文章编号: 1002-0268 (2007) 09-0069-05

斜拉桥塔索锚固区空间应力分析

金文成, 张晓飞, 简方梁, 周小勇
(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 结合恩施市施州大桥的设计, 运用大型通用分析软件 ANSYS, 采用空间有限元的方法, 分 2 种工况, 对其空心预应力混凝土桥塔塔索锚固区进行了空间应力分析, 并且比较了传统 U 形布束方式和井字方式的优缺点。分析结果表明: 通过合理布置预应力粗钢筋, 可以抵抗斜拉索水平力产生的不利影响, 满足结构的使用要求; 斜索锚固区段采用箱形截面的桥塔, 索力的水平分量在没有斜索锚固的箱体部分内引起较大的顺桥向拉应力, 在斜索直接锚固的箱体部分, 引起靠外壁部分、横桥向较大的拉应力; 顺桥向预应力筋应布置在没有斜索锚固的箱体内, 横桥向预应力筋则重点布置在斜索直接锚固的箱体靠外侧部分; 塔索锚固区的受力以正应力为主, 只要控制塔索锚固区正应力分布, 塔索锚固区的受力就可得到有效控制。

关键词: 桥梁工程; 预应力混凝土斜拉桥; ANSYS; 空间应力分析; 塔索锚固区; 索力
中图分类号: U448.27 文献标识码: A

Spatial Stress Analysis of the Cable Anchorage Zone of Cable-stayed Bridge

JIN Wen-cheng, ZHANG Xiao-fei, JIAN Fang-liang, ZHOU Xiao-yong
(School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong Universityof Science and Technology, Hubei Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the design of Shizhou bridge in Enshi city, the analysis of the spatial stress distribution of the cable anchorage zone is carried out in two cases by making use of the common analysis software-ANSYS. The advantages and disadvantages of traditional U type and # type layout of prestressed tendons are analyzed. The results indicate that, the affection caused by the horizontal components of the cable can be resisted by reasonable layout of the prestressed tendons and the requirement of usage can be reached, the horizontal components of cable forces cause a rather large longitudinal tense stress at the non-anchorage zones and great transverse tense stress at outside zones of anchorage. So the prestressed tendons should be put in the right places according to the analysis. The normal stress is the main part in the anchorage zone, when the normal stress be controlled, the force in the anchorage zone be controlled also.

Key words: bridge engineering; prestressed concrete cable-stayed bridge; ANSYS; spatial stress analysis; the cable anchorage zone in a tower; cable force

近年来, 斜拉桥以其挺拔的造型、较大的跨越能力, 使用日益广泛。已建和在建的斜拉桥中, 普遍采用预应力混凝土桥塔。斜拉桥独特的传力机制, 桥塔为主要的承重构件, 其上之塔柱塔索锚固区是把主梁内力通过斜拉索传递到主塔的关键环节。由于桥塔不仅承受很大的轴向力, 而且在斜拉索的锚固区还要承受拉索产生的水平分力。所以强大的索力施加到塔柱上的水平分力光靠塔柱的普通钢筋是难以抵抗的。这就需要在塔柱的拉索锚固区布置预应力束以抵抗拉索产生的拉应力[1~3]。

国内在塔柱锚固区预应力束布置时多采用 U 形 (环形) 预应力束布置, 有顺桥向布设 (开口于顺桥向) 和横桥向布设 (开口于横桥向), 如图 1 所示。应该说这种技术已经比较成熟, 最近还有一些采用精轧螺纹钢筋井形直束预应力束布置, 如图 2 所示[4,5]。

本文运用空间有限元方法, 结合恩施市施州大桥, 对其空心预应力混凝土桥塔塔索锚固区进行了空间应力分析, 指出了其力学特性, 并对类似结构的设

收稿日期: 2006-04-17
作者简介: 金文成 (1958-), 男, 安徽望江人, 教授, 研究方向为大跨度预应力混凝土桥梁结构. (hustxiaofei@163.com)

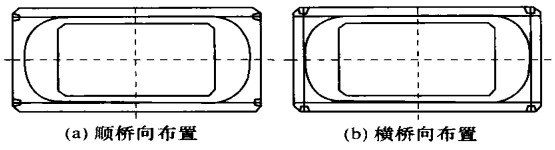

图 1 U 形预应力束布置示意图

Fig 1 Sketch of U type layout of prestressed tendon

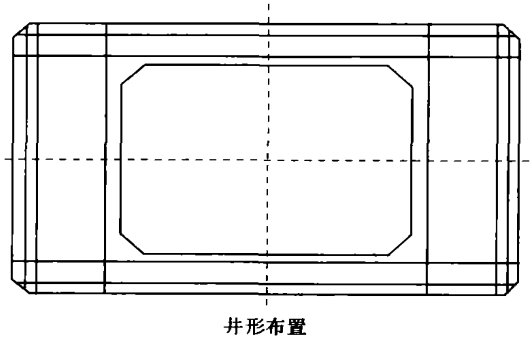

图 2 井形预应力束布置示意图

Fig 2 Sketch of # type layout of prestressed tendon

计提出了若干建议。恩施市施州大桥为单索面直塔预应力混凝土斜拉桥（30 m+ 100 m+ 145 m+ 3×30 m），墩塔梁固结体系。主梁为整体式箱形断面，双向 4 车道，全桥宽 21.5 m。恩施桥主塔高 66.65 m，上塔柱高 44.65 m，为斜拉索塔上锚固区，箱形断面，外形尺寸 6.6 m× 4.0 m，侧壁厚 0.6 m，前壁厚为 1.4 m，塔上索距 1.8 m，见图 3。塔前壁设斜拉索钢锚固齿槽，该桥的斜索采用单索面布置，但在纵立面上的每根斜索则由横向并列、中心间距为 1.2 m 的 2 根索组成，在主塔两侧各有 14 对斜拉索，在有限元计算模型中，仅取塔顶以下局部的锚固区段（两侧各有 8 对斜拉索），见图 4，可以保证中间斜索锚固区的应力分布不受下端位移边界效应的较大影响。

1 结构形式与计算模型

恩施桥塔索锚固区预应力钢筋布设形式如图 5 所示。针对塔索锚固区在施工、营运等各个阶段的应力状态及不同施工阶段间的相互影响，此次计算所取的局部区段自塔顶以下两侧各有 8 对斜拉索，考虑到结构对称及荷载近似对称，取 1/4 结构作为计算模型。

1.1 有限元离散

有限元计算采用大型通用有限元程序 ANSYS。有限元离散时，由于桥塔斜索锚固区段的构造特点，有限元计算模型采用了 8 节点 Solid65 块体单元来模拟塔体。钢束采用 Link8 单元模拟，钢束预应力损失以 20% 记，得出损失后的钢束内力值，然后将损失后的

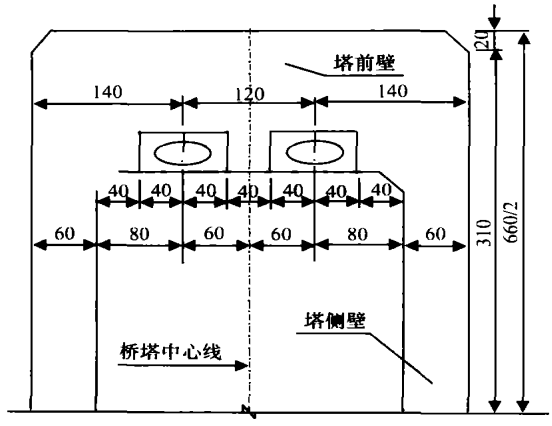

图 3 塔索锚固区横断面图（单位：cm）

Fig 3 Cross section of the cable anchorage zone (unit: cm)

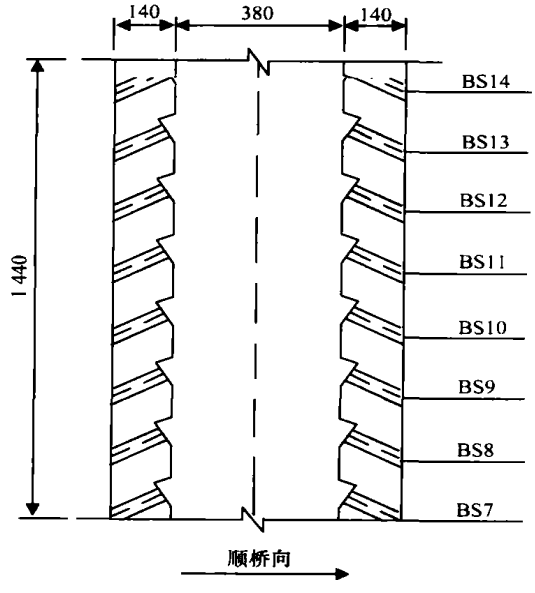

图 4 局部锚固区段纵立面图（单位：cm）

Fig 4 Elevation of the longitudinal partial cable anchorage zone (unit: cm)

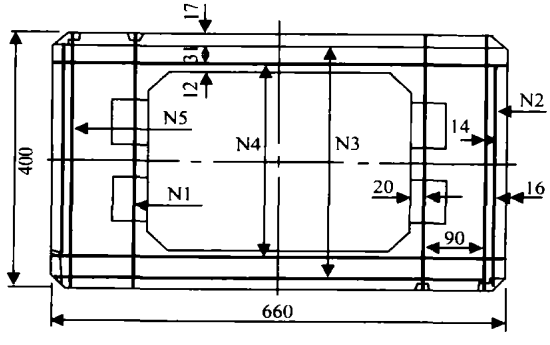

图 5 塔索锚固区预应力束布置图（单位：cm）

Fig 5 Layout of prestressed tendon of the cable anchorage zone (unit: cm)

钢束内力值以降温的形式加在 Link8 单元中，钢束和

塔柱通过节点耦合来共同作用，所谓耦合就是共享同一个节点。此模型共离散为 28 914 个节点，23 864 个 8 节点块体单元，3 560 个 Link8 单元。

单元刚度计算采用非协调插值列式，2 阶高斯积分点。材料特性作了以下简化：塔壁按各向同性的匀质弹性体考虑，未计入劲性骨架及普通钢筋。塔体混凝土（C50）弹性模量 $E=3.5e+10$ Pa，泊松比 $f=0.167$；预应力钢筋采用 JL32 精轧螺纹粗钢筋，标准强度 930 MPa，弹性模量 $E=2.0e+11$ Pa，泊松比 $f=0.3$，面积 $A=8.043e-4$ m^2，线膨胀系数 $\alpha=1.2e-5$。计算模型的有限元离散见图 6，其中总体坐标系规定为：X 轴为横桥向，Y 轴为纵桥向，Z 轴为竖直向上。

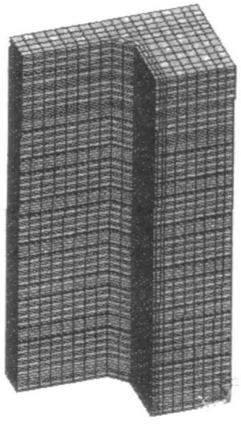

图 **6**　单元离散图

Fig. 6　Discrete element meshes

1.2　边界条件

前壁和侧壁的对称面处分别约束其横桥向和顺桥向的线位移，底面约束其竖向线位移。

1.3　荷载及荷载工况

（1）预应力

计算采用降温法模拟预应力张拉，该法可以较好的模拟有粘结预应力的实际作用状况，钢束预应力损失以 20% 记，即为：

$0.8\times0.85\times930\times10^6\times8.043\times10^{-4}=508.6$ kN，

降温 $T=508.6\times10^3/(1.2\times10^{-5}\times2.0\times10^{11}\times8.043\times10^{-4})=263.5$ ℃。

（2）斜拉索索力

斜拉索索力由平面有限元计算程序桥梁博士 3.0 求得，按最不利组合值取用，见表 1。斜拉索索力按面荷载施加在 0.6×0.6 m^2 的锚垫板上，其作用方向为顺桥向垂直塔壁。

（3）荷载工况

为仔细考查塔索锚固区在各个阶段的应力状态，

表 **1**　斜拉索索力表

Tab. 1　Cable force table

索号	角度/(°)	索力/kN	索水平力/(kN·m^{-2})
BS7	34.65	2 792	6 381
BS8	32.78	2 937	6 860
BS9	31.19	3 016	7 168
BS10	30.89	3 404	8 116
BS11	30.62	3 663	8 758
BS12	30.37	4 002	9 593
BS13	30.13	4 256	10 226
BS14	29.92	4 428	10 662

文中设置了 2 种荷载工况：工况 1：仅张拉预应力束；工况 2：张拉全部预应力束，并施加全部斜拉索（8 索）索力。

2　计算分析

按照前述建立的有限元模型，对恩施桥塔索锚固区进行了线弹性空间应力分析。在 2 种荷载工况下的计算结果见图 7~ 图 18，“+”号表示拉应力，“-”号表示压应力，点号从上到下依次为 1~ 8。

2.1　工况 1

对于仅张拉预应力束的情形（工况 1），结果表明：

（1）塔前壁外侧均为压应力，对称面最小压应力为 4.7 MPa，最大压应力为 7.8 MPa，沿塔高度方向从下到上依次增大（见图 7）；对称面内侧也均为压应力，最小压应力为 0.9 MPa，最大压应力为 1.4 MPa，沿塔高度方向从下到上依次减小（见图 9）。前壁内侧加腋处均为压应力，最小压应力为 0.3 MPa，最大压应力为 0.8 MPa，沿塔高度方向分布均匀（见图 11）。

（2）塔侧壁应力沿塔高度方向分布均匀，对称面外侧均为压应力，最小压应力为 3.4 MPa，最大压应力为 3.8 MPa（见图 13）；对称面处内侧也均为压应力，最小压应力为 6.6 MPa，最大压应力为 7.7 MPa（见图 15）。侧壁内侧加腋处均为压应力，最小压应力为 5.1 MPa，最大压应力为 6.2 MPa（见图 17）。侧壁最大压应力出现在对称面内侧靠塔顶处，其值为 7.7 MPa。

（3）此外，塔前壁外侧与侧壁外侧相交处有 1.3 ~ 5.3 MPa 拉应力，分布在预应力钢筋 N1 和 N5 之间，宽度约为 20 cm，主要是由 N1 和 N5 锚固引起的。在预应力锚固处出现应力集中，最大压应力为 31.0 MPa，最小压应力为 22.1 MPa。

2.2　工况 2

对于张拉全部预应力束，并施加全部斜拉索（8

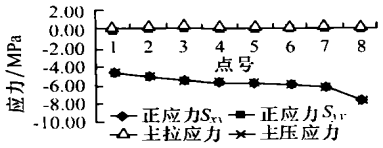

图 7 前壁外侧对称面处应力图(工况 1)

Fig. 7 Stress at the outside of ektexine (case 1)

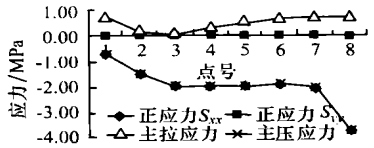

图 8 前壁外侧对称面处应力图(工况 2)

Fig. 8 Stress at the outside of ektexine (case 2)

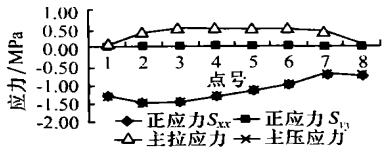

图 9 前壁内侧对称面处应力图(工况 1)

Fig. 9 Stress at the inside of ektexine (case 1)

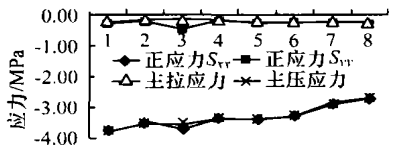

图 10 前壁内侧对称面处应力图(工况 2)

Fig. 10 Stress at the inside of ektexine (case 2)

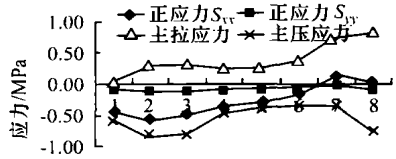

图 11 前壁内侧加腋处应力图(工况 1)

Fig. 11 Stress at the inside armpit of ektexine (case 1)

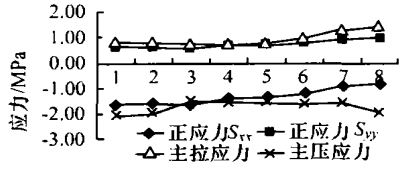

图 12 前壁内侧加腋处应力图(工况 2)

Fig. 12 Stress at the inside armpit of ektexine (case 2)

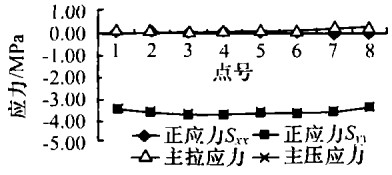

图 13 侧壁外侧对称面处应力图(工况 1)

Fig. 13 Stress at the outside of lateral wall (case 1)

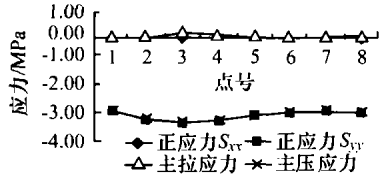

图 14 侧壁外侧对称面处应力图(工况 2)

Fig. 14 Stress at the outside of lateral wall (case 2)

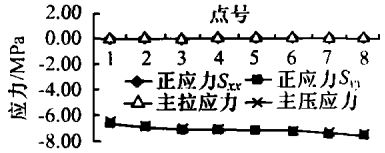

图 15 侧壁内侧对称面处应力图(工况 1)

Fig. 15 Stress at the inside of lateral wall (case 1)

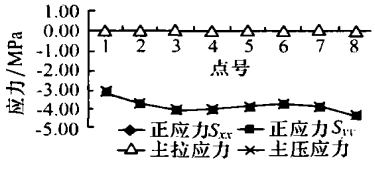

图 16 侧壁内侧对称面处应力图(工况 2)

Fig. 16 Stress at the inside of lateral wall (case 2)

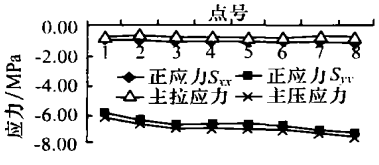

图 17 侧壁内侧加腋处应力图(工况 1)

Fig. 17 Stress at the inside armpit of lateral wall (case 1)

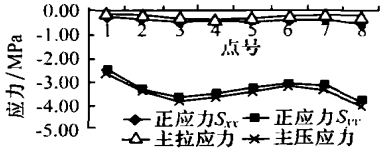

图 18 侧壁内侧加腋处应力图(工况 2)

Fig. 18 Stress at the inside armpit of lateral wall (case 2)

索) 索力的情形, 即成桥营运状态 (工况 2), 结果表明:

(1) 塔前壁外侧均为压应力, 对称面最小压应力为 0.7 MPa, 最大压应力为 3.8 MPa, 沿塔高度方向从下到上依次增大 (见图 8); 对称面内侧也均为压应力, 最小压应力为 2.7 MPa, 最大压应力为 3.8 MPa (见图 10), 沿塔高度方向从下到上依次减小。前壁内侧加腋处均为压应力, 最小压应力为 1.5 MPa, 最大压应力为 2.1 MPa, 沿塔高度方向分布均匀 (见图 12)。

(2) 塔侧壁应力沿塔高度方向分布均匀, 对称面外侧均为压应力, 最小压应力为 2.8 MPa, 最大压应力为 3.3 MPa (见图 14); 对称面处内侧也均为压应力, 最小压应力为 3.2 MPa, 最大压应力为 4.3 MPa (见图 16)。内侧加腋处均为压应力, 最小压应力为 2.6 MPa, 最大压应力为 4.0 MPa (见图 18)。

(3) 此外, 塔前壁外侧与侧壁外侧相交处有 1.3 ~ 5.3 MPa 拉应力, 分布在预应力钢筋 N1 和 N5 之间, 宽度约为 20 cm, 主要是由 N1 和 N5 锚固引起的, 斜拉索的张拉锚固对其影响微弱。在预应力锚固处出现应力集中, 最大压应力为 31.0 MPa, 最小压应力为 22.1 MPa。斜拉索锚下应力 10.0 MPa 左右, 没有出现应力集中。

2.3 应注意的问题

由以上的分析结果可知，在预应力混凝土桥塔的设计中，对塔索锚固区应注意以下问题：

(1) 在斜拉索水平力作用下，塔冠区断面呈框架受力状态，所以塔前壁外侧是拉应力最易出现的地方，布设预应力束时，应考虑加强此处的压应力储备。

(2) 施工和营运阶段显示，桥塔侧壁外侧和前壁外侧相交处，由于预应力钢筋在此锚固，使得此处出现应力集中（见图 19），应加强此处的防裂构造措施，如恩施桥在桥塔侧壁外侧和前壁外侧相交处设了 20× 20 cm 的倒角以释放此处角隅的应力。

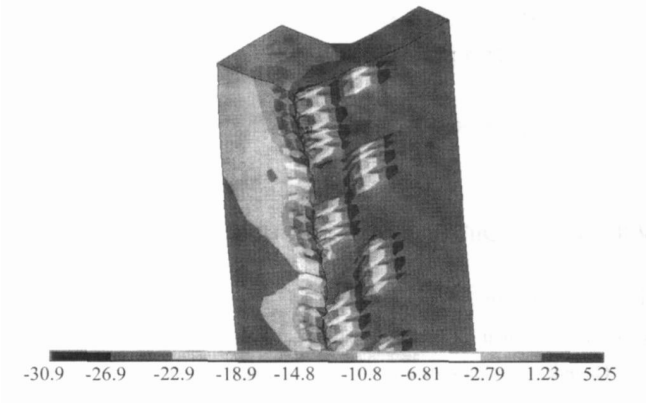

图 **19**　营运阶段部分塔冠区正应力 S_{xx} 示意图（单位：MPa）

Fig. 19　Normal stress S_{xx} of the cable anchorage zone at service phase (unit: MPa)

(3) 施工阶段，桥塔前壁内侧加腋处最大主拉应力达到 0.8 MPa（见图 11）；成桥营运状态，桥塔前壁内侧加腋处最大主拉应力达到 1.5 MPa（见图 12），虽然也满足预应力 A 类构件最大容许主拉应力 2.1 MPa 的要求，但是仍要应加强此处的防裂构造措施。

(4) 工况 1、工况 2 均表明，塔前壁与侧壁以弯曲应力为主。成桥营运状态，塔前壁外侧对称面处最大主拉应力达到 0.8 MPa（见图 8），我们所采取的井形预应力束靠近塔壁的外侧布设，以减小塔壁的弯曲应力，使塔壁受压均匀。

3　预应力筋布束方式的比较

传统的 U 形布束方式给施工带来很多不便，因为桥塔的箱壁中布置着用于斜拉索索管定位的劲性骨架、斜拉索索管、斜拉索、较密的塔柱钢筋，所以留下的操作空间很小。而弯束预应力筋因为弯曲和施工时要避免与箱壁内壁的钢筋和构件发生冲突，就会给施工提出很高的要求。布设预应力筋时不容易定位，施工难度较高。环形束的长度较长，弯折角几乎接近 90°，必然预压力损失就高[6, 7]。

井形预应力精轧螺纹粗钢筋与传统的 U 形预应力钢束相比较，粗钢筋在塔冠区可布置多层，从而使塔冠区的受力更加均匀；张拉控制应力较小，方便施工；预应力损失少，预应力效率高。但是用直束加强很明显会增加使用锚头[8~10]。

4　结论

(1) 计算表明，通过合理布置预应力粗钢筋是可以抵抗斜拉索水平力产生的不利影响，满足结构的使用要求的。

(2) 斜索锚固区段采用箱形截面的桥塔，索力的水平分量在没有斜索锚固的箱体部分内引起较大的顺桥向拉应力，在斜索直接锚固的箱体部分，引起靠外壁部分、横桥向较大的拉应力。因此，顺桥向预应力筋应布置在没有斜索锚固的箱体部分内，横桥向预应力筋则重点布置在斜索直接锚固的箱体靠外侧部分。

(3) 从正应力和主应力的关系可知，塔索锚固区的受力以正应力为主，换句话说，只要控制塔索锚固区正应力分布，塔索锚固区的受力就可得到有效控制。

参考文献：

[1] 林元培. 斜拉桥 [M]. 西安：西南交通大学出版社，1994.

[2] 严国敏. 斜拉桥 [M]. 北京：人民交通出版社，1995.

[3] 铁道部大桥工程局桥梁科学研究所. 斜拉桥 [M]. 北京：科学技术文献出版社，1992.

[4] 余报楚，张哲. 金马大桥主塔直束预应力筋设计技术与研究分析 [J]. 公路交通科技，2005，22 (5)：104－107.

[5] 邵旭东，曾田胜，李立峰，等. 斜拉桥预应力索塔优化布束方式研究 [J]. 中国公路学报，2001，14 (2)：40－44.

[6] 陈建阳，徐国平，刘丽，等. 大吨位小半径环向预应力在斜拉桥索塔锚固区中的应用研究 [J]. 桥梁建设，2001 (2)：12－15.

[7] 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 (10)：103－106.

[8] 代希华. 崖门大桥塔冠预应力设计 [J]. 广东公路交通，1999 (2)：4－8

[9] 李兴华，安群慧，王戒躁. 预应力混凝土空心桥塔锚固区受力特点研究 [J]. 桥梁建设，1999 (1)：23－24.

[10] 苏杨，罗嗣碧，朱华民. 株洲建宁大桥主塔设计 [J]. 人民长江，2003 (12)：14－15.