

文章编号: 0451-0712(2006)08-0062-06

中图分类号: U448.29

文献标识码: B

无背索竖琴式斜拉桥 混凝土斜塔结构设计与研究

陈爱军¹, 邵旭东²

(1. 中南林业科技大学土建学院 长沙市 410004; 2. 湖南大学土木工程学院 长沙市 410082)

摘要: 无背索斜拉桥是一种全新概念的造型优美独特的桥梁结构形式。它的最大特点是利用塔柱倾斜来平衡桥面恒载和活载, 不设背索, 改善了桥梁结构和自然景观之间的关系, 打破了传统的直塔斜拉桥的设计理念。本文以长沙市洪山大桥——单索面竖琴式斜塔斜拉桥为工程背景, 主要从设计的角度介绍了无背索斜塔斜拉桥的受力特点, 混凝土斜塔柱主要结构参数的选取、斜拉索的索力确定及其在塔内的锚固位置和形式等。并且通过与常规的直塔斜拉桥的对比分析, 对混凝土斜塔的合理结构进行了探讨。

关键词: 竖琴式斜拉桥; 无背索; 预应力混凝土斜塔; 合理结构型式

自1992年西班牙塞维利亚建成世界上第一座无背索斜塔斜拉桥——Alamillo桥^[1,2]以来, 无背索斜拉桥这种造型优美独特的桥梁结构形式立即引起了世界桥梁界的普遍关注, 并在后续短短的十几年里, 世界各国相继建成无背索斜拉桥10余座。其中于2004年底建成通车的长沙市洪山大桥是无背索竖琴式斜拉桥又一突出实例, 主孔跨径为206 m, 是目前该类桥型世界之最^[3,4]。桥位坐落于洪山庙休闲度假区, 跨浏阳河, 属市内北二环关键工程, 往南约2 km即为机场高速, 往北不到3 km是长沙世界之窗, 西侧比邻长沙大学, 地理位置十分重要, 市政府决心将该桥建成长沙市的标志性景观建筑物, 选择了造

型优美独特、景观效果杰出的无背索竖琴式斜拉桥方案。

大桥主梁采用钢—混凝土组合脊骨梁结构形式, 桥面宽为33.2 m, 双向六车道。索塔为预应力混凝土箱形结构, 塔身水平倾角58°, 桥面以上塔高138.3 m, 是世界上第一座高度超百米的混凝土斜塔。全桥共13对拉索, 以水平倾角25°平行布置, 如图1所示, 塔上索距为9.312 m, 梁上索距12 m, 横桥向2排, 间距为6 m。

无背索竖琴式斜拉桥结构新颖、受力复杂, 其复杂性主要体现在力的平衡关系, 尤其是塔墩梁固接部位, 需承受来自主梁的巨大轴力、剪力、弯矩及扭

收稿日期: 2006-03-16

Research and Practice for Jointless Bridges

PENG Da-wen¹, LIN Zhi-ping², HONG Jin-xiang²

(1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China; 2. Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Jointless bridge is an innovation in the concept of bridge design. It accommodates the requirement of durability and sustainability in the full life-cycle of bridges. Nowadays, jointless bridges are used widely in the world because of its excellent behaviour and maintainless. The structure style, research and practice of jointless bridges are reviewed and summarized. Meanwhile, the existing major problems and the topics for futher research are pointed out.

Key words: jointless bridges; integral abutment; research; practice

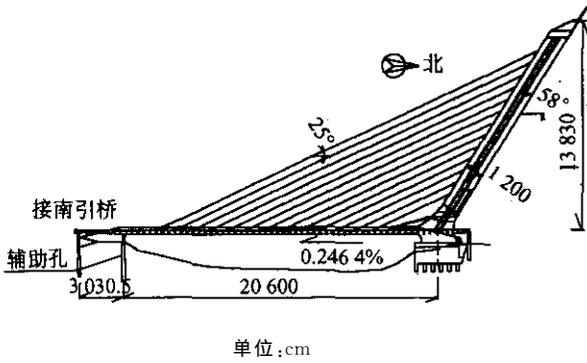


图1 长沙市洪山大桥立面

矩的作用。设计计算分析过程中,必须考虑力的平衡关系和结构的传力途径、结构内力的分布情况等。本文以长沙市洪山大桥为例来具体探讨无背索竖琴式斜拉桥混凝土斜塔柱的结构设计和受力特点,以便为类似桥梁结构的设计提供借鉴和参考。

1 设计构思

因大桥地理位置特殊,对结构造型和建筑美学要求相当高。无背索竖琴式斜拉桥,由于桥型结构新颖、造型美观大方,同时,竖琴式单索面简练流畅、柔和优美,与挺拔有力的斜塔柱相匹配更能体现出竖琴般的美感而倍受青睐。然而无背索斜拉桥是一种非对称结构,塔身向岸侧倾斜,仅在主跨侧配置拉索,这种独特的造型与传统的直塔斜拉桥的受力性能存在很大差异。如图2所示,无背索斜塔斜拉桥单边拉索强大的水平分力在塔的根部只能利用塔柱倾斜与塔重的水平分力相平衡,却不能同直塔斜拉桥那样直接与塔柱对侧拉索索力相平衡^[4],完全打破了传统直塔斜拉桥的拉索平衡体系。因此,斜塔柱重量的确定和结构参数的合理选取及拉索索力等因素,对整个结构的受力显得尤为重要。

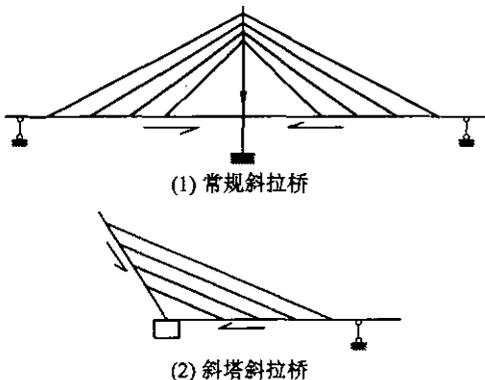


图2 直塔斜拉桥和斜塔斜拉桥的受力比较

1.1 斜塔柱重量的确定

无背索斜塔斜拉桥结构合理状态取决于斜塔柱和主梁重量之间的充分平衡,设计中除了需考虑合理的施工方法和施工程序外,还必须考虑塔和梁的受力及它们之间力的平衡关系、重量容许的最大误差等。为了保证斜塔柱长期处于良好的受力状态,设计按照以下原则来确定其自重:即当梁上作用全部恒载和一半活载时,斜塔柱应处于轴心受压状态^[5],如图3所示。由几何及平衡关系可以得到:

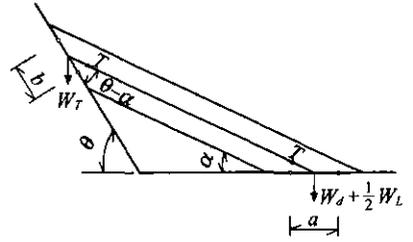


图3 斜塔自重计算图示

$$\left. \begin{aligned} \frac{b}{a} &= \frac{\sin \alpha}{\sin(\theta - \alpha)} \\ T \cdot \sin \alpha &= W_d + W_L / 2 \\ T \cdot \sin(\theta - \alpha) &= W_T \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: a 、 b 为每两根拉索在主梁和塔上的间距; W_d 、 W_L 为主梁 a 段上恒载、活载的重量; α 和 θ 为斜拉索和斜塔各自的水平倾角; W_T 为主塔 b 段上恒载的重量。

索塔的节段恒载 W_T 原则上按式(1)初拟。按洪山桥的结构布置,整个塔身混凝土的体积较大,约 $6\,700\text{ m}^3$ 。文献^[6]的计算结果还表明,索塔重量的增减对其内力非常敏感,尤其是塔的根部。塔超重10%,塔根弯矩将增大4.2倍,上、下缘应力分别增加2.8 MPa(54.9%)和3.6 MPa(54.5%),轴力也增大10%。同样,计算也表明索塔重量减轻对主梁的受力很不利,因而施工中应严格控制斜塔柱的重量。

1.2 斜塔柱结构优化设计

1.2.1 斜塔柱主要结构参数对结构受力的影响分析

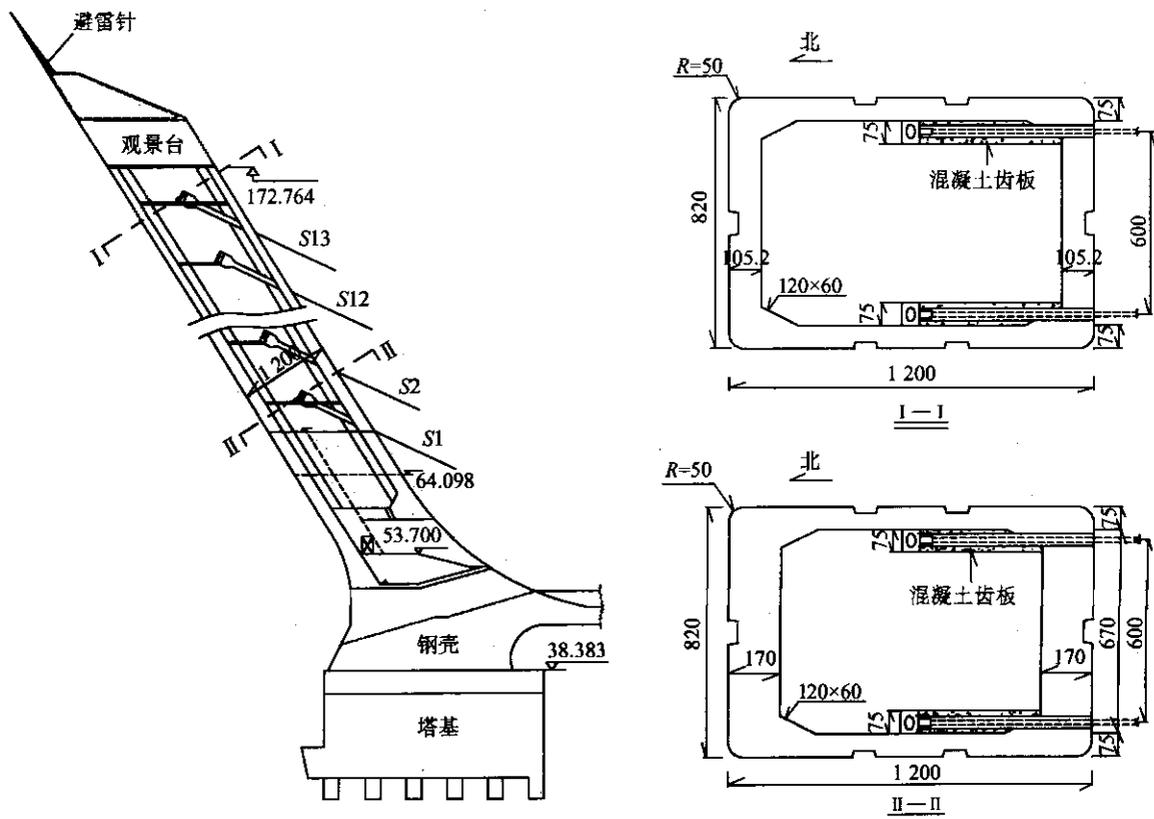
无背索斜塔斜拉桥是斜拉桥的一种特例,其特性主要体现在塔梁之间力的平衡关系,其静力参数的分析和研究涉及到的因素非常多,如斜塔倾角、塔和梁的容重及刚度等设计参数的选取及其之间的相互配合、协调等。其中斜塔的倾角程度是一个不可忽视的关键因素,它不仅影响斜拉索的长度和索力,

还在很大程度上影响主梁和桥塔的位移以及塔根弯矩。直塔斜拉桥塔柱的抗弯刚度不仅影响塔柱自身的变形,而且影响拉索对主梁的支承刚度,而主梁的刚度是控制活载挠度的主要因素,但是主梁刚度的提高将引起塔根弯矩的增大;而斜塔柱抗弯刚度对其本身的位移和尾索索力影响较大,对主梁位移和塔梁弯矩影响相对较小,这主要是因为传统的直塔斜拉桥索塔的变形能力取决于背索,而无背索斜塔斜拉桥则取决于斜塔本身的刚度,所以无背索斜拉桥塔柱的刚度一般都设计得很大^[6]。另外,混凝土斜塔柱在长期荷载作用下,产生的徐变变形而导致拉索下垂、索力减小等。所以根据式(1),综合考虑各种影

响因素,斜塔柱倾斜角度的合理选取是这类桥型受力的关键所在,文献^[6]通过理论推导和分析计算比较,得出洪山大桥混凝土斜塔柱的水平倾角为 58°较为合理。

1.2.2 斜塔柱结构设计

在原则遵循式(1)拟定塔重的基础上,为降低斜塔柱重心和进一步提高塔根区域的刚度以改善塔根的受力,而将其设计成上薄下厚的变壁厚箱形结构。同时考虑到方便施工,塔的外形尺寸自下而上保持不变。在综合考虑各影响因素后,经详细的计算分析,最终确定斜塔柱的具体结构尺寸如图 4 所示,主要结构参数见表 1。



单位:cm

图 4 主塔一般构造

表 1 洪山大桥主要结构参数

项目	弹性模量 MPa	面积 A m^2	纵向抗弯惯矩 I_x m^4	横向抗弯惯矩 I_y m^4	扭转惯矩 I_d m^4	单位质量 kg/m
钢箱梁	2.06×10^5	1.130 6	2.391 6	4.785 0	4.802 5	28 940
塔(I-I 截面)	3.5×10^4	32.246	644.45	304.18	625.261	82 857
塔(II-II 截面)	3.5×10^4	40.929	822.53	336.67	691.810	105 205
索(S1~S3)	1.9×10^5	0.010 15(283 ϕ 7)	—	—	—	91.35
索(S4~S12)	1.9×10^5	0.007 65(223 ϕ 7)	—	—	—	68.65
索(S13)	1.9×10^5	0.005 84(187 ϕ 7)	—	—	—	52.56

洪山大桥的又一设计特色是,除了宽5.0 m的人行道位于桥中央两个索面间且高出车行道外,塔顶还设有观景台。为方便行人、游客上下桥或上塔顶观光,在塔根钢壳部分设计一个高为9 m、宽为3 m的过人孔,塔内设3.2 m×3.2 m的电梯井道以配观光电梯。此外,为引导视觉,在斜塔柱东西两侧各设两条宽80 cm、深20 cm,南北两侧各设一条宽80 cm、深30 cm的沿塔高通长的装饰槽。

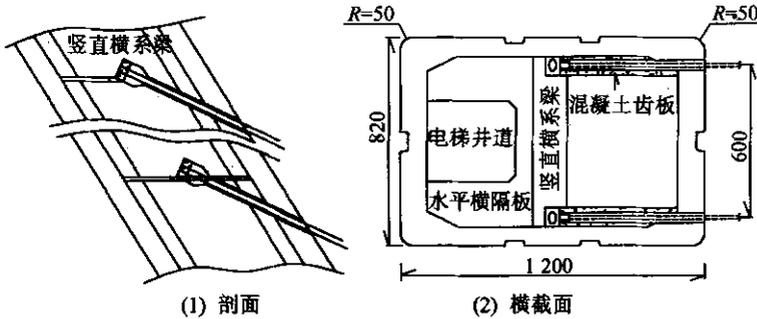
1.2.3 拉索与斜塔柱锚固位置和形式选取

由于无背索竖琴式斜拉桥受力情况的特殊性,其斜拉索在塔上的锚固位置和锚固形式也与常规直塔斜拉桥有所不同。直塔斜拉桥两边拉索对称,一般各自锚固在直塔两边的塔壁上;而无背索斜拉桥,取消了岸侧背索,斜拉索在塔上的锚固位置既可以锚固在前侧塔壁上也可以锚固在后侧塔壁上,还可以锚固在塔中轴线上。如表2所示的计算结果表明,锚固在斜塔柱的前(或后)侧塔壁上,由于单边索的缘故,锚固点集中力在塔箱截面上将有一个很大的附

表2 3种拉索锚固位置内力和变形计算结果^[6]

锚固位置	内力/(MN·m)			变形/mm		
	主梁跨中	塔根	梁端	主梁跨中	塔顶纵向	塔顶竖向
塔中心轴①	7.327	479.9	26.53	-267.7	82.6	50.9
塔前壁②	7.460	650.6	26.76	-274.6	80.6	49.6
塔后壁③	7.425	631.1	26.24	-262.8	84.5	52.1
(①-②)/①	1.82%	35.6%	0.88%	2.58%	-2.42%	-2.55%
(③-①)/①	1.33%	31.5%	-1.09%	-1.83%	2.30%	2.36%

加力偶,由此产生的塔内弯矩可占总弯矩的35%左右,这将使塔长期受力不良。因而如图5所示将拉索锚固位置设计在中和轴位置,可以尽最大可能减小不利的附加内力,并且利用齿条混凝土与塔侧壁混凝土及竖直横系梁,将局部拉应力分配和扩散到最低限度,使局部应力得到控制,从而使塔长期保持良好的受力状态^[4]。此外,这种锚固位置和形式还可以为斜拉索的张拉提供足够的操作空间,方便了施工。



单位:cm

图5 斜拉索在塔上的锚固

1.2.4 塔柱三向预应力体系布置

综合考虑塔在恒载、活载、混凝土收缩徐变、温度变化、索力及塔重误差等因素作用下的受力状态,为了使塔柱截面不出现拉应力,设置了沿塔轴线方向的竖向预应力筋和与塔轴垂直的纵、横向预应力筋,从而大大改善了混凝土斜塔柱的整体和局部受力状态。

1.3 拉索索力的确定

对于无背索斜拉桥,斜拉索的索力主要由主塔结构自重来平衡,索力的确定方法也不同于直塔斜拉桥,不仅需要控制主梁的内力,还需控制斜塔柱的内力,所以洪山大桥采用主梁和索塔双控调索来最终确定索力,见表3。从表中的索力分布情况来看,拉索越长索力越小,即尾索的索力最小,这与直塔斜拉

表3 洪山大桥拉索索力设计值 kN

拉索编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
成桥状态	6 620	6 390	6 255	4 672	4 688	4 721	4 736
第一次张拉	5 900	5 500	5 000	5 100	5 050	5 000	5 000
第二次张拉	6 600	6 200	5 800	—	—	—	—
拉索编号	S8	S9	S10	S11	S12	S13	
成桥状态	4 777	4 844	4 892	4 881	4 927	4 200	
第一次张拉	4 975	4 975	5 000	5 000	5 000	4 125	

注:(1)拉索编号S1~S13是按照由塔根向塔顶的顺序编排;

(2)只有内索S1、S2、S3分2次张拉,其余均为1次张拉。

桥的索力分布刚好相反,主要原因是从改善斜塔柱受力的角度来考虑的。因为无背索斜拉桥只有单边拉索,不像直塔斜拉桥那样拉索水平分力可以自平衡,而是依靠塔柱倾斜来平衡,因而尾索索力对塔根

的内力效果非常明显。常规的直塔斜拉桥拉索的索力主要是为了限制桥塔的变位,提高结构的刚度,它们的设计意图和出发点是完全不一样的。所以无背索斜拉桥尾索索力的变异性和敏感性较常规的直塔斜拉桥明显得多。按以上索力分布得到的洪山大桥内力包络图如图 6 所示。

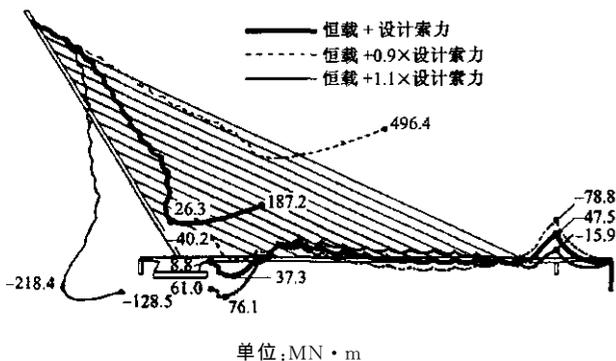


图 6 洪山大桥内力包络图

2 混凝土斜塔柱结构分析计算

无背索竖琴式斜塔斜拉桥的结构分析也不同于常规的直塔斜拉桥。除在总体设计中必须严格控制塔和梁的重量外,斜塔柱本身的应力分布及局部应力控制也很重要。所以在采用平面杆系有限元程序对全桥进行分析计算后,还采用了空间有限元程序 ANSYS 对预应力混凝土斜塔柱进行了结构分析计算,以便对局部应力进行控制。

2.1 空间分析计算模型的建立

洪山大桥索塔柱为预应力混凝土结构,塔身与斜拉索的锚固连接由塔身混凝土、齿条混凝土及斜

拉索钢丝束共同组成(图 5 所示)。在塔内拉索的锚固区还布设三向预应力钢筋以传递拉索索力。为明确斜塔与拉索锚固区的局部受力情况,采用空间有限元程序 ANSYS 对主塔拉索节段进行了计算,为了与现场埋片实测试验数据的对照而选取第一对拉索进行分析。考虑到结构的对称性,取塔身方向一半进行建模计算分析,并忽略水平横隔板的有利因素,经简化得最后模型如图 7 所示。整个模型采用实体单元(solid45)来模拟,共划分 2 496 个节点,1 586 个单元。另外,斜拉索的索力按照表 3 所示的设计值分 2 次张拉,采用节点集中力模拟。

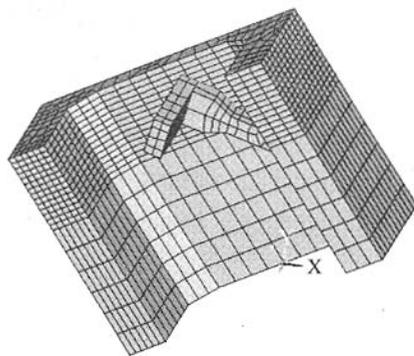


图 7 索塔节段模型块体单元网格划分

2.2 计算结果与实测对比分析

利用建立的计算模型,对拉索与混凝土斜塔柱锚固区局部应力,分别按 2 种工况进行分析计算,计算和实测结果见表 4。

表 4 主塔结构模型计算和实测结果对比

工况	塔身承受的压应力①	竖向横系梁的预加力②	斜拉索的索力③	主应力计算值④	主应力实测值⑤	⑤/④
工况 1	2 MPa	1.5 MPa	5 900 kN	9.141 MPa	4.388 MPa	0.480
工况 2	2 MPa	1.5 MPa	6 600 kN	11.821 MPa	—	—

由以上分析和计算结果可以看出:(1)在齿条、竖向横系梁和塔壁的连接处,确实存在较大的拉力;(2)现场实测值较小(不到计算值一半),这说明所设计的横向预应力钢筋和塔壁局部钢筋网的加密对结构的受力是有利的,同时也说明了塔柱结构设计是合理的;(3)对混凝土斜塔的施工提出了严格要求,即塔柱预应力束的张拉和压浆必须到位,尽可能地减小预应力损失。

3 结语

洪山大桥是目前世界上跨径最大的无背索竖琴式斜拉桥,也是目前世界上唯一高度超百米的混凝土斜塔桥。由于不设背索,仅利用塔柱倾斜来平衡桥面恒载和活载,使结构的受力和设计变得十分特殊。本文通过对洪山大桥混凝土斜塔结构的设计与研究可以得出:(1)无背索竖琴式斜拉桥的受力特性与常规斜拉桥是完全不同的;(2)斜塔柱倾角的合理选取

和塔柱重量的确定,是该类桥型的关键所在;(3)无背索斜拉桥拉索的索力分布与直塔斜拉桥完全相反;(4)斜拉索锚固在斜塔柱中和轴的位置,不但可以有效减小斜塔柱不利附加弯矩和内力的影响,而且方便了斜拉索的张拉施工。

参考文献:

- [1] Casas J R. A combined method for measuring cable forces: The Alamillo Cable-Stayed Bridge in Spain [J]. Structural Engineering International, 1994, 4(4).
- [2] Casas J R. Full Scale Dynamic Testing of the Alamillo Cable-Stayed Bridge in Seville (Spain) [J].

Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1995, 24.

- [3] Shao X D, Zhao H, Li L F, et.al. Design And Experimental Study of A Harp Shaped Single Span Cable-Stayed Bridge [J]. ASCE's Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(6).
- [4] 邵旭东,陈爱军,李立峰. 长沙市洪山大桥的创新设计[J]. 中外公路, 2005, 25(2).
- [5] 邵旭东,李立峰,赵华,彭旺虎. 长沙市洪山桥竖琴式斜拉桥的设计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2001, 28(4).
- [6] 陈爱军. 大跨无背索竖琴式斜拉桥合理结构型式研究[D]. 湖南大学土木工程学院, 2005.

Structure Design and Research on Inclined Concrete Pylon of Harp-Type Cable-Stayed Bridge with No Backstays

CHEN Ai-jun¹, SHAO Xu-dong²

(1. School of Architecture Engineering, Central South Forestry University, Changsha 410004, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The cable-type bridge with no backstays is a new concept bridge structure with particularly exquisite shape. It's most prominent character is that with the elimination of the backstays, the inclined pylon would rely on its own dead weight, serving as a counterbalance to support the dead loads and live loads on the deck. It would enrich the harmonious relationship between bridge construct and natural landscape. The design concept of the upright pylon in conventional cable-stayed bridges would be broken. This paper introduces the characteristics of inclined pylon cable-stayed bridge with no back stays, and major preferences of the structure of inclined concrete pylon, the forces of cable-stayed, the location and approaches of cable-stayed being anchored in the inclined poly from the point of design based on the Hongshan Bridge, located in Changsha City, which is a harp-type single span inclined pylon cable-stayed bridge. By analyzing the differences between the inclined pylon of harp-type cable-stayed bridge and upright poly in conventional cable-stayed bridges, some studies on the reasonable structural form of inclined concrete pylon are carried out in this paper.

Key words: harp-type cable-stayed bridge; no backstays; prestressed concrete inclined pylon; rational structure form