

两座大型斜拉桥索塔锚固区模型试验及对比研究

刘 钊, 孟少平, 吕志涛

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

[摘要] 简要介绍了两座大型斜拉桥(南京长江第二大桥南汉桥和润扬长江公路大桥北汉桥)索塔锚固区的节段足尺模型试验,研究了索塔锚固区的抗裂安全系数和极限承载力;同时,还对索塔锚固区预应力索的合理布置形式、索塔节段模型对索塔整体的仿真效果等进行了研究,对于斜拉桥索塔设计具有理论指导意义和实用价值。

[关键词] 斜拉桥;索塔;模型试验;设计研究

[中图分类号] U448.27 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)12-0048-07

1 问题的提出

在大跨度斜拉桥索塔形式中,箱形截面混凝土索塔占据主流。为抵抗斜拉索锚下强大集中力对箱形截面索塔的作用,保证斜拉索锚固区有足够的抗裂性和极限承载力,对斜拉索的锚固区构造,通常有以下几种做法:**a.** 拉索间设钢锚梁(钢扁担),形成自平衡体系,如上海的南浦大桥、杨浦大桥等;**b.** 索塔截面内布置双向直线或曲线预应力索,或称井字形索,如芜湖长江大桥、福建青洲闽江大桥、湖南岳阳洞庭湖大桥等;**c.** 有横桥向开口的U形索,如润扬长江公路大桥北汉斜拉桥^[1](见图1);**d.** 索塔截面内布置环形预应力索,有顺桥向开口的U形索,如南京长江二桥南汉斜拉桥等^[2](见图2和本期封面);**e.** 按前面几种方式进行混合配索(见图3),如武汉军山大桥等。

由于索塔锚固区的形状与构造不规则,斜拉索的锚下集中力往往很大,现行桥梁规范对索塔锚固区的设计计算又没有规定,使得索塔锚固区的设计十分棘手。为此,不少斜拉桥均进行了索塔的节段足尺模型试验,见表1。但是,在试验方法上,以往的索塔模型试验均从方便试验的角度出发,只采

用水平向加载^[3-6],测点大多布置在模型表面,有的将斜拉索套筒也改为水平布置,这些做法在很大程度上会影响仿真试验的效果;在试验内容上,一般均以索塔的开裂荷载及安全度是否满足设计要求为目标。

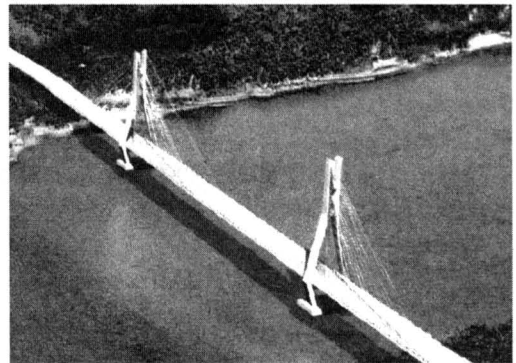


图1 润扬长江公路大桥北汉斜拉桥

Fig.1 The north branch cable-stayed bridge, the Runyang Yangtze River Bridge

受南京长江第二大桥和润扬长江公路大桥建设指挥部的委托,笔者分别对这两座桥的索塔锚固区进行了节段足尺模型试验。在试验研究的内容上力求系统,除回答索塔的开裂性以外,还对索塔预应

力工艺、锚固区的受力特性、塔身预应力索的合理布置形式、控制截面的空间应力分布、索塔的极限承载力、有效预应力的传递角度等问题进行了深入系统的探讨。在试验研究方法上力求仿真，在润扬桥试验中，对节段足尺模型进行了斜向加载以模拟斜拉索的斜向作用，同时，借助于辅助模型研究孔道摩阻和预应力在锚下的扩散效果，这些做法在国内尚属首次^[1]。

本文结合两座斜拉桥的索塔模型试验，重点探讨在顺桥向开口 U 形索（南京长江二桥布索方式）和横桥向开口 U 形索（润扬大桥布索方式）两种布索方式下，索塔的抗裂安全度和极限承载力，以及不同布索方式下的索塔消压应力比，同时还对索塔节段模型对索塔整体的仿真效果等内容进行了研

究。这两座大型斜拉桥的索塔模型试验研究的其他成果，限于篇幅，本文不作介绍。

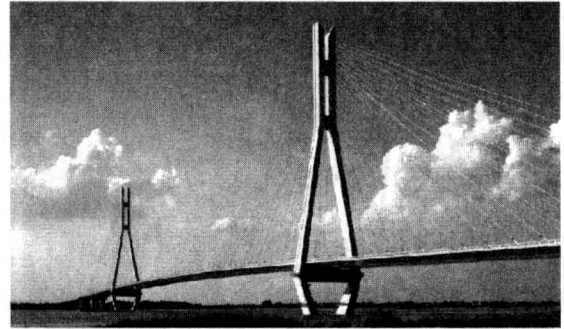


图 2 南京长江第二大桥南汊斜拉桥
Fig.2 The south branch cable-stayed bridge, the Second Nanjing Yangtze River Bridge

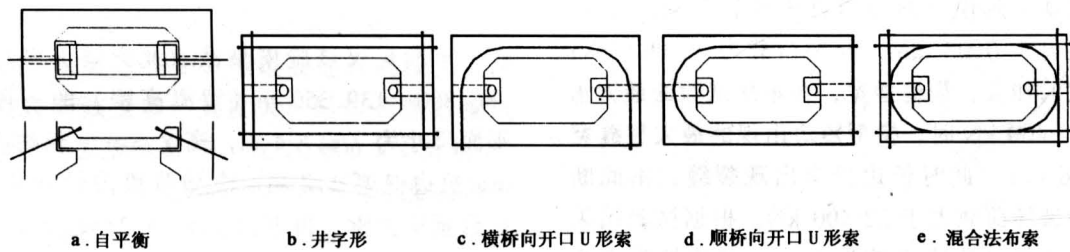


图 3 箱形截面索塔锚固区常见预应力索布置

Fig.3 The typical placement of prestressing tendons in anchorage zone of box-section pylon

表 1 几座斜拉桥索塔模型试验的加载方式与测点布置

Table 1 Loading mode and measuring points placement for several cable-stayed bridges

桥名	塔身预应力形式	加载方向		测点布置	
		水平	斜向	模型表面	模型内部
鄱阳湖口大桥	环形索+短边对拉索	✓		✓	
杭州文晖路立交桥	井字形高强精轧螺纹钢	✓		✓	
芜湖长江大桥	井字形高强精轧螺纹钢	✓		✓	
武汉军山大桥	横桥向开口 U 形索+顺桥向对拉索	✓		✓	
南京长江二桥	顺桥向开口 U 形索	✓		✓	
润扬长江大桥	横桥向开口 U 形索	✓	✓	✓	✓

2 斜拉桥索塔节段足尺模型试验

2.1 南京长江二桥索塔模型试验简况

南京二桥南汊斜拉桥主跨为 628 m，目前位居国内第一，世界第三。钻石形塔高 195.4 m，斜拉索通过锚块锚固于上塔柱的内壁。为抵抗斜拉索的水平分力，在锚固区的塔壁内设置了相互扣合的、开口于索塔截面短边的 U 形预应力索。U 形索由

19 ϕ 15.24 钢绞线群锚体系组成，采用 PT-PLUS 塑料波纹管成孔和真空辅助压浆技术对张拉后的孔道进行压浆。

节段足尺试验模型截取索塔上塔柱高程自 180.9~183.4 m（黄海高程）的一段；外形平面尺寸为 7.5 m \times 4.5 m，高 2.5 m；模型内设 8 索交互开口于索塔截面长边的 U 形预应力索。南京二桥采用两台千斤顶并置进行水平方向加载（图

4), 加载分 23 级进行。限于篇幅, 这里略去模型测点布置及相关测试结果的介绍。

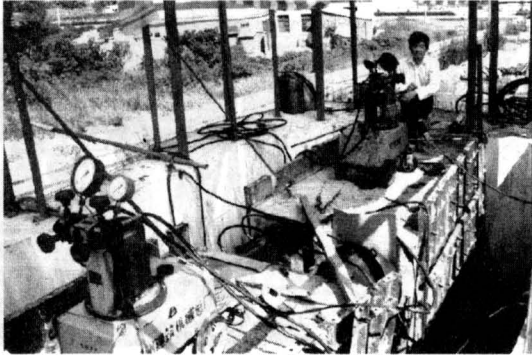


图 4 索塔节段足尺模型水平加载

Fig.4 Horizontal loading of the pylon segmental model

试验观察到模型的短边首先开裂 (图 5), 初始裂缝宽度为 0.03 mm, 开裂荷载为 10 000 kN; 随着荷载的加大, 裂缝增宽, 在本次试验的最大水平加载 22 400 kN 时, 模型短边出现的最大裂缝宽度为 0.36 mm, 此时长边仍未出现裂缝, 由此断定索塔的破坏荷载大于 22 400 kN。根据试验结果推算的短边抗裂安全系数为 1.67, 长边抗裂安全系数则大于 3.73。

2.2 润扬大桥索塔模型试验简况

润扬长江公路大桥北汊桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥, 主跨为 176+406+176 m, 钻石形桥塔高 154 m。索塔采用预应力混凝土箱型断面, 塔身同

样采用相互扣合的 U 形预应力索, 但 U 形索横向开口于索塔截面。同样采用 PT-PLUS 塑料波纹管成孔和真空辅助压浆技术。

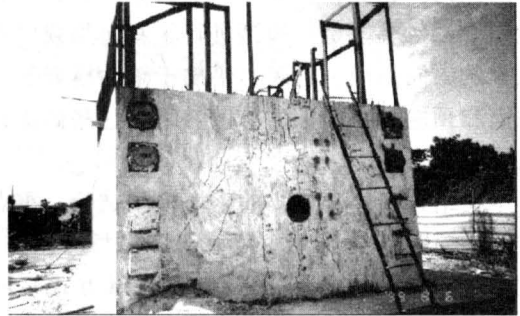


图 5 南京长江二桥索塔模型的短边裂缝分布

Fig.5 Cracking on short-side of the pylon model of the 2nd Nanjing Yangtze River Bridge

节段足尺试验模型截取北索塔上塔柱高程自 136.850~139.350 m (黄海高程) 的一段; 外形平面尺寸为 7 m×4 m, 高 2.5 m, 长边壁厚 0.8 m, 短边壁厚 1.2 m; 模型节段内设 4 层 (4 束) U 形预应力索, 每束由 19 ϕ 15.24 钢绞线群锚体系组成。模型塔身所有构造尺寸及配置均与实际索塔相同, 施工工艺也与以后实际施工相同。为实现斜拉索的斜向加载, 在模型底部设预应力混凝土 T 形截面伸臂反力梁。

模型斜向加载情况如图 6 所示。有关模型测点布置及相关测试结果分析可参见文献 [1]。

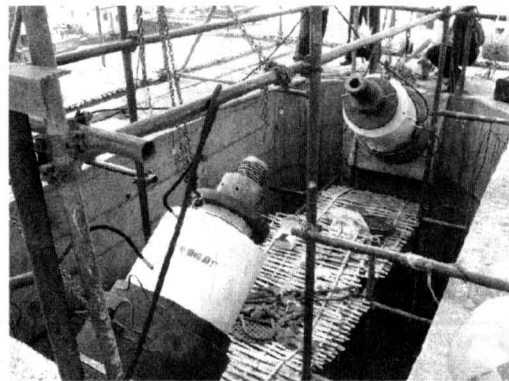
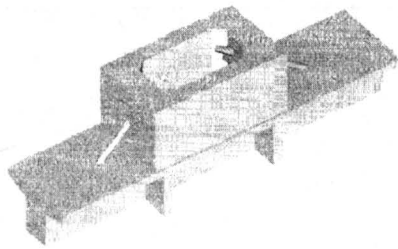


图 6 润扬桥索塔节段足尺模型斜向加载

Fig.6 View of diagonal loading of the pylon segmental model of the Runyang Yangtze River Bridge

试验加载考虑多重因素后, 决定分三次进行。第一次为斜向加载, 目的是检验索塔在正常使用极

限状态的设计索力下, 索塔的弹性工作状态。水平加载试验再分两次进行, 第一次水平加载最大吨位

为 8 000 kN，然后卸载到零，目的是找出模型长边的开裂荷载；第二次水平加载最大吨位到 20 000 kN，从中找出短边的开裂荷载，最终以模型达到破坏为度。

润扬大桥索塔足尺模型试验表明，在斜向作用的斜拉索工作索力下，索塔处于弹性工作状态。通过试验及理论分析推算出：斜向加载下短边开裂荷载为 $p_{1,cr} = 13\ 100\ \text{kN}$ ，长边开裂荷载为 $p_{2,cr} = 9\ 600\ \text{kN}$ 。与斜拉索的设计索力 $p = 5\ 129\ \text{kN}$ 相比，短边抗裂安全系数 $p_{1,cr}/p = 2.25$ ，长边抗裂安全系数 $p_{2,cr}/p = 1.87$ ，短边与长边开裂荷载比值 $p_{1,cr}/p_{2,cr} = 1.36$ 。

在水平加载中，裂缝首先出现在长边中截面的内侧上口及长边角部外侧附近，宽度约 0.02 mm (图 7)，长边开裂荷载为 7 600 kN。短边裂缝首先出现在斜拉索套筒口上方，开裂荷载为 10 500 kN。在整个加载过程中，短边裂缝开展较长边缓慢，长边裂缝数量多、宽度大；短边裂缝数量较少，裂缝宽度发展也较慢。在 20 000 kN 荷载下，模型长边顶面四个角区均可见外层普通钢筋拉断和屈服，裂缝宽度从 6 mm 至 20 mm 不等；由于裂缝截面混凝土退出工作，而裂缝截面预应力筋以及普通钢筋的破断荷载预计在 22 000 kN 左右，考虑到截面内侧普通钢筋不能与外侧普通钢筋以及预应力筋同时达到极限强度，若再继续加载，模型有断裂的危险，所以未再进一步加载，将 20 000 kN 定为模型极限荷载。在 20 000 kN 荷载时，短边最大裂缝宽度在 0.3 mm 左右。



图 7 模型长边外立面裂缝分布
Fig.7 Cracking on long-side of the pylon model

3 索塔预应力索合理布置形式探讨

箱形截面索塔中的 U 形预应力索布置，通常分为横桥向开口 U 形索 (润扬大桥情况) 和顺桥向开口 U 形索 (南京二桥情况) 两种形式，不同布索形式对索塔的预应力效果显然是有区别的。

为进行分析比较，以润扬大桥的索塔模型为蓝本，分别构造横桥向开口 U 形索和顺桥向开口 U 形索两个计算模型。由于索塔箱形截面的长边总是位于顺桥向，而短边总是在横桥向，所以，横桥向开口又称长边开口，顺桥向开口又称短边开口，见图 8 和图 9。

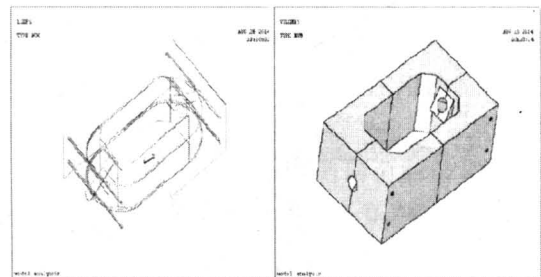


图 8 U 形预应力索按横桥向开口布置
Fig.8 U-tendons' opening toward the transverse side of bridge

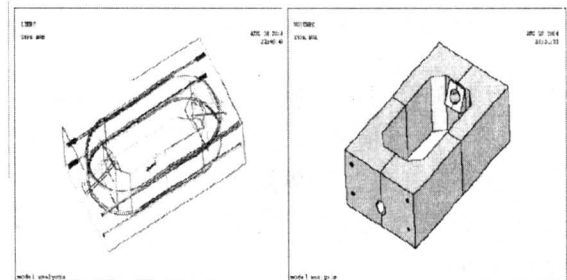


图 9 U 形预应力索按顺桥向开口布置
Fig.9 U-tendons' opening toward the longitudinal side of bridge

从有限元分析的应力图中可以看出，在横桥向开口的 U 形预应力索作用下，短边预压应力较大；在顺桥向开口的 U 形预应力索作用下，长边预压应力较大 (图 10，图 11)。

在斜拉索的索力作用下，如果以混凝土达到标准抗拉强度作为开裂荷载，则采用顺桥向开口 U

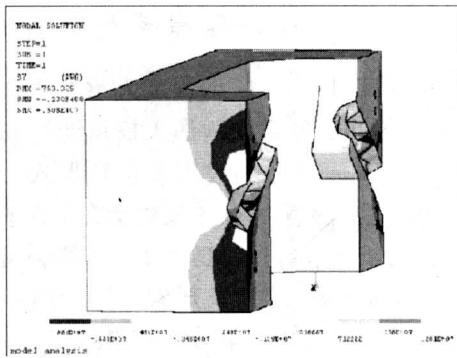


图 10 U 形索按横桥向开口布置时的应力
Fig. 10 Stress distribution when U-tendons' opening toward the transverse direction of bridge

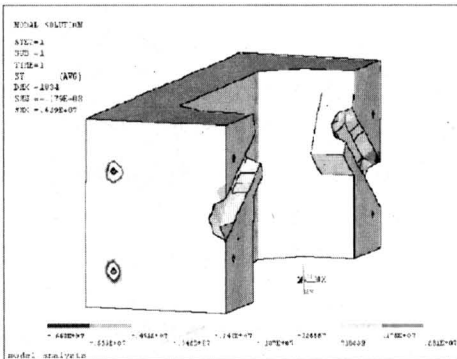


图 11 U 形索按顺桥向开口布置时的应力
Fig. 11 Stress distribution when U-tendons' opening toward the longitudinal direction of bridge

形预应力索布置时,长边首先开裂,开裂荷载为 12 040 kN;采用横桥向开口 U 形预应力索布置时,短边首先开裂,开裂荷载为 7 430 kN。两种 U 形预应力索布置形式开裂荷载比为: $12\ 040/7\ 430 = 1.66$ 。

根据模型试验及有限元分析结果,无论采用哪种 U 形预应力索布置形式,索塔节段模型短边开裂点均位于斜拉索套筒口上方,长边开裂点均位于长边内侧中点。

为了说明索塔箱形截面长边、短边开裂荷载的均衡性,特定义一个长边、短边的消压应力比 η :

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{长边}} + \gamma R_1^b}{\sigma_{\text{短边}} + \gamma R_1^b}, \quad (1)$$

式中 $\sigma_{\text{短边}}$ 为短边开裂控制点预压应力; $\sigma_{\text{长边}}$ 为长边开裂控制点预压应力; R_1^b 为混凝土抗拉强度标准值; γ 为受拉区混凝土塑性系数,算法参见桥规,

此处取 1.0。

而在斜拉索作用下,长边开裂控制点处的拉力 $\sigma'_{\text{长边}}$ 与短边开裂控制点处的接应力 $\sigma'_{\text{短边}}$ 之比为

$$\eta' = \frac{\sigma'_{\text{长边}}}{\sigma'_{\text{短边}}} = \frac{5.32}{9.42} = 0.565. \quad (2)$$

将斜拉索作用下的长边、短边拉应力比 η' 与 U 形索作用下的长边、短边消压应力比 η (表 2 中最后一列) 进行比较,从物理意义上不难理解, η'/η 越接近 1,表明 U 形索在长边、短边对斜拉索作用的抵抗越均衡。在本算例中,当 U 形索按横桥向开口布置时, $\eta'/\eta = 0.555/0.565 = 0.98$; 而当 U 形索按顺桥向开口布置时, $\eta'/\eta = 1.161/0.565 = 2.05$ 。

因此,当索塔节段采用横桥向开口 U 形预应力索布置时,其长边、短边开裂荷载较为接近,而采用顺桥向开口 U 形预应力索布置时,其长边、短边开裂荷载相差较远。如果要求长边、短边具有相同的抗裂安全度,则采用横桥向开口 U 形索更为合理。

表 2 索塔截面长短边消压应力比 η 值

Table 2 The stress decompression ratio η between long-side and short-side of pylon's cross-section

预应力索形式	短边控制	长边控制	η
	点应力/MPa	点应力/MPa	
横桥向开口 U 形索	-8.54	-3.41	0.555
顺桥向开口 U 形索	-4.0	-5.12	1.161

4 索塔节段模型对索塔整体仿真效果

4.1 计算模型选取

索塔预应力索的设计以及索塔锚固区的模型试验均是按节段考虑的,但节段模型与索塔整体之间有差别,首先是边界条件的差异,其次是各对斜拉索张力对索塔受力的叠加作用,因此有必要研究索塔节段模型对索塔整体的仿真效果。

以润扬大桥索塔锚固区为分析蓝本,分析模型取 10 m 高,分 4 个标准节段,每节段高 2.5 m,为方便起见,将自上而下的第二节段作为研究的基准节段,将基准节段的中点定义为高度零点。应用 ANSYS 有限元程序建立索塔三维有限元计算分析模型 (图 12)。

在分析中考虑以下 4 种基本工况: a. 在基准节段上施加 U 形预应力索,研究 U 形索作用及其应力扩散; b. 在基准节段上施加斜向荷载,研究斜拉索作用及其扩散; c. 在整体模型的所有节段

上施加 U 形索，研究各节段 U 形索作用的相互影响及在高度方向的分布；d. 在整体模型的所有节段上施加斜向荷载，研究各对斜拉索作用的相互影响及在高度方向的分布。其他状态下索塔应力分布可以通过叠加得到。

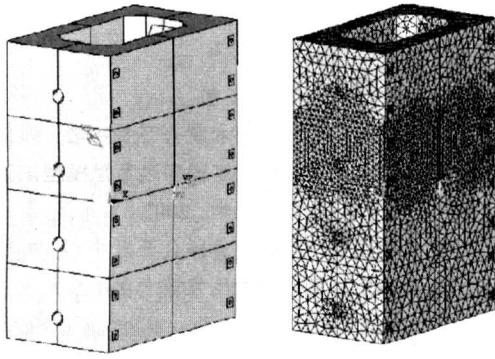


图 12 多节段整体模型

Fig. 12 Integral model for multi-segments

4.2 U 形预应力作用下塔身水平应力沿高度方向的分布

润扬大桥索塔上塔柱竖向每 2.5 m 内，通过布置 4 束 U 形预应力索来平衡一对斜拉索的索力，在这种结构中，U 形预应力索的作用在高度方向的分布是否均匀，有没有留下预应力的“空白区”，是设计者十分关心的问题，在此，通过研究 U 形预应力作用沿高度方向的扩散程度进行探讨。为此，引入两个参数，即从基准节段向索塔上下的应力变化系数 λ 和应力衰减梯度 i ：

$$\lambda = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (3)$$

$$i = \frac{1 - 0.2}{h(\lambda = 1) - h(\lambda = 0.2)}, \quad (4)$$

式 (3) 中 σ_0 为基准节段受力时，基准节段上基准点（基准节段中央横截面上某点）处的环向水平应力值； σ 为整体模型在通过基准节段基准点竖线上的各点应力。式 (4) 中分母为索塔沿竖向 λ 等于 1 的点和 λ 等于 0.2 的点之间的高度（以 m 计），分子为相应高度点处的 λ 值之差。

λ 表示在 U 形索（或斜拉索）作用下，索塔沿竖向某点的应力与基准点的应力之比，为无量纲数。 i 反映在 U 形索（或斜拉索）作用下，应力沿索塔高度方向每米的衰减率。通过数值分析，有如下结论：

1) 仅在基准节段上施加 U 形预应力作用时，短边中截面外侧应力在斜拉索孔附近较大，并向上下递减，应力衰减梯度为 $i = 0.31$ ，在基准节段内 $\lambda > 0.4$ ，在相邻节段中点处 λ 为 0.2 左右。长边中截面内侧应力在基准节段高度中央点处最大，向上下递减， $i = 0.19$ ，在基准节段内 λ 保持在 0.7 以上。

2) 在所有节段施加预应力时，短边应力在斜拉索孔上方 0.4 m 范围内较大，索孔边缘处最大， λ 达到 1.4 ~ 1.6，其余各点 λ 在 1.15 ~ 1.2，比较均匀；长边应力叠加比较均匀， λ 在 1.9 ~ 2.0 之间。

4.3 斜拉索荷载作用下塔身水平应力沿高度方向的分布

实际斜拉桥的索塔要同时承受多对斜拉索的作用。为了研究各对斜拉索作用对索塔节段的影响，同样使用参数 λ 和 i 对斜拉索作用的扩散进行研究，得到以下结论：

1) 仅在基准节段施加斜向荷载时，短边应力在索孔附近衰减梯度较大， $i = 0.44$ ，在基准节段内 λ 为 0.4 ~ 1.0。长边应力在基准节段内 $i = 0.22$ ， λ 为 0.7 ~ 1.0，扩散范围可取上、下各一个节段。

2) 在所有节段施加斜向荷载时，短边应力在索孔上方最大， λ 为 1.51，其余各点 λ 在 0.7 ~ 1.3。长边应力叠加比较均匀， λ 在 1.6 ~ 2.4 之间。

4.4 节段模型与索塔整体开裂荷载比较

如果以混凝土达到抗拉强度标准值作为开裂标准，以整体模型计算的结果是：短边开裂荷载 $P_{1,cr} = 12\ 880\ \text{kN}$ ，长边开裂荷载 $P_{2,cr} = 10\ 910\ \text{kN}$ 。而根据节段模型试验与计算所得到的斜向开裂荷载为 $p_{1,cr} = 13\ 100\ \text{kN}$ ， $p_{2,cr} = 9\ 600\ \text{kN}$ 。节段模型开裂荷载与索塔整体开裂荷载相比，对于短边有 -1.7% 的差异，对于长边有 +12.0% 的差异，但均能满足设计要求。

5 结语

1) 通过足尺模型试验，给出了南京长江二桥和润扬长江大桥斜拉桥索塔的抗裂安全度和极限承载力：南京二桥索塔的开裂控制部位位于短边中点，开裂荷载为 10 000 kN，极限荷载超过 22 400 kN，且在加载最大值下，长边未出现裂缝。短边抗裂安全系数为 1.67，长边抗裂安全系数则大于 3.73。润扬大桥索塔的长边中点内侧首先开裂，开裂荷载为 7 600 kN，短边开裂荷载为 10 500 kN，

极限荷载为 20 000 kN。短边抗裂安全系数为 2.34, 长边抗裂安全系数则大于 1.69。

2) U 形预应力索的布置形式对索塔的预压应力场有较大的影响。分析表明, 采用横桥向开口 U 形预应力索布置时, 长边首先开裂; 采用顺桥向开口 U 形预应力索布置时, 短边首先开裂。当索塔节段采用横桥向开口 U 形索布置时, 其长短边开裂荷载较为接近; 而采用顺桥向开口 U 形索布置时, 其长短边开裂荷载相差较远。如果要求长、短边具有相同的抗裂安全度, 则采用横桥向开口 U 形索更为合理, 且经济性也更好。

3) 索塔整体分析表明, 长边及短边开裂控制部位与节段足尺模型试验相同, 开裂荷载相近, 在合理设置塔身 U 形预应力索间距的情况下, 在索塔上截取每对斜拉索相应的节段进行分析, 可以满足设计要求。

4) 斜拉索对索塔所产生的局部拉力, 在索塔竖向衰减较快, 因此, 在索塔截面内布置 U 形预应力索时, 应当尽量靠近斜拉索的锚固点, 使 U 形索和斜拉索产生的应力变化系数 λ 和应力衰减梯度 i 相匹配。

5) 在优化箱形截面索塔的预应力布置形式时, 可以将索塔长短边的抗裂安全度的均衡性作为优化目标之一。对于横桥向开口 U 形索, 可根据需要

考虑增加长边对拉的直线预应力筋; 对于顺桥向开口 U 形索, 则可考虑补充短边对拉的直线预应力筋。在预应力索的优化设计中, 构造的合理性与经济性也是必须考虑的重要因素。

致谢: 本研究得到南京长江二桥和润扬长江大桥模型试验资金的支持, 在此鸣谢!

参考文献

- [1] 东南大学华东预应力技术联合开发中心. 润扬长江公路大桥北汊斜拉桥索塔锚固区足尺模型试验研究报告[R]. 南京: 东南大学, 2002
- [2] 东南大学华东预应力技术联合开发中心. 大曲率 U 形预应力索及真空辅助压浆技术在南京长江二桥索塔工程中的应用 [R]. 南京: 东南大学, 1999
- [3] 李雄晖. 军山长江大桥索塔锚固区足尺节段模型试验研究 [J]. 交通科技, 2002, (2): 24~27
- [4] 项贻强, 陈国强. 鄱阳湖口大桥节段足尺模型试验与分析研究 [J]. 中国公路学报, 2000, (4): 74~78
- [5] 李兴华, 安群慧, 王戒躁. 芜湖长江大桥索塔锚固区模型试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2001, (5): 103~106
- [6] 王锋君. 杭州艮山门立交桥斜拉索塔锚固区节段的分析研究 [J]. 华东公路, 2000, (6): 19~23

Model Tests and Comparative Study of the Pylon's Anchorage Zone of Two Long-span Cable-stayed Bridges

Liu Zhao, Meng Shaoping, Lü Zhitao

(Key Lab of RC&PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] Two model tests for pylon's anchorage zone of two long-span cable-stayed bridges, the Second Nanjing Yangtze River Bridge and the Runyang Yangtze River Bridge, are expounded in this paper. Safety factors for cracking and ultimate strength are obtained. The optimal configuration of prestress tendons in anchorage zone, and the emulation effects of segment model test to integral pylon are investigated. The results can be a reference for the design of pylon of cable-stayed bridges.

[Key words] cable-stayed bridge; pylon; model test; design research