同工况。

条文说明

因体系转换对结构产生的效应是永久效应，本条文规定必须对体系转换进行计算，规定了体系转换进行计算的项目，对本条文未规定的项目而在实际中

存在的体系转换也必须进行计算，计算结果应按本标准荷载组合的要求进行组合。主梁合龙时应计入温度效应的影响。

合龙施工涉及结构体系转换，合龙施工计算包括两方面的含义：一是合龙温度变化和合龙施工荷载对结构产生的效应，该效应是永久效应，应按本标准荷载组合的要求进行组合；二是合龙温度变化和合龙施工荷载对结构合龙施工荷载产生的临时影响，如合龙段两端相对变位，对合龙临时结构的受力影响等，该部分计算应对合龙段（包括合龙临时结构）进行验算。

5 不平衡荷载计算

斜拉桥施工过程中应考虑以下几种不平衡荷载：

- 1) 主梁悬臂两端设计不对称产生的不平衡重力；
- 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。

条文说明

主梁悬臂施工时，双悬臂的不平衡荷载对结构的内力影响很大，特别是主梁悬臂施工达到最大悬臂长度，这种不平衡荷载对结构的内力影响严重时足以使桥梁破坏，因此，本条强调了应对斜拉桥悬臂施工状态进行计算。本条规定了不平衡荷载计算的项目，实际结构不平衡荷载不尽相同，设计时应根据实际结构可能发生的不平衡荷载进行计算，如其他施工设备布置不平衡、机具坠落引起的荷载等。根据荷载效应的性质，按相关规范荷载组合的要求进行组合。

6.7.2 施工阶段抗风验算

1 索塔浇筑完成，施工模板尚未拆卸，应对该状态按结构受纵、横向风力作用进行静力验算，风荷载应按本标准 5.2.4 条的规定取用。

2 对裸塔状态应进行风稳定分析，风稳定分析按现行《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01 有关条款进行，必要时可进行风洞试验。

3 主梁施工到最大双悬臂状态和最大单悬臂状态时，应计算受横桥向风力作用索塔两侧主梁底面产生不同的升力。计算采用空间模型或平面模型。

条文说明

1 索塔浇筑完成，施工模板尚未拆卸时，结构的挡风面积是最大的，该状态的静风荷载效应是最危险的，应对结构（包括施工结构）进行静力验算。

2 裸塔是高耸结构，在风荷载作用下存在驰振或涡激共振的可能，在结构设计时，应对裸塔进行风稳定验算，如果所验算结果不能确保裸塔的风稳定安

全性时，应进行必要的风洞试验以确定结构设计在裸塔状态的风稳定性是安全的。

3 当主梁及斜拉索安装进行至边跨合龙前，主梁达到最大悬臂长度，在这种状态下，当索塔两侧有不平衡横向风力作用时，结构处于不利的受力状态，应分为两种状态进行验算。

1) 结构承受横向风力的作用，按空间结构进行分析计算。

2) 结构承受因横向风力产生的，作用在索塔两侧主梁底不同的升举力，将此升举力作为静荷载考虑，结构体系可按平面杆系进行计算。

对于斜拉桥在施工阶段或成桥状态的抗风稳定，国内各有关单位进行了大量的风洞试验研究，结果表明，当主梁截面外形选择合理时，应能取得较高的临界风速值（主梁产生颤振的风速），这种风速一般是不易出现的，根据这项研究结果及已成桥的实际计算经验，本条文将升举力作为静荷载处理。

由于我国现行桥规对施工过程中桥梁结构的抗风计算尚无明确的规定，因此本条文对上述第二种状态的抗风验算，系参考国内外某些已成桥采用的计算方法及有关规范条文而提出的升力系数，作为初设或估算时使用。如需准确计算，应通过风洞试验确定。

本条文除考虑风力造成的不平衡竖向荷载外，还需考虑不平衡的施工荷载，及考虑使结构处于最不利的不平衡状态。对于悬拼主梁预制块件的施工方法，主梁两悬臂端的块件不可能很准确地同时安装，即两端相差一个块件。

本条文所列的两种验算状态，第二种状态对桥梁结构易造成直接危害，在施工过程中应注意预防，因此要求必须进行此项验算。

6.7.3 临时墩计算

在斜拉桥施工过程中，可在不影响通航的前提下设置临时墩。临时墩参与施工过程中的结构计算。临时墩应该考虑船舶或漂流物的撞击作用。

条文说明

主梁悬臂施工时，双悬臂的不平衡荷载（包括恒载和风载）对结构产生不利影响，这种不利影响会影响桥梁在施工中的安全，严重的足以使桥梁破坏。根据我国已建斜拉桥的成功经验，设临时墩是解决这种不利影响最有效的办法，因此，本条文强调在施工桥位条件允许的情况下，可设临时墩，但要进行体系转换计算。

6.7.4 主梁预拱度计算

成桥预拱度不宜小于主梁混凝土收缩徐变、斜拉索松弛产生的竖向挠度及1/2汽车荷载产生的竖向挠度之和，并拟合成平顺曲线。

条文说明

主梁预拱度是指主梁合龙标高与主梁设计标高之差，即合龙后高程的预留值，主要是补偿二期恒载、混凝土收缩徐变、斜拉索松弛以及 $1/2$ 汽车荷载引起主梁的下挠。至于主梁在施工期间产生的竖向变位，则主要在施工过程中通过设置施工预抬高度，施加斜拉索力及确定立模标高解决，不再考虑预留拱度。预拱度按通常规定设置，但由于斜拉桥一般具有较大的跨径，桥轴纵断面设计不仅影响桥梁外形美观，而且对使用功能也有较大的影响。根据已建的一些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，因此本条文规定应计入此项影响，不应漏计。经验表明，如果已建成的斜拉桥存在因施工控制不当而形成的凹形纵面，要进行纠正是十分困难的。设计合理的桥轴纵断面竖曲线是很重要的，在实桥具体条件允许的前提下，将桥轴线设计成有一定坡度的凸形曲线，可避免因施工控制不当而形成的凹形纵面。

6.7.4 压缩补偿

对于大跨径斜拉桥，必要时应考虑主塔及主梁的压缩补偿。

7 主梁

7.1 一般规定

7.1.1 斜拉桥的主梁宜在全长范围内布置成连续体系。

条文说明

斜拉桥的主梁一般都布置成连续梁。在早期的斜拉桥中，也曾采用 T 构加挂梁的形式，如委内瑞拉的 Maracaibo 桥的 Morandi 体系。在台湾的光复桥中，也曾设剪力铰。

7.1.2 主梁节段划分应便于制造、运输和架设，宜与索距相对应。

条文说明

斜拉桥组合梁施工可采用分布式节段预制拼装、整体式节段预制拼装和大节段预制拼装等方法

组合梁分步式节段预制拼装，其钢梁与桥面板分步骤进行安装，组合梁节段一般划分为 20m 以内的长度。钢梁可以整体节段进行安装，也可进一步划分为单根杆件。钢梁分成构件单元进行安装，常用于组合钢板梁和组合钢桁梁，优势是构件质量小，施工工艺灵活以及对施工设备要求低等，缺点是现场工作量大，质量控制难度高以及施工周期长等。应用该施工工艺的有我国的南浦大桥、杨浦大桥和西班牙的 La Pepa 大桥等。

组合梁整体式节段预制拼装，其钢梁与桥面板预制结合成整体后进行安装，由于节段重量大，节段长度一般控制在 15m 以内。组合梁全断面在预制厂制造，工厂化程度高，现场工作量少，有利于加快工期和保证施工质量；缺点是节段重量大，对施工设备要求高。该安装工艺既适用于组合钢板梁、组合钢箱梁，也适合于组合钢桁梁。我国东海大桥、椒江二桥、希腊 Rion-Antirion 桥等均采用该施工工艺。

组合梁大节段安装方法，是通过在桥位处设置临时墩提供梁段支撑，利用大型水上设备先进行长大梁段的安装，再开始斜拉索的安装。大节段安装方法施工效率高、速度快、现场工作量少，但对吊装设备要求非常高，需结合具体工程建设条件，进行综合比选后确定。组合钢桁梁具有梁高较高，承载能力强等特点，当节段长度较大甚至达到 100m 以上时无需结构加强，更适应该安装工艺，丹麦厄勒海峡大桥就是利用这一方法的典型案例。

7.1.3 主梁节段应在架设前预拼，预拼时的节段不应少于 3 段，每次留 1 段参与下一轮预拼装匹配。预拼装线形应符合施工监控方案要求。

7.1.4 斜拉桥主梁合龙应根据温度变化设置临时锁定措施，合龙段长度需根

据合龙温度予以修正。

7.1.5 混合梁斜拉桥主梁纵向不同材料梁的连接处，宜设置在轴力较大、弯矩和剪力较小位置，两种梁体的重心高度位置宜尽量一致，避免两种梁体整体及局部刚度的突变，保证力的顺畅传递。

7.2 组合钢板梁

7.2.1 组合钢板梁的钢梁宜采用纵向两工字形钢主梁之间设有横梁相互连接的纵横梁体系，纵向钢主梁也可采用窄钢箱截面形式。其典型截面形式如图 7.2.1-1、图 7.2.1-2 所示。



图 7.2.1-1 斜拉桥组合钢板梁横截面示意



图 7.2.1-2 窄幅边箱组合梁横截面示意

条文说明

传统的两片工字型钢主梁的组合钢板梁（图 7.2.1-1），根据不同的工程特点可以做出适当的变化，以适应更加广泛的需求。随着斜拉桥跨径的增加，钢主梁的翼缘板尺寸需要相应增加，不可避免地要使用厚钢板，焊接难度加大。作为解决问题的一种方式，可以将两片工字型钢纵梁做成窄幅箱梁的形式（图 7.2.1-2）。这种结构形式可以解决上述问题，同时由于其抗扭能力的增强和抗侧弯能力的提高，在作为单根杆件安装施工时，将具有更好的适应能力。从整体的组合截面来看，钢梁采用两片窄幅箱梁以及沿桥纵向以一定间距设置的钢横梁，所构成的仍然是纵横向的梁格体系，与混凝土桥面板形成组合结构后，主梁总体的抗扭能力并没有得到有效提升，也就是说抗风问题依然是这种结构形式向更大跨径发展的制约因素。

我国福建青洲闽江大桥，跨径 605m，采用两工字形钢主梁。上海杨浦大桥，跨径 602m，则采用两窄幅边箱截面。

7.2.2 为了提高组合钢板梁斜拉桥的抗风性能，特别是颤振临界风速，常需要采用气动措施和结构措施，如图 7.2.2，或采用塔身内收的空间索面布置。

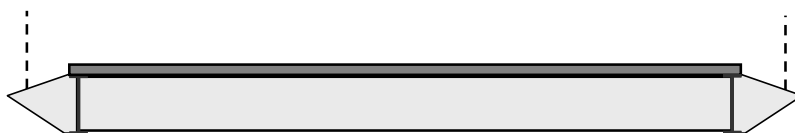


图 7.2.2 设置风嘴的组合钢板梁横截面示意

7.2.3 为改善主梁横向受力条件，可考虑采用三索面、三主梁结构型式，如图 7.2.3-1；结合桥塔的选择，还可采用四索面、四主梁的结构型式，如图 7.2.3-2。

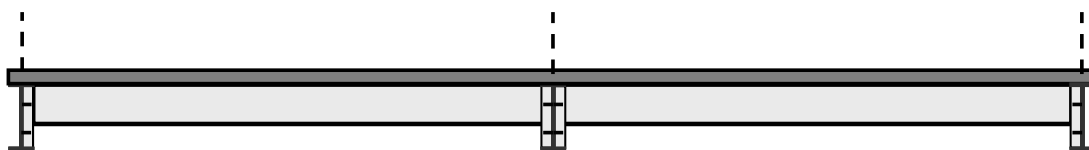


图 7.2.3-1 三索面、三主梁横截面示意

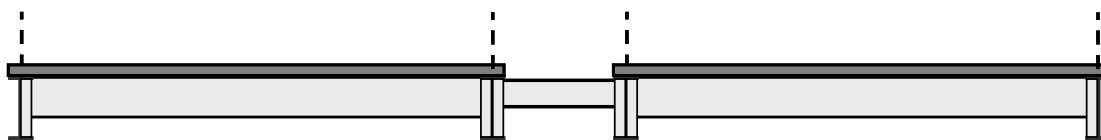


图 7.2.3-2 四索面、四主梁横截面示意

7.2.4 为方便桥面板分块施工，可在两片钢主梁之间设置小纵梁。小纵梁宜采用工字钢，间距与数量根据主梁宽度和桥面板分块情况确定，一般布置 1~3 道。

7.2.5 钢横梁宜采用工字钢，并沿桥梁纵向等间距布置，间距大小应根据桥面宽度、斜拉索间距、桥面板厚度等因素综合考虑确定。

条文说明

根据以往工程，钢横梁间距一般在 4~6m 之间变化，常用 4.5m。

7.2.6 钢横梁加劲设置应结合组合梁受力特点、施工方法综合考虑后确定。

条文说明

钢横梁与混凝土桥面板形成组合截面后，组合截面的中性轴接近混凝土板，特别是采用整体式节段预制拼装施工时，钢横梁腹板几乎全高范围处于受拉区，使得腹板可以不设纵向加劲肋，减少钢材用量，方便运营期养护维修工作。我国巢湖大桥、希腊 Rion-Antirion 桥钢横梁都未设置腹板纵向加劲，仅设置 3 道腹板竖向加劲。

7.2.7 支座处钢横梁应进行加强，可采用箱形截面。

7.3 组合钢箱梁

7.3.1 组合钢箱梁应根据不同工程需求选择合适的形式，常用的基本形式有中心箱组合梁、半封闭箱组合梁和全封闭箱组合梁。

7.3.2 中心箱组合梁宜适用于单索面斜拉桥，如图 7.3.2。

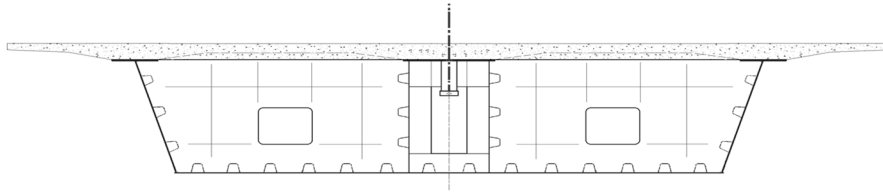


图 7.3.2 中心箱组合梁截面示意

条文说明

中心箱梁具有良好的抗扭性能，根据箱梁尺度和风环境情况，可以满足 500m、甚至更大跨径的单索面斜拉桥的要求。当然，作为组合梁其桥面板横桥向受拉是一个缺点，通常横向使用预应力予以解决。

当桥梁跨径大、桥面宽、抗风要求较高时，可以采用箱体较大的截面形式，以提高主梁的抗扭能力。东海大桥主航道斜拉桥由于重载和强风环境，使用了这种结构形式。当条件适当时，比如桥宽和运营荷载较小，可以考虑中间箱体较小的截面形式，以减少钢材消耗，提升桥梁的经济性。当斜拉桥的跨径较小、桥面宽度较大、抗风能力需求较低时，或这些情况部分出现时，可以采用中心箱外侧设置斜撑的截面形式，以抗扭需要的较小中心箱梁及外加劲支撑桥面板，实现主梁截面的高效利用。

7.3.3 双边箱组合梁和全封闭箱组合梁宜适用于双索面斜拉桥，如图 7.3.3-1、图 7.3.3-2。

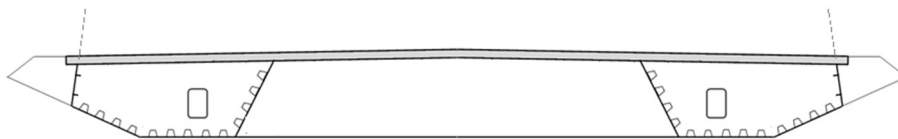


图 7.3.3-1 双边箱组合梁横断面示意

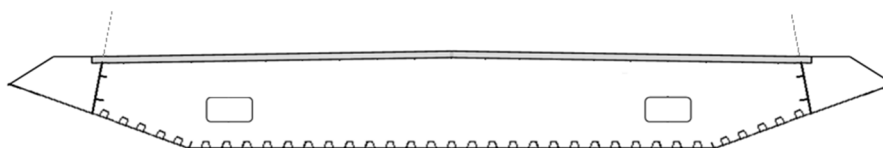


图 7.3.3-2 全封闭箱组合梁横断面示意

条文说明

当斜拉桥跨径较大、位处强风环境时，中心箱组合梁已经不再适用，需要采用双索面斜拉桥，可以采用双边箱组合梁或全封闭箱组合梁。双边箱组合梁为具有两个边箱的半封闭结构形式，这种箱梁形式的钢结构材料相对集中于两侧，可以根据结构受力需要选择合适的底板尺寸和板厚，避免全宽底板因为构造控制最小板厚而造成浪费。这种半封闭箱梁结构具有较好的面内外受力性能与抗扭性能，截面端部采用流线型布置、设置风嘴，并以双索面的空间布置、配合适当的索塔形式，可以有效提高其颤振临界风速值，甚至能够满足 700m 以上跨径斜拉桥的抗风性能要求。双边箱组合梁可以根据桥梁跨径、宽度等条件，确定梁高、边箱宽度等具体结构尺寸，以满足结构承载和抗风等方面的需要。另外，和组合钢板梁相比，可以避免厚板、特别是超厚板的使用。

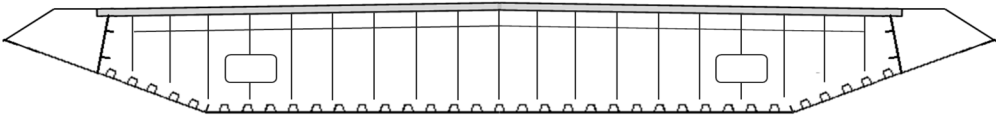
随着斜拉桥跨径的加大，从正常运营受力及抗风考虑，全封闭箱组合梁将成为合理的选择。全封闭箱梁结构形式具有强大的抗扭能力，采用全封闭箱组合梁的斜拉桥，跨径达到千米级也可以满足抗风要求。从全封闭箱组合梁的结构与力学特点看，这种结构形式更适合大跨径斜拉桥，相关研究表明，即使在沿海强风软基环境下，当跨径增加到 1000m 的情况下，和钢箱梁斜拉桥相比仍然不失经济上的竞争力。全封闭箱组合梁可以根据桥梁跨径、宽度等条件，确定梁高、横隔板形式及板厚等具体结构尺寸。随着斜拉桥跨径的增加，主梁的压屈稳定、静风荷载等都有可能成为控制因素，需要结合具体工程建设条件加以确定。

7.3.4 组合钢箱梁应在桥梁纵向以一定间距设置横隔板，间距大小应根据桥面宽度、斜拉索间距、桥面板厚度等因素综合考虑确定。

7.3.5 横隔板可采用实腹式、空腹式和两者结合的方式，应结合截面特点、横向受力及养护维修等因素选用。

条文说明

实腹式横隔板具有较大的刚度，承载能力强、加工制造简单，但材料用量较多，不便于箱内设施的安裝及后期维护检查。空腹式横隔板刚度相对较小，承载能力可以满足横向受力等各项要求，加工制造相对复杂，但材料用量相对较少，便于箱内设施的安裝及后期维护检查。全封闭箱组合梁一般采用流线型的外形，箱梁两端的结构高度在锚腹板处达到最低，箱梁截面端部都是斜拉索索力的扩散传递区域，在这一区域采用实腹式隔板，其余部分采用空腹式横隔板，可以兼顾多种需求。



(a) 实腹式

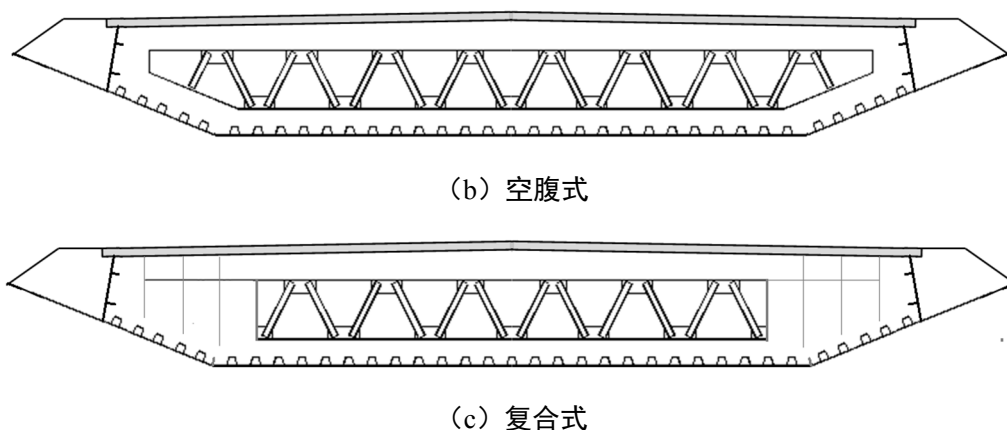


图 7.3.5 组合钢箱梁三种横隔板布置示意

7.4 组合钢桁梁

7.4.1 斜拉桥组合钢桁梁结构形式，按照桥面布置可分为双层桥面和单层桥面，按照斜拉索布置可分为单索面、双索面及三索面等，可结合工程需求及特点选用。

7.4.2 上层为六车道或以上的双层桥面斜拉桥，可选用双层桥面组合钢桁梁，如图 7.4.2 所示结构形式。

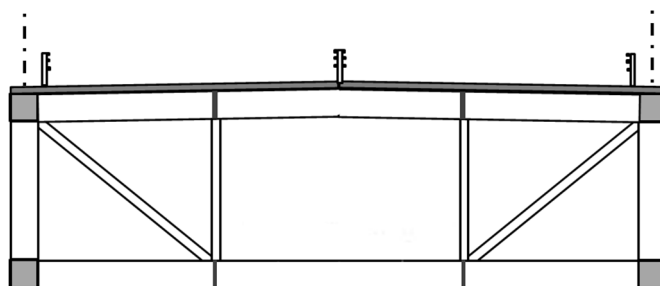


图 7.4.2 双层桥面组合钢桁梁

条文说明

该结构形式相对简单，可以根据下层交通净空要求以及横向受力的合理性，确定桁架高度和节间距、斜拉索的索距。这种结构形式可以适应较宽的桥面，比如 6 车道及以上公路交通需求，相应桁架宽度将达到 30m 以上。若下层为双线轨道交通，则下层的宽度远远超出了实际需要，下横梁由于跨距很大，再加上双线轨道交通的作用，受力十分不利，在恒载、活荷载以及风荷载等作用下，结构将发生较大的面外变形和扭转等，需要设置强大的横梁或配合设置横向加劲措施，以改善桁架结构横向系统的受力，使结构更为经济合理。该类钢桁梁需在上横梁设置钢纵梁支撑混凝土桥面板，以考虑桥面板的自身受力和在组合钢桁梁中参与总体受力的要求，使桥面板的厚度和受力合理化。

7.4.3 对于四车道双层桥面斜拉桥，可采用设有拉索锚固副桁的组合钢桁梁，如图 7.4.3 所示结构形式。桥面板在钢梁上弦杆处与钢桁梁结合，桥面板为横桥向单向板。

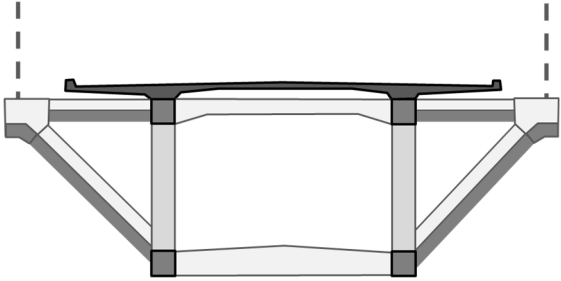


图 7.4.3 设有拉索锚固副桁的组合钢桁梁

条文说明

图示组合钢桁梁结构形式的最大特点在于设置专用副桁，用于传递斜拉索的索力到主梁的钢桁的上下节点，副桁不参与主梁的总体受力，仅起到对主梁的支撑和传递斜拉索索力的作用。钢桁梁两片主桁的间距可以减小到桥面功能所需的宽度，同时较宽的桥面板分布于主桁内外两侧，具有更好的受力条件和钢与混凝土之间的传力条件。对于 4 车道公路与双线轨道交通桥梁，采用这种结构形式时，桥面板只需在在钢梁上弦杆处通过焊钉与钢桁梁结合，桥面板横向配置横向预应力后可以满足受力要求。

这种截面形式的代表为丹麦的厄勒海峡大桥主航道桥，公铁两用桥包含双线铁路和四车道公路，上层桥面宽 23.5m，为主跨 490m 的双塔竖琴式双索面斜拉桥。该桥组合钢桁梁采用大节段预制安装的方法施工，对于桥面板能够采用横向受力体系非常重要，在预制场进行主梁制造可以避免钢桁梁的上弦杆单独承受桥面板自重作用，而是可以在与桥面板结合后，以强大的组合截面共同承受各种荷载作用，因此不会导致钢桁梁的上弦杆产生较大的弯曲应力。

7.4.4 对上层桥面较宽的带拉索锚固副桁双层桥面斜拉桥，可采用设置桥面板支撑纵梁，如图 7.4.4 所示结构形式。

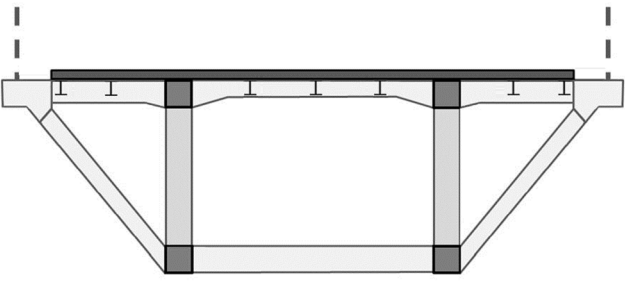


图 7.4.4 设有拉索锚固副桁的组合钢桁梁（设置桥面板支撑纵梁）

条文说明

图 7.4.3 结构型式当桥面较宽时，比如上层为 6 车道公路或更宽的桥面时，桥面板仅由钢梁上弦杆处支撑已经超出了合理受力范围，可以在钢横梁上设置纵梁等方式，为桥面板提供支撑，以使桥面板的厚度控制在合理的水平，如图 7.4.4 所示。

芜湖长江大桥是继厄勒海峡大桥主航道斜拉桥之后，国内建设的第一座组合钢桁梁斜拉桥，并且也是一座公铁两用桥，主跨跨径为 312m，包括双线铁路和四车道公路。公路面行车道净宽 18m，两侧各设 1.5m 宽的人行道，总宽 21m。斜拉桥为双塔双索面斜拉桥。尽管芜湖长江大桥的桥面宽度略小于厄勒海峡大桥，混凝土桥面板还是选择了设置纵梁，由纵梁以及桁架上弦杆和横梁构成的梁格体系来支撑。这种方式可以适应更小的桥面板厚度以及更大的桥面宽度。和厄勒海峡桥不同，芜湖长江大桥的组合钢桁梁采用分散构件现场拼装的施工方法，在钢桁架拼装完成后安装预制桥面板。如果不设置纵梁，在预制桥面板安装时，将导致钢桁上弦杆承受较大的弯矩。

7.4.5 对上层为不超过四车道公路的双层桥面斜拉桥时，可采用拉索锚于横梁的组合钢桁梁，如图 7.4.5 所示结构形式。

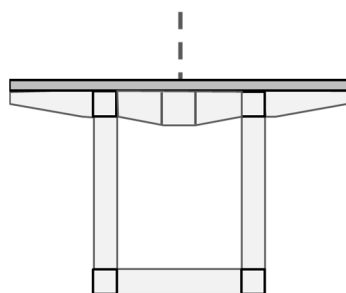


图 7.4.5 拉索锚于横梁的组合钢桁梁

条文说明

以横梁受弯来承受斜拉索的竖向分力，单从横梁受力来看并不是合理的形式，但对于桥宽不大、下层仅为单线轨道交通或人非系统时，可以减少桁宽、使混凝土桥面板的分布更加合理；和有副桁截面形式相比，可以省去副桁也同时避免了复杂的连接结构。因此，这种依靠对横梁加强满足斜拉索锚固要求的方式，综合看来有其技术经济合理性。对于桥面板而言，无论节点横梁的纵向距离、还是弦杆的横向间距，都将超出其合理的跨径范围，为此需要设置节间横梁。

韩国 Geogum 大桥，是双向两车道高速公路桥梁，主桥采用主跨 480m 双塔单索面组合钢桁梁斜拉桥。主梁为梁高 6m 的双层桥面组合钢桁梁，桥梁宽度 15.3m，上层混凝土桥面板供机动车通行，下层钢桥面板供行人和自行车通行。

委内瑞拉 Puente Mercosur 桥主桥是一座 360m 主跨的单索面组合钢桁梁斜拉桥。其中上层桥面宽度 19.9m，可提供 4 条机动车道，下层桥面则为单线铁

路线路。组合梁梁高为 12m，钢桁梁的桁高为 10.25m，桁架的节间距为 10m，斜拉索在梁上的索距也为 10m。

7.4.6 对于单层桥面交通的桥梁，在山区运输困难等特殊条件下，可采用图 7.4.6 所示结构形式。

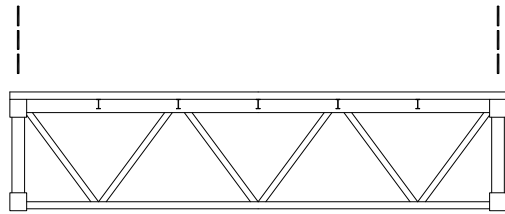


图 7.4.6 单层桥面组合钢桁梁

条文说明

对于单层桥面交通的桥梁，一般情况下组合钢桁梁并不是合理的选择，只有在山区运输困难等特殊条件下，才能展现技术经济合理性。为了减小材料用量，横向可以采用受力效率高的桁架结构。此外，通过在上横梁上设置小纵梁，可以满足桥面结构的受力要求，并综合考虑总体受力的需要合理确定桥面板厚度。

7.4.7 当节点横梁支撑无法满足桥面板合理受力要求时，应结合结构受力特点，合理设置小纵梁或节间横梁来改善桥面板受力，如图 7.4.7 所示。

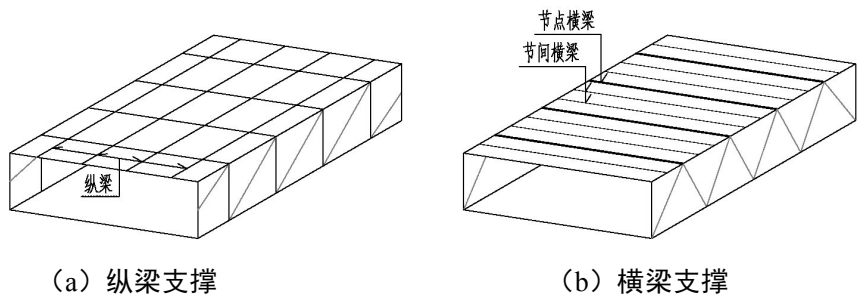


图 7.4.7 桥面板支撑体系

条文说明

通过在节点横梁上增设小纵梁，使桥面板横向获得足够的支撑，桥面板第二体系受力为横向受力的单向板。纵梁的数量根据桁宽和桥面板厚度情况决定，间距一般在 3~5m 范围变化。这种传力在满足混凝土桥面板受力要求的同时，将大部分桥面荷载传递到主桁节点，可以有效减少主桁弦杆所分担的桥面荷载，从而减少弦杆的弯曲应力。

通过在主桁节间增设横梁与上弦杆相连，使桥面板在纵向获得足够的支撑，桥面板为顺桥向单向板。节点之间的横梁数量根据主桁节间距和桥面板厚度情况决定，一般在 4~6m 范围变化。这种传力主桁弦杆需承受桥面荷载，需增大

尺寸以考虑弯曲作用。在较宽的结构中还需增设纵梁以更好的扩散桥面荷载作用，减少集中轮载下横梁的弯曲作用。

7.5 混凝土桥面板构造

7.5.1 主梁的混凝土桥面板，其最小厚度应根据安全性、耐久性以及施工性确定。对于普通混凝土桥面板，其厚度不宜小于 250mm，对于 UHPC 桥面板，其厚度不宜小于 160mm。

条文说明

确定桥面板最小厚度时，需考虑混凝土材料误差、施工的影响以及保护层厚度要求，保证其力学性能与实际相符，并根据对应车辆荷载验算其安全性。已建或在建项目桥面板板厚与其相应参数见表 7.5.1 所示。

表 7.5.1 组合梁斜拉桥桥面板板厚统计表

序号	桥名	梁型	板厚 (mm)	横隔梁间距 (m)	备注
1	巢湖大桥	工字钢组合梁	260	4.5	
2	青州闽江大桥	工字钢组合梁	250	4.5	
3	东海大桥	中心箱组合梁	280~550	4	
4	望东大桥	双边箱组合梁	280	3.6	
5	椒江二桥	双边箱组合梁	260~400	4.5	
6	哈尔滨松浦大桥	窄幅边箱组合梁	250	4.5	
7	曹妃甸 1#桥工程	中心箱组合梁	260~450	3.5	
8	漳州芝山南路大桥	槽形钢组合梁	260	4.5	
9	南浦大桥	工字钢组合梁	260	4.5	
10	杨浦大桥	窄幅边箱组合梁	260	4.5	
11	南京五桥	全封闭钢箱组合梁	170~200	3.65	UHPC 桥面板

7.5.2 桥面板一般可不设置承托。当主梁间距较大时，桥面板可根据实际需要设置承托。设置承托时，应使界面剪力传递均匀、平顺，其外形尺寸及构造应满足《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01 相关规定。

7.5.3 桥面板采用预制板时，预制板安装前宜存放 6 个月以上。

7.5.4 组合梁在钢与混凝土交界面应设置连接件，宜采用焊钉或开孔钢板连接件。

7.6 正交异性组合桥面板构造

7.6.1 正交异性组合桥面板中钢面板厚度不宜小于 12mm，上层混凝土当采

用 UHPC 时厚度宜为 45mm~90mm，当采用普通混凝土时厚度宜为 100mm~160mm。

7.6.2 正交异性组合桥面板中钢面板纵向加劲型式、间距及横隔板间距应根据上层混凝土板厚、材料的不同，综合考虑静力、疲劳性能及制造工艺等因素后确定。

7.6.3 宜根据焊钉布置情况，采用梅花形间隔布置将焊钉与钢筋骨架进行固定。

7.7 斜拉索梁端锚固构造

7.7.1 斜拉索与钢主梁的锚固宜采用的形式有：锚箱式、锚拉板式、耳板式，如图 7.7.1 所示。

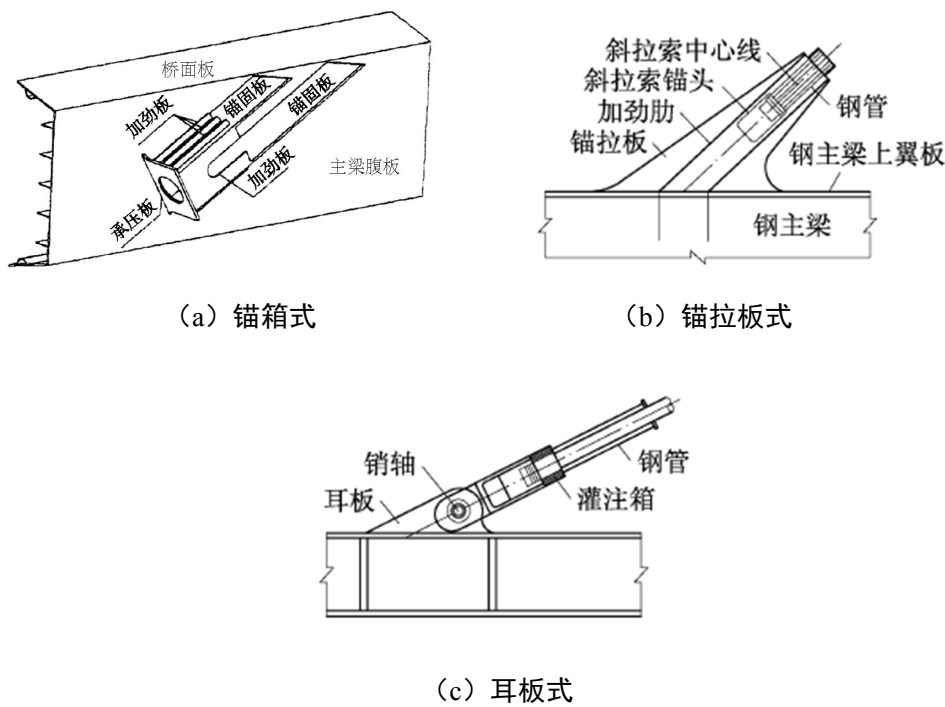


图 7.7.1 索梁锚固形式

7.7.2 基本构造要求

- 1) 锚箱式锚固应设置钢锚箱，斜拉索锚固在钢锚箱上，钢锚箱用焊接或高强螺栓方式与主梁连接。
- 2) 锚拉板式锚固应在主梁顶板上或腹板上连接一块厚钢板作为锚拉板，在锚拉板上部开槽，槽口内侧焊接在锚筒外侧，斜拉索锚固于锚管底部。

3) 耳板式锚固应在主梁的腹板向上伸出一块耳板,斜拉索通过铰连接在耳板上。

4) 钢主梁上的斜拉索锚固区各构件之间应连接可靠,各构件的最小厚度应不小于 10mm。

条文说明

斜拉索可锚固在主梁的顶板、底板或梁高中部。另外因为锚固点作用着强大的集中力,在主梁的一定范围内产生局部应力,在锚固区还同时受有弯矩和剪力,应力状况十分复杂,绝不可忽视。

对应于斜拉索锚固区的顶板混凝土,由于较强的局部应力效应容易开裂,可以采取加大混凝土厚度、加强配筋、合理设计剪力键的刚度过渡、或延迟该处混凝土与钢结构的结合等措施。

7.8 结构计算及模型试验

7.8.1 主梁结构计算应考虑施工及运营状态,并应满足强度、刚度、疲劳和稳定性等相关要求。

7.8.2 混凝土桥面板强度的验算,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 的要求。

7.8.3 钢主梁截面强度的验算,应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的要求。

7.8.4 主梁的钢梁及连接的疲劳验算,应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的要求,剪力连接件的疲劳验算应符合现行《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01 的要求。

7.8.5 主梁的强度验算应考虑剪力滞的不利影响,宜通过精细化空间分析确定。

条文说明

结合钢板梁斜拉桥中,主梁的间距较大,斜拉索锚固在主梁上。一方面,组合梁的桥面板除随结构整体受力产生整体竖向挠曲变形,另一方面,斜拉索拉力通过主梁传递到全截面,必然引起桥面板剪力滞,使桥面板横截面上正应力沿板宽的分布不均匀。受弯矩和轴力共同作用的组合梁斜拉桥中桥面板有效宽度问题较为复杂,梁式桥桥面板有效宽度的规定不适用于组合梁斜拉桥。

西南交通大学杜振华以重庆江津观音岩长江大桥为背景，得出组合梁斜拉桥主梁在弯矩和轴力共同作用下，顶板有效宽度比为 0.743~0.883。刘洋以武汉二七路长江大桥为研究背景，得出有效宽度系数的取值在 0.748~0.916 之间；索力在桥面板中的传递角度略小于美国桥梁设计规范中规定的传递角度 30°。

国外有学者基于美国已建组合梁斜拉桥基本参数，建立了 18 组有限元模型，重点对各截面内纵向应力进行研究，提出了适合于组合梁斜拉桥的修正有效分布宽度确定方法，认为斜拉桥桥面板有效宽度仅与跨径、桥面板板厚及桥面实际宽度有关，如图 7.8.4 所示。采用该文建议的有效宽度进行计算得到的截面应力与实体有限元计算结果吻合良好。该计算图式较为简洁，计算结果规律上与我国学者研究较为吻合（数值上在支座处偏于保守）。

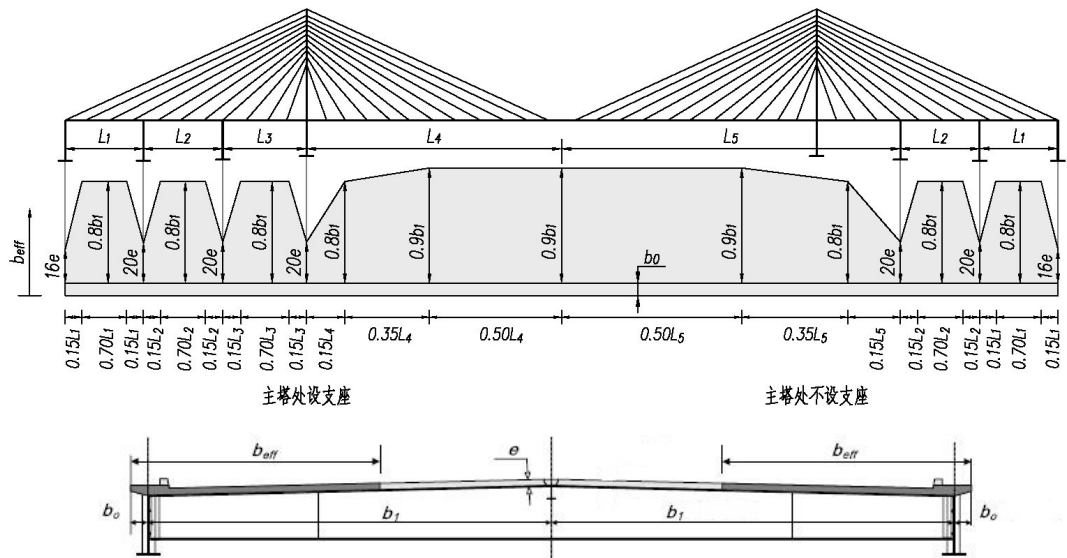


图 7.8.4 组合梁斜拉桥承载能力极限状态桥面板有效分布宽度

7.8.6 主梁结构应进行总体计算和局部计算，应根据实际情况进行必要的组合。局部计算宜采用基于部分梁段的空间杆系单元方法、板壳单元方法、实体单元方法或组合单元方法，采用车辆荷载并考虑多个车辆荷载的横向偏载作用，车辆的车轮荷载应考虑桥面铺装层的扩散效应，扩散角可取 45°。

7.8.7 桥面板验算

1 混凝土桥面板强度的验算，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 的要求。

2 对于顺桥向单向板，需考虑局部车辆荷载效应与总体车道荷载效应的叠加，并按下列组合确定最不利效应：

$$S_d = \text{Max}(\psi S_{loc,d} + S_{glob,d}, S_{loc,d} + \psi S_{glob,d})$$

S_d —组合后桥面板最不利汽车荷载效应

$S_{loc,d}$ —桥面板的局部车辆荷载效应

$S_{glob,d}$ —桥面板的总体车道荷载效应

ψ —与有效跨径相关的组合系数，一般可取 0.7。

条文说明

桥面板局部车辆荷载效应最大值与总体车道荷载效应最大值同时发生概率很低，直接采用线形叠加过于保守，参考欧洲规范 4 对桥面板验算规定，考虑与有效跨径相关的组合系数。考虑到斜拉桥有效计算跨径一般大于 40m，故本规范建议直接取 0.7，特殊情况下可根据有效跨径参考图 7.8.6 相应调整。

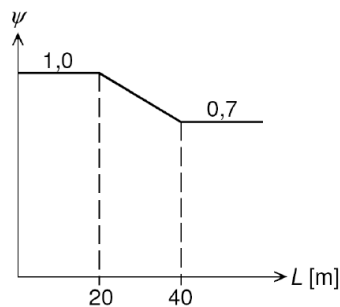


图 7.8.6 与有效跨径相关的组合系数

7.8.8 组合梁斜拉桥界面连接件设计时，应考虑竖向荷载、拉索索力、预应力、收缩徐变等荷载的作用及其组合，尤其应注意辅助墩处、拉索锚固点处、预应力束端部、梁端等关键受力位置的剪力钉合理布置。

条文说明

同济大学博士论文《大跨度钢-混凝土组合梁斜拉桥关键技术研究》，基于考虑滑移的组合梁单元，进行了大跨径组合梁斜拉桥主梁钢混界面连接件设计方法研究，指出连接件设计需考虑竖向荷载及水平荷载，并指出连接件设计需注意的关键部位。

7.8.9 组合桥面板中钢混界面连接件设计时应考虑局部车辆荷载效应与总体车道荷载效应的叠加。

7.8.10 局部计算

1 主梁与索塔连接区、索梁锚固部位、混合梁的钢混结合部等受力复杂区域应进行结构局部分析。

2 索梁锚固部位应进行局部稳定分析和疲劳分析；必要时应对索梁锚固结构进行模型静载、疲劳试验，疲劳模型宜采用足尺比例。

条文说明

本条明确提出索梁锚固区应力计算宜采用空间有限元方法进行计算。锚固区受力复杂，应力集中十分明显，有限单元法是目前锚固区应力分析广泛采用且行之有效的数值解法，采用平面有限单元法计算锚固区应力，难以全面反应锚固区应力的真实性。对于索力大的重要大型桥梁锚固区，除采用空间有限元方法进行计算外，建议增加试验验证。

斜拉索锚固结构等疲劳敏感部位的疲劳试验宜采用足尺比例模型，重点解决模型尺寸、制造工艺、加载及边界条件等方面与实桥的相似问题，以保证由试验确定的关键细节疲劳强度等级的可靠性。

8 索塔及基础

8.1 一般规定

8.1.1 索塔设计除应满足施工及运营阶段结构强度、刚度、稳定性、耐久性等要求外，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。

8.1.2 索塔可根据不同需要，采用钢筋混凝土索塔、钢索塔或钢-混凝土混合式索塔。

8.1.3 在沿海等风速较大地区建造大跨斜拉桥，桥塔尤其是钢塔的形式及截面设计时宜开展抗风性能专题研究，必要时尚应考虑设置制振设施。

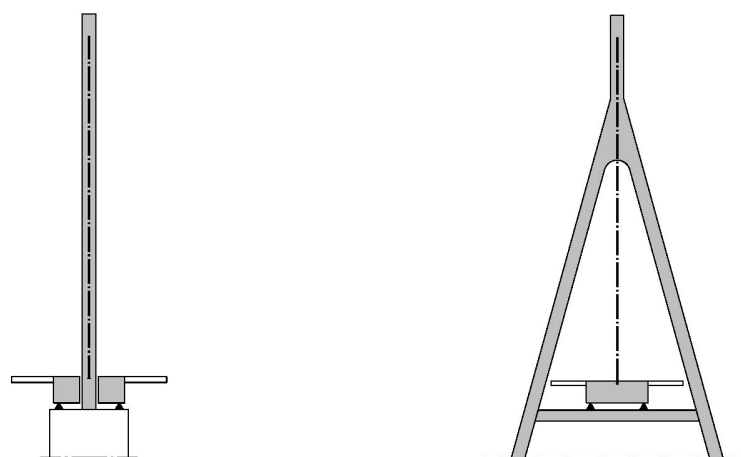
条文说明

在沿海等风速较大地区建造斜拉桥，如塔柱采用钢结构，其质量和阻尼均较小，易发生涡激共振，对部分高塔，尚有发生弛振的可能性，一般需进行相关抗风性能研究，以确定桥塔形式及截面。对日本名港东大桥的桥塔形状曾经研究过倒 Y 形及倒 V 形塔架，但研究表明塔架在桥轴方向的风会引起面内的发散振动，故增加了上横梁成为 A 形塔。中央大桥与东大桥的塔高分别为 190m 与 125m。中央大桥为防止桥轴方向的风荷载引起面内的发散振动，塔柱采用八角形截面，而东大桥则采用矩形截面。日本多多罗大桥塔高 220 m，采用钢质单箱室塔，塔肢的断面型式为矩形切去四个角隅，有利于抗风。南京长江第三大桥塔高 215m，根据气动外形比选结果，最终选择 0.8×0.7m 作为切角尺寸。香港昂船洲大桥桥塔高 300m，原桥塔顶部 118m 为圆柱形的钢结构，风洞测试显示较轻的钢结构桥塔容易受到涡激振动的影响，而引致拉索线性共振的风险。最终桥塔上端通过采用不锈钢外壳和混凝土组合的截面，使桥塔具有较好的抗风性能。

8.1.4 索塔设计应满足航空限高、防雷、航空警示等要求。

8.2 索塔的形式

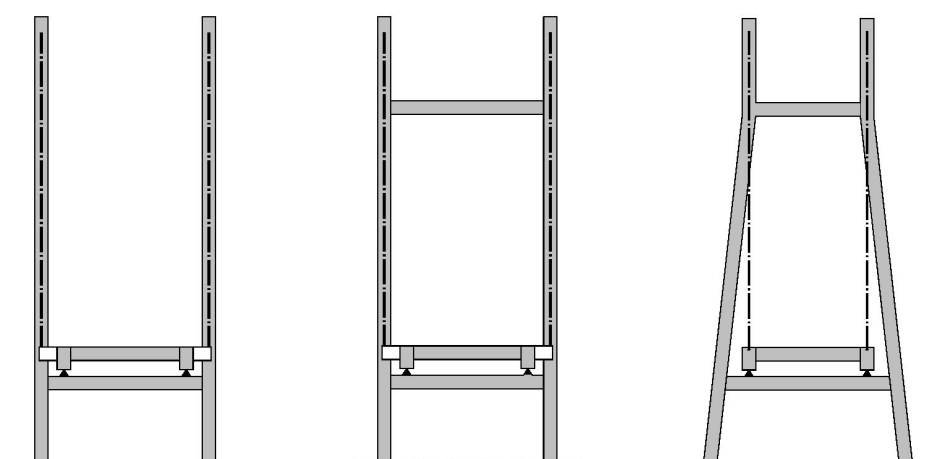
8.2.1 支撑中央索面的桥塔基本形式有单柱式、倒 Y 形式等，如图 8.2.1 所示。



(a) 单柱式 (b) 倒 Y 形式

图 8.2.1 支撑中央索面的桥塔基本形式

8.2.2 支撑双竖向索面的桥塔基本形式有双柱式、门形式及 H 形式等，如图 8.2.2 所示。



(a) 双柱式 (b) 门形式 (c) H 形式

图 8.2.2 支撑双竖向索面的桥塔基本形式

8.2.3 支撑空间索面的桥塔基本形式有单柱式、A 形式及倒 Y 形式等，如图 8.2.3 所示。

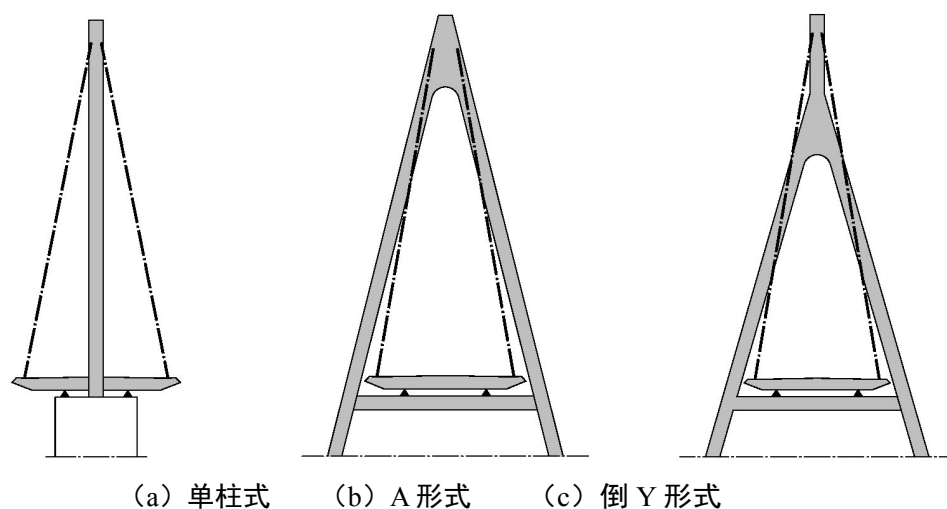


图 8.2.3 支撑空间索面的桥塔基本形式

8.3 构造要求

8.3.1 主梁与塔柱下横梁顶面之间的距离应满足相关支座、纵向或横向限位装置高度及施工、养护需要。

8.3.2 混凝土索塔

1 中小斜拉桥桥塔可采用矩形截面，大跨径斜拉桥桥塔宜采用多边形或弧线形截面，以减小风阻。

2 混凝土塔柱一般采用具有单个箱室的空心截面，空心截面塔柱底部宜设置壁厚渐变段或塔座。

3 索塔钢筋构造应符合下列规定：竖向受力钢筋的直径不宜小于 25mm，竖向受力钢筋的截面积不宜小于混凝土截面面积的 1%；箍筋直径不应小于 16mm，且不大于 200mm。

4 混凝土索塔的门洞部位应增设加强钢筋。

5 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。

8.3.3 钢索塔

1 钢索塔宜设计成空心箱截面形式，根据工程实际也可将其设计为带竖隔板的大格室截面形式。箱室各主壁板上应布置竖向加劲肋，箱室内应设置水平横隔板，其间距不宜大于 4m，且不大于桥塔短边尺寸的 2 倍。

2 钢索塔外壁板及竖向隔板的厚度根据受力需要可沿索塔内分段取用不同的壁板厚度，但不宜小于 20mm。

3 钢塔柱与承台宜采用端承压板式、埋入式或端承压板式与埋入式结合的方式连接。

条文说明

目前，钢塔柱与桥塔基础的连接方式主要有端承压板式连接、埋入式连接或端承压板式与埋入式结合的方式连接。

埋入式连接是将塔柱底节的一部分埋入基础中。采用埋入式连接时，如何使塔柱的壁板和混凝土充分结合在一起，并且能够使荷载均匀传递，是设计和施工的主要问题。常用的方法有在壁板上设置剪力钉或者采用 PBL 开孔剪力键。

端承压板式连接是将钢结构根部通过承压板和预埋在混凝土中的大型锚固螺栓或钢绞线预应力连接在一起。在这种连接方式中，钢结构根部的压力是通过承压板传递到混凝土，而弯矩和剪力则是通过锚固螺栓传递，大多数钢索塔同基础承台连接采用这种形式构造。由于刚度和强度上的要求，承压板通常采用很厚的钢板。为了能够均匀传递塔柱根部的压力，承压板与混凝土承台之间必须保持密切接触。端承压板式连接的传力机理明确，易于施工。斜拉桥混合桥塔采用该连接方式的如港珠澳大桥江海直达船航道桥、杭州之江大桥。

埋入式连接和端承压板式连接在力学性能上各具优势：埋入式连接中钢结构通过剪力连接键与混凝土作为整体构造共同传力，整体刚度大，竖向抗压承载力强；端承压板式连接中高强度螺栓或钢绞线提供了预压应力，可分担混凝土基础中产生的拉应力，在钢桥塔水平向荷载不平衡状态下，塔基有较强的抗弯抗拔能力。同时，两种连接方式也都存在一些不足：埋入式连接中，拉应力是通过剪力连接键逐步传递给混凝土基础，当存在受拉荷载时，基础上部混凝土中可能产生拉应力；端承压板式连接中，钢桥塔产生的竖向压应力仅依靠桥塔底部的厚钢底板传递给混凝土，极限抗压承载力相对较小。依据端承压板式连接和埋入式连接各自的特点，在设计时可考虑二者的混合式连接，即钢桥塔根部的压应力，通过埋入在混凝土基础中的桥塔节段沿整个埋设高度范围内，以剪力形式传递到混凝土中，而拉应力则通过预应力传递到混凝土基础中。混合连接方式既可避免单纯采用埋入式连接时可能产生拉应力这一不足，又可以使塔基有富余的承载力，但是施工复杂，造价较高。

4 钢塔柱节段高度划分应充分考虑工厂制造能力、运输和施工吊装能力。

5 钢塔柱节段间连接形式主要有全焊接接头、端面金属接触+摩擦型高强螺栓并用接头、栓接+焊接接头。连接形式应保证节段间应力的合理传递，同时还要兼顾加工制造及架设的可行性、经济性和景观等。

条文说明

全焊接接头的优点是：塔柱压力经焊缝传递，传力直接；没有拼接板，材料利用率高；有利于涂装施工和维修；塔外无拼接板，景观较优；可微量调整主塔架设垂直度等。但由于现场高空焊接作业，受气候条件影响较大，施工周期较长。焊接变形对主塔，特别是高度较高、厚度较大的钢塔，整体架设精度影响很大。因此，适用于一定高度的塔柱。日本中央大桥钢塔高 190m，现场节段之间主要为焊接连接。

端面金属接触+摩擦型高强螺栓并用接头塔壁压力由两节段端面金属接触与摩擦型高强螺栓共同传递。拼接板不仅可以传递压力，而且有抑制塔壁面外变形的效果。但端部接触面有间隙时，拼接板会产生弹性变形，当弹性变形量克服间隙量时，才能使塔壁端面传递接触压力。所以，端面接触率是保证传力的基本点。为此，该接头要求较高的主塔垂直度、端面平面度和接触率，并且端面接触传力与摩擦传力比例分配随着塔壁和纵向肋接触率不同而变化。该接头形式的近视景观效果稍差，并且因有拼接板和高强螺栓，加大了涂装施工及维修作业，拼接板未覆接缝处的防腐需特殊处理，容易出现涂装过早劣化的情况。我国钢索塔多采用高强螺栓连接的形式，如南京长江第三大桥。

栓接+焊接接头塔壁采用对接焊连接，纵向肋采用摩擦型高强螺栓连接。相对栓接与端面金属接触率结合方式，该方式塔壁内力经焊缝传递，传力直接，既可承受压力也可承受拉力；焊缝用量相对较少，省掉大规模高强螺栓以及拼接板数量；从制造工艺上，可以省略掉“全端面机加工”环节；索塔安装的线形调整，通过焊缝间隙方便调整，降低了施工控制难度；外壁板采用焊接，接头密闭不容易锈蚀，利于养护管理；表面光滑也有利于索塔的景观。相对全断面焊接方式，本方式可以减少焊接工作量，同时可以加快工程进度；同时加劲肋上预留螺栓孔可配合吊耳作为临时吊点用；在索塔节段安装过程中，加劲肋高强螺栓可用来连接定位，并承受节段自身重量，便于四周壁板的焊接作业。日本鹤见航道桥、我国之江大桥钢索塔采用该连接形式。

总之，钢索塔节段间现场连接形式的选择首先需要保证节段间应力的合理传递，同时还要兼顾加工制造及架设的可行性、经济性和景观等。目前而言，高索塔一般采用端面金属接触+摩擦型高强螺栓并用接头，较低的景观索塔则一般采用焊接连接。

8.3.4 混合索塔

- 1 竖向混合索塔钢混结合区宜选择在桥面位置处或索塔锚固区底部。
- 2 钢-混凝土混合式索塔的构造要求应符合混凝土塔柱及钢塔柱的相关构造规定。
- 3 应根据结合部受力特点及景观需求合理选择埋入式、端承压板式、有格室承压板式等钢-混凝土之间的连接方式。
- 4 空心截面塔柱与钢横撑连接处的塔壁应局部加厚。
- 5 钢横撑与混凝土塔柱中钢预埋件的连接方式可采用栓接、焊接或栓焊结合方式，钢横撑两端宜设置嵌补段。

6 钢横撑设计应考虑制造安装、运营期检修及防腐等要求。

条文说明

随着桥梁技术的发展，并为充分发挥钢材及混凝土材料的技术优势，近年来混合塔在大跨径斜拉桥中逐渐得到推广应用。钢-混凝土混合索塔一般有塔柱采用钢-混凝土混合形的，也有塔柱采用混凝土结构，横梁或剪刀撑采用钢结构，如武汉阳逻长江大桥索塔。

对于塔柱采用混合型的桥塔，钢-混凝土结合部位置的选择非常重要。一般情况，主塔钢混结合段的位置主要选择在承台顶面，日本大多数桥梁均如此。当水位变化较大，考虑钢结构耐久性及船舶撞击等因素，部分桥梁将钢混结合段设置在桥面附近。南京长江三桥下塔柱及下横梁采用混凝土结构，其上部分采用钢结构。尚有部分斜拉桥混合塔为使索塔锚固区结构简单、受力明确，索塔锚固区采用全钢结构，锚固区以下塔柱采用混凝土结构，如宁波大榭二桥。

目前，钢塔柱与混凝土塔柱（桥塔基础）的连接方式主要有埋入式连接、端承压板式连接、有格室承压板式连接三种。

埋入式连接是将塔柱底节的一部分埋入混凝土塔柱中。采用埋入式连接时，如何使塔柱的壁板和混凝土充分结合在一起，并且能够使荷载均匀传递，是设计和施工的主要问题。常用的方法有在壁板上设置剪力钉或者采用 PBL 开孔剪力键。混合桥塔采用该连接方式的有南京长江三桥、日本鹤见航道桥。

端承压板式连接是将钢结构根部通过承压板和预埋在混凝土中的大型锚固螺栓或钢绞线预应力连接在一起。在这种连接方式中，钢结构根部的压力是通过承压板传递到混凝土，而弯矩和剪力则是通过锚固螺栓传递，大多数钢索塔同基础承台连接采用这种形式构造。由于刚度和强度上的要求，承压板通常采用很厚的钢板。为了能够均匀传递塔柱根部的压力，承压板与混凝土承台之间必须保持密切接触。端承压板式连接的传力机理明确，易于施工。混合桥塔采用该连接方式的如马鞍山长江公路大桥中塔。

有格室承压板式是利用钢塔腹板、壁板和加劲板形成钢格室，在格室中浇筑混凝土，并在格室四周的板件内侧布置焊钉连接件，在格室端部布置承压板。混合塔结合部由钢塔加劲过渡段和钢-混凝土结合段组成。结合部将钢塔所受的轴力、剪力、弯矩通过钢塔加劲过渡段加以分散，再通过结合部钢格室的承压板、抗剪连接件的过渡段作用传递给格室填充混凝土，进而传递给混凝土塔。根据承压板位置的不同，具体可分为有格室前承压板式，如宁波大榭二桥及有格室后承压板式，如南京青奥跨江景观桥。

总体而言，埋入式结合段混凝土浇筑质量容易保证，其作用力全通过连接件传递，需要较长的结合段，连接件受力较大。端承压板式结合段构造简单，应力传递直接，截面的刚度变化比较大，由于刚度和强度上的要求，需设置较厚的承压板，为了能够均匀地传递压力，承压板与混凝土承台之间必须保持密切接触。有格室承压板式相对于埋入式及端承压板式结合段刚度过渡均匀，应力扩散好，塔柱横向尺寸连续、景观效果占优，但构造相对复杂。混合桥塔设计时，应根据结合部受力特点及景观需求合理选择钢-混凝土之间的连接方式。

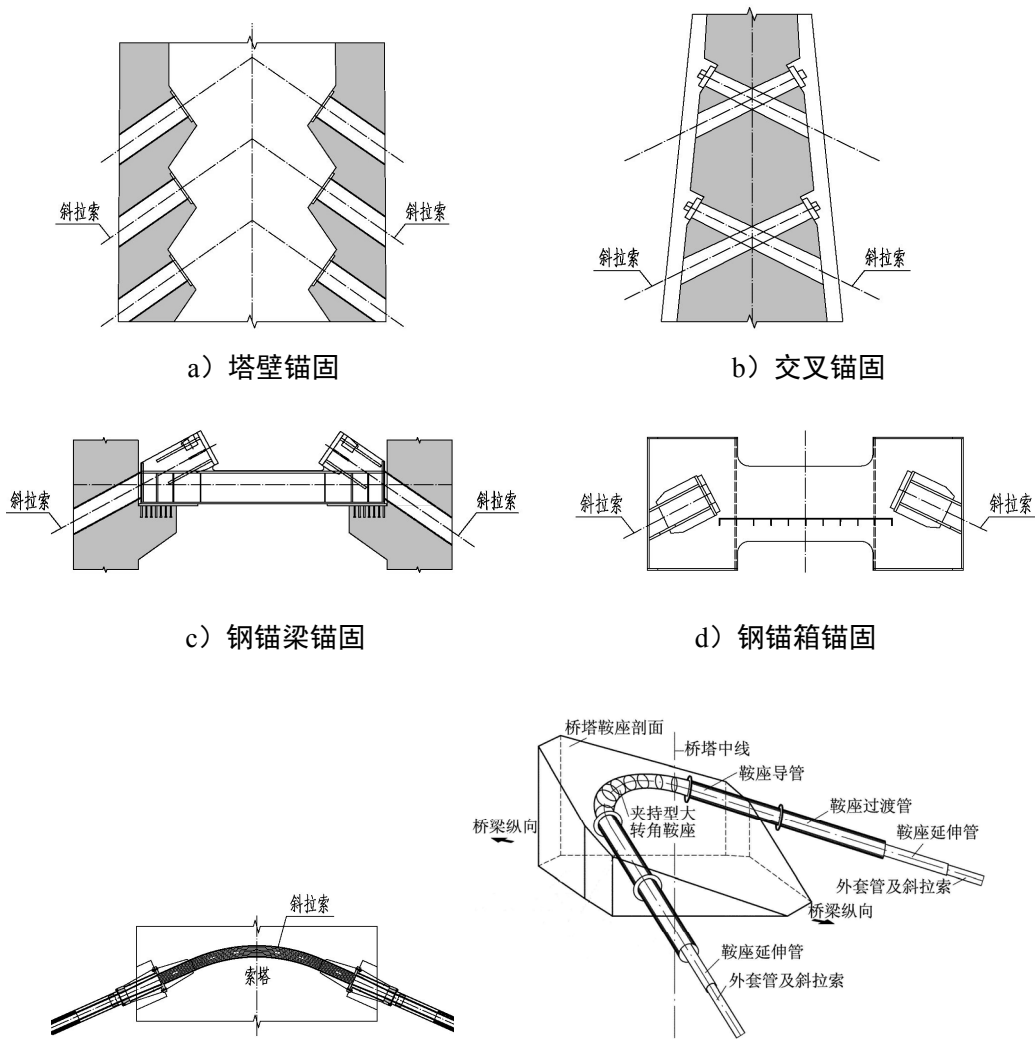
8.4 斜拉索塔端锚固构造

8.4.1 索塔锚固区的构造需从设计、施工、养护维修及拉索的更换等各个方面综合考虑确定，须达到传力可靠、安全耐久、造型美观、易于维护的要求。

8.4.2 斜拉索与混凝土索塔的锚固宜采用塔壁锚固、交叉锚固、钢锚梁锚固、钢锚箱锚固、鞍座式锚固、回转式锚固等形式（图 8.4.2），可根据索塔的类型、拉索的布置、索力的大小等选择合理的一种或多种锚固方式。

条文说明

索塔拉索锚固区是斜拉桥中的关键部位，拉索的局部集中力将通过这一部位安全、均匀地传递到塔柱中。索塔斜拉索锚固部位的构造，与斜拉索布置、斜拉索的根数和形状、塔型与构造、斜拉索牵引和张拉等种种因素有关，故应从设计、施工、养护维修及斜拉索的更换等各方面综合考虑锚固段的合理构造。



e) 鞍座式锚固

f) 回转式锚固

图 8.4.2 斜拉索与索塔锚固形式示意

表 8.4.2-1 列举了部分国内外著名斜拉桥混凝土索塔的锚固形式。

表 8.4.2-1 国内外著名斜拉桥混凝土索塔锚固形式一览表

桥名	主跨 (m)	建成 时间	锚固类型	具体型式
杨浦大桥	602	1993	塔壁锚固	
南京长江二桥	628	2001	塔壁锚固	
珠江黄埔大桥	383	2008	塔壁锚固	
厄勒海峡大桥	490	2000	钢锚箱	内置式
苏通长江大桥	1088	2008	钢锚箱	内置式
香港昂船洲大桥	1018	2009	钢锚箱	内置式
上海长江大桥	730	2009	钢锚箱	内置式
鄂东长江大桥	926	926	钢锚箱	内置式、预应力
法国诺曼底桥	856	1995	钢锚箱	外露式
香港汀九桥	475	1998	钢锚箱	外露式
杭州湾大桥北航道桥	448	2008	钢锚箱	外露式
重庆东水门大桥	445	2014	钢锚箱	外露式
加拿大安纳西斯桥	465	1986	钢锚梁	
南浦大桥	423	1991	钢锚梁	混凝土牛腿、滑动连接
东海大桥主航道桥	420	2005	钢锚梁	混凝土牛腿、固定连接
金塘大桥	620	2009	钢锚梁	空间索、钢牛腿、滑动连接
荆岳长江大桥	818	2010	钢锚梁	钢牛腿、先滑动后固定
闵浦大桥	708	2010	钢锚梁	混凝土牛腿、滑动连接
漳州战备大桥	132	2001	鞍座式锚固	双套管式
上虞曹娥江大桥	110	2007	鞍座式锚固	单套管式
怀洪新河特大桥	130	2011	鞍座式锚固	分丝管式
美国 Glass City Skyway 桥	187	2007	鞍座式锚固	分丝管式、常规斜拉桥
芜湖二桥	806	2017	回转式锚固	

交叉锚固适用于早期的中小跨径斜拉桥，现已较少采用；鞍座式锚固主要应用于部分斜拉桥；回转式索塔锚固目前实例较少。斜拉索塔端锚固主要有混凝土塔壁锚固、钢锚梁锚固、钢锚箱锚固，三种方式各有其优缺点。混凝土塔壁锚固方案构造简单、造价便宜，往往通过设置预应力以提高混凝土的抗拉能力；缺点在于施工相对复杂，高空作业施工精度和质量控制难。钢锚箱锚固方案力学性能有保证，定位简单、施工方便；但构造复杂、用钢多、造价贵。钢横梁锚固方案受力明确，但现场施工对每组牛腿位置均需精确定位，施工较为不便。三种主要索塔锚固方式的比较详见表 8.4.2-2。

表 8.4.2-2 三种主要索塔锚固方式比较

项目	混凝土塔壁锚固	钢锚梁	钢锚箱
受力机理	上塔柱锚固区段参与主塔整体受力，将拉索锚固集中力传递至单侧塔壁，为防止开裂，平衡塔柱壁的拉应力，在其周边施加平面预应力。	锚固钢横梁本身是独立的构件，支撑于塔柱内侧牛腿上，平衡两侧拉索的大部分水平分力，拉索的竖直分力传递至塔柱内侧牛腿。	两侧拉索的水平分力主要通过钢锚箱来平衡，部分水平分力由混凝土塔柱承受，竖直分力通过锚箱竖板的剪力键传递到塔柱混凝土中。
安装精度	锚固系统全部在现场完成，由于在高空作业，锚垫板的角度及位置控制较难。	工厂完成钢横梁制作，现场施工对每组牛腿位置均需精确定位。	钢锚箱在工厂预制完成，容易控制锚固点的位置和角度，现场仅需控制塔柱整体精度。
施工	需要多次张拉预应力	钢锚梁的安装在对应塔柱施	对吊装能力有一定要求，钢

要求		工完成后，对塔柱内部空间有要求，安装不很方便。	锚箱在浇筑对应塔柱混凝土前拼装，施工较为方便。
后期养护	仅锚头需养护	比钢锚箱方案小。	后期养护工作量较大
费用	较低	较高	较高

8.4.3 斜拉索与混凝土索塔锚固的基本构造应符合下列规定：

1 塔壁锚固

空心塔上的侧壁锚固，应在空心塔柱的壁板内配置预应力钢筋，并应避免出现预应力盲区。

2 钢锚梁锚固

钢锚梁锚固体系主要由钢锚梁、牛腿和限位装置构成。钢锚梁与塔壁牛腿之间可采用滑动连接或固定连接的方式，牛腿可采用钢筋混凝土牛腿或钢牛腿。

条文说明

钢锚梁式锚固体系主要由钢锚梁、牛腿和限位装置构成。

钢锚梁与塔壁牛腿之间可采用滑动连接或固定连接的方式。对于采用钢锚梁与塔壁牛腿滑动连接方式的斜拉桥，其恒载索力的水平分量一般由钢梁自身承担，塔壁承担的水平分量很小，能有效的提高索塔锚固区的抗裂性能。但在运营期间当斜拉索换索时及可能出现的断索情况下，主塔将会承担较大的不平衡水平分力。也有部分斜拉桥采用了钢锚梁与塔壁固定的连接方式，即钢锚梁安装后与牛腿预埋件焊接，共同承担拉索水平力。此时钢锚梁能够更好的与塔壁共同受力，但混凝土塔壁受到的水平力比前种方式较高。还有一种先滑动后固结的连接方式，即张拉前钢锚梁一端固定一端滑动，张拉后改为两端固定；这样恒载作用下的水平索力主要由钢锚梁自身承担，活载的水平分力由钢锚梁和混凝土塔壁共同承担，能够有效的减小混凝土开裂的风险。

一般与钢锚梁链接的牛腿又可以分为钢筋混凝土牛腿和钢牛腿两类。混凝土牛腿直接与塔壁浇筑在一起，钢牛腿需要通过连接件与混凝土塔壁可靠连接。

3 钢锚箱锚固

1) 钢锚箱由侧板、端板、横隔板、锚垫板、承压板、支承板等焊接而成的箱型结构。

2) 混凝土索塔可根据桥塔断面、受力特点、拉索张拉及养护维修需要分别选用内置式和外露式钢锚箱，应通过可靠的连接方式将钢锚箱与混凝土索塔固结。

3) 钢索塔的钢锚箱与钢塔壁应焊接成整体。

条文说明

对于混凝土索塔，主要有内置式和外露式两种钢锚箱形式。内置式钢锚箱设置在混凝土塔柱的内部，在索塔的外侧不能看到钢锚箱。外露式钢锚箱把混凝土索塔在锚固区分成两部分，在索塔的外侧能够看到钢锚箱的一部分。内置式钢锚箱和外露式钢锚箱两者结构形式类似，只是与混凝土塔壁相对位置不同而造成的受力分摊不同而已。采用两种钢锚箱锚固方案，钢锚箱自身应力水平相差不大。外露式钢锚箱张拉空间大，可适应小尺寸塔柱；但顺桥向伸长量较大，混凝土塔壁水平应力较高，为保证钢锚箱侧壁与混凝土塔壁的抗剪效果及抵抗索塔的拉应力，必须在塔壁施加预应力。而内置式锚固可设置普通钢筋控制强度及其裂缝，或施加预应力限制裂缝。钢锚箱的具体结构构造形式及应用特点各有千秋，需根据实际情况在方案比较基础上进行适宜的设计。

4 鞍座式锚固

可根据需要采用套管式和分丝管式两种体系，其锚固构造应考虑斜拉索更换的需要。

条文说明

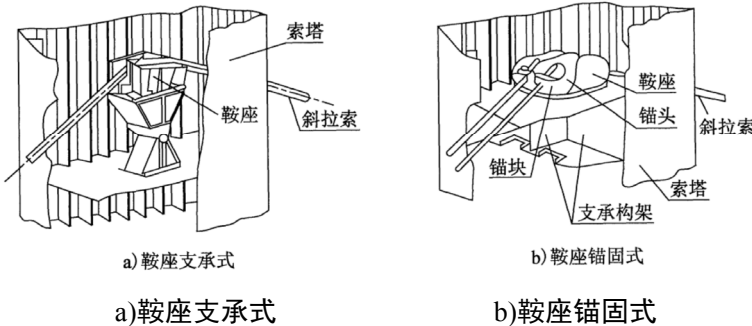
套管式又可以分为单套管式和双套管式两种。单套式只有一层钢套管预埋于混凝土桥塔中，钢绞线整捆穿过钢套管。这种锚固方式锚固构造简单，占用空间较小，弯曲形状相似，因而可以将塔上索距设置的很小，最大限度地提高拉索使用效率，但是其最大的缺点是极难进行斜拉索的更换。

双套管式鞍座是由两层套管组成，外层套管预埋于混凝土桥塔中，内层套管放置于外层套管之中，在内外层套管之间存在一定的间隙使得在换索时内套管可以被抽出。双管式鞍座同单管式一样存在一定的缺陷，如内外层套管之间成线接触，产生应力集中；套管中的各根钢绞线相互叠压在一起，受力不均匀。

在分丝管式鞍座锚固区里，每一根钢绞线穿过对应的分丝管，形成分离式布置，钢绞线之间互不干涉。有效地克服了套管式鞍座的上述缺点，同时当各钢绞线相互分离后，在发生小半径弯曲时能有效的降低弯曲应力，因而成功解决了大直径斜拉索不能小半径弯曲的问题。

5 索塔锚固区环向预应力筋曲率半径不宜小于 1.5m。

8.4.4 斜拉索与钢索塔的锚固宜采用鞍座支承式、鞍座锚固式、锚固梁式、锚固箱式、锚管式，如图 8.4.4 所示。



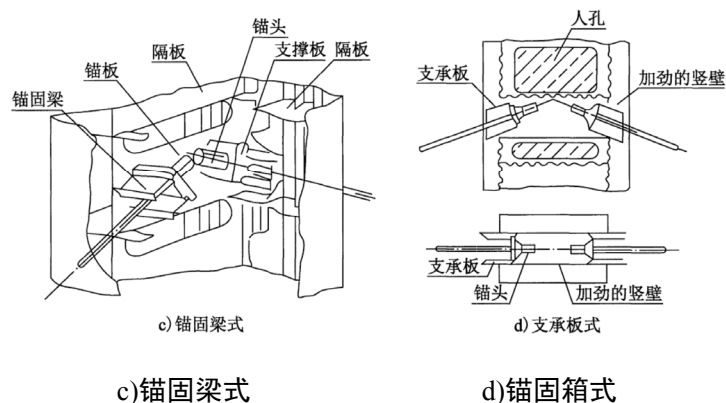


图 8.4.4 斜拉索与钢索塔的锚固方式示意

条文说明

由于采用纯钢结构，钢锚箱+钢塔壁的锚固形式受力顺畅、传力合理，适用范围广泛，如南京三桥、宁波大榭二桥斜拉索锚固于焊接在两道腹板的锚箱上。武汉九龙大桥斜拉索采用锚管式锚固于钢索塔纵隔板上。

表 8.4.4 国内外著名斜拉桥钢索塔锚固形式一览表

桥名	主跨 (m)	建成 时间	锚固类型
南京长江三桥	648	2005	钢锚箱
宁波大榭二桥	392	2013	钢锚箱
武汉九龙大桥	95	2007	锚管式

8.5 结构计算

8.5.1 斜拉桥结构分析时应准确建模索塔锚固细节构造，当两侧拉索交点与主塔中心线有一定的偏心时，索塔计算分析中需要考虑偏心的影响。

条文说明

斜拉桥结构分析时应准确建模索塔锚固细节构造。当边中跨拉索倾角一致时，边中跨拉索在桥塔的索锚点标高一致，且交点位于主塔中心线上。然而，大多情况下边中跨拉索斜率不同。此时，如需要拉索交点位于主塔中心线处，索锚点将位于不同标高；反之，索锚点标高相同则拉索交点将与主塔中心线有一定的偏心（图 8.5.1）。主塔设计时，为简化索塔锚固细节，往往采用后一方案，当然索塔计算分析中需要考虑偏心的影响。

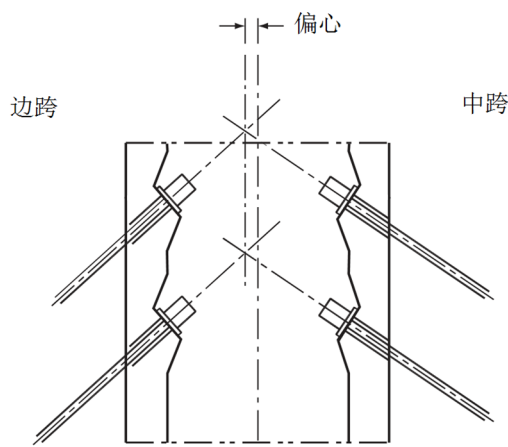


图 8.5.1 拉索交点与主塔中心线偏心示意

8.5.2 混凝土索塔截面强度的验算，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 的要求。

8.5.3 钢索塔截面强度的验算，应符合现行《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的要求。

8.5.4 索塔可采用二维计算模型分别按顺桥向和横桥向两个方向的施工和成桥运营两个阶段进行整体计算分析。

8.5.5 索塔应验算施工和成桥阶段结构整体稳定性，弹性屈曲稳定安全系数不应小于 4。钢塔设计应进行整体稳定性和局部稳定性计算，并应保证局部失稳不先于整体失稳发生。

条文说明

钢桥塔的局部稳定和整体稳定具有同等重要的意义。钢桥塔整体稳定验算时所用的有效压屈长度，分别按桥塔面内与面外弹性压屈进行分析，根据最小固有值反算有效压屈长度，或由计算图式推算的方法计算。钢桥塔的整体失稳可以通过增大塔柱截面、增加构造措施等方法，提高桥塔的稳定安全系数而加以防止。局部失稳也可通过增加构造措施，减小板件的宽厚比，使其后于桥塔的整体失稳发生或者不发生。通常的做法是在塔壁钢板内部布置若干纵向加劲肋，箱室上、下相隔一定距离设置水平横隔板，在横隔板之间布置横向加劲肋。若箱室较大时，还可在塔柱顺桥向和横桥向设置竖隔板，将塔柱截面分为多室。

在确定了钢塔的截面形状和整体尺寸之后，可根据索塔在施工中与成桥后的受力状况，确定截面高度方向上的壁板厚度的变化。钢桥塔的构造对于防止板件的失稳有着重要的作用，如横隔板的间距、厚度，加劲肋的间距、尺寸等的合理取值，对保证钢桥塔的稳定会起到决定性的作用。钢桥塔中沿竖向每隔一段距离布置横隔板，在桥塔壁板和横隔板相接处为塔壁板提供了弹性约束，可提高壁板的承载能力。由于在塔柱自由长度范围内，作用在塔柱截面上的扭

矩很小，在确定横隔板的间距和数量时通常只需考虑面板的屈曲。钢桥塔中的纵向加劲肋可以减小壁板的宽厚比，增加壁板的抗面外失稳能力。加劲肋的规格尺寸与间距确定，根据截面受力需要和横隔板的约束情况以壁板与腹板不发生局部屈曲为原则，以尽可能使截面各个部分均不产生应力折减为宜。在钢桥塔的设计中，横隔板的间距一般可参考 4m，加劲肋的间距可参考为壁板厚的 30~40 倍，加劲肋厚度等于或者略小于壁板厚度为宜，加劲肋宽度则需满足规范关于宽厚比要求，板式加劲肋宽厚比取值约为 15~20。

8.5.6 索塔与横梁、索塔与主梁连接区、应力集中以及锚固部位等结构局部分分析和应力计算均可采用有限元方法，所取计算区域应能确保分析点的应力与实际相符。

8.5.7 基础计算

1 常规基础计算应符合现行行业标准《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363 的要求。

2 应计入墩、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。

条文说明

由于斜拉桥墩、塔都较高大，施工误差不可避免，对于基础设计计算来说，主要有两部分必须考虑：一是塔、墩底与基础交接面截面形心不在同一点；二是墩、塔轴线偏差。对于大跨斜拉桥，主墩、塔传给基础的轴力较大，一般有万吨级，该轴力相对于上述两种偏差，都会对基础产生很大的附加力。

9 斜拉索

9.1 一般规定

9.1.1 斜拉索应结合起重、运输和安装等条件选用平行钢丝斜拉索或钢绞线斜拉索。

9.1.2 斜拉索下料制作前，应根据实际索塔与主梁安装线型、斜拉索实测弹性模量，对斜拉索的无应力长度进行修正。

9.1.3 斜拉索设计时应考虑换索的需要。

9.2 构造要求

9.2.1 斜拉索作为一个独立构件，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。

9.2.2 斜拉索索端预埋管内应设置减振装置，并应在索与预埋管之间采取可靠的防水、防潮措施。

9.2.3 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，本条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。

9.2.4 大型斜拉桥或在多风多雨特殊地区，斜拉索应考虑其减振措施。

9.2.5 平行钢丝斜拉索

1 平行钢丝斜拉索设计应符合现行国家标准《斜拉桥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 的要求。

条文说明

现行《斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索》GB/T 18365 对斜拉桥用高强钢丝斜拉索的规格型号、技术要求、试验方法、检验规则等作出了规定。现行《大跨度斜拉桥平行钢丝拉索》JT/T 775 对大跨径斜拉桥用平行钢丝斜拉索的结构、规格与型号、技术要求等作出了规定。

2 单根钢丝应采用镀层或环氧涂层进行防护，其性能应符合相关国家和行业标准。

条文说明

目前常用的平行钢丝一般采用镀层或涂层进行防护，其中镀层钢丝满足《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》GB/T 17101 的要求；环氧涂层钢丝满足《缆索用环氧涂层钢丝》GB/T 25835 要求；也可采用满足国家和行业标准的其他新产品。

3 平行钢丝斜拉索应采用外挤单层或双层高密度聚乙烯护套防护形式，对耐久性要求更高的可增加外缠氟化膜胶带。

4 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。

9.2.6 钢绞线斜拉索

1 钢绞线斜拉索的设计应满足现行国家标准《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》GB/T 30826 及现行行业标准《无黏结钢绞线斜拉索技术条件》JT/T 771 的要求。

条文说明

现行《斜拉桥钢绞线拉索技术条件》GB/T 30826 对斜拉桥钢绞线拉索的结构、技术要求、产品验收检查、拉索防腐剂防护、拉索安装、拉索更换、拉索的检查等作出了规定。现行《无黏结钢绞线斜拉索技术条件》JT/T 771 对无黏结钢绞线斜拉索的构造、规格型号、技术要求、试验方法及安装要求作出了规定。

2 斜拉索用钢绞线应采用满足现行国家标准的高强度低松弛钢绞线。

条文说明

填充型环氧钢绞线需满足《环氧涂层七丝预应力钢绞线》GB/T 21073 要求；单丝型环氧钢绞线采用《单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线》GB/T 25823 要求；镀锌钢绞线采用《预应力热镀锌钢绞线》GB/T 33363 要求。

3 单根钢绞线宜进行镀锌或环氧树脂涂覆等防腐处理，且外包挤黑色高密度聚乙烯护套，整束钢绞线外护套可采用高密度聚乙烯管。

4 钢绞线斜拉索锚具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。

条文说明

斜拉索中使用的夹片式锚具与工程中通常使用的有黏结预应力夹片式锚具是不同的。用于斜拉索的夹片式锚具通常具备一些特殊的构造功能，如使钢绞线在进入群锚的锚板后穿过一个压板，在索力调整完毕后，将夹片压紧放松。

5 钢绞线斜拉索锚具宜考虑施工及运营期间的整体张拉要求。

9.2.7 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。

9.3 结构计算

9.3.1 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：

$$\frac{\gamma_0 N_d}{A} \leq \Phi_d f_d \quad (9.3.1)$$

式中： γ_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（mm²）；

Φ_d ——斜拉桥的结构体系修正系数，对于部分斜拉桥， $\Phi_d=1.5$ ；对于其余结构体系， $\Phi_d=1.0$ ；

f_d ——斜拉索的抗拉强度设计值（MPa），在持久状况下，按本规范第 3.3.1 或 3.3.2 条的规定取值，在短暂状况下，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行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定。其中部分斜拉桥斜拉索的疲劳应力幅应控制在 80MPa。

条文说明

本规定与《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01 保持统一。

9.3.2 斜拉索锚头验算规定参照现行《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64 的规定执行。

10 附属结构

10.1 桥面铺装

10.1.1 混凝土桥面板桥面铺装宜采用沥青混凝土桥面铺装或水泥混凝土桥面铺装，并应设置防水层。

10.1.2 水泥混凝土铺装层厚度不宜小于 80mm，混凝土强度等级不应低于 C40，可采用纤维混凝土。铺装层内应配有钢筋网，钢筋直径不应小于 10mm，间距不宜大于 100mm。

条文说明

桥面铺装采用沥青混凝土材料，是因为它易于重新铺筑，当沥青混凝土发生裂缝和产生剥落危及桥面板，须刨挖清理和重新铺筑更换桥面时，沥青混凝土材料较水泥混凝土材料易于施工。此外，沥青混凝土对车辆的剪切、冲击、磨损影响较小。

对于交通量不大，跨径小，桥面较窄或地理位置偏远的人行斜拉桥，在沥青混凝土材料施工有困难时，可采用水泥混凝土铺装。混凝土桥面铺装的强度等级不得低于 C40，铺装下宜设防水层。

10.2 桥面排水

10.2.1 桥面应设置足够的横向、纵向坡度和完善的排水设施。对桥面伸缩装置、排水孔及其与路缘石或其他构造接缝处等特殊部位，应进行专门的防、排水设计。

10.2.2 防排水构造应在主体结构设计时综合设计，局部构造细节不得影响结构的可维护性和耐久性，并应符合环保相关规范要求。

10.2.3 主体结构上易于积水处应设置相应的泄水孔，其孔径不应小于 50mm。

10.2.4 当桥面排水采用直排式时，出口排水不得腐蚀和污染钢结构。当采用汇集式时，泄水管孔径及数量应根据桥面汇水面积确定，排水口应设置于主体结构以外。汇集式的集水管与主体结构的连接，应适应桥面梁的变形需要。跨越桥梁伸缩缝的集水管应设置伸缩装置。

10.3 护栏和栏杆

10.3.1 防撞护栏的设计应按现行国家标准《城市道路交通设施设计规范》GB 50688、行业标准《公路交通安全设施设计规范》JTG D81、《高速公路交通工程及沿线设施设计通用规范》JTG D80 的有关规定进行。

10.3.2 桥面防撞护栏宜采用金属梁柱式护栏，应验算其与桥面板的连接强度。

10.3.3 桥梁栏杆及防撞护栏的设计除应满足受力要求以外，其栏杆造型、色调应与周围环境协调，对重要桥梁宜作景观设计。

10.4 伸缩装置

10.4.1 应根据桥梁伸缩量，按照现行行业标准《公路桥梁伸缩装置通用技术条件》JT/T 327 的要求选择性能好的伸缩装置。

10.4.2 桥面伸缩装置，应满足梁端自由伸缩、转角变形及使车辆平稳通过的要求。伸缩装置应采用经久耐用、防渗、防滑等性能良好，且易于清洁、检修、更换的材料和构造形式。材料及其成品的技术要求应符合国家现行相关标准的规定。

10.4.3 伸缩装置设计时，除应考虑温度变化、混凝土收缩徐变引起的水平位移及竖向荷载产生的变形外，尚应考虑汽车制动力、风荷载作用等，具体应根据结构受力分析确定。梁缝设计时，除应考虑上述因素外，还应考虑地震的作用，确保地震时相邻梁体之间不发生碰撞。

10.4.4 伸缩缝锚固部位宜采用高性能混凝土，混凝土强度等级不应低于C40，并做好接缝处理。

10.4.5 伸缩装置应考虑防水、排水辅助设施设计。

10.5 支座及限位装置

10.5.1 支座及限位装置的设置应根据桥梁总体计算分析确定，并应满足竖向、横向荷载传递功能和各向位移、转角的变形要求，宜提出主要材料、制造、检测试验、装配、安装与维护等技术要求。

10.5.2 支座宜设置防雨水及尘埃进入的防护罩，并应预留安装、维护的工作空间和设置安全防护栏杆等。

10.5.3 斜拉桥边跨端支点支座或辅助墩承受正负反力的支座应进行特殊设计。

10.5.4 设置支座处应预留支座更换时放置千斤顶的空间，并对该部位加强，满足支座更换时的受力需求。

10.6 除湿系统

斜拉桥主梁、索塔为钢箱结构时，为防止闭口钢箱结构内部发生锈蚀，宜设置内部除湿系统。闭口钢箱结构的对外出入通道口应设置密闭门，密闭门的要求应满足现行国家标准《船用风雨密单扇钢质门》GB/T 3477 的有关规定。

10.7 防雷、航空、航道

10.7.1 应按现行行业标准《大型桥梁防雷设计规范》QX/T 330 的相关规定设置防雷设施。

10.7.2 根据航空管理的要求，必要时应根据现行行业标准《航空障碍灯》MH/T 6012 设置航空障碍标志灯。

10.7.3 有通航要求时，通航孔处应按航道部门要求和现行国家标准《内河助航标志》GB 5863 设置桥涵标、导航装置。

条文说明

1 斜拉桥的索塔高度一般都在 100m 以上，防雷是必不可少的，因此增加此条文。

2 根据我国飞行区技术标准的规定，要求在飞行区域内高度超过 45m 的独立建筑物，都需设置不能中断照明的夜间航空障碍灯，以确保安全，障碍灯的布设应事先与民用或军用航空管理部门取得协议。从标志灯本身性能要求而言，应具有使用寿命长，维修方便，气候适应性好的特点。

3 对通航孔处，应按航道部门要求设导航灯标，使航行的船舶能及早发现并避开墩、台，防止撞击事故发生。

10.8 检修养护设施

10.8.1 斜拉桥应设置检修设施，主梁、主塔、辅助墩以及交界桥墩应设置检查平台、通道、围栏、升降机或电梯、内照明、人口井盖等专门供检查和养护用的设施。防雷系统、导航灯标、航空障碍灯应设置检修通道和工作平台。

10.8.2 特大桥、大桥宜配置检修车。索塔应根据需要预留运营期索塔外部检查、维护以及斜拉索检修、更换所需的预埋件及相关设施。

10.8.3 在设计阶段应根据构造特点提出桥梁检查、养护、维修的技术要求。

10.8.4 在设计阶段应设定养护工况，考虑养护设施及养护人员的荷载以及养护中结构重力的变化，进行养护工况的验算。

11 结构耐久性设计

11.1 一般规定

11.1.1 应根据设计使用年限的要求进行专门的耐久性设计。

11.1.2 不可更换构件的设计使用年限不应低于结构整体设计使用年限。

条文说明

组合梁斜拉桥的索塔、主梁的主体构造以及下部结构等属于不可更换构件。

11.1.3 可更换构件的设计使用年限可视具体情况小于结构整体设计使用年限，应明确其预定的更换次数，其设计使用年限不应低于表 11.1.3 的规定。

表 11.1.3 主要可更换构件的设计使用年限

构件	设计使用年限（年）	构件	设计使用年限（年）
斜拉索	20	钢支座	50
防撞护栏（主体）	50	盆式支座	25
桥面铺装	15	拉索阻尼装置	20
伸缩装置	15	塔梁阻尼装置	30

条文说明

表中所列设计使用年限为参考相关标准及工程得出的数据，为最低寿命，可结合结构自身实际情况、后期养护条件等因素，适当提高。

11.1.4 对斜拉索和其他可更换构件，必须在确保主体结构安全运营的前提下，考虑其检测与更换的可行性与方便性。

11.1.5 应进行大气环境、地上（下）水中腐蚀成分含量的测试与调查，划分结构所处的环境类别；处于不同环境的各个构件可采用不同的耐久性措施。

11.2 钢结构耐久性设计

11.2.1 应统筹考虑建设期和运营期，并结合施工方案、养护方案确定钢结构耐久性设计方案。

11.2.2 根据结构腐蚀重点、工艺要求，结构设计时应避免出现易于积水集

污的死角、未封闭焊缝及难以实施涂装施工的不良细节。

11.2.3 对无法进行检查和维护的钢结构，应考虑防腐富余度，或采用可靠的长效防护措施，或进行有效的密封防止腐蚀。

条文说明

对无法进行检查和维护的结构需参考有关环境的年腐蚀量，按照设计使用年限，计算出增加的额外厚度作为防腐富余度。

11.2.4 钢结构防腐应根据设计使用年限、环境条件等采用耐候钢、金属涂层（热浸或热喷涂锌、铝、锌铝合金等）、漆涂层、阴极保护或其组合。浪溅区、水位变动区部位宜采用重防腐涂层、金属热喷涂层加封闭涂层保护等措施，也可采用包覆有机复合层、树脂砂浆、复合耐蚀金属层等。

11.2.5 对封闭空间的钢结构，可采用除湿系统，封闭空间内的相对湿度宜小于 50%。

11.3 斜拉索耐久性设计

11.3.1 平行钢丝斜拉索的每根钢丝外表面应进行热熔镀锌或锌铝合金，镀锌层应大于或等于 300g/m^2 ，镀锌铝合金层应大于或等于 290g/m^2 ，整根斜拉索外应包裹 PE 层防护。钢绞线斜拉索可根据其类型采取相应的防腐措施。

条文说明

无论是平行钢丝斜拉索还是钢绞线斜拉索，或者其他新型拉索产品，均应对拉索进行防腐涂装并采取外包 PE 或缠包带等防护措施。

11.3.2 在斜拉索所有接口处应设置密封橡胶圈及密封压环等密封措施。

11.4 混凝土耐久性设计

索塔、组合梁中混凝土板的耐久性设计应符合行业标准《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310 的规定。

11.5 钢混结合部耐久性设计

11.5.1 应从混凝土配制、构造要求及施工工艺等方面防止钢混结合部接触

面脱空。

11.5.2 钢混接触面应做好防水、排水，必要时可设置密封胶等防水填塞料。

11.5.3 钢混结合部的钢结构应进行重防腐设计。

11.6 附属结构耐久性设计

11.6.1 铺装、栏杆、伸缩缝、支座、防雷设施、航空警示灯、桥涵标等附属设施的耐久性设计应满足相关标准的规定。

11.6.2 附属设施的耐久性设计方案在满足自身耐久性的同时，不应影响主体结构耐久性。

12 设计对施工、监控和管养的要求

12.1 一般规定

12.1.1 设计应根据桥梁规模、技术创新程度等对施工、施工监控和运营阶段长期监测等方面提出相应的技术要求。

12.1.2 设计应列出设计基准条件下斜拉桥的成桥索力与主梁线形。

12.1.3 设计应根据具体情况，对施工控制精度提出目标要求。

条文说明

设计与施工、监控、管养结合非常重要，但本章并不是具体提出施工、监控、养护的要求，那是施工规范、养护规范要解决的问题，这里只是提出为满足施工、监控及养护要求而在设计上应考虑的问题。

12.2 施工及施工监控要求

12.2.1 设计应考虑在索塔和桥墩基础顶面等预埋长期变形观测点，观测点应通视，稳定可靠。

条文说明

变形观测点可用于施工阶段和建成后的运营阶段对基础沉降、倾斜、滑移进行测量，不同类型基础和不同地质基础的观测点要求可不同。

12.2.2 设计应根据组合梁斜拉桥结构特点和受力特性对施工顺序和工艺提出要求。

12.2.3 应根据需要，对主梁的实际重量提出称重的具体要求，对铺装层及混凝土桥面板重量的误差提出具体要求。

条文说明

钢梁、桥面板及铺装层重量对组合梁斜拉桥的线形和受力产生较大影响。只有采用可靠的实测重量值并在施工整个过程中进行严格控制，才能实现设计的精度要求。

12.2.4 对混凝土索塔，宜对施工监控时预埋能测量索塔柱应变场与温度场

的传感器的必要性提出要求。

条文说明

混凝土索塔受非均匀温度场的影响比较大，特别是比较高的塔。进行温度场测试可以为线形调整提供可靠的数据。

12.2.5 控制精度要求

1 变位控制

结构在施工过程的最终误差应符合现行行业标准《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650 和《公路工程质量检验评定标准》JTG F80 的规定。

成桥后主梁高程误差，跨径不大于 200m 时，应不大于 $\pm 20\text{mm}$ ；跨径大于 200m 时，应不大于 $\pm L/5000$ ，其中 L 为跨径。

索塔的倾斜度应控制在 $H/3000$ 以内，且不大于 30mm 或设计文件规定值，H 为承台以上塔高。

2 索力误差控制

斜拉索索力与设计的允许误差需满足设计要求，且不宜大于 5%。钢绞线斜拉索内各钢绞线拉力差值控制标准宜为-2%~8%。

12.3 管养要求

12.3.1 在斜拉桥施工图设计中应考虑运营期间的养护检修需求，并提出后期养护重点。

12.3.2 斜拉索设计中宜提出换索的相关原则和程序要求。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词，说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

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用词：

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用词：

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用词，采用“可”。

2 本规范中指明按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《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
- 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64
- 《公路斜拉桥设计规范》JTG/T 3365-01
- 《活性粉末混凝土》GB/T 31387
- 《公路桥梁抗风设计规范》JTG/T 3360-01
- 《公路桥梁抗撞设计规范》JTG/T 3360-02
- 《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01
- 《城市桥梁抗震设计规范》CJJ 166
- 《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》JTG/T D64-01
- 《公路桥涵地基与基础设计规范》JTG 3363
- 《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索》GB/T 18365
- 《桥梁缆索用热镀锌或锌铝合金钢丝》GB/T 17101
- 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370
- 《城市道路交通设施设计规范》GB 50688
- 《高速公路交通工程及沿线设施设计通用规范》JTG D80
- 《公路交通安全设施设计规范》JTG D81
- 《公路桥梁伸缩装置通用技术条件》JT/T 327
- 《船用风雨密单扇钢质门》GB/T 3477
- 《大型桥梁防雷设计规范》QX/T 330
- 《航空障碍灯》MH/T 6012
- 《内河助航标志》GB 5863
- 《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310
- 《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650
- 《公路工程质量检验评定标准》JTG F80