

# 外露型钢锚箱索塔锚固结构受力机理试验

徐海军<sup>1,2</sup>, 刘玉擎<sup>1</sup>, 李 炆<sup>1</sup>, 郑双杰<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 通过缩尺比例为1:2的节段模型试验, 揭示了外露型钢锚箱索塔锚固结构的受力机理, 重点分析了塔壁预应力在结构中的作用效应。研究表明: 外露型钢锚箱索塔锚固结构在中小跨径桥梁中具有较好的适用性; 在塔壁不开裂的情况下, 预应力不会改变水平索力在钢锚箱和混凝土塔壁之间的分配关系; 预应力能够明显减少塔壁混凝土的拉应力, 提高塔壁的抗裂性能, 但也会降低钢板的利用率和增大焊钉剪力顺桥向作用的剪力。

**关键词:** 组合桥; 索塔锚固结构; 受力机理; 模型试验; 外露型

**中图分类号:** TU398; U441

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Stress Mechanism of Exposed Steel Anchor Box Cable-tower Anchorage

XU Haijun<sup>1,2</sup>, LIU Yuying<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, ZHENG Shuangjie<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper, based on a model experiment of 1/2 reduced scale, reveals the stress mechanism of exposed steel anchor box cable-tower anchorage and analyzes the effect of the prestress. The results show that the exposed steel anchor box cable-tower anchorage is suitable for the cable-stayed bridge of small span. In the condition of no-crack occurred in the concrete tower wall, prestress does not change the distribution of the horizontal cable force between the steel anchor box and the concrete tower wall. Prestress can obviously reduce the tensile stress of concrete tower wall and then improve the performance in crack resistance. However, prestress will also reduce the ratio of utilization of steel anchor box and add the shearing force of studs.

**Key words:** composite bridge; cable-tower anchorage; stress mechanism; model test; exposed steel anchor box

斜拉桥索塔锚固结构是一个将斜拉索的局部集中力分散到索塔全截面, 并安全、均匀地传递到锚固区以下的重要受力结构。索塔锚固结构采用组合结构可以充分发挥钢材和混凝土材料各自的优势, 提高锚固结构的受力性能。组合索塔锚固结构主要有钢锚梁和钢锚箱两种基本形式<sup>[1]</sup>。1987年建成的比利时 Ben-Ahi 大桥首次采用钢锚箱锚固结构的大桥<sup>[2]</sup>, 1995年建成的法国诺曼底大桥也采用了钢锚箱式锚固结构<sup>[3]</sup>。在国内, 苏通大桥<sup>[4]</sup>和杭州湾跨海大桥<sup>[5]</sup>分别采用了内置型与外露型钢锚箱索塔锚固结构。苏通大桥索塔锚固结构平面外轮廓尺寸为 9.164 m×8.365 m, 塔壁端壁和侧壁厚度分别为 1.0 m 和 1.2 m, 内置型钢锚箱平面外轮廓尺寸为 7.965 m×2.700 m, 钢锚箱侧板与混凝土侧壁间净距为 2.83 m, 锚固最大设计索力为 7 279.7 kN。杭州湾跨海大桥索塔锚固结构平面外轮廓尺寸为 6.0 m×6.5 m 渐变到 6.811 m×15.377 m, 塔壁端壁和侧壁厚度分别为 1.4 m 和 0.8 m, 外露型钢锚箱平面外轮廓尺寸为 6.5 m×2.8 m, 钢锚箱侧板与混凝土侧壁间净距为 1.850~6.289 m, 锚固最大设计索力为 5 136.2 kN<sup>[1]</sup>。这些工程和其他一些大跨度桥梁工程上应用索塔锚固结构时, 由于索塔平面尺寸较大, 索塔侧壁与钢锚箱之间通常存在一个较大的空间。

近年来, 城市桥梁中的一些中小跨径混凝土斜拉桥也开始采用组合索塔锚固结构。这种桥梁常常因为桥面很宽, 造成斜拉索索力很大, 斜拉索安装和张拉所需要空间要求使得索塔内腔尺寸不能过小, 为了避免粗笨的索塔造成桥梁外形比例不协调, 采用外露型钢锚箱锚固结构可以较传统的锚固形式取得更小的结构外形。因为塔柱顺桥向尺寸可以减少两个混凝土塔壁厚度(1.2~1.6 m), 横桥向可以减小直至取消钢锚箱侧板与混凝土侧壁之间的空间, 即将侧板与混凝土侧壁“密贴”在一起, 从而减小横向尺寸。例如, 对于

收稿日期: 2013-06-05

第一作者: 徐海军(1978—), 男, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为组合桥梁结构。E-mail: stingtsu@gmail.com

通讯作者: 刘玉擎(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为组合桥梁结构。E-mail: yql@tongji.edu.cn

7 500 kN的索力,塔柱尺寸可以减小到4.5 m×3.0 m.这种不同于大跨度桥梁中通常采用的锚固构造形式,使得结构表现出不同的受力机理.

本文以一座独塔双索面混凝土斜拉桥的外露型钢锚箱锚固结构为对象,开展了节段模型试验研究,重点探讨了塔壁预应力对结构受力机理的影响.

## 1 外露型钢锚箱锚固结构构造特点

本文研究的工程背景是一座主跨123 m的独塔双索面混凝土斜拉桥.索塔采用H形索塔,设18对斜拉索,位于上塔柱的10对斜拉索因索力较大而采用外露型钢锚箱锚固结构.如图1所示,锚固结构分为3个部分:中间的钢锚箱和位于其两侧的混凝土塔壁.钢锚箱为4.7 m×1.2 m矩形结构,由侧板(厚度为35 mm)、端板、锚垫板、承压板、支承板和加劲板组成;内测混凝土塔壁为5.0 m×0.9 m矩形截面;外侧混凝土塔壁为5 m×(0.675~1.400) m五边形截面.混凝土塔壁和钢锚箱之间依靠直径25 mm焊钉连接(横向间距100 mm,竖向间距150 mm).

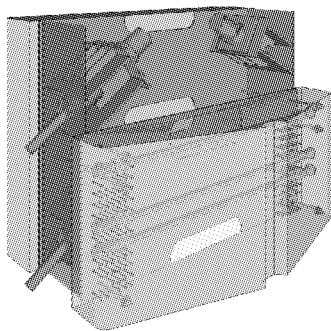


图1 外露型钢锚箱索塔锚固结构

Fig.1 The structure of the exposed steel anchor box cable-tower anchorage

外露型钢锚箱索塔锚固结构在索力作用下,在横断面上会发生框架结构的弯曲变形,使得在钢锚箱与混凝土塔壁联结面上的焊钉受到一定的拉拔力,不能很好地传递剪力,为此在塔壁设置“井”字形预应力钢束,顺桥向采用12Φs15.20钢绞线,横桥向采用JL32精轧螺纹钢,每根拉索对应设置3对纵向和横向预应力,纵向预应力对于结构的受力有较大影响,是本文研究的重点内容之一.

## 2 模型试验方法

### 2.1 模型设计

本桥选取受力最为不利的17号索(最大设计索

力7 040 kN)对应的节段进行1:2等比例缩尺模型试验,节段模型试件构造如图2所示.

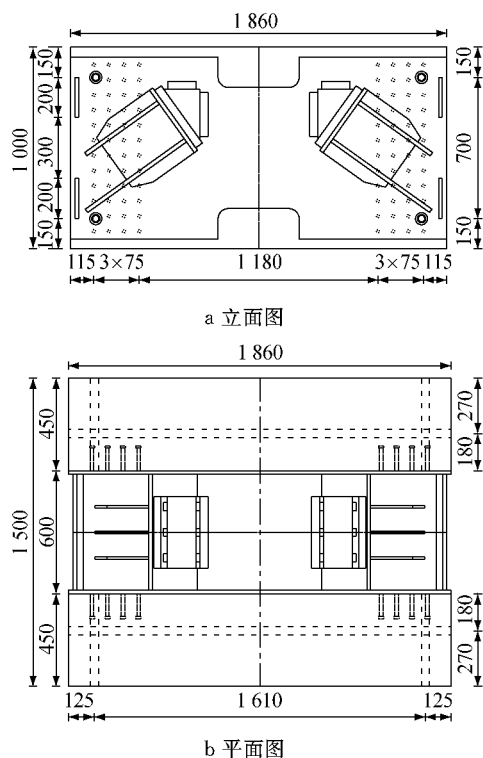


图2 节段模型试件构造尺寸(单位:mm)

Fig.2 The size of the segmental model specimen (unit: mm)

实桥单节段高度为1 800 mm,故试件高度取900 mm,为了减小边界约束对结构受力的影响,塔壁在上下端均高出钢结构50 mm,试件混凝土高度为1 000 mm.考虑到侧板和塔壁在中心线附近受力均匀而两端受力复杂,将试件顺桥向长度减小为1 860 mm.简化实桥因造型而在外侧塔壁采用的五边形截面,采用与内侧塔壁一样的尺寸,使得结构构造和受力完全对称,忽略不对称引起的微小受力差异,其余结构尺寸均严格按照相似比例进行缩放.

焊钉连接件高度方向布置间距减小为原来的一半,即75 mm.焊钉排列单侧高度方向为12行,水平方向为4列.并且根据焊钉刚度等效原则,采用Φ16×120 mm的焊钉进行试验.混凝土塔壁上锚固4根贯穿试件的精轧螺纹预应力筋,模拟锚固区横桥向和顺桥向预应力作用.

模型采用与实桥完全相同的材料,钢板材料为Q345qC,混凝土标号等级为C50.在试验当天测得的混凝土立方体标准抗压强度为55.1 MPa,弹性模量为3.73 GPa.钢板材料特性如表1所示.

### 2.2 试验加载

图3为试验现场加载装置,为准确模拟实桥拉

表 1 钢板材料特性

Tab.1 Material properties of steel plate

钢板厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	延伸率	备注
40	355	530	0.26	锚垫板及加载板
20	465	580	0.23	锚头支撑板
18	385	530	0.31	锚箱侧板及端板
12	280	535	0.31	锚头加劲

索斜向传力的特点,本试验采用双向分离的新型加载方案,竖向荷载由压力机提供,而水平向荷载通过千斤顶自平衡顶压施加,在模型底面铺设黄沙垫层以减小试件底部与试验机台座间的摩擦.根据实桥中最大索力换算的节段模型荷载为 1 760 kN,对应的竖向荷载为 1 010 kN,水平荷载为 1 442 kN,以此作为试验加载的设计荷载  $P$ .

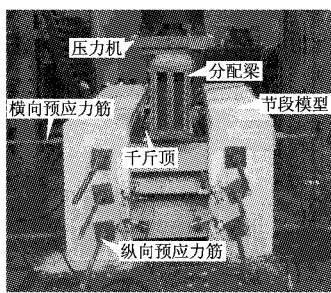


图 3 试件加载装置

Fig.3 Specimen loading device

根据实桥预应力换算得到模型的预应力作用:顺桥向预压力为 368 kN;横桥向预压力为 120 kN.

加载分为两个工况:工况 1 模拟实桥结构受力状态,顺桥向及横桥向预应力全部张拉至设计值,索力加载至  $1.7P$ ,用于测试结构安全性能;工况 2 释放顺桥向预应力,加载至  $3.5P$ ,用于研究索塔锚固结构的极限承载能力以及顺桥向预应力对结构受力的影响,如表 2 所示.

表 2 试验荷载工况

Tab.2 Load cases of the experiment

工况编号	预应力作用/kN		最大荷载作用/kN	
	顺桥向预压力	横桥向预压力	竖向分力	水平分力
1	368	120	1 717	2 451
2	0	120	3 535	5 047

### 2.3 测点布置

对于钢锚箱,在侧板内侧中心线位置处布置水平应变片以测试侧板承担的水平力;在锚头与侧板连接焊缝附近及应力集中处布置应变花,以测试钢锚箱的传力部位的应力大小;在侧板外侧的焊钉连接件之间的关键部位设置应变花,以测试焊钉受力分布情况.对于混凝土塔壁,在塔壁外表面中心线位置布置水平应变片,以测试混凝土塔壁承担的水平

力;在水平钢筋上布置应力测点,以测试混凝土开裂后的受力情况.此外,在钢-混结合部的关键位置处设置位移计,测试钢与混凝土水平、竖向相对滑移以及相对脱离位移.试验共布置 50 个单向应变片,27 个三向应变花以及 10 个位移计.

## 3 试验结果及分析

### 3.1 钢锚箱侧板应力

钢锚箱侧板是承受斜拉索水平分力的主要板件.如图 4 可知,工况 1 中侧板拉应力随加载基本保持线性增长,整体应力水平较低, $1.7P$  荷载作用下最大应力为 60.2 MPa.由于纵向预应力会通过焊钉传递到钢板上,因此钢板在加载前处于受压状态.

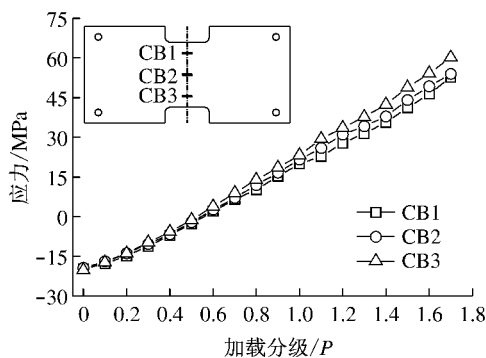


图 4 工况 1 钢侧板拉应力-荷载曲线

Fig.4 Tensile stress-load curves of steel side plate, Case 1

如图 5 所示,工况 2 取消纵向预应力后,钢板初始压应力基本消除.在  $3.5P$  荷载作用下应力不超过 300 MPa,说明侧板仍处于弹性受力阶段.当荷载达到  $1.2P$  时,测点 1(CB1)的应力突然增加,结合混凝土塔壁裂缝开展情况,可知应力突变是由于塔壁上部发生开裂并退出工作,应力转移到侧板上.测点 2(CB2)应力增加幅度较小,可认为混凝土出现局部

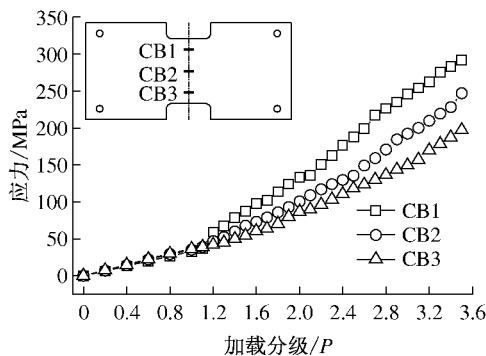


图 5 工况 2 钢侧板拉应力-荷载曲线

Fig.5 Tensile stress-load curves of steel side plate, Case 2

裂缝,但并未完全退出工作.测点3(CB3)在加载过程中应力曲线增加较为均匀,说明塔壁底部混凝土受地面摩擦力约束作用而没有出现裂缝.

### 3.2 混凝土塔壁外侧表面应力

因为纵向预应力的作用,工况1在 $1.7P$ 作用下塔壁外侧中心线上、中、下3个测点(C1,C2,C3)仍处于受压状态,受边界条件的影响,3个测点应力水平差异较大.工况2取消纵向预应力后,塔壁出现拉应力,在 $1.0P \sim 1.1P$ 荷载作用下出现裂缝,因此只给出 $1.0P$ 作用下的应力分布图,见图6.

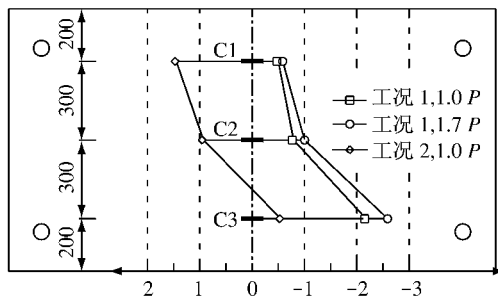


图6 混凝土塔壁外侧表面水平应力分布(尺寸单位:mm)

Fig.6 Horizontal stress in the outside surface of the concrete wall of the tower

### 3.3 塔壁普通钢筋应力

图7是工况1下混凝土塔壁内侧中心线上、中、下3个测点(GJ01,GJ03,GJ11)和外侧中心线中间测点(GJ10)钢筋应力变化曲线图.可以看出,预应力使得钢筋初始处于受压状态,拉索力对塔壁的弯矩和轴力组合作用使得塔壁内侧受拉、外侧受压.

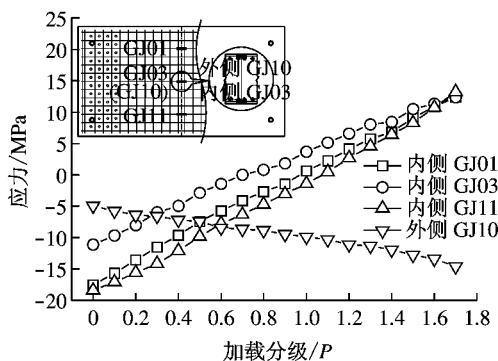


图7 工况1塔壁水平钢筋应力-荷载曲线

Fig.7 Horizontal stress-load curves of the rebar of the tower, Case 1

工况2下,上部测点GJ01应力在 $1.1P$ 时应力有明显增加(图8),说明内侧上部混凝土首先发生开裂;荷载增加达到 $1.2P$ 时,测点GJ03的应力曲线有突变现象,说明裂缝进一步开展至塔壁中部.塔壁下部由于直接接触地面,有一定的约束作用,受到的

顺桥向拉力较小,钢筋应力没有发生明显的增大.

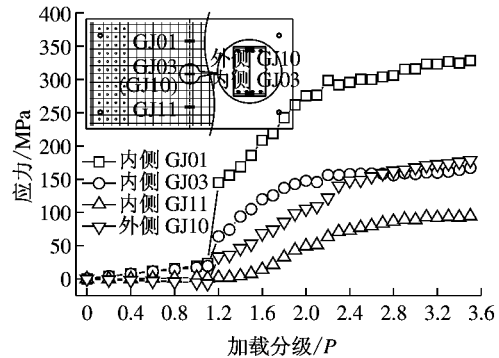


图8 工况2塔壁水平钢筋应力-荷载曲线

Fig.8 Horizontal stress-load curves of the rebar of the tower, Case 2

在测点GJ01对应塔壁外侧的水平钢筋上布置有测点GJ02,GJ01和GJ02应力随加载等级的变化趋势基本保持一致,达到 $1.1P$ 时应力有明显增加,加载至 $3.0P$ 应力达到 $330\text{ MPa}$ ,接近屈服强度.

### 3.4 钢锚箱-塔壁相对滑移

工况1中,钢锚箱-塔壁相对滑移较小.工况2相对滑移-荷载曲线如图9所示.由图可知,加载过程中曲线没有出现明显的非线性现象,总的相对滑移较小,表明焊钉在加载过程中没有进入塑性状态.

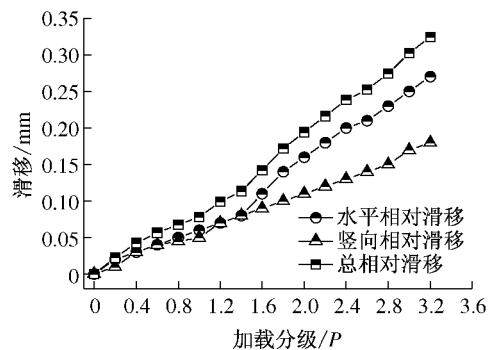


图9 工况2相对滑移-荷载曲线

Fig.9 Relative slip-load curves, Case 2

由于锚固结构会发生面内弯曲变形,使得混凝土塔壁与钢侧板之间发生脱离,试验中工况1和工况2在 $1.0P$ 作用下脱离值约为 $0.3\text{ mm}$ .

## 4 预应力作用效应分析

### 4.1 预应力对结构受力的影响

工况1施加了顺桥向预应力筋,混凝土塔壁在加载至 $1.7P$ 时未出现开裂现象.工况2撤销了顺桥向预应力筋,加载至 $1.1P$ 后,塔壁混凝土内侧中部首先开裂,并随荷载等级增加逐渐延伸至塔壁外侧.

表 3 对比了工况 1 及工况 2 在无荷载及荷载  $P$  作用时模型钢结构及混凝土在中部的平均应力。可以看出,工况 1 中,无论有无荷载混凝土均受到压应力,而工况 2 中撤销预应力后混凝土拉应力增加约 2 MPa,塔壁由受压转变为受拉。塔壁开裂情况及混凝土应力变化表明顺桥向预应力可以降低混凝土的拉应力,提高混凝土的抗裂性能。

表 3 钢板及混凝土平均应力对比

Tab.3 Contrast of the average stress in steel and concrete

工况	钢板平均应力/MPa		混凝土平均应力/MPa	
	无荷载	荷载 $P$	无荷载	荷载 $P$
1	-19.8	21.6	-1.89	-1.26
2	0	35.0	0.08	0.83
变化量	19.8	13.4	1.97	2.09

同时,施加预应力使得工况 1 中的侧板初始处于受压状态,在施加索力后逐渐转换到受拉状态;而工况 2 则在加载过程中一直处于受拉状态。说明在纵向预应力作用下,有部分预应力通过焊钉传递至钢锚箱侧板,造成了钢板受力状态的明显差异。

由于横桥向预应力没有改变,所以两种工况下钢锚箱与塔壁的摩擦力没有发生变化,则侧板作用力的增量完全由焊钉传递。在荷载  $P$  作用下两种工况下钢板平均应力变化量为 13.4 MPa,说明预应力使焊钉顺桥向剪力增加了约 144 kN。这是由于在外露型钢锚箱锚固结构中,预应力与水平索力对焊钉的作用方向相同,从而增大了焊钉的顺桥向剪力。

#### 4.2 预应力对水平索力分配的影响

水平索力在钢锚箱与混凝土塔壁之间的分配关系是组合索塔锚固结构受力的重要参数。通过截面中心处应力增量计算钢板和塔壁混凝土各自承担的水平索力。另一方面,定义钢锚箱侧板实际所受拉力(以应力绝对值计算)占水平索力的比值作为钢锚箱的利用率,以了解钢材的利用效率。通过两种工况下水平索力分配及钢锚箱利用率的对比,说明预应力施加对组合索塔锚固结构的适用性有何影响。模型试验得到水平力分配关系如表 4 所示。

表 4 水平力分配比例和钢锚箱利用率

Tab.4 Horizontal force allocation proportion and utilization ratio of steel

工况	位置	水平索力分担比例		钢锚箱利用率	
		水平索力/kN	比例/%	实际受力/kN	比例/%
1	钢锚箱	840	58.3	467	32.3
	塔壁	602	41.7		
2	钢锚箱	758	52.6	758	52.6
	塔壁	684	47.4		

在荷载  $P$  作用下,工况 1 和工况 2 的分配比例差异很小,说明预应力并不会改变水平索力的分配

比例。这是因为,荷载  $P$  作用下,混凝土塔壁没有发生开裂,截面的刚度没有发生根本变化,力是按刚度进行分配的,因此分配结果也不会发生根本变化。

从钢板应力绝对值看,两种工况下钢锚箱材料利用率有明显差别。不设预应力时,钢锚箱利用率与水平索力分配率相同。施加预应力会降低钢锚箱的利用率,使得钢锚箱的作用很难得到充分发挥。

## 5 结语

(1)基于索塔锚固区节段模型承载性能试验可知,在 1.7 倍设计索力作用下,钢锚箱侧板最大实测应力为 60.2 MPa,混凝土塔壁保持受压状态,锚固结构处于弹性工作阶段,表明外露型钢锚箱锚固结构受力性能良好,结构安全可靠,具有较好的适用性。

(2)索塔锚固区纵向预应力施加前后,钢锚箱侧板和混凝土塔壁的水平力分配比例从 0.58:0.42 变化到 0.53:0.47,考虑到塔壁没有发生开裂,截面刚度未发生改变,表明预应力的施加不会改变水平索力在钢锚箱侧板和混凝土塔壁之间的分配关系。

(3)索塔锚固区施加的预应力对结构各组成部分的受力影响不同。预应力能够明显减小塔壁混凝土的拉应力,提高塔壁的抗裂性能,但是钢锚箱侧板材料的利用率施加预应力后从 52.6% 降低到 32.3%,而且预应力与水平索力对焊钉的作用方向相同,预应力增大了焊钉顺桥向作用的剪力。

## 参考文献:

- [1] 张喜刚,刘玉擎.组合索塔锚固结构[M].北京:人民交通出版社,2010.  
ZHANG Xigang, LIU Yuqing. Cable-tower composite anchorage [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] Virlogeux M. New trends in prestressed concrete bridges [J]. Transportation Research Record, 2000, 1696(27):238.
- [3] Virlogeux M. The Normandie Bridge, France: a new record for cable-stayed bridges [J]. Structural Engineering International, 1994, 4(4):208.
- [4] 张奇志,李明俊.斜拉桥钢-混组合索塔锚固区节段模型试验研究[J].桥梁建设,2006,3(4):16.  
ZHANG Qizhi, LI Mingjun. Segmental model test study of steel and concrete composite anchor zone on pylon of cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2006, 3(4):16.
- [5] 陈开利.钢锚箱索塔锚固区受力机理[J].中国铁道科学,2008,29(4):58.  
CHEN Kaili. Mechanical mechanism of the steel anchor housing in the anchorage zones of cable pylons [J]. China Railway Science, 2008, 29(4):58.