

基于一阶优化方法的钢-混凝土组合索塔锚固区结构设计

赵 秋¹, 邢 昕², 翟慧娜³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108
2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300070 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010)

摘要: 研究了斜拉桥内置式钢锚箱钢-混凝土组合索塔锚固区的结构优化设计。建立以索塔锚固区典型节段的建造成本和水平承载力为综合目标的多目标优化模型,以索塔混凝土塔壁的厚度、钢锚箱侧板尺寸、塔壁配筋为设计变量,建立设计变量与满足塔壁裂缝宽度、塔内钢筋配筋率、钢锚箱屈服强度要求的状态变量之间的约束关系,采用一阶优化分析方法确定钢-混凝土组合索塔锚固区最优结构尺寸,得到了钢-混凝土组合索塔锚固区设计的最优方案。优化结果显示:针对索塔锚固区的钢锚箱侧板与混凝土塔壁形成的组合结构承受斜拉索水平力的特点,建立以建造成本和水平承载力为综合目标的优化模型是合理的,充分发挥了钢材和混凝土两种不同材料的性能,有效的控制塔壁混凝土裂缝产生。

关键词: 斜拉桥; 一阶优化; 桥塔; 钢-混凝土组合索塔锚固区

中图分类号: U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)04-0026-06

0 引言

“结构设计”一词,本身就包含了对结构优化的概念,设计出来的方案不应只是可用和比较合理,而应该是追求尽可能理想的方案^[1]。结构优化设计是从符合结构使用功能要求并满足结构强度、稳定性和刚度的所有可行设计中,相对设计者预定的标准,找出的最优方案。它使得设计者由被动的分析转变为主动的设计控制^[2]。现代结构优化设计方法的出现,大约可以追溯到 20 世纪 50 年代后期,首先在航空航天领域开始应用。L. A. Schmit 是早期研究结构最优化设计的著名学者,他于 1960 年首先提出了把结构优化设计的数学规划法和结构分析的有限元法联系起来,引起人们极大的兴趣^[3-4]。我国在这一领域研究虽然起步较晚,但开始就紧密地与实际工程相结合,如在航空航天、建筑、造船等领域得到了应用。1973 年,我国学者钱令希教授发表的关于“结构优化设计的近代发展”一文,可说是国内研究结构优化的一个进军号^[4]。

近年来,在大跨径斜拉桥建设中锚箱式钢-混凝土组合索塔锚固形式得到了广泛应用,如国内的苏通长江大桥、香港昂船洲大桥、上海长江大桥、鄂东长江大桥、济南黄河大桥等均采用这样的锚固形式^[5]。钢-混凝土组合索塔锚固区是由钢材和混凝土两种不同的材料组成、共同承受拉力的一种组合结构,利用钢结构强度大、抗拉能力强的特点承受斜拉桥拉索水平拉力。由于斜拉索锚固区承受强大的集中力作用,索塔锚固区的构造和受力复杂,通常是控制桥塔设计的关键部位,设计是否可靠直接关系到大桥的安全度。尝试将结构优化方法引入到索塔锚固区结构设计当中,通过优化设计改进斜拉索锚固区细部构造,对提高结构的安全性具有重要的指导意义。

1 结构体系特点

钢锚箱内置式钢-混凝土组合索塔锚固形式是将钢锚箱放置在混凝土塔壁框架内,钢锚箱的端板与横

桥向混凝土塔壁通过剪力钉连接, 通常混凝土塔壁内只布置普通钢筋, 不需要布置预应力钢筋, 构造图如图 1 所示。

为了掌握钢锚箱内置式钢-混凝土组合索塔锚固区这种新式结构的受力机理, 国内几座大桥的建设中均进行了相关的节段模型试验^[6-9]。从研究的结果上看, 组合索塔锚固区的传力途径为: 斜拉索的拉力首先传到钢锚箱上, 在顺桥方向的水平分力被钢锚箱侧板承担相当大的一部分, 其余没有被钢锚箱侧板承担的水平分力由钢锚箱传到混凝土塔壁上, 同时, 斜拉索竖向分力通过剪力钉传给混凝土塔壁, 由混凝土塔壁承担。这样, 在组合结构中钢材承受了较大的拉力, 混凝土承受了较大的压力和较少的拉力, 充分发挥了钢材抗拉强度高和混凝土抗压性能好的优点, 克服了钢材承受较大压应力容易失稳和混凝土承受较大拉应力容易开裂的缺点^[9]。

拉索水平力在传递过程中, 由于钢锚箱与塔壁的变形协调关系, 在拉索前侧横桥向的塔壁基本为纯弯构件, 再由框架效应导致顺桥向塔壁为偏心受拉构件。文献[9]的试验结果显示, 混凝土塔壁结构的应力分布共有三个部位拉应力较大, 实验时产生了裂缝。第一处为斜拉索索孔出口面, 第二处为内侧拐角, 第三处为混凝土侧壁内侧。但总体来说, 索塔混凝土水平裂缝的分布范围不大, 深度不深。是可以通过配置普通钢筋将裂缝宽度限制在规范允许的范围

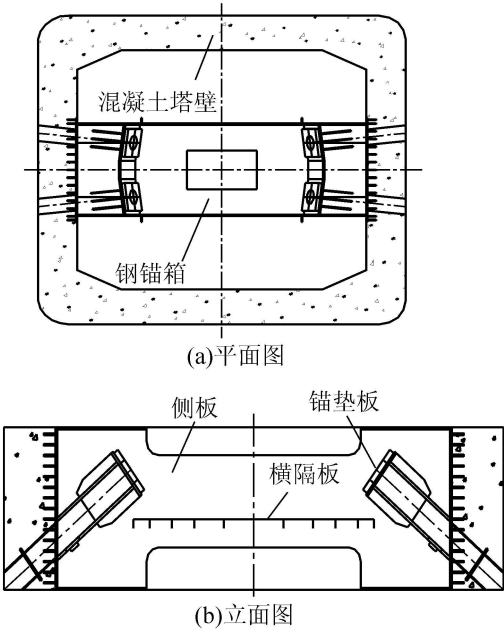


图 1 内置式钢锚箱钢-混凝土组合索塔锚固区节段构造

2 最优化建模

2.1 优化算法

目前对于结构优化问题的求解主要有三种解法, 即简单解法、准则法和数学规划法。当问题只有一两个变量可用简单法; 准则法是从工程观点出发, 提出结构达到优化设计时应满足某些准则 (如满应力、能量准则等), 然后用迭代的方法求出满足这些准则的解, 但它所得到的设计不是最优, 只是接近最优。数学规划法是把结构优化问题归结为数学规划问题, 常用的数学规划方法有非线性规划, 有时也用到线性规划, 各别情况还用动态规划和几何规划^[2]。在优化过程中需要使用状态变量和目标函数对于设计变量的偏导数, 称为一阶方法。一阶方法基于目标函数对设计变量的敏感程度, 因此更加适合于精确的优化分析。尤其适用于因变量很大, 设计空间也相对较大时。但占用的机时相比零阶方法多些, 随着计算机计算速度的提高, 便不成为问题了。对于有约束的非线性规划问题, 其数学模型可描述为

m in

s t

$F(X)$

$g_i(X) \leq 0 (i = 1, 2, \dots, m)$

$h_l(X) = 0 (l = 1, 2, \dots, m)$

(1)

式中, X 为 n 个优化设计变量, $g_i(X)$ 、 $h_l(X)$ 为状态变量, $F(X)$ 为目标函数。使用一阶分析法可将上述有约束优化问题通过对目标函数追加罚函数的方法转化为非约束优化问题^[4]。约束函数 $g_i(X)$ 、 $h_l(X)$ 以一定的方式附加加到原问题的目标函数上去。

m in

$Q(X, r_k, t_k) = F(X) + r_k \sum_{i=1}^m G[g_i(X)] + t_k \sum_{l=1}^p H[h_l(X)]$

(2)

式中, $G[g_i(X)]$ 、 $H[h_l(X)]$ 分别是针对原问题中一组不等式约束条件和一组等式约束条件, 以某种方式构成的 $g_i(X)$ 、 $h_l(X)$ 泛函。 r_k 、 t_k 是在优化过程中随 k 的增大而不断调整的变值参数, 称作罚因子或罚参

数^[10]。在每次优化迭代计算中, 主要包括两方面的计算。一个是选择合适的下降方向 d^j , 另一个是沿 d^j 方向进行一维搜索, 找到一个合适的步长 S_j 。迭代公式为

$$X^{j+1} = X^j + S_j d^j \tag{3}$$

式中, S_j 是采用黄金分割法和最小二乘法来确定的参数, 对 S_j 的限制条件为

$$0 \leq S_j \leq S_{\max} S_j^* / 100 \tag{4}$$

式中, S_j^* 为当前线性搜索迭代步骤中最大的可能步长; $S_{\max}$ 线性搜索步长的最大值 (以 % 为单位)。 S_j 对应的搜索方向 d^j 可采用最速下降搜索或者共轭方向搜索确定^[11], 计算公式从略。

2 2 锚固区建模思路

斜拉桥的主塔不仅承受斜拉索竖向分力所产生的巨大轴力作用, 而且还要承受水平分力所产生的弯曲作用。主塔截面尺寸需要根据整个斜拉桥结构体系的强度、刚度、稳定计算的需要, 以及建筑造型要求设计^[12]。而索塔锚固区的计算属于局部计算, 主塔形式和截面尺寸拟定所需考虑的因素, 对其相关性较小。针对索塔锚固区结构的特点, 对于主塔的设计应分三阶段进行优化设计, 首先从全桥的整体出发, 并考虑锚固区的构造要求, 进行主塔的结构形式、高度、截面尺寸大小等的优化设计; 第二阶段为以锚固区节段为研究对象, 只考虑斜拉索索力水平分力的影响, 优化由钢锚箱侧板和钢筋混凝土塔壁组成的组合结构, 确定钢锚箱侧板构造尺寸、塔壁混凝土配筋设计, 重点控制塔壁裂缝产生, 使钢-混组合结构最优的发挥各自的性能; 第三阶段以钢锚箱为研究对象, 在斜向斜拉索作用下, 优化钢锚箱各组成板件构造尺寸、钢锚箱端板与塔壁相连的剪力连接键。而本文所完成的任务应属第二阶段内容。

2 3 建立优化数学模型

一个结构优化设计问题的数学模型包括三个要素, 通常称为设计变量、约束条件和目标函数。合理的选择这三个要素是优化数学模型合理的关键。综上所述, 钢-混凝土组合索塔锚固区结构优化设计问题可以表述为:

求设计变量构成的向量

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \tag{5}$$

使目标函数

$$f(X) \rightarrow \min \tag{6}$$

满足约束条件

$$\begin{cases} W_{fk,i} \leq W_0 & (i = 1, 2, \dots, m) \\ \sigma_i^{gb} \leq \sigma_i^{gb} \leq \bar{\sigma}^{gb} & (i = 1, 2, \dots, m) \\ \underline{\rho} \leq \rho_i \leq \bar{\rho} & (i = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \tag{7}$$

式中, X 为结构的设计变量, 包括顺桥向和横桥向塔壁厚度、钢锚箱侧板板厚、塔内钢筋直径; $W_{fk,i}$ 为混凝土塔壁裂缝宽度, W_0 为裂缝宽度的限值; σ_i^{gb} 为钢锚箱侧板应力, σ^{gb} 、 $\bar{\sigma}^{gb}$ 为钢材应力的上下限; ρ 为断面含筋率, $\underline{\rho}$ 、 $\bar{\rho}$ 为含筋率的上下限。 $f(X)$ 为目标函数, 由于索塔截面尺寸在索塔锚固区设计阶段改动要尽量小, 而钢锚箱侧板在整个锚固区所占成本比重不大, 如果只将工程建造成本设为目标函数并不能完全体现设计的最优。故本文采用多目标函数优化设计, 并将两个目标构造成一个复合的目标函数。

$$f(X) = \alpha P_0 / P_1 + \beta A_1 / A_0 \tag{8}$$

式中, P_0 、 A_0 分别是由第一阶段设计的塔壁尺寸和初步拟定的钢锚箱构造尺寸所组成的锚固区节段的最大水平承载力和建造成本 (包括材料费和安装费); P_1 、 A_1 是优化设计后该节段的最大水平承载力和建造成本。 α 、 β 为权系数, 随着问题的性质, 权系数可取不同的值, 如何寻找合理的权系数是至关重要的。

3 工程实例

3 1 工程背景

某桥为主跨 386 m 的独塔钢箱梁斜拉桥, 跨径布置为 (60+ 60+ 160+ 386) m, 桥宽 43.6 m。桥塔采用倒 Y 形钢筋混凝土结构, 承台以上塔高 197 m, 塔柱为单箱单室断面, 采用内置钢锚箱作为斜拉索锚固结构。主塔两侧各采用 24 对斜拉索, 基本索距为 15 m, 边跨密索区基本索距为 7.5 m。索塔锚固区节段总长 50.4 m, 共 21 个钢锚箱节段, 节段高度 2.3~3.6 m, 上塔柱锚固段示意图见图 2。索塔锚固区节段构造图见图 1 所示。塔壁内布三排钢筋, 其布置形式如图 3 所示, 横桥向塔壁双层钢筋在外侧, 顺桥向塔壁双层钢筋布置在内侧, 钢筋直径均采用 28 mm。

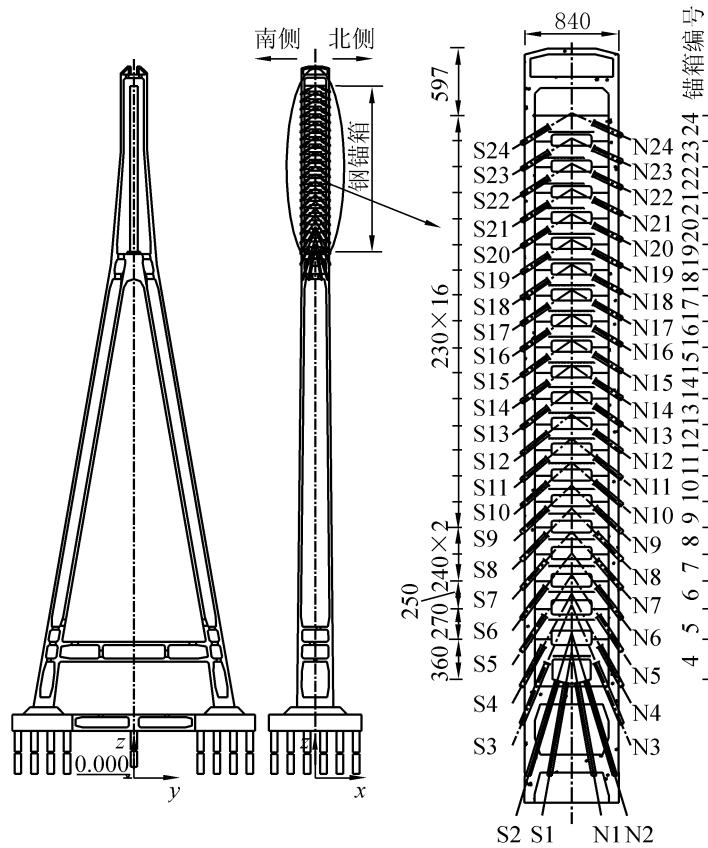


图 2 上塔柱锚索段示意图 (单位: cm)

3.2 计算模型检验

优化模型截取水平受力最不利的 23 号节段, 索力水平分力 $P = 5\,349\text{ kN}$ 。在有限元分析模型中, 塔壁混凝土采用 8 节点 Solid45 单元模拟, 混凝土塔壁平面内主要环向受力钢筋采用 Link8 单元模拟。钢锚箱锚垫板采用 Solid45 单元模拟, 其余板件采用 Shell181 单元模拟。钢混结合面之间的剪力钉采用三维弹簧单元 Cmbin14 模拟。有限元模型见图 4 所示。有限元计算结果与文献 [9] 索塔锚固区水平受力性能静力模型试验结果相吻合, 可以进行下一步优化分析模型使用。

3.3 结构优化分析

在优化计算过程中, 为了提高优化速度, 索塔锚固区的承载力计算参照文献 [9] 对索塔锚固区水平承载力简化公式计算方法。简化分析方法将混凝土塔壁简化为平面框架结构, 忽略钢锚箱的刚度对结构的影响, 只用钢锚箱侧板与混凝土相连, 斜拉索索力作为外荷载近似作用于钢锚箱侧板的两端, 该方法计算水平承载力与试验得到很好的吻合。

经计算发现, α 与 β 值均设为 0.5 时, 虽然综合目标函数减小, 但相对水平承载力 P_1/P_0 变化大于相对工程建造成本 A_1/A_0 , 导致基于该目标优化的水平承载力增加 30% 和工程建造成本增加 20%, 优化结果并不合理。当 α 与 β 值分别设为 0.4 和 0.6 时, 基于该目标优化的水平承载力增加 4.2% 和工程建造成本增加 12.1%, 已经趋于理想了。当 α 与 β 值分别设为 0.3 和 0.7 时, 基于该目标优化的水平承载力降低 16.4%

和工程建造成本降低 20 1%, 优化结果同样不理想。这样通过试算, 当 α 与 β 值分别设为 0.35 和 0.65 时, 水平承载力不变, 工程建造成本降低 10.7%, 可以将这一等承载力状态作为优化设计的结果。

优化结果显示, 索塔锚固区相对水平承载力 P_1/P_0 与相对建造成本 A_1/A_0 关系见图 5 所示。从图中可以看到, 相对工程建造成本的增加不能保证的相对水平承载力增加, 所以相对水平承载力与相对工程建造成本并没有必然的联系。这也说明了, 在结构设计当中, 如设计不合理, 各材料使用效率相差悬殊, 造成浪费。设计变量优化前与优化后对比见表 1 所示, 可以看出, 组合索塔锚固区结构优化的发展趋势为横桥向塔壁截面变大, 塔壁内受拉侧钢筋面积增加; 顺桥向塔壁截面变小, 塔壁内钢筋面积减少。原设计有限元计算钢锚箱承担水平荷载比例为 84.5%, 混凝土塔壁承担比例为 15.5%。优化后钢锚箱承担水平荷载比例为 82.0%, 混凝土塔壁承担比例为 18.0%。也就是说, 随着横桥向塔壁抗弯刚度增加, 混凝土塔壁承担斜拉索水平分力增加, 钢锚箱承担水平分力减少。图 6 为目标函数 $f(X)$ 随迭代次数变化过程。图 7 显示优化迭代过程中, 塔壁所承担斜拉索水平分力与塔壁厚度对应关系。并可以看出, 如增加塔壁承担的的水平力, 可以通过增加横桥向塔壁厚度, 减小顺桥向塔壁厚度实现。

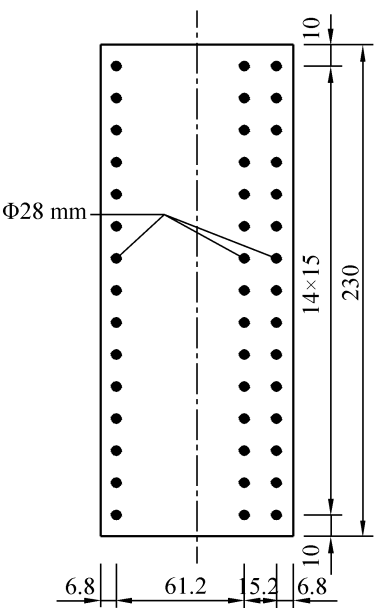


图 3 塔壁纵横向与横桥向钢筋布置图(单位: cm)

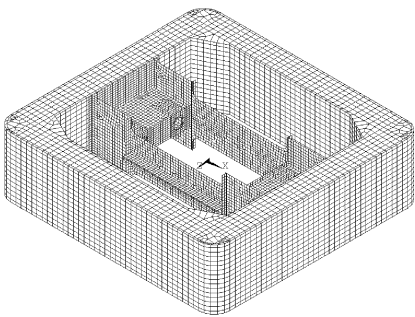


图 4 有限元模型

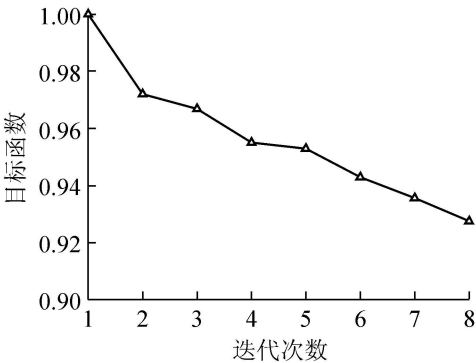


图 6 目标函数迭代次数变化

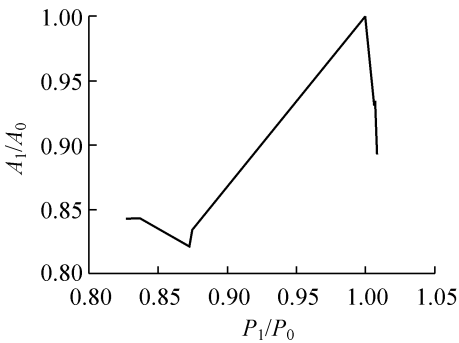


图 5 相对承载力与相对工程建造成本的关系图

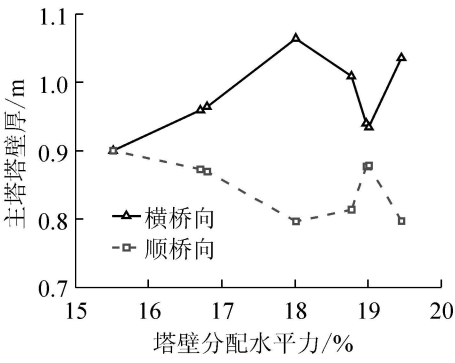


图 7 塔壁厚度对混凝土塔壁承担水平分力的影响

表 1 设计变量对比表

变量	塔壁横桥 向壁厚 /m	塔壁顺桥 向壁厚 /m	塔壁内斜 角长×宽 /m	钢锚箱侧 板板厚 /m	横桥向塔壁拉 / 压钢筋直径 /mm	顺桥向塔壁拉 / 压钢筋直径 /mm
原设计	0.9	0.9	1.0×0.5	0.04	28/28	28/28
优化后	1.064	0.797	0.918×0.447	0.035	37/18	19/16

4 结语

(1) 优化内置式钢锚箱钢-混凝土组合索塔锚固区, 可以建立以水平承载力和工程建造成本综合目标的多目标优化模型, 对于本例题水平承载力加权系数取 0.35, 工程建造成本取 0.65, 采用一阶优化分析方法, 可以得到比较理想的结构设计形式。

(2) 斜拉桥主塔的优化设计可以分为三个阶段: 第一阶段为全桥分析, 优化塔形, 塔截面尺寸等; 第二阶段对钢锚箱与混凝土塔壁构成的组合结构水平受力分析, 优化钢锚箱侧板尺寸、塔壁内环向受力钢筋、塔壁厚度等; 第三阶段对锚固区节段斜向受力分析, 优化钢锚箱各板件构造尺寸、剪力连接键等。

(3) 组合索塔锚固区结构优化结果为横桥向塔壁截面增大, 塔壁内受拉侧钢筋增加, 顺桥向塔壁截面减小, 塔壁内钢筋减少, 说明原结构横桥向塔壁是控制裂缝宽度的关键部位。

(4) 当塔壁裂缝宽度为钢锚箱组合锚固结构设计的控制因素, 钢锚箱无法发挥高强钢材的强度, 而需要一定的锚箱侧板厚度限制水平变形, 提高钢锚箱承担水平分力比例。

参 考 文 献

- [1] 钱令希. 工程结构优化设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] 朱伯芳, 黎展眉, 张壁城. 结构优化设计原理与应用 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [3] 曾广武. 船舶结构优化设计 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [4] 张炳华, 侯昶. 土建结构优化设计 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
- [5] 魏奇芬. 钢锚箱在斜拉桥索塔锚固区中的应用 [J]. 世界桥梁, 2008(2): 27-30.
- [6] 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.
- [7] 苏庆田, 翟慧娜, 吴冲. 济南黄河三桥索塔锚固区水平受力性能模型试验研究 [J]. 桥梁建设, 2008(3): 12-14.
- [8] 曾明根, 苏庆田, 吴冲. 上海长江大桥组合索塔锚固区受力数值计算 [J]. 桥梁建设, 2007(5): 34-37.
- [9] 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: 同济大学土木工程学院, 2008.
- [10] 于宝海, 肖熙. 船舶结构优化设计 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986.
- [11] 郑玉国, 袁万城, 屈本宁. 基于综合非线性优化方法的倒张型悬索桥非线性优化设计 [J]. 计算力学学报, 2008(S1): 58-62.
- [12] 林元培. 斜拉桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Structural Design in Steel-concrete Composite Anchorage Zone on Pylon Based on First Order Optimization Method

Zhao Qiu¹, Xing Xin², Zhai Huina³

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

2. Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300070, China

3. China Communication Highway Planning and Design Institute, Beijing 100010, China)

Abstract The structural optimization design for composite anchor zone with built-in steel box of cable-stayed bridge is studied. The Multiobjective optimization model is established for the cost of single segment in anchor zone and the horizontal bearing capacity. Taking the thickness of the concrete pylon wall, side-plane size of steel anchor-box, reinforcement diameter in pylon wall as design variables, constraint relations are defined among the crack width of wall, reinforcement strength in pylon, reinforcement ratio and the yield strength of the steel anchor-box. The optimum structural dimension is determined by using first order optimization method. The result shows that based on the properties of the composite anchorage zone, the multiobjective optimization model targeted for the cost and the horizontal bearing capacity is reasonable, and the cracks of the concrete wall are effectively controlled by combining the respective advantages of steel and concrete.

Key words cable-stayed bridge; first-order optimization; pylon; steel-concrete composite anchorage zone