

文章编号: 1002-0268 (2009) 08-0077-07

长寿长江公路大桥索塔节段 足尺模型试验研究

刘兆丰¹, 孟鑫², 赵人达¹, 杨永清¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

摘要: 为研究小半径大吨位 U 形预应力钢束的孔道摩阻系数、钢束伸长值以及索塔锚固区的应力分布规律, 以重庆长寿长江大桥索塔锚固区为研究对象, 在理论分析的基础上进行了索塔锚固区节段的足尺模型试验。介绍了模型试验的内容、步骤、方法。通过测试分析得出了 U 形塑料波纹管孔道合理的摩阻系数和钢束伸长值。对索塔模型在 U 形预应力下以及斜拉索作用下的应力进行了量测与计算分析, 指出了节段的应力分布规律, 并将试验结果与有限元分析计算结果进行了比较, 两者分布规律吻合较好, 结果表明结构设计安全可靠。

关键词: 桥梁工程; 摩阻系数; 模型试验; 索塔锚固区; U 形预应力束

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

Full-scale Model Test for Pylon Segment of Changshou Yangtse River Highway Bridge

LIU Zhaofeng¹, MENG Xin², ZHAO Renda¹, YANG Yongqing¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the tunnel frictional resistance, the extension of tendons and the stress distribution of cable-pylon anchorage zones for U-type prestressed tendons with great tonnage and small radius, a full-scale pylon segment model including one whole anchorage of cable was tested based on theoretical analysis of Changshou Yangtse River Highway Bridge in Chongqing. The content, procedure and method of the test were introduced. The reasonable frictional coefficient values of the U-type plastic corrugated pipes and the extension values of tendons were provided by test analysis. The stress distribution in the model under the U-type prestress and stayed cable actions was measured and analyzed and the stress distribution regularity of the segment were pointed out. The stress distribution features of the pylon segment were pointed out. The result shows that the stress distribution between measured values and calculated values are basically identical and the structure is safe and reliable.

Key words: bridge engineering; frictional coefficient; model test; cable-pylon anchorage zone; U-type prestressed tendon

0 引言

主塔的拉索锚固部位是一个将拉索的局部集中力安全、均匀地传送到塔柱的重要受力构造, 其受力状况是设计和施工中的重要问题^[1-3]。为了平衡斜拉索的强大集中力作用, 目前塔柱常采用大吨位、小半径

的 U 形预应力束布置。在斜拉索和 U 形预应力束的作用下, 塔柱受力复杂。因此, 必须对其进行深入细致的研究。本文以重庆长寿长江公路大桥为背景对其索塔锚固区进行节段足尺模型试验研究^[4-10]。重庆长寿长江公路大桥是渝涪、渝万高速公路和渝巴高等级公路的连接通道。主跨跨径 460 m, 桥宽 20.5 m、双

收稿日期: 2008-07-29

作者简介: 刘兆丰 (1982-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 从事桥梁结构行为研究。(lzf1126@163.com)

向四车道混凝土双塔双索面斜拉桥，索塔为花瓶形。索塔高度为 164.6 m，截面形状为单箱单室。单柱外轮廓尺寸为 4.6 m × 7 m，索塔内索塔内采用预应力混凝土锚固形式，索塔内布置 U 形环向预应力筋 19 ϕ_s 15.24，采用了 PT-PLUS 塑料波纹管，压浆采用真空吸浆以保证压浆密实。该桥索塔拉索锚固区具有如下特点：(1) U 形束半径较小，最小半径仅有 1.6 m；(2) 锚固密集，上下锚固齿块首尾相接，最短锚固节段仅为 1.45 m；(3) 拉索最大拉力超过 700 t。桥梁立面、塔柱立面分别如图 1、图 2 所示。

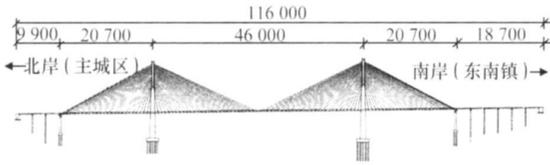


图 1 桥梁立面图 (单位: cm)

Fig 1 Elevation drawing of the bridge (unit: cm)

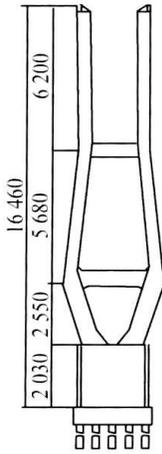


图 2 塔柱立面图 (单位: cm)

Fig 2 Elevation drawing of the pylon (unit: cm)

1 试验目的、内容及试验仪器

试验目的主要有：掌握大吨位小半径环向预应力筋的成孔、穿束以及真空吸浆工艺；测定相应的预应力筋摩阻系数；明确索塔锚固区在塔身预应力束及斜拉索作用下的应力分布情况及其承载能力；了解索塔拉索锚固区的工作性能。

试验内容主要有：测定预应力体系下管道摩阻系数；给出预应力筋在张拉控制吨位下的伸长量；根据索塔足尺模型，测试在预应力筋张拉后，设计水平索力 (6 300 kN) 以及 2 倍设计水平索力荷载下，各控制截面混凝土应力。试验仪器设备主要有 7V13/UCAM 测试系统、千分表/百分表、温度测量仪、裂

缝观测仪、直尺/皮尺、千斤顶等。

2 模型试验设计

2.1 结构试验模型及有限元模型设计

通过斜拉桥整体静力分析可知塔顶部斜拉索的索力最大且倾角最小，水平拉力最大，故取塔的上部一段作为研究对象。根据圣维南原理，同时考虑边界条件的影响，根据锚固区实际情况研究决定选取北岸索塔上高程自 306.277~308.427 的一段作为足尺模型试验研究对象。该处索塔节段总高 2.15 m，锚固区内部锚固齿块高度为 1.47 m，作用力施加高度为 1.15 m。外形平面尺寸为 7 m × 4.6 m，长边壁厚 1.1 m，短边壁厚 1.3 m。模型节段内设 6 根开口于索塔截面长边的 U 形预应力索，如图 3 所示，每根由一束 19 ϕ_s 15.2 钢绞线群锚体系组成，其 U 形弯曲处的曲率半径为 1.6、1.7 m。模型中斜拉索锚固孔与实际一样斜向布置，塔身所有构造尺寸与配置均与实际索塔相同，施工工艺也与以后实际施工相同。

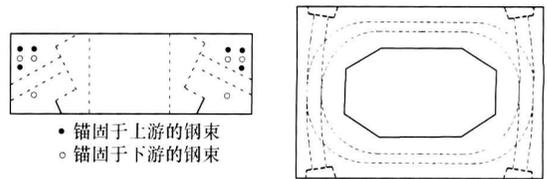


图 3 U 形预应力束布置

Fig 3 U-shape prestressing tendons arrangement

应用大型通用有限元分析软件 ANSYS 对索塔模型进行三维有限元仿真计算，计算模型如图 4 所示。

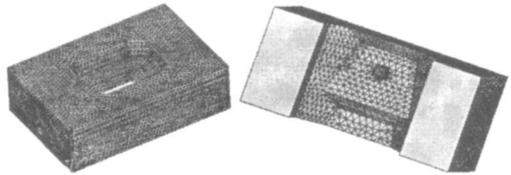


图 4 索塔有限元计算模型

Fig 4 Pylon's FEM model

有限元模型采用 SOLID45 单元模拟混凝土；采用 SHELL63 单元模拟斜拉索的锚垫板和预埋钢套管；预应力筋采用 Link8 元模拟，预应力采用单元的降温的方式施加，对预应力筋单元分段降低不同的温度来模拟预应力对模型的作用。模型模拟了实际的斜拉索锚固区形状以及锚固构造 (锚垫板、钢套管)，将顶推力以等效表面水平压力施加在锚固齿块上。其中 U 形预应力束的有效预应力、混凝土的弹性模量等均按实测取值。因节段试验模型实际位移边界条件不明，

进行定量模拟有难度。为了能综合分析, 计算模型分2种情况进行计算, 一种是底面节点全部固结, 约束其全部自由度; 另一种是底面沿高度 Z 方向的位移设置为0, 其余2个方向的变形置为静定, 这样计算模型在水平力作用下底面在水平方向亦可自由变形。将2种位移边界模型的计算位移与试验中的实测位移相比较, 第2种边界条件更为合理, 故最终采用第2种边界条件的有限元计算结果。

2.2 加载系统设计

试验模型中模拟斜拉索的水平力进行加载, 实桥设计最大水平索力为6300 kN, 试验预期最大模拟加载力为2倍最大设计水平索力。试验中通过置于塔柱体内、水平并列的2个6500 kN千斤顶同时顶推两侧锚块来实现斜拉索水平力的模拟。由于拉索锚固齿块为斜向布置, 而加载为水平加载且吨位较大, 对试验加载装置进行了专门的设计。如图5、图6所示, 采用钢板做为外模板和骨架, 在钢板间填充混凝土, 在压力作用下使混凝土处于三向压应力状态, 充分发挥混凝土和钢板的极限承载力。其中, 在千斤顶作用位置, 采用了4 cm厚的钢板进行局部加强, 保证了装置的安全。计算显示这种加载装置在13000 kN压力作用下强度和稳定方面满足本试验的要求, 并在现场加载过程中得到验证。

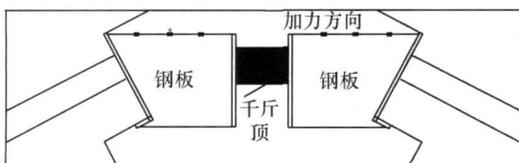


图5 加载系统立面简图

Fig. 5 Elevation drawing of the loading system

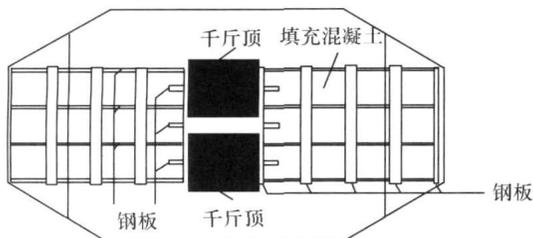


图6 加载系统平面简图

Fig. 6 Plane drawing of the loading system

2.3 测点布置及测试方法

2.3.1 水平加载力的监测

加载前对2个6500 kN加载千斤顶进行精确的标定, 加载力由千斤顶油表读取。为防止在加载过程中出现2台千斤顶顶推不平衡而导致的偏载状况, 在两

加载短边外塔壁的中点及两侧布置沿水平力方向的位移观测点(与千斤顶加载点相同高度), 根据位移变化情况及油压表读数控制两台千斤顶和各自的加载进程。

2.3.2 摩阻系数的量测

摩阻系数的测试, 张拉前先对千斤顶进行标定, 张拉时用千斤顶的实测张拉力和布置于预应力筋下的穿心式传感器的实测值来校核并确保达到设计张拉力。在张拉时先单端张拉, 记录张拉端和固定端斜拉索对应的传感器读数, 然后卸载进行另一端单端张拉并记录数据, 上述操作多次重复后最终进行2台千斤顶两端张拉并完成锚固。根据张拉端主动张拉力和固定端的被动反力可较准确地推算管道摩阻系数。

2.3.3 伸长值的量测

为了实现预应力束张拉作业以应力控制为主, 伸长量控制为辅的双控, 在计算伸长量时, 有必要规定一个张拉应力初始读数, 从这个初始读数开始量测以后的伸长, 作为与理论伸长量比较的依据^[5]。对于曲率半径较小的环向预应力, 显然各钢绞线的不均匀松散程度较大, 作为双控的初始张拉力也相应较大, 试验中分别取 $0.15\sigma_{con}$ 、 $0.30\sigma_{con}$ 作为初始张拉力进行比较分析。

2.3.4 混凝土及普通钢筋应力的量测

混凝土应变测点布置于索塔锚固区内外侧塔壁混凝土表面, 塔壁短边外侧共布置50个混凝土应变片, 塔壁长边外侧共布置18个混凝土应变片, 塔壁长边内侧共布置30个混凝土应变片, 合计98个混凝土表面测点, 见图7。普通钢筋测点布置在塔壁短边斜拉索孔道上方最外层钢筋上(18个)和环向预应力孔道径向钢筋处(8个), 合计26个钢筋应变测点。混凝土和钢筋的应变采用粘贴应变片来测量, 数据采用7V13和UCAM测试系统自动采集, 进行应力测试前对所有应力测点读数清0, 待每级加载完成后进行应力测试。

3 U形预应力束施工工艺及其摩阻系数试验研究

3.1 U形预应力束施工工艺

塑料波纹管具有摩擦系数小, 自身刚度大, 密封性好, 防腐性好等优点, 适合于小曲率半径预应力束孔道成型, 以利于小半径管道布设和防止漏浆。孔道定位采用绑扎通长定位钢筋和#字形钢筋架的方式, 为防止预应力索小半径处混凝土劈裂, 沿弯道径向应设置防劈钢筋, 也有利于波纹管的径向定位。通过整束和单根穿束工艺对比试验, 确定采用单根钢绞线穿束方法, 方便省力, 穿束选择在管道外混凝土浇筑后

进行,穿束前对孔道进行清洗。在张拉过程中,仔细较核分级张拉力与伸长量的大小,严格控制张拉力的大小进行张拉,不宜超张拉,张拉时,锚下混凝土承受的局部压力较大,事先应严格控制锚下混凝土强

度和锚下构造措施。预应力筋在高应力状态下很容易锈蚀,为防止力筋的锈蚀和降低力筋的松弛,并将预应力通过凝结后的水泥浆传递至混凝土结构中,张拉完后要尽快压浆。采用真空吸浆工艺辅助压浆,可有

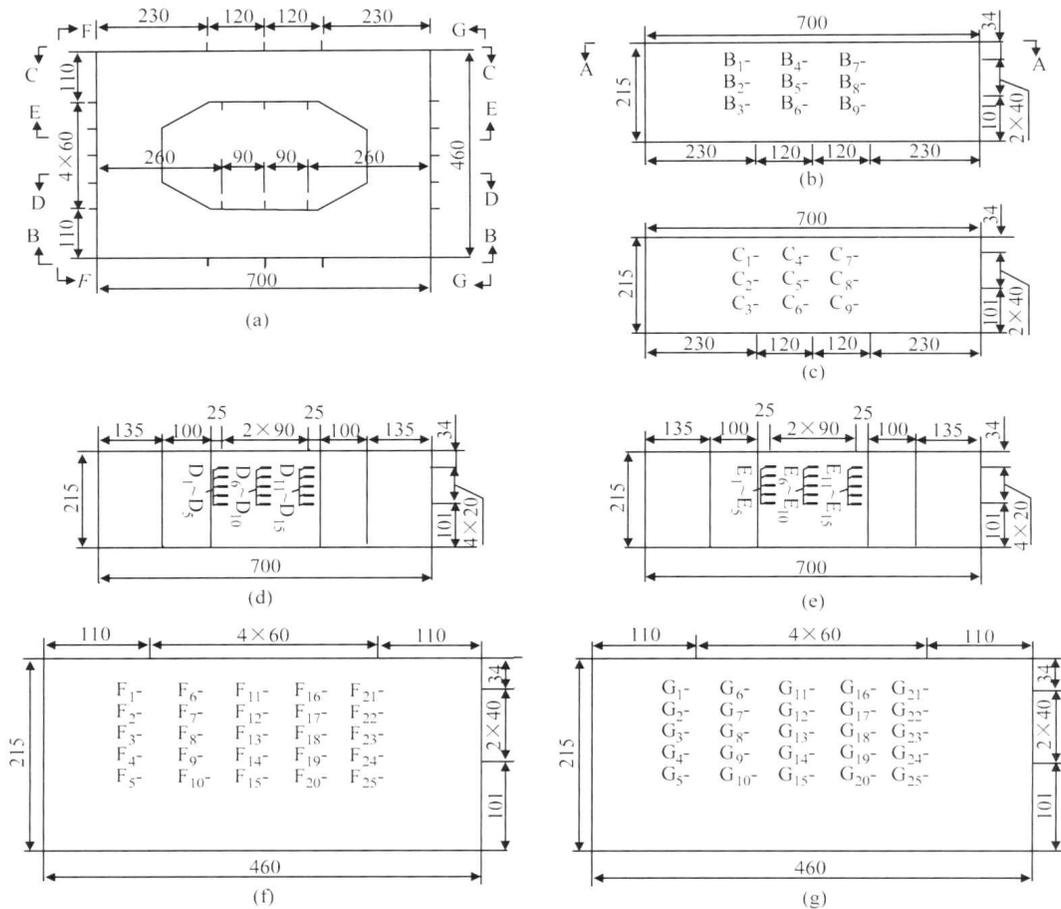


图7 混凝土测点布置(单位:cm)

Fig 7 Measuring points arrangement (unit: cm)

效确保孔道浆体饱满,压浆前,用高压水清洗管道,用高压空气将管道吹干,采用真空泵抽掉孔道内的空气,使孔内真空度达到80%以上,同时在管道的另一端用压浆机将水泥浆注入管道。

3.2 孔道摩阻系数及伸长值测定

3.2.1 孔道摩阻系数

在桥梁规范中^[11],孔道摩擦系数只与成孔材料有关,事实上,影响孔道摩擦的因素还有钢绞线的数量、张拉力的吨位以及孔道曲率半径等^[12]。试验中分别对曲率半径为1.6、1.7 m的U形钢束进行了摩阻试验。公路桥涵设计规范^[11]的预应力摩阻损失计算公式为 $\sigma_{l1} = \sigma_{cm} [1 - e^{-(kx + \theta x^2)}]$ 可将此式转换为

$$\mu = (\ln T_1 - \ln T_2 - kx) / \theta, \quad (1)$$

式中, T_1 为主动端的锚下张拉力值; T_2 为被动端的张拉力值; x 、 θ 为已知数值;规范中给定 $k = 0.0015$, kx

项数值很小,当 k 在0.0015附近波动时,对 μ 值影响较小,见表1,令 k 分别取值0.0013、0.0015、0.0017,可得曲率半径为1.6 m的管道的实测平均值0.2098,曲率半径为1.7 m的管道 μ 的实测平均值分别为0.1767。

3.2.2 U形预应力束张拉伸长量

根据规范^[11]以及实测摩阻系数算得曲率半径1.6 m的钢束伸长值为72 mm,曲率半径1.7束伸长值为80 mm。本模型试验中的张拉工艺试验测得钢束实际伸长量见表2。可见实测值均大于按规范计算的理论伸长量,有关文献资料^[13-15]也表明这种实测钢束伸长值与理论值差距较大的现象较为普遍,经分析认为主要原因如下:(1)张拉前各钢绞线在管道曲线部位分布半径不一致,钢绞线在管道内松紧状况不一致,在对钢绞线进行整束预张拉后这种情况依然存在;(2)钢

表 1 U 形塑料波纹管孔道实测摩擦系数和摩阻损失

Tab 1 Measured friction coefficients and friction-loss rates on the U plastic sheath

钢束编号	实测摩阻损失/%	k 取值	实测 μ	均值 μ
1#	51.8	0.001 3	0.209 5	0.208 8
		0.001 5	0.208 8	0.208 8
		0.001 7	0.208 1	
		0.001 3	0.213 9	
2#	52.4	0.001 5	0.213 2	0.213 2
		0.001 7	0.212 6	0.209 8
		0.001 3	0.208 1	
		0.001 5	0.207 4	0.207 4
3#	51.7	0.001 5	0.207 4	0.207 4
		0.001 7	0.206 8	
		0.001 3	0.178 3	
		0.001 5	0.177 6	0.177 6
4#	46.5	0.001 5	0.177 6	0.177 6
		0.001 7	0.176 9	0.176 7
		0.001 3	0.176 4	
		0.001 5	0.175 8	0.175 8
5#	46.2	0.001 5	0.175 8	0.175 8
		0.001 7	0.175 1	

绞线张拉受力后依次紧贴管壁, 当张拉力增大到一定程度, 各钢绞线在管道曲线部位会重新分布, 发生相互嵌挤现象, 对伸长量产生影响; (3) 塑料波纹管在管道曲线部位产生压缩变形, 局部会出现挤裂现象, 同时也产生一定的几何变形; (4) 钢绞线在孔道内长度不一致, 使得整束钢绞线实际换算弹性模量比单根钢绞线弹性模量低; (5) 位于千斤顶内部的钢束在张拉时的伸长量在量测时也包含在总伸长量中, 和计算总伸长量理论值有所差别。

表 2 钢绞线伸长量实测值

Tab 2 Measured elongation of prestressed tendons

钢束编号	初张力 $0.15\sigma_{con}$		初张力 $0.30\sigma_{con}$	
	伸长值/mm		伸长值/mm	
曲率半径 1.6 m	1#	119	113	
	2#	116	113	
曲率半径 1.7 m	4#	118	114	
	5#	120	116	

根据试验测试数据和理论分析, 对实桥索塔锚固区环向预应力各钢绞线张拉伸长量控制值提出如下建议: (1) 现场实际张拉过程中可按初张 0.30 倍的控制应力来计算的钢束实测伸长量; (2) 张拉至各级荷载时适当延长持荷时间, 使钢束的各段充分受力变形; (3) 环向预应力以张拉力控制为主, 以伸长量校核为辅, 建议设计张拉控制应力取 0.65~0.70 倍的抗拉强度标准值, 不宜采用超张拉。

4 节段足尺模型荷载试验研究

4.1 U 形预应力效应

如图 8、图 9 所示, 在长边开口的 U 形预应力束

作用下, 短边塔壁有 4.08~9.43 MPa 的预压应力, 在斜拉索孔上方局部达到 12.00 MPa。长边塔壁内侧应力比较均匀, 有 3.00~7.20 MPa 预压应力, 在拐角处上部局部达到 8.60 MPa; 长边塔壁外侧出现 0.6 MPa 左右拉应力, 局部达到 1.20 MPa。可见, 在横桥向开口 (长边开口) 的 U 形预应力索作用下, 短边预压应力相对长边预压应力较大。由于节段模型内预应力束的布置在上下游两长边塔壁内并不完全一致, 两长边塔壁的预应力效应有所差异。

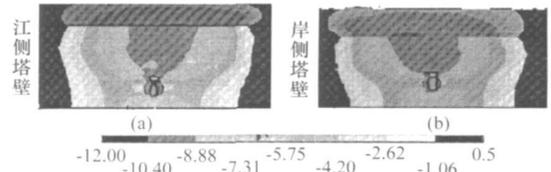


图 8 塔壁短边水平向预应力 (单位: MPa)

Fig 8 Horizontal prestress on shorter side (unit: MPa)

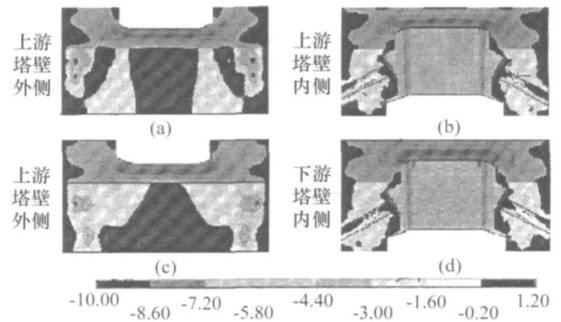


图 9 塔壁长边水平向预应力 (单位: MPa)

Fig 9 Horizontal prestress on longer side (unit: MPa)

4.2 水平加载效应

试验中水平加载最大吨位为 13 000 kN, 其中 0~4 000 kN、7 000~13 000 kN 按 1 000 kN 级差加载, 4 000~7 000 kN 按 500 kN 级差加载。试验结果揭示测点应力分布规律与计算分布规律吻合。在各级水平力加载下, 塔壁短边外侧同行混凝土测点应力增量由中间向两侧递减, 同列混凝土测点应力增量数值接近, 上部混凝土测点应力增量略大; 塔壁长边内侧同行混凝土测点应力增量数值较为接近, 两侧测点应力增量略大, 同列混凝土测点应力增量数值由上到下递减; 塔壁长边外侧各混凝土测点由于应力增量数值较小, 测试误差相对较大, 各测点应力沿位置变化的规律不明显。各测点应力增量均随着荷载的增加而增长。图 10 为混凝土塔壁部分测点的实测荷载-应力关系曲线, 同时还绘出了用 ANSYS 分析的计算值。由图 10 可以看出, 实测应力增量值大多小于计算增量值, 在加载至 9 000 kN 以前, 测试值和计算值吻合得

较好。加至9 000 kN时,塔壁开始出现细微裂缝,测试值有些波动,随后加载测试值又表现得平缓增长,可认为结构仍处于弹性工作状态。

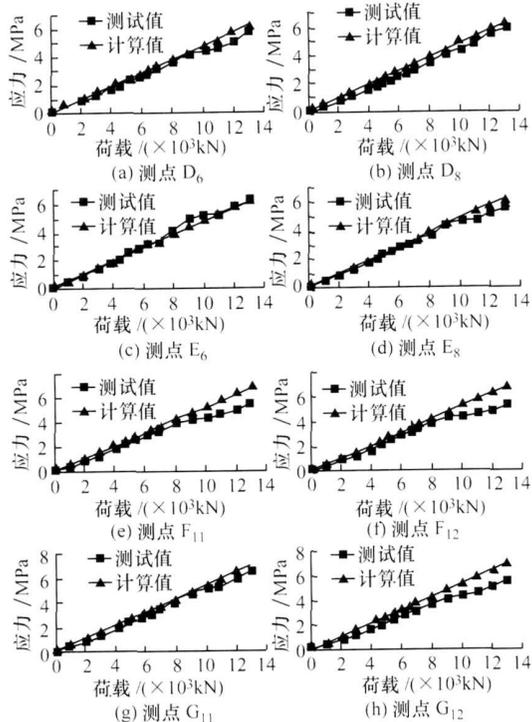


图 10 部分测点应力-荷载曲线

Fig 10 Stress-load curves of some measuring points

4.3 裂缝分析

水平加载至9 000 kN时,塔壁长边外侧出现裂缝,宽度介于0.02~0.08 mm。由现场观测结果可知,裂缝随着荷载的增大,裂缝宽度变化无明显规律,完全卸载后裂缝宽度变化较小,该处裂缝与荷载产生的荷载裂缝表现形式有所差别,计算结果亦显示结构不会开裂,裂缝疑为温度和混凝土收缩产生的细微裂缝在加载过程中扩展而成,非荷载裂缝。在加载中,拉索锚固齿块未发现开裂现象,但实际拉索作用区域比试验中水平加载面传力更为不利,该区域为高应力区域,应加强此处的构造措施防止出现裂缝。

5 结论

(1) 对于小半径U形预应力束这种特殊情况,已不满足桥规关于管道最小半径的构造要求,应该采取试验的方法确定摩阻参数。本文通过试验确定了曲率半径1.6、1.7 m的塑料波纹管的孔道摩阻系数分别为0.209 8、0.176 7,可见孔道摩阻系数与孔道曲率半径有关,实际上影响因素还有钢绞线的数量、张拉力的吨位等。

(2) U形预应力筋张拉工艺试验表明影响伸长量

的因数较多且复杂,张拉中以张拉力控制为主,以伸长量校核为辅,千斤顶和油表要及时标定准确,适当延长各级加载的持荷时间。

(3) U形预应力的张拉初始应力应由试验得出,本桥建议取0.30倍张拉控制应力。建议设计张拉控制应力取0.65~0.70倍的抗拉强度标准值,不宜采用超张拉。

(4) 在工作状态下,锚固齿块属于高应力区域,应通过构造措施加以改善,施工时加强质量保证。若将突出于塔壁内侧的楔形锚固区用钢板封包加强,可以起到内模的作用,还可以给强大压应力下的锚固区混凝土提供侧向约束,解决锚下抗裂问题。

(5) 在模型试验过程中,当加载至设计水平荷载时,模型表面及内部应变数值与计算值吻合得较好;加载至1.43倍至设计水平荷载时,长边外侧出现细微的非荷载裂缝,在随后的加载至2倍设计水平荷载的过程中,各测试值仍保持平稳基本呈线性的增长,表明在2倍设计拉索水平荷载下,结构尚处于弹性工作状态,结构有足够的安全储备。

参考文献:

References:

- [1] 梁柱,叶贵如.跨金华江斜拉桥索塔锚固区应力仿真分析[J].铁道建筑,2004(11):8-11.
LIANG Zhu, YE Guiru. Stress Simulation Analysis of the Cable-tower Anchorage Zone of Cable-stayed Bridge over Jinhua River [J]. Railway Engineering, 2004(11): 8-11.
- [2] 单炜,李玉顺,于玲,等.异形截面斜拉桥索塔锚固区节段足尺模型试验研究[J].中国公路学报,2005,18(3):60-65.
SHAN Wei, LI Yushun, YU Ling, et al. Experimental Research on Full-scale Model for Anchorage Zone of Pylon of Cable-stayed Bridge with Irregular-shaped Section [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 60-65.
- [3] 董冰,苏庆田.兰墅大桥索塔受力分析[J].结构工程师,2006,22(3):25-28.
DONG Bing, SU Qingtian. Mechanic Analysis for Pylon of Lanshu Bridge [J]. Structural Engineers, 2006, 22(3): 25-28.
- [4] 李德寅,王邦桐,林亚超.结构模型试验[M].北京:科学出版社,1996.
LI Deyin, WANG Bangtong, LIN Yachao. Model Test of Structure [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [5] 左东启.模型试验的理论和方法[M].北京:水利水电出版社,1984.
ZUO Dongqi. Theory and Method of Model Test [M]. Beijing: China Water Power Press, 1984.

- [6] 石挺丰, 胡狄, 陈政清. 预应力混凝土桥梁徐变模型试验相似关系研究 [J]. 华东交通大学学报, 2007, 24 (4): 30-32.
SHI Tingfeng, HU Di, CHEN Zhengqing. Research on Similarity Relationship for Model-based Creep Experiment of Prestressed Concrete Bridges [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24 (4): 30-32.
- [7] 颜东煌, 田仲初, 陈常松. 岳阳洞庭湖大桥三塔斜拉桥全桥静动力模型设计 [J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15 (1): 50-54.
YAN Donghuang, TIAN Zhongchu, CHEN Changsong Static and Dynamic Model Design of the Total Bridge of Yueyang Dongting Three Tower Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Changsha Communications University, 1999, 15 (1): 50-54.
- [8] 陈星烨, 马晓燕, 宋建中. 大型结构试验模型相似理论分析与推导 [J]. 长沙交通学院学报, 2004, 20 (1): 11-14.
CHEN Xingye, MA Xiaoyan, SONG Jianzhong Comparability Analysis and Deduction of a Large Structure Test model [J]. Journal of Changsha Communications University, 2004, 20 (1), 11-14.
- [9] 孙九春, 吴冲. 赵家沟大桥系杆锚固区局部应力分析 [J]. 结构工程师, 2006, 22 (2): 29-32.
SUN Jiuchun, WU Chong Local Stress in Anchorage Zone of Zhaojiagou Bridge [J]. Structural Engineers, 2006, 22 (2): 29-32.
- [10] 马俊, 陈彦江, 盛洪飞, 等. 斜拉桥桥塔锚固区足尺模型试验与理论研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (1): 74-77.
MA Jun, CHEN Yanjiang, SHENG Hongfei, et al Experimental and Theoretical Analysis of Full Size Model of Anchorage Zone Segment of Cable Stayed Bridge Tower [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (1): 74-77.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
P. R. China. Ministry of Communications Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [12] 刘钊, 孟少平, 刘智. 润扬大桥北汊斜拉桥索塔塔节段足尺模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (6): 35-40.
LIU Zhao, MENG Shaoping, LIU Zhi. Full-scale Model Test for Pylon Segment of the Cable-stayed Bridge of Runyang Yangtze River Bridge [J]. Journal of Civil Engineering, 2004, 37 (6): 35-40.
- [13] 王德华, 朱宏平, 刘春杰. 大吨位小半径环向预应力设计和施工技术分析 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2002, 19 (3): 24-27.
WANG Dehua, ZHU Hongping, LIU Chunjie Design and Construction Analysis of Large-tonnage-and-small-radius Annular Prestressed Force [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2002, 19 (3): 24-27.
- [14] 张望喜, 易伟建, 陈建阳, 等. 斜拉桥索塔大吨位环向预应力束伸长量试验分析 [J]. 中国公路学报, 2002, 15 (3): 57-60.
ZHANG Wangxi, YI Weijian, CHEN Jianyang, et al Experimental Analysis of the Extension of the Ring Prestressed Steel Bundle with Great Tonnage in the Concrete Tower of Cable-stayed Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15 (3): 57-60.
- [15] 唐红元, 孟少平, 刘钊. 斜拉桥索塔锚固区双层 U 形预应力束的张拉控制试验研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 56-59.
TANG Hongyuan, MENG Shaoping, LIU Zhao. Experimental Study on Tension Control of Double U Tendons in Anchorage Zone of Cable-stayed Bridge Pylon [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (1): 56-59.