

# 钢锚箱连接对索塔锚固体系受力性能的影响

逯文茹<sup>1,2</sup>, 赵毅<sup>3</sup>, 赵敏<sup>2,4</sup>, 谭东莲<sup>5</sup>

1. 河南工业大学土木建筑学院, 郑州 450001

2. 长安大学公路学院, 西安 710064

3. 中原工学院建筑工程学院, 郑州 450007

4. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266000

5. 上海应用技术学院轨道交通学院, 上海 201418

**摘要** 为明确多节段钢锚箱式索塔锚固体系的传力机理,以杭州湾跨海大桥北通航孔桥为例,采用有限元分析软件(ANSYS 11.0),研究了钢锚箱之间连接与不连接两种方式对索塔锚固体系受力性能的影响。结果显示,钢锚箱之间是否连接对锚固体系各节段以及节段内各构件承担的水平力影响较小,对各节段整体承担的竖向力无影响,而对各节段钢锚箱及塔壁承担的竖向力影响较大;钢锚箱之间是否连接对钢锚箱板件应力、混凝土塔壁应力以及栓钉剪力的分布规律具有明显影响,与钢锚箱不连接体系相比,钢锚箱连接体系各构件的应力或剪力分布更为均匀。

**关键词** 钢锚箱连接;索塔锚固体系;受力性能

索塔锚固体系是将巨大的斜拉索索力传递至混凝土塔柱的关键构件,合理分析锚固体系受力以保障桥梁结构的安全至关重要。目前针对钢锚箱式索塔锚固体系的研究多采用单节段足尺模型试验,并结合有限元仿真分析,对锚固体系各构件的受力特性、结构荷载传递路径以及极限承载能力进行分析。俞先林、曾明根、胡贵琼、张奇志、徐海军等通过对单节段钢锚箱式索塔锚固体系的模型试验,研究了锚固体系的承载能力以及各构件的应力和变形状态<sup>[1-6]</sup>;吕涛、郑舟军、冯凌云等通过对单节段钢锚箱式索塔锚固体系的受力分析,提出了锚固体系荷载分配简化计算方法<sup>[7-9]</sup>。而钢锚箱式索塔锚固体系通常采用锚箱间连接或者不连接的形式,在斜拉桥索塔中呈现多节段共同工作状态。另外,曾明根、张喜刚等通过对多节段内置钢锚箱式索塔锚固体系各构件的应力及变形分析,认为当钢锚箱间连接时,其构件应力及变形分布与钢锚箱间分离结构不同<sup>[10,11]</sup>。目前关于连接状态对锚固体系各构件承担载荷的影响尚无文献报道。本文以杭州湾跨海大桥北通航孔桥(杭州湾北通航孔桥)外露钢锚箱式索塔锚固体系为例,针对钢锚箱间不同连接方式对锚固体系受力性能的影响进行有限元分析,以期明确多节段钢锚箱式索塔锚固体系的传力机理。

## 1 有限元仿真分析模型

杭州湾跨海大桥北通航孔桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,跨径布置形式为(70+160+448+160+70)m。其中,索塔呈钻石形,其上塔柱索塔锚固采用外露钢锚箱式索塔锚固体系,共分为14个索塔锚固节段,外露钢锚箱式索塔锚固体系构造形式如图1所示。

选取索力较大的最上部5个锚固节段为研究对象,采用大型通用有限元分析软件ANSYS 11.0,分别建立5节段有限元模型如图2所示,各锚固节段自下而上编号依次为GMX10、GMX11、GMX12、GMX13、GMX14。混凝土塔壁以实体单元Solid65模拟;钢锚箱板件除锚垫板以实体单元Solid185模拟外,其余板件均以板单元Shell181模拟;栓钉按其实际截面以梁单元Beam188模拟;钢锚箱侧板与混凝土塔壁界面之间分别以非线性面-面接触单元Conta174与目标单元Targe170模拟,并取钢-混凝土间的摩擦系数为0.4<sup>[11]</sup>。

杭州湾跨海大桥北通航孔桥塔柱混凝土材料为C50,钢锚箱各板件及其侧板焊接的栓钉材料分别为Q345q和ML15。有限元模型中混凝土的本构关系取自《混凝土结构设计规范》<sup>[12]</sup>,钢板和栓钉材料本构关系曲线均采用双折线,锚固体系各材料属性如表1所示。

收稿日期:2015-02-09;修回日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51378069)

作者简介:逯文茹,博士,研究方向为钢桥梁、组合结构桥梁的理论及应用,电子信箱:luwenru@163.com

引用格式:逯文茹,赵毅,赵敏,等.钢锚箱连接对索塔锚固体系受力性能的影响[J].科技导报,2016,34(2):265-270;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.045

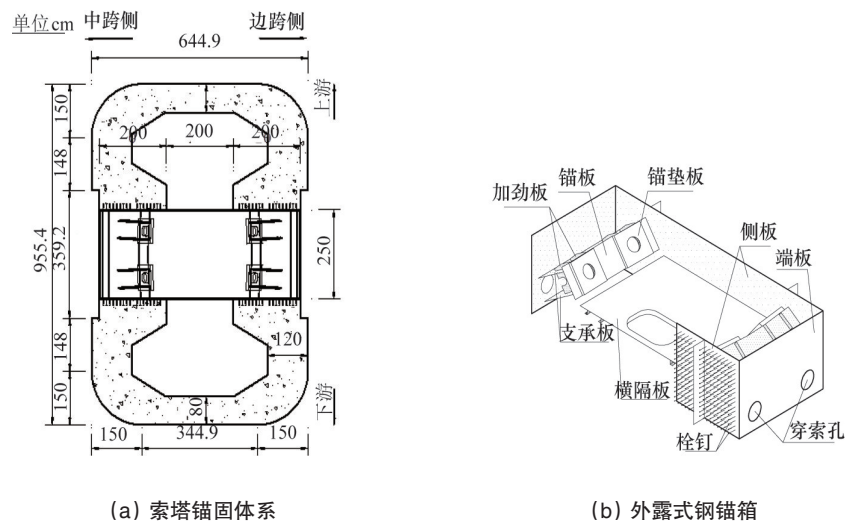


图1 钢锚箱式索塔锚固体系

Fig.1 Pylon anchor system with exposed steel anchor box

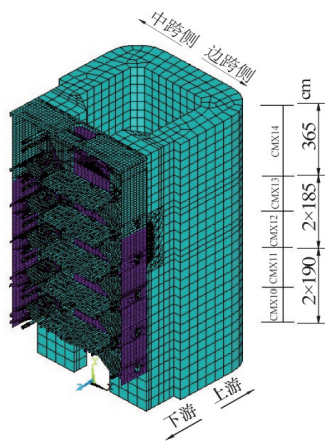


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

表1 锚固体系材料属性

Table 1 Material properties of the pylon anchor system

材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	切线模量 $E_t/\text{MPa}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	极限强度 $f_u/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$
C50混凝土	$3.45 \times 10^4$	—	—	—	0.2
Q345q钢板	$2.10 \times 10^5$	$0.03E$	345	480	0.3
ML15栓钉	$2.10 \times 10^5$	$0.006E$	420	495	0.3

钢锚箱之间的连接及不连接在有限元模型中通过钢锚箱节段间是否共节点进行模拟。5节段钢锚箱式索塔锚固体系每个节段均施加成桥恒载状态斜拉索索力,且索力以节点载荷的形式施加在锚垫板上,各锚固节段成桥恒载状态斜拉索索力值如表2所示。

表2 各锚固节段成桥恒载状态斜拉索索力

Table 2 Cable force of pylon segments in the condition of dead load

分类	斜拉索索力/kN				
	GMX10	GMX11	GMX12	GMX13	GMX14
索力	2492, 2339	2730, 2718	2714, 3026	2963, 3244	1652, 2392
索力水平分力	1984, 1842	2231, 2194	2265, 2499	2516, 2727	1423, 2042
索力竖向分力	1507, 1442	1574, 1604	1495, 1708	1565, 1755	839, 1246

注:数据分别对应中路侧单根斜拉索和边跨侧单根斜拉索。

## 2 斜拉索索力分配分析

斜拉索索力在外露钢锚箱式索塔锚固体系的分配路径:钢锚箱连接体系中,节段索力水平分力由相邻多个节段的塔柱侧壁、钢锚箱侧板及横隔板共同承担,而索力竖向分力由

钢锚箱和塔壁逐节段向下传递。钢锚箱不连接体系中,节段索力水平分力在加载初期由本节段的塔柱侧壁、钢锚箱侧板及横隔板承担,但随着塔柱侧壁的受拉变形,并进一步带动相邻节段钢锚箱侧板及横隔板受力,其水平分力最终也是通

过多个节段的塔柱侧壁、钢锚箱侧板及横隔板共同承担,而索力竖向分力通过群钉剪力连接件传递至塔壁,并全部由塔壁逐节段向下传递。鉴于钢锚箱连接与不连接体系索力分

配方式的差别,需要对其受力构件承担(传递)的力的大小进行对比分析。

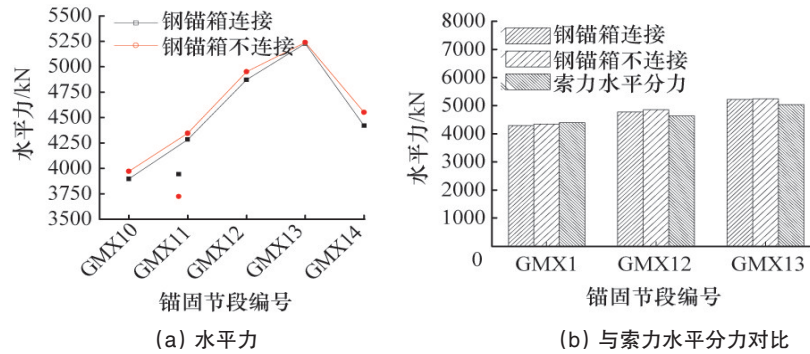


图3 各节段承担的水平力与索力水平分力对比

Fig. 3 Horizontal force undertaken by each anchor segment and their proportions

### 2.1 索力水平分力分配

钢锚箱连接与不连接两种方式下,各锚固节段所承担的水平力,以及与各锚固节段索力水平分力的对比情况如图3所示。可以看出,钢锚箱连接与不连接两种方式均对各节段所承担的水平力影响较小,最大差值仅为2.9%,出现在GMX14锚固节段;并且两种锚固体系各节段承担的水平力均与相应节段的索力水平分力差别很小。

钢锚箱连接与不连接两种方式下,钢锚箱侧板、横隔板及塔柱侧壁所承担的水平力及其占5节段索力水平分力之和的比例如图4~图6所示。可以看出,连接与不连接两种方式对钢锚箱侧板、横隔板及塔柱侧壁承担的水平力及其所占比例影响较小,其中,钢锚箱侧板最大差值为2.7%,出现在GMX10锚固节段;钢锚箱横隔板与塔柱侧壁的最大差值均为0.1%,均出现在GMX14锚固节段。

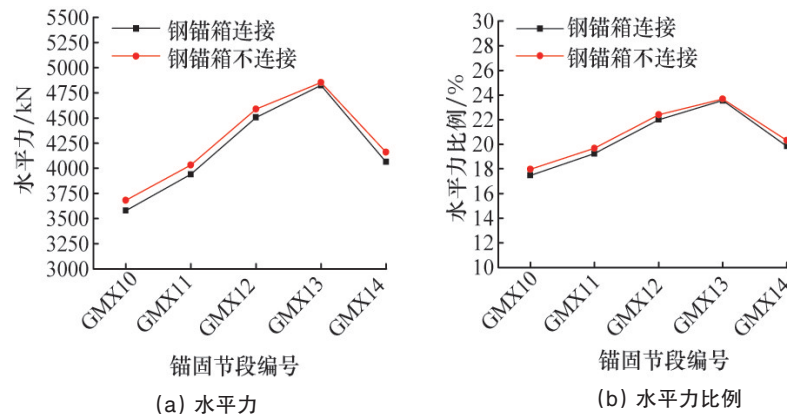


图4 各节段钢锚箱侧板承担的水平力及比例

Fig. 4 Horizontal force undertaken by the side plates

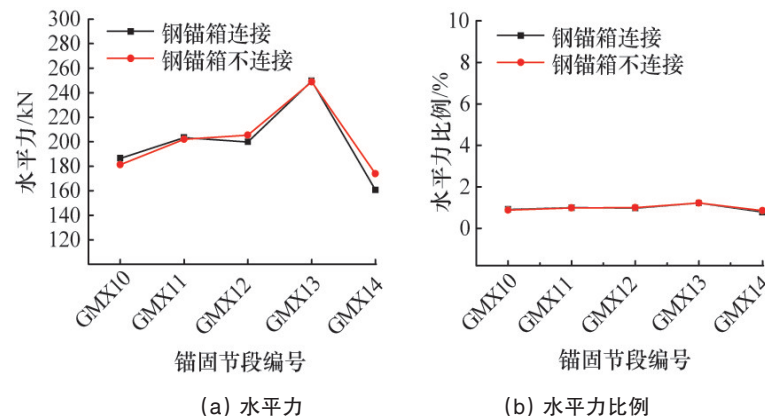


图5 各节段钢锚箱横隔板承担的水平力及比例

Fig. 5 Horizontal force undertaken by the diaphragms and their proportions

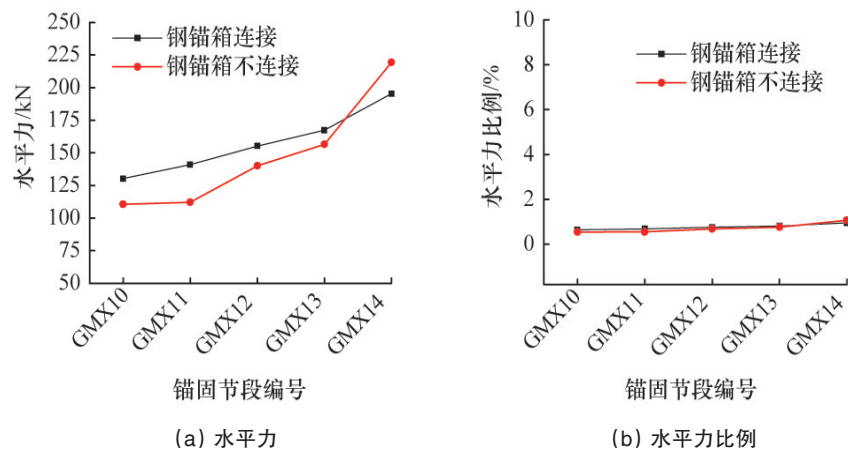


图6 各节段塔柱侧壁承担的水平力及比例

Fig. 6 Horizontal force undertaken by the pylon wall and their proportions

### 2.2 索力竖向分力分配

钢锚箱连接与不连接两种方式下,各锚固节段传递的竖向力如图7(a)所示,可以看出,不同连接体系对各节段传递的竖向力无影响,且各节段传递的竖向力等于相应节段索力竖向分力与上部各节段索力竖向分力之和。钢锚箱连接与不连接两种方式下,各锚固节段钢锚箱与混凝土塔壁向下一

节段传递的竖向力分别如图7(b)、(c)所示,可以看出,钢锚箱连接体系各节段索力竖向分力由钢锚箱和混凝土塔壁共同传递;而钢锚箱不连接体系各节段索力竖向分力全部由混凝土塔壁逐节段传递。因此,不同连接方式对各节段钢锚箱和混凝土塔壁传递竖向力的大小影响较大,且其差距沿索塔高度方向自上而下不断增大,最大差值出现在GMX10锚固节段。

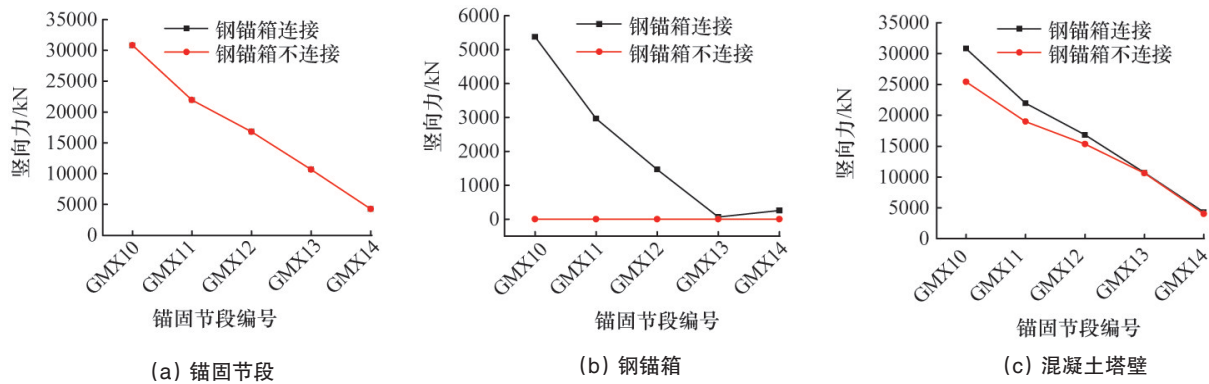


图7 锚固节段、钢锚箱、塔壁传递的竖向力

Fig. 7 Vertical force transferred by each anchor segment, steel anchor box and pylon wall

### 3 锚固体系构件受力特性分析

钢锚箱连接与不连接两种方式下,钢锚箱侧板、横隔板、端板的米塞斯应力、混凝土塔壁主压应力以及栓钉竖向剪力沿索塔高度方向分布的对比情况如图8~图12所示。可见钢锚箱之间连接可以促进钢锚箱各板件的应力扩散,与钢锚箱不连接体系相比,钢锚箱连接体系各板件应力分布及栓钉剪力分布更加均匀。另外,由于索力水平分力在两种连接方式的锚固体系中分配路径基本一致,承担绝大部分水平力的钢锚箱侧板及横隔板在两种连接方式下,其应力分布形式均较为一致;而索力竖向分力由于其在两种连接方式的锚固体系中传递路径的差异,两种连接方式下端板及塔壁的应力分布形式差别较为明显,与不连接体系相比,钢锚箱连接体系端板及塔壁下部应力水平高于上部,且下部高应力分布区域也较大。

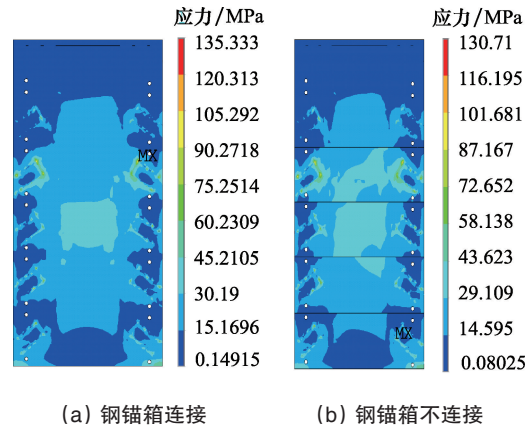


图8 钢锚箱侧板米塞斯应力分布

Fig. 8 Von Mises stress distributions of the side plate in steel anchor boxes

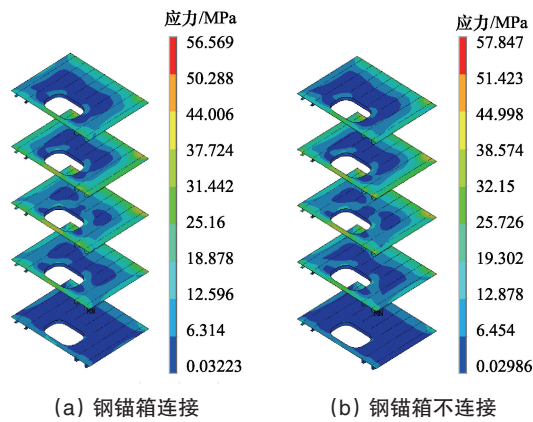


图9 钢锚箱横隔板米塞斯应力分布

Fig. 9 Von Mises stress distributions of the diaphragm in steel anchor boxes

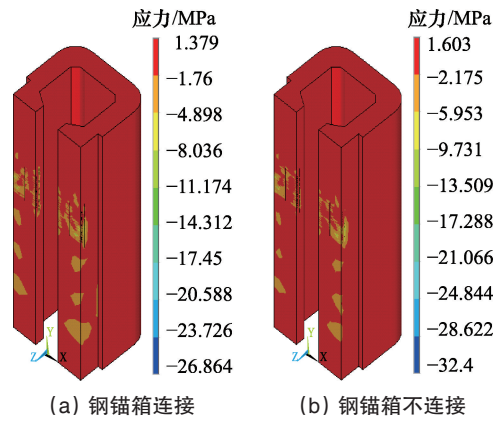


图11 混凝土塔壁主压应力分布

Fig. 11 Principal compressive stress distributions of the concrete pylon wall

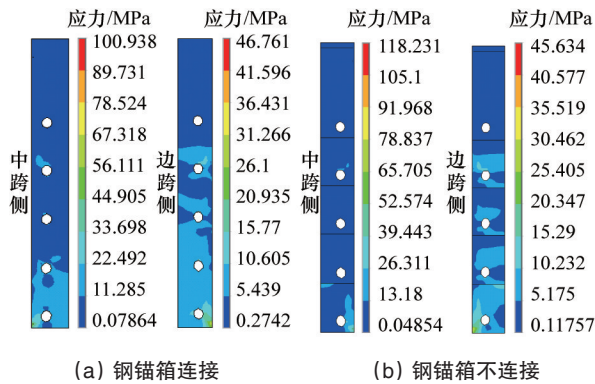


图10 钢锚箱端板米塞斯应力分布

Fig. 10 Von Mises stress distributions of the end plate in steel anchor boxes

#### 4 结论

1) 不同连接方式对外露式钢锚箱锚固体系各节段以及节段内各构件承担的水平力影响较小,且最大差值不超过3%。不同连接方式对外露式钢锚箱锚固体系各节段传递的竖向力无影响,而对各节段钢锚箱及塔壁传递的竖向力影响很大,且其差距沿索塔高度方向自上而下不断增大。

2) 钢锚箱之间连接可以促进各构件的应力扩散,与钢锚箱不连接体系相比,钢锚箱连接体系各板件应力或剪力分布更均匀。钢锚箱连接和不连接体系钢锚箱侧板及横隔板的应力分布形式均较为一致;而端板及塔壁的应力分布形式差别较为明显,钢锚箱连接体系端板及塔壁的下部应力水平高于上部,且下部高应力分布区域也较大。

3) 在进行外露钢锚箱式索塔锚固体系设计计算分析时,

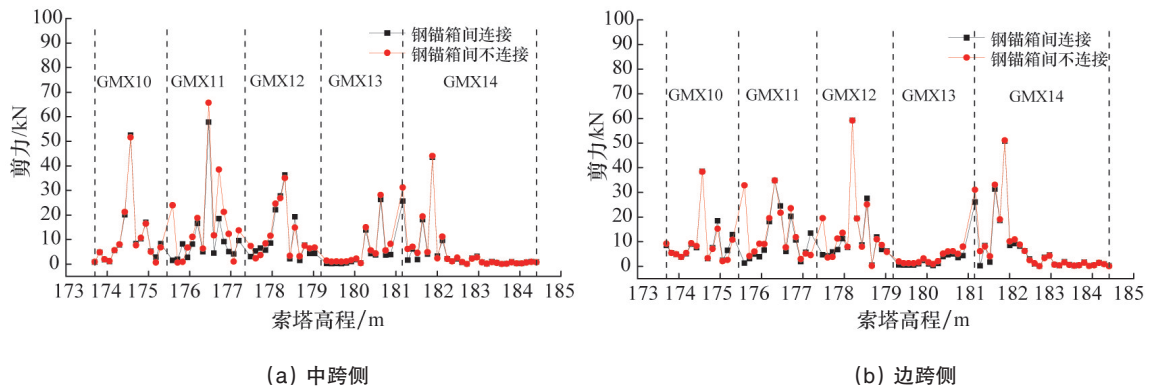


图12 栓钉剪力沿索塔高度方向的分布

Fig. 12 Stud shear distribution along the height direction of the pylon

可直接以单节段作为研究对象,水平载荷可直接取该节段索力水平分力,竖向载荷则需考虑钢锚箱之间连接与否按其传递路径取用。

#### 参考文献(References)

[1] 俞先林, 张奇志. 钢-混组合索塔锚固结构节段模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2008(8): 16-18.

Yu Xianlin, Zhang Qizhi. Research segment model test on steel-concrete composite cable pylon anchorage[J]. Railway Engineering, 2008 (8): 16-18.

[2] 曾明根, 苏庆田, 邵长宇, 等. 公轨共用大跨斜拉桥索塔锚固区节段试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 53-57.

Zeng Minggen, Su Qingtian, Shao Changyu, et al. Test study on the cable- pylon anchorage zone of highway and light railway long-span ca-

- ble-stayed bridge[J]. China Railway Science, 2008, 29(4): 53-57.
- [3] 胡贵琼, 童智洋, 郑平伟, 等. 鄂东长江公路大桥索塔锚固区节段模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2009(增2): 55-60.  
Hu Guiqiong, Tong Zhiyang, Zheng Pingwei, et al. sectional model test study of cable-to-pylon anchorage zone of edong changjiang river highway bridge[J]. Bridge Construction, 2009(Suppl 2): 55-60.
- [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): 16-19.  
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): 16-19.
- [5] 汪昕, 吕志涛. 斜向索力下钢筋混凝土组合索塔锚固区荷载传递与分配关系分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(4): 585-589.  
Wang Xin, Lü Zhitao. Analysis of load transferring and distribution in anchorage zone of steel-concrete composite pylon under inclined cable forces[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(4): 585-589.
- [6] 郑舟军, 田晓彬, 余俊林, 等. 内置式钢锚箱索塔锚固区受力机理分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 84-89.  
Zheng Zhoujun, Tian Xiaobin, Yu Junlin, et al. Analysis of mechanism of pylon anchorage zones with built-in steel-anchor-box[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 84-89.
- [7] 徐海军, 刘玉擎, 李炆, 等. 外露型钢锚箱索塔锚固结构受力机理试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 672-676.  
Xu Haijun, Liu Yuqing, Li Yang, et al. Experimental study on stress mechanism of exposed steel anchor box cable-tow anchorage[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(5): 672-676.
- [8] 冯凌云, 苏庆田, 吴冲. 大跨度斜拉桥混凝土索塔钢锚箱的计算模型研究[J]. 现代交通技术, 2005(4): 26-29.  
Feng Lingyun, Su Qingtian, Wu Chong. Calculation method of concrete pylon with steel anchor box in long-span cable-stayed bridge[J]. Modern Transportation Technology, 2005(4): 26-29.
- [9] Su Q T, Yang G T, Qin F. Investigation on the horizontal mechanical behavior of steel-concrete composite cable-pylon anchorage[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72(2): 267-275.
- [10] 曾明根, 苏庆田, 吴冲. 连接形式对斜拉桥组合索塔钢锚箱剪力钉受力的影响[J]. 桥梁建设, 2008(1): 47-49.  
Zeng Minggen, Su Qingtian, Wu Chong. Effect of connections on shear stud mechanical behavior of steel anchor box in composite pylon of cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2008(1): 47-49.
- [11] 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.
- [12] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB 50010—2002, Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

## Effects of connections of exposed steel anchor boxes on the mechanical behavior of pylon anchorage system

LU Wenru<sup>1,2</sup>, ZHAO Yi<sup>3</sup>, ZHAO Min<sup>2,4</sup>, TAN Donglian<sup>5</sup>

1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China
2. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China
3. School of Civil and Architectural Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China
4. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266000, China
5. School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

**Abstract** This paper aims to study the mechanical characteristics and load transfer mode of pylon anchor system with steel anchor boxes. Taking the north navigable bridge of Hangzhou Bay cross-sea bridge as an example, we analyzed the mechanical behavior and cable force distribution pattern influenced by the connections of steel anchor boxes using finite element analysis (ANSYS 11.0). The results show that when the connection of the steel anchor box is transformed, the transferring force of the anchorage segment and its components are changed slightly, the vertical force transmitted by the anchorage segment has no change, while the vertical force transmitted by the steel anchorage box and pylon wall are changed evidently. Whether the steel anchor box is connected has a great influence on the distribution laws of the stress on the steel plate and concrete pylon wall and the shear force on studs. The stress on the steel plate and concrete pylon wall and the shear force on studs are more evenly distributed in connected steel anchor boxes than those in separated ones. The stress distribution pattern of the side plate and diaphragm are impacted slightly by the connection of steel anchor boxes, while that of the end plate and pylon wall are impacted significantly.

**Keywords** steel anchor box connection; pylon anchor system; mechanical behavior

(责任编辑 韩星明)