

组合索塔锚固区水平受力机理的理论及试验

苏庆田, 秦 飞

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 在总结和分析组合索塔结构形式的基础上, 依据变形协调原理推导了组合索塔锚固区主要构件承担水平力的计算公式, 并推导了计算主要构件内力的一般算式. 结合一实际工程进行了组合索塔锚固区水平受力分析的足尺模型试验, 得到了主要构件的应力分布规律. 通过与试验结果进行对比, 验证了本文提出的公式的准确性.

关键词: 斜拉桥; 索塔; 组合结构; 受力机理

中图分类号: U 448.21

文献标识码: A

Theory and Experiment on Horizontal Mechanical Behavior in Anchorage Zone of Composite Cable-pylon

SU Qingtian, QIN Fei

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on a summary and an analysis of the configuration in composite cable-pylons, the expression for calculating the horizontal force burdened by the main members of composite cable-pylon was deduced according to the deformation compatibility principle; and the expression for calculating the inner force of the main members in composite cable-pylon was deduced too. The full scale model tests were made to analyze the horizontal mechanical behavior of composite cable-pylon according to an actual project and the stress distribution patterns of main members were obtained. Comparing to the tests results, the proposed accurate of the method was testified.

Key words: cable-stayed bridge; cable-pylon; composite structure; mechanical behavior

钢与混凝土组合结构索塔作为一种新型结构形式(图1)开始应用于大跨度斜拉桥中^[1-3]. 它由混凝土塔壁和钢锚箱组成, 混凝土塔壁从承台的顶面一直

延续到索塔的顶部, 钢锚箱位于索塔顶部锚固斜拉索的位置, 钢锚箱与混凝土塔壁通过连接件结合到一起. 钢与混凝土组合索塔是一种受力比较合理的结构, 近些年开始在大跨度斜拉桥中使用, 如法国的 Normandy 大桥、希腊的 Rion-Antirion 大桥以及中国的苏通大桥、上海长江大桥、济南黄河三桥、鄂东大桥等均采用了这种结构形式.

钢与混凝土组合索塔在沿索塔高度方向上具有常规组合构件的特性^[4-5], 与钢管混凝土构件和型钢混凝土构件组合原理相似, 可以采用组合结构的理论计算方法来分析组合索塔沿索塔高度方向上整体受力特性. 然而组合索塔这种组合结构在横截面上的受力与常规的组合构件有很大的不同, 斜拉索的斜向拉力使组合索塔产生较大的水平分力, 是控制整个索塔受力的最关键部位之一, 该部位的拉索水平分力使组合索塔在水平面内产生较大变形, 而这种横截面的变形在常规的组合构件中是没有考虑的.

国内外对钢与混凝土组合结构索塔的研究主要是针对单个工程进行的, 目前主要借助数值计算^[1-6]和试验方法^[2-3,7-8], 对于其受力机理主要集中在锚固区的空间传力上的研究. 根据大量数值计算和试验结果的研究发现组合索塔混凝土塔壁外表面在横桥向中心部位的应力较大, 容易发生开裂, 主要是因为斜拉索索力的水平分力使组合索塔产生了较大的横向变形引起. 目前对于组合索塔受力机理的试验研究均采用了一个钢锚箱高度范围的节段进行研究, 施加的荷载沿实桥中斜拉索方向, 该方法能够较好反映钢锚箱的真实受力情况, 但由于模型高度的限制以及边界条件的影响使混凝土受力在高度方向不均匀, 试验模型的混凝土塔壁受力情况与真实结构的受力情况有所不同. 本文采用理论推导和试验相结合的方法, 对组合索塔的水平受力机理进行研究.

收稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(50708075)

第一作者: 苏庆田(1974—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为钢桥及组合桥梁. E-mail: sqt@tongji.edu.cn

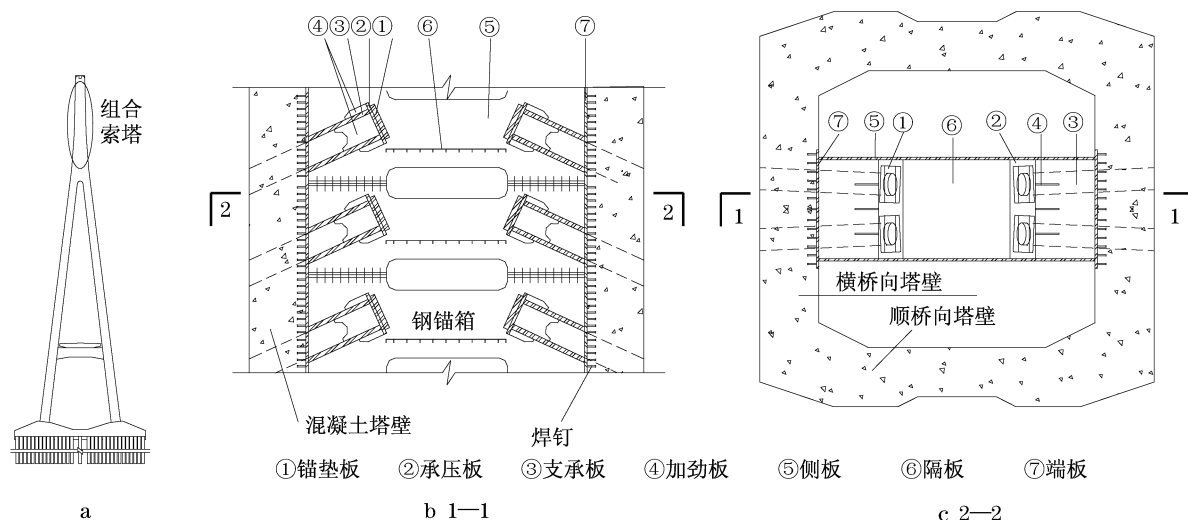


图1 组合索塔

Fig.1 Composite cable-pylon

1 钢-混凝土组合索塔水平受力分析模型转换

钢-混凝土组合索塔的四周是一圈完整的混凝土塔壁,塔壁内部放置钢锚箱,钢锚箱与混凝土塔壁通过连接件结合起来.钢锚箱中钢板数量众多,有锚垫板、承压板、支承板、加劲板、侧板、隔板和端板组成.当索塔中有多个钢锚箱且钢锚箱之间相互连接时,在斜向斜拉索索力作用下钢锚箱的侧板以及混凝土塔壁的应力在高度方向分布相对均匀,因此当取一个节段高度的组合索塔分析在拉索水平分力作用下的受力时可以按照图2所示的方式进行转换.这种转换在结构上是把钢锚箱的支承板由倾斜方向变为水平方向,与之相连的加劲板和承压板也随之转动,锚箱中的侧板和端板与原结构相同.这种转换在受力上只是在侧板上与承压板相连的部位附近与原结构不同,但混凝土的受力与真实索塔相同,侧板中间部位及钢锚箱大部分板件的受力与原结构接近.

2 组合索塔水平受力的理论计算

对组合索塔进行受力分析时,由于结构的复杂往往需采用实体有限元的方法进行计算,这种方法不易被一般工程设计人员使用.本文为此提出一种简化的计算方法,以图2b所示的转换后的索塔传递水平力为研究对象,将图1中水平方向受力的组合索塔简化为一框架结构,如图3a所示,取混凝土塔

壁的中心线作为框架结构的外部尺寸,取钢锚箱侧板作为内部构件,其长度为侧板长度,连接钢锚箱侧板与混凝土构件的是一刚臂,长度为混凝土塔壁厚度的1/2.

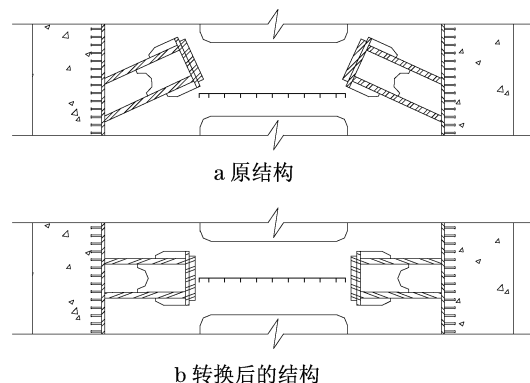


图2 组合索塔水平方向受力等效变换

Fig.2 Equal change of horizontal force transferring in composite cable-pylon

由实际的组合索塔到简化的框架模型时需对结构进行适当的处理.首先忽略了混凝土塔壁隅角处的局部截面变化;其次是钢锚箱中间的横隔板厚度较薄且开有孔洞,与锚箱侧板相比受力较小,可以忽略隔板的受力;再次是钢锚箱的侧板在中间部位窄、两端宽,对侧板的模拟采用了2种截面形式;最后,在钢锚箱与塔壁混凝土结合段处,钢锚箱端板与塔壁混凝土通过连接件相连,该部位具有组合截面的特点,但是又不能简单地把混凝土塔壁与钢锚箱的端板、支承板和承压板组成的封闭钢箱完全组合,也不可忽略钢结构的作用只取混凝土塔壁部分.

根据该部位钢锚箱的受力特点:承压板主要承受锚垫板传来的压力,通过支承板把大部分的力向钢锚箱的侧板传递、小部分的力向端板传递,这样可以认为承压板不参与组合截面,只有端板及部分支承板起到参与组合截面的作用,但是支承板具体有多少参与组合截面很难准确界定.为了简化计算,认为压力在支承板中以近 45° 的夹角进行扩散,这样可以近似取 1/2 长度的支承板参与组合截面.

由实际的组合索塔到简化的框架模型时需对外荷载进行适当的处理.根据对钢锚箱受力机理的研究^[9],斜拉索索力作用在锚垫板上,经过板件间的传递后大部分力集中在支承板与侧板的焊缝上,较少的一部分力通过支承板传到了混凝土塔壁上,因此假设拉索力全部在支承板与侧板的焊缝上均匀分布.

在实桥的锚固区索塔节段处,左右两边的斜拉索水平分力一般是不相等的,但相差不大.偏于安全,取较大的水平分力代替较小的水平分力,使得左右荷载对称.另外,混凝土索塔钢锚箱的横截面也是对称的,因此平面框架模型可以按正对称模型简化,只取图 3b 所示 1/4 结构进行分析.在图 3b 所示 1/4 结构中,AC 段 L_1 为两顺桥向混凝土塔壁中心线间距的 1/2, CD 段 L_2 为两横桥向混凝土塔壁中心线间距的 1/2, AB 段 L_3 为钢锚箱宽度的 1/2, BC 段 L_4 为钢锚箱侧板与顺桥向塔壁中心线间的横桥向混凝土塔壁长度, FG 段 L_5 为钢锚箱侧板中间(宽度较窄)部分长度的 1/2, EF 段 L_6 为钢锚箱侧板的一个端板(宽度较宽)部分长度, BE 段为刚性域,长度为横桥向混凝土塔壁厚度的 1/2.结构中 BC 段和 CD 段为混凝土截面,弹性模量为 E_c , EF 段和 FG 段为钢截面,弹性模量为 E_s , AB 段为钢与混凝土组合截面,弹性模量为 E_0 ,各部分的截面特性如截面积 A 、惯性矩 I 、面积矩 W 、厚度 t 等见图 3b 所示,组合截面的取法按照前文所述.模型中 EF 段受到均匀的剪力流 $q = P/L_6$ 作用, P 为单根斜拉索的水平分力.

进一步将 1/4 平面框架模型分解为如图 3c 的混凝土隔离体部分和钢隔离体部分,两隔离体间的作用力与反作用力为 P_c (即混凝土塔壁所承担到的拉索水平分力),钢锚箱所承担到的拉力为 P_s .取钢锚箱侧板与混凝土塔壁的交点处为变形协调点,建立变形协调方程.

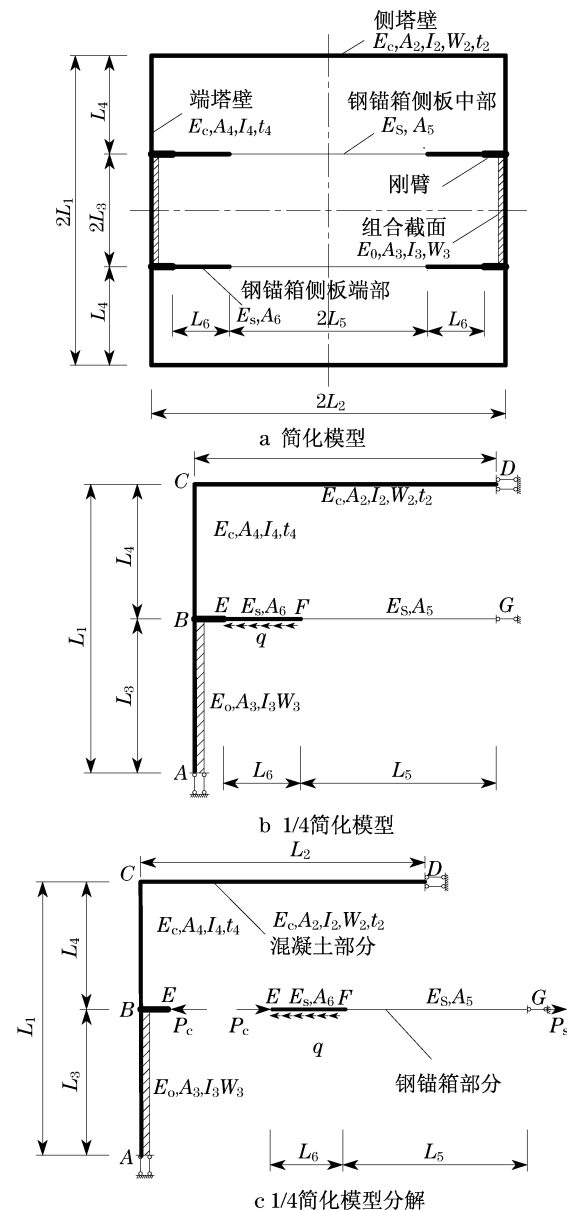


图 3 平面框架简化模型

Fig. 3 Simplified plane frame model

$$P_c \bar{\Delta} = P_s f_{N5} + 0.5(P_s - P_c) f_{N6} \quad (1)$$

式中: $\bar{\Delta}$ 为混凝土隔离体中作用单位力 $\bar{P} = 1$ 时混凝土塔壁 B 点所产生的位移; $f_{N5} = L_5 / (E_s A_5)$, $f_{N6} = L_6 / (E_s A_6)$.

根据钢隔离体的力平衡条件

$$P_c + P_s = qL_6 = P \quad (2)$$

可解得

$$P_c = \frac{f_{N5} + 0.5f_{N6}}{\bar{\Delta} + f_{N5} + f_{N6}} = C_0 P \quad (3)$$

其中, C_0 为混凝土塔壁所分担到斜拉索水平分力的比例.

根据结构力学中力法方程可以求得混凝土隔离体在单位力 $\bar{P}=1$ 时 B 点产生的位移

$$\bar{\Delta} = f_{N2} + k_D^2 f_{M2} + k_D^2 f_{M3} + \frac{(k_A^2 + k_D^2 - k_A k_D)}{3} f_{M4} \quad (4)$$

式中: $f_{N2} = L_2/(E_c A_2)$, $f_{M2} = L_2/(E_c I_2)$, $f_{M3} = L_3/(E_c I_3)$, $f_{M4} = L_4/(E_c I_4)$, k_A, k_D 分别代表混凝土隔离体在单位力 $\bar{P}=1$ 的作用下 A 点和 D 点的弯矩值,由力法方程可求得

$$k_A = (L_4 f_{M2} + 0.5 L_4 f_{M4}) / (f_{M2} + f_{M3} + f_{M4}) \quad (5)$$

$$k_D = (L_4 f_{M3} + 0.5 L_4 f_{M4}) / (f_{M2} + f_{M3} + f_{M4}) \quad (6)$$

于是可知混凝土塔壁 E 点作用 P_c 时,结构中 A 点和 D 点的弯矩分别为

$$M_A = k_A P_c \quad (7)$$

$$M_D = k_D P_c \quad (8)$$

则塔壁 D 点内、外侧混凝土应力和 A 点外侧混凝土应力为

$$\sigma_D = P_c / A_2 \pm M_D / W_2 \quad (9)$$

$$\sigma_A = M_A / W_3 \quad (10)$$

以上的推导是假设钢材和混凝土均处于弹性状态,实际上塔壁中的混凝土常常是处于带裂缝的工作状态.根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[10](JTG D62—2004)对不允许混凝土开裂的构件其抗弯刚度为 $E_c I$,允许混凝土开裂的构件其抗弯刚度可采用 $0.8 E_c I$,本文参照此条规定,考虑塔壁混凝土开裂影响则采用弹性模量折减的方法,折减系数取 0.8.

3 组合索塔水平受力机理的试验

3.1 试验概况

为了研究组合索塔水平方向受力的机理,结合一实际工程进行了足尺模型试验,如图 4 所示.模型高度 2.30 m,平面尺寸 8.00 m × 8.40 m,塔壁混凝土厚度 900 mm,钢锚箱除端板和加劲板厚度分别为 30 mm 和 25 mm 外,其他板件厚度均为 40 mm,模型中混凝土配筋与实桥相同(图中未示).模型加载如图 5 所示,在左右两边的锚垫板中间各设 2 台吨位 650 t 的千斤顶,千斤顶的推力和反力通过两边的钢分配梁传到锚垫板进而传递到整个结构中.

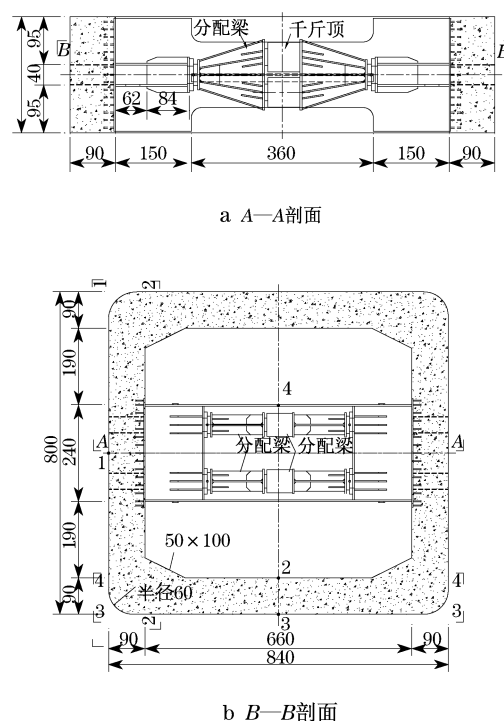


图 4 索塔锚固区节段加载模型示意图(单位:cm)

Fig.4 Schematic loading instruments on cable-pylon anchorage segment (unit:cm)

试验当天测试的混凝土弹性模量为 42.2 GPa,钢材弹性模量为 218 GPa.

3.2 试验结果

实桥在运营情况下单根斜拉索水平分力最大值为 5 439 kN,限于篇幅这里仅给出千斤顶在每个锚垫板上作用 5 439 kN 压力时索塔的受力情况.

图 5 给出了塔壁各表面的实测应力值,图中 1—1~4—4 区位置见图 4.由于试验模型对称,图中给出了 1/2 结构的测试结果.由图 5 可见,横桥向塔壁外侧和顺桥向塔壁内侧混凝土受拉,横桥向塔壁内侧和顺桥向塔壁外侧混凝土受压.横桥向塔壁中间部分应力较大、两边应力较小,在索孔处混凝土的拉应力最大,导致塔壁混凝土从该位置开始开裂,在横桥向塔壁外侧混凝土表面对应着钢锚箱范围内已有多处开裂.由于同一位置处的应力沿高度方向并不完全相同,这里取它们的平均值作为该处的应力值,得到横桥向塔壁外侧中心点、顺桥向塔壁内侧中心点和外侧中心点的应力分别为 2.24, 2.22, -1.41 MPa.

图 6 给出了钢锚箱侧板的实测应力值.由图可以看出,在靠近承压板附近的侧板应力较大,由单向应变片的测试结果可见侧板大部分受拉,在靠近端板附近受压.侧板中间部分拉应力均值为 91.5 MPa.

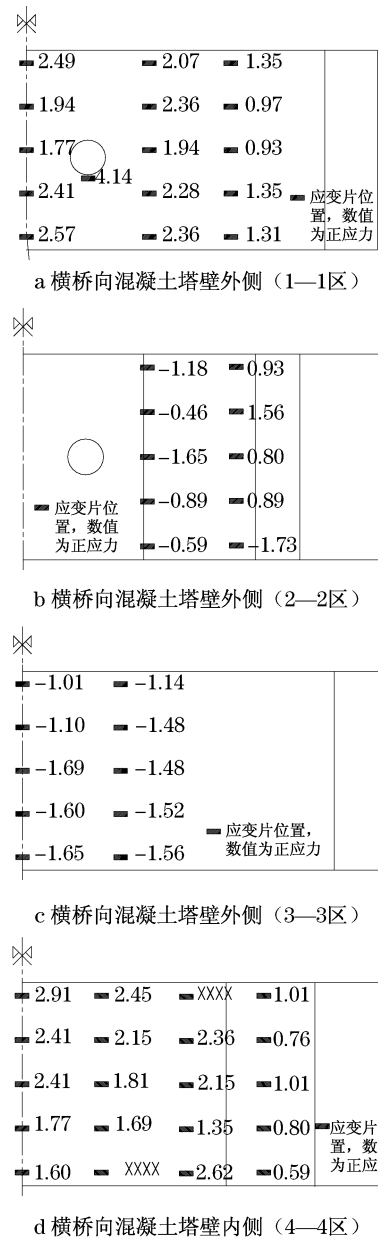


图 5 混凝土塔壁实测应力(单位:MPa)

Fig.5 Measured stresses of concrete wall(unit:MPa)

表 1 理论计算与实测结果比较

Tab.1 Comparison between theory calculation results and experimental results

方法	各部分承担的水平力/kN		各部分承担水平力的分数/%		控制点应力/MPa			
	钢锚箱	混凝土	钢锚箱	混凝土	1	2	3	4
本文方法计算	4 450	889	83.18	16.82	2.46	2.26	-1.40	85.57
模型试验实测	4 758	838	85.02	14.98	2.24	2.22	-1.41	91.50

4 结论

通过对组合索塔这种复杂结构的构造和受力机

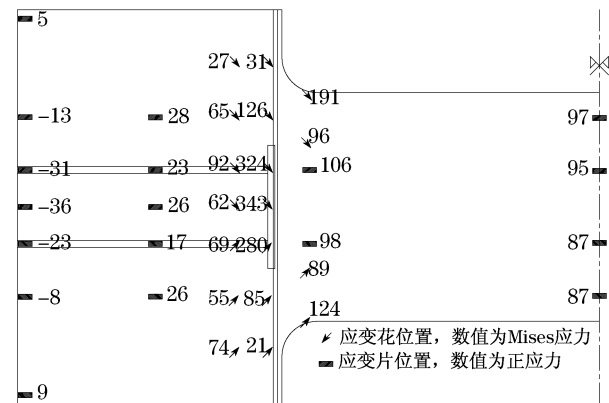


图 6 侧板实测应力结果(单位:MPa)

Fig.6 Measured stresses of lateral plate(unit:MPa)

3.3 结果比较

以顺桥向塔壁中心截面的测试应力平均值与该截面的面积乘积作为混凝土塔壁承受的轴向拉力,以钢锚箱侧板中心截面的测试应力平均值与该截面的面积乘积作为侧板承受的轴向拉力,得到单侧混凝土塔壁承受拉力为 838 kN,单侧钢锚箱侧板承受拉力为 4 758 kN,见表 1,二者之和是单个千斤顶施加推力的 1.05 倍,这是由于试验测试误差及观测点的应力均值与整个截面的应力均值间的误差等原因造成的.本文以测试结果为准得到试验模型中钢锚箱承担拉索水平分力的比例为 85.02%,混凝土塔壁承担的拉索水平分力的比例为 14.98%,而按照本文提出的计算方法得到钢锚箱和混凝土塔壁承担的拉索水平力的比例分别为 83.18%和 16.82%.

同样采用本文提出的计算方法对试验模型进行计算,计算时考虑与钢锚箱端部相连的塔壁混凝土开裂影响,得到了混凝土塔壁和钢锚箱承担的水平力及其比例,结果见表 1.表中还对组合索塔几个关键控制点的应力进行了比较,这几个控制点的位置见图 4 所示.由表中的数值可知本文的计算方法得到的结果与试验测试结果比较接近.

理的分析总结,对组合索塔的水平受力机理得到以下结论:

(1) 通过对组合索塔复杂构件的简化得到了用于索塔水平受力分析的简化计算模型,并推导了用

于组合索塔水平受力的计算式. 通过与试验结果对比, 本文提出的计算方法有较好的准确性, 可用于组合索塔结构水平受力计算.

(2) 在钢与混凝土组合索塔中, 钢锚箱能承担80%以上的拉索水平力, 而混凝土塔壁承担的拉索水平力不到20%, 但在横桥向塔壁局部位置会引起混凝土开裂, 在设计中应引起足够重视.

参考文献:

- [1] 刘玉擎, 苏庆田. 苏通长江公路大桥索塔锚固区受力机理分析研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2004.
LIU Yuqing, SU Qingtian. Research on the mechanical behavior in anchorage zone of cable-pylon of Sutong Yangtze River Bridge[R]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [2] 曾明根, 苏庆田, 吴冲, 等. 上海长江大桥索塔锚固区受力分析与试验研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2007.
ZENG Minggen, SU Qingtian, WU Chong, et al. Research on the mechanical behavior and tests in anchorage zone of cable-pylon of Shanghai Yangtze River Bridge [R]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [3] 吴冲, 苏庆田. 济南黄河三桥索塔锚固区受力机理分析与试验研究报告[R]. 上海: 同济大学, 2007.
WU Chong, SU Qingtian. Research on the mechanical behavior and tests in anchorage zone of cable-pylon of No. 3 Huanghe River Bridge [R]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [4] 马旭涛. 上海长江大桥索塔锚固区模型试验与分析研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
MA Xutao. Experiment and analysis on cable-pylon anchorage of Shanghai Yangtze River Bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [5] 翟慧娜. 济南黄河三桥索塔锚固区水平受力性能静力模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
ZHAI Huina. Model test study of horizontal performance of the anchorage zone on pylon of the third Yellow River Bridge in Ji'nan [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [6] 苏庆田, 曾明根. 斜拉桥混凝土索塔钢锚箱受力计算[J]. 结构工程师, 2005, 21(6): 28.
SU Qingtian, ZENG Minggen. Analysis of mechanical behavior on concrete pylon steel anchor-box in cable-stayed bridge[J]. Structural Engineers, 2005, 21(6): 28.
- [7] 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 the cable pylons [J]. China Railway Science, 2008, 29(4): 58.
- [8] 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.
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.
- [9] 苏庆田, 曾明根, 吴冲. 上海长江大桥索塔钢锚箱模型试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 126.
SU Qingtian, ZENG Minggen, WU Chong. Experiment study on steel-anchor-box of cable-pylon in Shanghai Yangtze River Bridge[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 126.
- [10] 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.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D62—2004 Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.