

文章编号: 1002-0268 (2004) 04-0066-03

# 矮塔斜拉桥的设计

何新平

(山西省交通规划勘察设计院, 山西 太原 030012)

**摘要:** 矮塔斜拉桥是介于梁式桥和斜拉桥之间的一种桥型, 其适用跨度也介于梁式桥和斜拉桥之间。本文结合离石高架桥主桥的设计情况, 浅析 PC 部分斜拉桥的桥型特点、受力特性及设计要点。山西离石高架桥主桥为双塔单索面三跨连续部分斜拉预应力混凝土箱梁桥, 主桥孔跨为 85+135+85m, 采用塔梁固结、塔梁与墩分离, 墩顶设支座的结构形式。

**关键词:** 矮塔斜拉桥; 结构设计; 力学分析

**中图分类号:** U492.431                      **文献标识码:** A

## Design of Low Tower Cable-stayed Bridge

HE Xin-ping

(The Communications Survey & Design Institute of Shanxi Province, Shanxi Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** Low tower cable-stayed bridge is one type of bridge between girder bridge and cable-stayed bridge, and its suitable span is also between girder bridge and cable-stayed bridge. Based on the design conditions of the main frame of Lishi viaduct, the characteristics of bridge type, force principle and design gist of the PC Part of the cable-stayed bridge are simply analyzed. Lishi Viaduct Bridge is a 3-span partially cable-stayed prestressed concrete box girder bridge with two towers and single-cable-plane. Spans are attributed as 85+135+85m, the structure type of consolidated tower-girder, separated tower-girder and pier and top pier mouted supports is used.

**Key words:** Low tower Cable-stayed bridge; Structure design; Mechanics analysis

### 0 概述

矮塔斜拉桥又称部分斜拉桥, 为一种新兴的桥型结构, 国外近 10 年内已修建了 20 余座此类桥梁。由于它优越的结构性能, 良好的经济指标, 越来越显示出巨大的发展潜力。我国虽起步稍晚, 但发展势头迅猛, 仅山西省目前已有 2 座此类桥梁在开工建设。

离石高架桥位于青银国道主干线山西省境内汾阳至离石段, 是跨越离石市开发区的一座特大桥梁。在跨越龙凤大街主桥桥型选择上, 为了展现开发区现代城市的风格和蓬勃向上的精神风貌, 在满足使用功能的前提下, 经多方案比较, 最终选定采用双塔单索面预应力混凝土矮塔斜拉桥方案。其建成后将成为山西省西部高速公路的一个标志性建筑。

### 1 构造及受力特征

矮塔斜拉桥具有斜拉桥的形式, 但在布索、结构尺寸比例以及受力特性等方面又与真正的斜拉桥有明显的差别, 是介于具有非常柔性加劲梁的斜拉桥和梁高度比较大的连续梁式桥之间的一种过渡性桥梁, 梁高位于它们之间, 斜拉索较正规斜拉桥少, 且主塔较矮。该桥具有斜拉桥和梁式桥的双重特性, 且桥塔与普通斜拉桥比要矮, 因此称之为矮塔斜拉桥, 在结构总体抗力中斜拉索只起部分作用而不是全部作用。

从构造特征上矮塔斜拉桥中的拉索与常规斜拉桥中的拉索不同之处在于塔上的锚固形式, 常规斜拉桥中的拉索在塔顶上锚固或张拉, 而矮塔斜拉桥则基本采用鞍座式, 斜拉索在塔顶连续通过, 由于摩擦力存

在及固定装置, 拉索在塔顶不能滑动。一般采用圆弧形双套管形式, 斜拉索从内钢管穿过, 施工完成后在内钢管内压入高标号环氧水泥浆。双套管形式可以使换索工作易于进行。同时由于加劲梁已具有一定刚度, 因此作为体外索之间的斜拉索不需像常规斜拉桥那样有端锚索, 对塔顶水平位移进行约束, 布索区段也无需覆盖全部加劲梁。

在受力特征上, 连续梁桥是以梁的直接受弯、受剪来承受竖向荷载, 斜拉桥是以梁的受压和索的受拉来承受竖向荷载, 矮塔斜拉桥则是以梁的受弯、受压和索的受拉来承受竖向荷载, 因此三者的最大差别在于梁的受力行为不同。从连续梁、矮塔斜拉桥到斜拉桥, 主梁承受的弯矩逐渐减小, 而轴力却逐渐增加。连续梁的主梁以受弯为主, 斜拉桥主梁以受压为主, 而部分斜拉桥的主梁则以压弯为主, 其斜拉索从受力特征上讲更接近一般 PC 梁桥的体外索。

## 2 设计及计算要点

根据矮塔斜拉桥梁受弯、受压和索受拉共同承受竖向荷载的特点, 可以理解为矮塔斜拉桥的索对梁起加劲作用, 超过梁体承载力部分的荷载效应由索来承担, 因此可人为限制二者的分配比例, 当梁体较刚, 承载能力大时, 可减少斜拉索, 弱化斜拉索的作用; 反之, 梁体较柔, 承载能力较小时, 可增大斜拉索, 强化斜拉索的作用。这样, 可根据实际情况, 合理选择各部尺寸使设计自由度更大。

矮塔斜拉桥的适用跨径由于其特性决定, 它的适用跨径宜在 100~300m 之间, 若主梁采用钢与混凝土混合结构, 跨径有望突破 400m。结构体系可选用塔梁固结、梁底设支座; 塔墩固结、塔梁分离; 塔梁墩固结的 3 种形式。第一种形式适用于跨度不太大的桥梁, 支座吨位不致于过大, 它的特点是塔根弯矩较小, 塔两侧索力差较小, 结构的整体刚度较小。第二种形式适用于跨度稍大, 墩高较矮的桥梁, 它的特点是塔墩弯矩较大, 塔两侧索力差较大, 结构的整体刚度较第一种形式大。第三种形式适用于跨度稍大, 墩高较大的桥梁, 结构体系类似于连续刚构, 它的特点接近于第二种形式。目前我国已建和在建的矮塔斜拉桥多为第一种形式。

根据国内外目前已建矮塔斜拉桥跨径比例分析, 由于矮塔斜拉桥刚度比斜拉桥大, 接近于连续梁, 其边、中跨比值常采用 0.52~0.65。在特殊情况下, 边、中跨比值亦可小于 0.5, 这时, 边跨需采取措施, 解决负反力问题。矮塔斜拉桥由于其主梁要承受

相当大的弯矩, 主梁截面形式与斜拉桥有很大不同, 而更接近于连续梁。一般情况下, 大部分连续梁采用的截面形式都能适用于矮塔斜拉桥, 但矮塔斜拉桥更适宜采用变高度截面。其塔墩处梁高可采用相同跨度连续梁高的一半左右。在特殊情况下, 主梁亦可采用等高度, 此时梁高与跨度之比可采用  $1/35 \sim 1/45$ 。在选择主梁截面形式时, 需注意斜拉索的布置及锚固要求。

斜拉索设计根据桥面布置及景观要求, 可采用单索面及双索面, 各斜拉索可采用相同的索截面。斜拉索在梁上宜布置在边跨中及  $1/3$  中跨附近。索距不宜太大, 宜为 3~5m, 以适应受力及施工要求。主、边跨的索应对称于塔布置。塔上拉索宜采用鞍座形式通过, 每根索对应 1 个鞍座, 鞍座的设计应考虑换索的需要, 位于塔两侧拉索出口处应设计锚固装置, 克服索的不平衡拉力。斜拉索的应力可采用较高值, 最大可达  $0.6R_{by}$ , 由于梁的刚度大, 斜拉索倾角小, 斜拉索一般宜采用一次张拉。由于矮塔斜拉桥的拉索具有主梁体外索的特征。索对梁提供竖向分力的同时, 也对梁提供较大的轴压力, 以使梁能承受弯矩, 因此索的倾角较小, 塔高不需太大, 其高度可采用主跨的  $1/8 \sim 1/12$ , 相当于斜拉桥塔高的  $1/2 \sim 1/3$ 。由于塔高较矮, 一般不存在失稳问题, 主塔可采用实心截面, 以方便设计和施工。

矮塔斜拉桥在构造及受力特征上与斜拉桥和连续梁桥尚有一定的差异, 根据笔者多年的设计实践, 在进行其结构分析时要注意以下几点:

(1) 结构分析要选用合理的计算图式, 考虑施工过程中结构的逐步形成和体系转换、临时支座的设置和拆除, 以及结构各部分的强度增长, 合理估计主梁架设各阶段的施工荷载。直线桥的施工控制计算一般采用平面分析, 必要时采用三维空间分析。

(2) 矮塔斜拉桥张拉时主梁挠度大, 张拉初期索的垂度较大, 必须计入几何非线性影响。斜拉桥主梁和索塔都是压弯构件, 其截面弯矩和轴力会产生耦合效应, 应加以处理。要考虑混凝土收缩徐变、温度以及风荷载等偶然因素对结构变形和内力的影响。

(3) 斜拉桥施工时因恒载引起的内力与变形与施工方法有很大关系, 主梁施工时的施工计算荷载除恒载人群、施工机具等施工荷载外, 还需考虑预应力、斜拉索的张拉力等。

(4) 针对各施工阶段的实际情况建立正确的计算模型, 单元类型采用拉索单元、梁单元、3D 实体单元、板壳单元和边界单元等。

(5) 当斜索的竖向荷载承担率超过 30%，或斜索在活载作用下的应力变幅超过 50MPa，既进入斜拉桥的范畴，其标志为斜索的容许应力取值的不同。看作斜拉桥的斜索，其容许应力取  $0.4R_{by}$ ，安全系数为 2.5；而没有超过界限的容许应力取值则与 PC 梁桥相同为  $0.6R_{by}$ ，安全系数为 1.67。

(6) 预应力混凝土斜拉桥施工中各工况受力状态达不到设计要求的重要原因，是有限元计算模型中的计算参数取值（主要为混凝土的弹性模量、材料的相对密度、混凝土收缩徐变系数、构件重量、施工中温度变化以及施工临时荷载条件等）与施工中的实际情况有一定的偏差。斜拉桥的这种偏差具有累积性，因此，要根据施工实测结果予以修正，以使计算模型和计算参数符合结构的实际情况。

3 离石高架桥设计

离石高新技术开发区龙凤大街规划宽度 80m，设计路线与其呈 30° 交角。考虑道路两侧城市管网布置，桥净跨需 120m 以上，经多方案比较，最终选定采用 85m+135m+85m 三跨双塔单索面预应力混凝土部分斜拉桥，结构形式为塔梁固结、墩梁分离，梁底设支座。桥墩采用钢筋混凝土板式墩、钻孔灌注桩基础。施工方法为主梁悬臂浇注。总体布置见图 1。

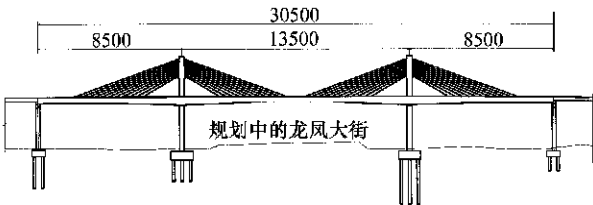


图 1 离石高架桥桥型布置图

主梁采用单箱三室大悬臂横断面，支点梁高 4.2m，跨中梁高 2.4m，梁体下缘按二次抛物线变化。箱梁顶宽 26m，顶板边室厚 0.28m，中室厚 0.5m，底板厚 0.25~0.462m，边腹板厚 0.50m，中腹板厚 0.35m，

主塔结构高 18.0m。每根斜拉索由 2 束组成，每束斜拉索采用 31-7 $\phi$ 5 环氧喷涂钢绞线组成。拉索采用多重防腐措施，单根钢绞线为环氧喷涂，外包单层 PE，钢绞线索外包 HDPE 套管。主塔采用实心矩形截面。布置在中央分隔带上，塔身上设鞍座，以便拉索通过。斜拉索横桥向呈两排布置，鞍座亦设两排。鞍座采用分丝管形式，每根分丝管穿一根钢绞线，以便将来可以单根换索。在两侧斜拉索出口处设抗滑锚板，以防止钢绞线的滑动。

主梁和主塔都采用三维梁单元，斜拉索采用索单元，参考施工阶段梁段的划分和预应力钢束的布置，并考虑桥梁的实际情况，将主梁划分为 92 个单元，变截面范围内处理为变截面单元；主塔为矩形截面，每个主塔划分为 12 个单元；全桥共 44 根斜拉索，划分为 44 个索单元。全桥共 160 个单元，117 个节点。根据施工组织设计，在施工阶段假定在左右墩顶处固结；在成桥运营阶段左墩为固定支座，右墩和主梁两端设置为沿桥梁方向的滚动支座。

除桥梁自重和二期恒载外，根据桥面宽度情况，桥面上按双向六车道布置车辆移动荷载，分别考虑汽车-超 20 和挂车-120；温度应力分别考虑整体升降温 20℃和桥面升降温 10℃四种情况；支座下沉分别考虑左右边支座和左右中支座单独下沉 1cm 四种情况；预应力荷载考虑沿梁纵向钢束预应力和斜拉索拉力；收缩徐变按规范规定的强度发展函数、收缩徐变时间函数考虑 10000 天的长期荷载效应。

通过计算，在各种荷载组合情况下，成桥阶段主梁呈全截面受压状况，最大压应力为 13.3MPa，发生在中跨跨中附近，最小压应力为 3.6MPa，在最不利荷载组合情况下主梁仍呈全截面受压状况，说明结构存在一定的安全储备。

正常使用极限内力包络图和正常使用极限应力包络图，见图 2、图 3。

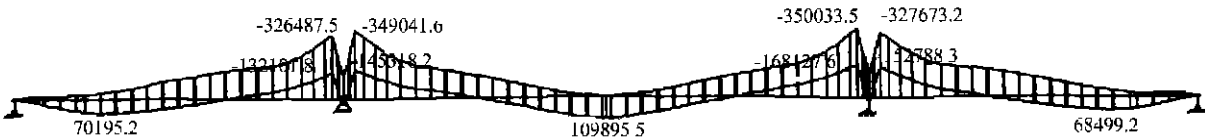


图 2 正常使用极限内力包络图

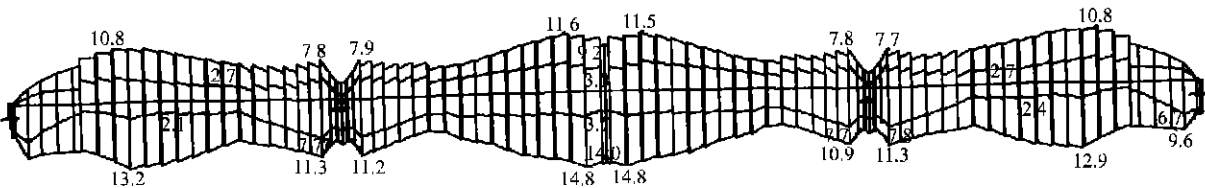


图 3 正常使用极限应力包络图

(下转第 72 页)

随着抗压强度的降低，抗冻融性能也会减弱，所以含气量并不是越大越好，它存在一个最佳范围。因此，最佳范围含气量的确定要通过严格的试验按抗冻指标来确定。粉煤灰是一种含硅、铝氧化物的火山质材料，由于 5%~7% 左右的碳粒存在，粉煤灰对表面活性剂如引气剂有较强的吸附性，因此，要获得与普通混凝土相同的抗冻性能，引气剂要适量的增加，粉煤灰混凝土的含气量需适当提高。

3 粉煤灰混凝土的变形特性

从图 7 看出，混凝土干缩随粉煤灰掺量的增加而减小。掺 20% 粉煤灰混凝土干缩比不掺的降低 13.6%，掺 40% 粉煤灰比不掺的干缩平均降低 16.7%。

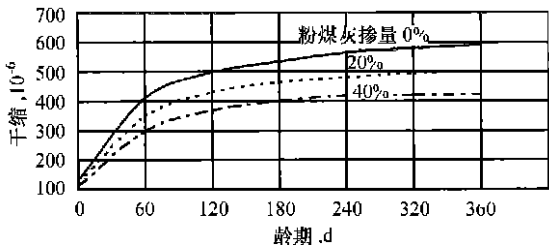


图 7 粉煤灰掺量对混凝土干缩的影响

4 结论

(1) 通过裂区试验结果分析可知，水胶比对混凝土抗压强度是极显著影响因素，粉煤灰掺量、外加剂品种对混凝土抗压强度是显著影响因素。

(上接第 68 页) 另外，根据对零号块和塔根结合部位的实体有限元分析，以下三个部位的局部应力需要引起特别关注。其一是塔根局部压应力达 26.5MPa，远大于按梁单元计算的最大压应力；其二是主墩支座处的局部拉应力达 6.85MPa，超过了混凝土的极限抗拉强度，应加强配筋检算；其三是预应力筋锚固端的局部应力效应明显，应加强配筋检算。

本文对该桥的动力特性进行分析，纵向梁的支撑条件对斜拉桥的动力特性有决定性的影响。本桥基本周期为 1.4116s，为竖向振型，如图 4 所示。关于结构动力特性分析、抗震分析和三维实体有限元计算的详细资料，限于篇幅，拟另文发表。

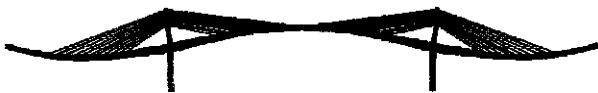


图 4 基本振型图

通过离石高架桥的设计实践，使我们有机会对我国已建和在建的 PC 部分斜拉桥的设计进行认真的分析和研究，以下体会供同行借鉴：

(2) 通过裂区试验结果分析可知，南京外加剂适用于粉煤灰掺量为 30%~60% 的大掺量粉煤灰混凝土，具有明显的早期激发作用，可将龄期为 60d 抗压强度作为强度的设计标准值；而山西外加剂适用于粉煤灰掺量为 15%~30% 的低掺量粉煤灰混凝土，无早期激发作用，可将龄期为 90d 抗压强度作为强度的设计标准值。

(3) 高掺量粉煤灰混凝土要想获得比普通混凝土更高的抗压强度，不仅水胶比要比普通混凝土低，而且要注意选用粉煤灰的最佳掺量。对于试验所用材料，南京外加剂粉煤灰最佳掺量为 40%，山西外加剂粉煤灰最佳掺量为 27.9%。

(4) 在抗压强度相近的情况下，粉煤灰混凝土的抗碳化性能比普通混凝土差，但是，掺用高效减水剂降低水胶比后，由于混凝土的抗压强度的提高，也能获得较低的碳化深度值。

(5) 只要在粉煤灰混凝土中引入适宜的含气量，即可获得良好的抗冻性，是否掺入粉煤灰或其掺量的大小对于抗冻性的影响不是主要因素。

参考文献:

[1] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析 [M]. 清华大学出版社, 1993.  
[2] 范立础. 桥梁工程 [M]. 人民交通出版社, 2001.  
[3] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 人民交通出版社, 2001.

(1) 直线或近似直线的部分斜拉桥采用平面计算图式进行结构分析，其计算结果是可信的，能够满足设计要求。但对于受力较复杂的构件，如塔根、支座等，尚需借助三维有限元计算，进行局部应力分析。

(2) 桥塔处不设锚固端可以缩小桥塔的结构尺寸，减小施工难度，降低工程造价，但斜索巨大的竖向力要通过外管与桥塔相接触的很小面积的混凝土来提供，所以外管下的混凝土就会产生很大的局部压应力，因此必须加强该处普通钢筋的配置。必要时还需通过空间有限元的分析和实验验证。

(3) 斜拉索容许应力的选取主梁与斜拉索对后期荷载的承担比率不仅可以决定梁高与塔高的选取，且可以作为界定斜拉桥与部分斜拉桥的一项指标，也就决定了斜拉索容许应力的取值。

参考文献:

[1] 陈亨锦, 王凯, 李承根. 浅谈部分斜拉桥 [J]. 桥梁建设, 2002 (1).  
[2] 范立础. 桥梁工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.