

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.12.015

大体积承台结构设计优化与试验研究

董汉军¹, 李满², 董满生², 秦晓峰¹, 陈斌¹

(1. 中交第二航务工程局有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518067; 2. 合肥工业大学 交通学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 结合汕头外砂河大桥工程项目, 提出一种在封底混凝土结构和承台结构之间, 设置钢-混组合过渡层结构的主墩大体积承台结构设计优化方法, 实现承台混凝土一次浇注成型。通过对过渡层结构受力进行理论分析, 明确新型承台结构受力机理, 并在承台混凝土浇注过程中对封底结构和过渡层结构承重分担比例规律进行试验研究。研究表明: 理论分析与试验结果吻合, 验证了承台结构设计优化方法的可靠性和实用性, 为类似工程承台结构优化设计提供理论参考和实践借鉴。

关键词: 桥梁工程; 大体积承台; 试验研究; 结构优化; 浇注

中图分类号: U443.25

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2015)12-0088-06

Structure Design Optimization and Experimental Study of Large Volume Pier Cap

DONG Han-jun¹, LI Man², DONG Man-sheng², QIN Xiao-feng¹, CHEN Bin¹

(1. Shenzhen Branch of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518067, China;

2. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: Combining with a project of Waishaha bridge in Shantou, a design optimization method for large volume main pier cap that setting a steel-concrete transition layer between subsealing concrete back and pier cap structure is proposed to make the concrete of the pier cap poured at one time. First, by analysing the distributed load of the transition layer, and the load mechanism of this new pier cap is determined. Then, the load sharing ratios of the subsealing and the transition layer in the process of concrete pouring is experimental studied. The research shows that theoretical analysis agrees with the experimental result, which verified the reliability and practicability of the proposed structure design optimization method and provided a theoretical and practical reference for similar engineering.

Key words: bridge engineering; large volume pier cap; experimental research; structure optimization; pouring

0 引言

随着我国跨江、跨河及跨海大桥的修建, 大型水上施工作业日益增多, 其中承台施工是水上作业必不可少的环节。在进行承台施工时, 承台混凝土重量由封底混凝土承担^[1-3]。目前, 由于封底结构承载力的限制, 大体积承台混凝土浇注过程中大多选择分层浇注^[4-6]。若选择一次浇注将大大缩短工期, 节约成本, 而一次浇注封底混凝土和桩基之间

的握裹力往往不足以承受承台混凝土的重量。

一直以来, 针对封底及承台承载力的研究, 主要集中在承台施工前混凝土与钢护筒间的握裹力及承台施工后对承载力不足的承台进行加固两方面^[7-14]。杨红等通过对苏通大桥承台封底混凝土与钢护筒间握裹力的试验研究与施工现场检测, 提出钢护筒与承台封底混凝土间的握裹力系数取 0.37 MPa, 安全、快速地完成了南主塔墩基础的施工^[15]。李杰从桥梁承台的一般设计理论与方法出发, 采用

收稿日期: 2014-11-12

基金项目: 交通运输部建设科技项目 (2013318740050)

作者简介: 董汉军 (1969-), 男, 湖北孝感人, 硕士, 高级工程师. (2304009010@qq.com)

撑系杆体系计算模式, 对两座桥梁承台进行受力分析, 并且针对承载能力严重不足的承台提出了预应力承台加固法及墩身加宽法^[16]。现有研究, 主要通过增加封底和钢护筒间的握裹力系数或加固封底来提高封底支撑力, 具有局限性。

本文结合汕头外砂河大桥主墩承台施工项目, 寻求封底结构之外的支撑力, 研究一次浇注成型的新型承台结构设计优化理论, 并对承台施工中承台支撑系统的力学机制进行试验研究。

1 工程概况

外砂河大桥及互通工程是汕头东部城市经济带规划中的滨海大道跨越外砂河的一座特大桥, 长 1 887.2 m (不包括匝道), 起止桩号为 K9+715.126~K11+602.326, 标准段桥面宽单幅宽 18.75 m, 中央分隔带为 2.5 m。其中主桥 (35~38#墩) 为 (61+108+61) m 三跨梁拱组合式桥。

外砂河大桥主桥承台为 35~38#, 其中 36#和 37#为主墩, 35#和 38#为过渡墩。单个主墩承台由 2 个尺寸 14.2 m×14.2 m×4.5 m 的小承台与一个尺寸为 6 m×5.1 m×4.5 m 系梁连接而成。单个主墩共有直径 2 m 的灌注桩 18 根。承台混凝土为 C35 的海工高性能混凝土, 总浇注量约 1 927.42 m³。封底混凝土为水下不离析 C30 混凝土, 厚度为 2 m, 单个墩承台封底方量约为 812 m³。主墩承台平面结构如图 1 所示。

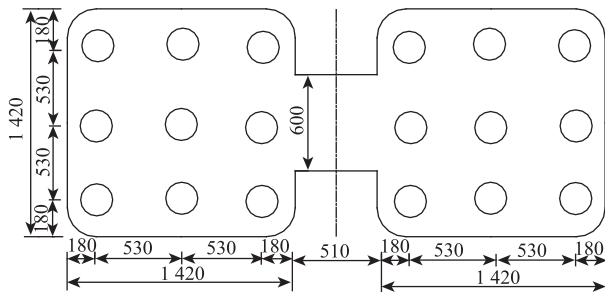


图 1 主墩承台平面图 (单位: cm)

Fig. 1 Plan view of main pier cap (unit: cm)

2 承台结构设计优化理论分析

2.1 承台结构设计优化方案

外砂河大桥主墩承台原设计施工方案分两次浇注承台混凝土, 第 1 层浇注 2 m, 第 2 层浇注 2.5 m, 第 2 层混凝土在第 1 层混凝土强度达到设计强度时浇注。考虑到工期紧, 提出一次性浇注承台。分别对封底混凝土与钢护筒的握裹力、中部支座强度及

中部支座与拉压杆焊缝进行计算, 结果表明承台一次浇注成型时封底混凝土与钢护筒的握裹力不足以承受承台混凝土重量。针对这一问题, 经过施工现场多次勘察, 利用封底混凝土顶面的 30 cm 找平层, 提出在封底混凝土结构和承台结构之间设置钢-混组合过渡层结构, 优化承台结构设计。

为了充分挖掘钢-混组合过渡层结构承载力, 除了利用封底找平层外, 还将原设计的承台厚度由 450 cm 减小到 430 cm, 设计过渡层厚为 50 cm。钢-混组合过渡层采用型钢, 将钢护筒与钢套箱侧壁、钢护筒与护筒之间连接起来, 其中钢护筒之间用 2~3 根型钢连接, 具体如图 2 所示。型钢位置尽可能低, 保证型钢顶面以上混凝土厚度大于 15 cm, 在型钢上铺设直径 22 mm 的 II 级钢筋网, 钢筋横向、纵向间距均为 200 mm, 并将钢筋与型钢焊接, 钢筋网在经过桩基时与桩基钢护筒及桩基钢筋焊接联系。

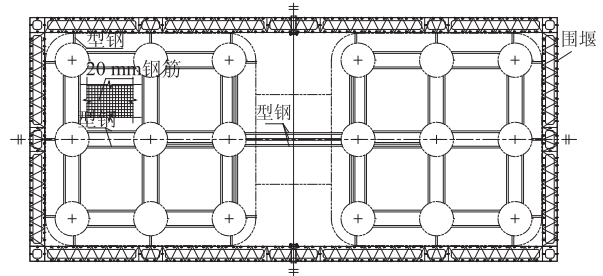


图 2 承台结构优化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pier cap structure optimization

承台结构优化设计以过渡层和封底整体承载力为目标, 关键技术为: (1) 分析过渡层中型钢受力分析; (2) 研究承台混凝土浇注过程中过渡层和封底结构共同作用机理。具体优化设计流程见图 3。

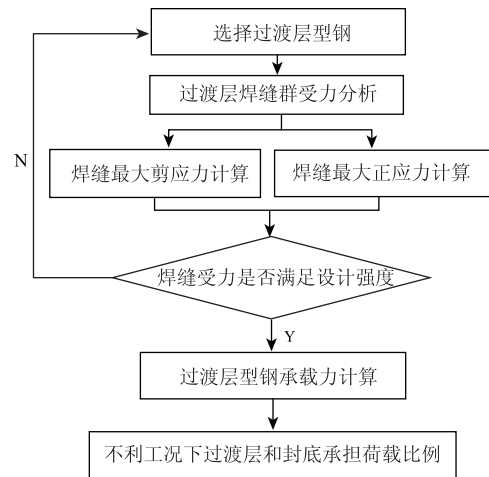


图 3 优化设计流程图

Fig. 3 Flowchart of optimization design

2.2 承台结构设计优化理论分析

2.2.1 过渡层中型钢承载力理论分析

本案例中过渡层型钢选用工 25a, 工 25a 为 Q235-B, 采用对接焊缝焊接, 焊缝达到一级检验标准。在承台混凝土浇注过程中, 工 25a 受到的荷载通过焊缝作用到桩基钢护筒。假设对接焊缝的应力分布情况与焊件相同, 可用计算焊件的方法进行计算, 对接焊缝的计算截面如图 4 所示。

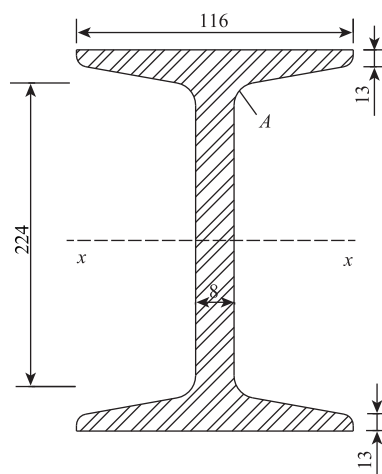


图 4 对接焊缝计算截面图 (单位: mm)

Fig. 4 Section of butt weld calculation (unit: mm)

根据对接焊缝截面特性及承台混凝土特性, 得到焊缝承载力计算参数如表 1 所示。

表 1 焊缝承载力计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of load bearing capacity of weld

焊缝截面 积 A/cm^2	截面惯性 矩 I_x/cm^4	截面静矩 S_x/cm^3	翼缘静矩 S_{x1}/cm^3	焊缝群受 力 V/kN	扭矩 $M/(\text{kN} \cdot \text{m})$
48.08	4984.4	228.87	178.7	31.63	83.82

将表 1 数据代入式 (1) 与式 (2) 计算焊缝最大正应力与最大剪应力。

表 2 承台整体荷载组合 (单位: kN)

Tab. 2 Load combination of the whole pier cap (unit: kN)

波浪吸力 G_1	钢吊箱自重 G_2	封底混凝土 重 G_3	过渡层重 G_4	承台钢筋混 凝土重 G_5	钢吊箱存水 重 G_6	水浮力 F_1	封底混凝土握 裹力 F_2	过渡层混凝土 握裹力 F_3
3 998.4	3 449.6	22 334.2	5 145	37 651.6	4 900	28 037.8	28 665	17 199

表 2 中 $F_2 = 3.14 \times 2.3 \times 1.5 \times 15 \times 18 = 28\ 665\ \text{kN}$, $F_3 = 3.14 \times 2.3 \times 0.45 \times 30 \times 18 = 17\ 199\ \text{kN}$ 。根据表 2 具体数值, 向下荷载总和 $N_1 = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 = 77\ 748.8\ \text{kN}$, 向上荷载总和 $N_2 = F_1 + F_2 + F_3 = 73\ 901.8\ \text{kN}$, 分以下 3 种情况讨论一次性浇注承台混凝土时的抗滑安全系数:

(1) 不设计过渡层时, 抗滑安全系数 $K_1 = \frac{F_1 + F_2}{G_1 + G_2 + G_3 + G_5 + G_6} = 0.78 < 1.1$, 显然承台混凝土

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I_x} \cdot \frac{h}{2}, \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \frac{VS_x}{I_x t}. \quad (2)$$

根据式 (1) 和式 (2) 得

$$\sigma_{\max} = 210.21\ \text{MPa} < f_t^w = 215\ \text{MPa},$$

$$\tau_{\max} = 18.15\ \text{MPa} < f_v^w = 125\ \text{MPa}.$$

式中 f_t^w , f_v^w 为对接焊缝的抗拉设计强度和抗剪设计强度。

由于上翼缘和腹板交接处 A 点易破坏, 用式 (3) 和式 (4) 计算 “A” 点正应力与剪应力。

$$\sigma_A = \sigma_{\max} \cdot \frac{112}{125}, \quad (3)$$

$$\tau_A = \frac{VS_{x1}}{I_x t}. \quad (4)$$

根据式 (3) 和式 (4) 得 $\sigma_1 = 188.35\ \text{MPa}$, $\tau_1 = 14.18\ \text{MPa}$, 由于 A 点受有较大的正应力和剪应力, 经验算其折算应力小于 $1.1 f_t^w$ 。由计算结果可知对接焊缝理论受力满足设计强度要求, 每个焊缝处桩基钢护筒提供反向支撑力, 将数据代入式 (5) 计算支撑力:

$$F_1 = \tau'_{\max} A. \quad (5)$$

分析上述计算结果, 承台混凝土浇注完成后过渡层每根工 25 型钢理论上提供承载力 174.244 kN。

2.2.2 新型承台结构受力分析

在低潮位 -0.2 m 时, 完成承台混凝土施工, 其荷载组合为: 波浪吸力 (向下) + 钢吊箱自重 (向下) + 封底混凝土重 (向下) + 过渡层重 (向下) + 承台钢筋混凝土重量 (向下) + 钢吊箱存水重量 (向下) + 水浮力 (向上) + 封底混凝土握裹力 (向上) + 过渡层混凝土握裹力 (向上) + 过渡层工 25 型钢承载力 (向上), 各荷载具体值见表 2。

不能进行一次性浇注。

(2) 设计过渡层, 不考虑工 25a 型钢承载力时, 抗滑安全系数 $K_2 = \frac{N_2}{N_1} = 0.95 < 1.1$, 不满足要求。

(3) 设计过渡层且考虑工 25a 型钢承载力, 假设抗滑安全系数为临界值 1.1 时, 型钢焊接数量 $n = \frac{1.1N_1 - N_2}{17.78 \times 9.8} = 65$ 。

经过上述计算, 低潮位时若使承台混凝土一次

性浇注成功, 需设置过渡层且过渡层工 25a 型钢数量不少于 65。

本实例中, 过渡层共焊接工 25a 型钢 68 根。随着浇注量的增加, 承台混凝土重量由过渡层结构传递到封底结构, 其中过渡层结构由钢 - 混凝土共同承重, 封底结构由封底混凝土与钢护筒间的握裹力承重。按照这个作用机理, 当承台混凝土浇注完成时, 过渡层和封底理论承重比为:

$$\gamma = 1.01。$$

3 承台结构优化试验研究

3.1 试验方案

过渡层施工过程中, 在封底和过渡层顶面埋设轴力计, 试验研究承台混凝土浇注过程中的封底结构和过渡层结构受力特性, 分析二者共同承重机理。

3.1.1 设备埋设

按图 5 位置安装压力传感器 20 个, 封底混凝土顶面 9 个, 过渡层混凝土顶面 9 个, 桩顶 2 个。封底压力传感器与封底接触面尽量平整, 如不平整用 C30 水泥砂浆找平后进行安装, 过渡层顶面混凝土压力传感器在过渡层混凝土浇注时以嵌入混凝土形式安装, 以确保传感器顶面水平。过渡层顶面轴力计测量点如图 5 所示, 封底顶面轴力计测量点位置与过渡层相同。

3.1.2 试验观测

承台混凝土浇注过程中务必严格按照观测频率和观测要求进行观测。承台混凝土浇注之前测试初始值, 之后每浇注 180 m³ 观测 1 次, 直到浇注完成, 浇注完毕后每 4 h 测一次, 直到相邻两次数值不变。

表 3 过渡层混凝土顶面测量点应力

Tab. 3 Stresses at measuring points on transition layer concrete top

测量号	各混凝土浇注量 (m ³) 应力变化/MPa							
	540	720	900	1 080	1 260	1 440	1 620	1 880
318	0.031 292 141	0.041 063 816	0.054 738 466	0.064 502 005	0.076 213 777	0.087 920 667	0.099 622 676	0.109 370 621
306	0.031 671 53	0.041 561 711	0.055 402 228	0.065 284 214	0.077 138 088	0.088 987 046	0.098 857 42	0.118 587 924
301	0.033 187 747	0.044 891 74	0.054 641 35	0.066 336 421	0.078 026 624	0.089 711 96	0.099 446 022	0.130 680 304
310	0.031 944 73	0.043 914 816	0.053 886 06	0.065 846 959	0.077 802 847	0.089 753 724	0.099 708 96	0.109 660 716

表 4 封底混凝土顶面测量点应力

Tab. 4 Stresses at measuring points on subsealing concrete top

测量号	混凝土浇注量 (m ³) 应力变化/MPa							
	540	720	900	1 080	1 260	1 440	1 620	1 880
309	0.011 695 45	0.027 281 677	0.035 071 488	0.038 965 568	0.042 859 098	0.046 752 077	0.050 644 506	0.058 427 712
308	0.012 158 88	0.028 362 947	0.034 437 182	0.038 485 978	0.042 534 219	0.046 581 905	0.050 629 035	0.058 721 63
312	0.011 917 356	0.027 799 492	0.033 753 032	0.037 721 374	0.041 689 168	0.045 656 414	0.049 623 113	0.057 554 864
302	0.012 278 844	0.028 642 74	0.034 776 875	0.038 865 593	0.042 953 747	0.047 041 336	0.051 128 363	0.059 300 723

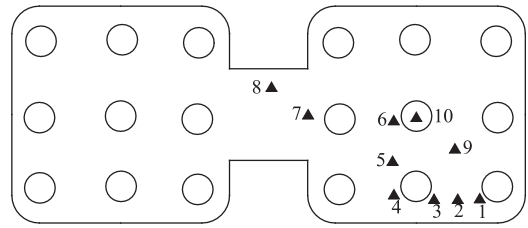


图 5 过渡层顶面轴力计位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of axial force meter positions on top of transition layer

3.2 试验分析

根据实测试验数据, 绘制承台混凝土浇注量与测量点应力变化关系, 分析承台施工过程过渡层和封底承重比; 通过试验进一步验证并校验承台结构优化设计的合理性。

将轴力计测得频率数据进行筛选, 过渡层顶部测量点 2, 6, 8, 9 测量编号分别为 318, 306, 301 及 310, 封底顶部相同位置测量编号分别为 309, 308, 312 及 302, 此 8 组测量数据有效, 把有效数据代入式 (6), 计算各测量点轴力。

$$F_i = K_i(f_i^2 - f_0^2), \quad (6)$$

式中, i 为轴力计测量号; F_i 是测量点轴力; f_i 为测量点实时测量频率; f_0 为测量点初始频率。将计算得到的轴力代入式 (7), 计算各测量点应力。

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A}, \quad (7)$$

式中, F_i 为测量点实时轴力; A 为轴力计接触面面积。整理计算所得各测量点应力, 得到过渡层混凝土顶面测量点应力变化如表 3 所示, 封底混凝土顶面测量点应力变化如表 4 所示。

结合表 3 及表 4 绘制过渡层顶面和封底顶面对应测量点混凝土浇筑方量 - 应力变化曲线见图 6。由图 6 可直观看出, 承台混凝土浇筑过程中, 各测量点应力变化规律基本一致, 过渡层和封底共同承担了承台混凝土重量。对过渡层顶部及封底混凝土顶部对应测量点在混凝土浇筑过程中的应力变化进行

比较分析可知, 承台混凝土浇筑量为 540 m^3 时, 过渡层和封底的承重比约为 3: 2; 随着承台混凝土浇筑方量的增加, 过渡层和封底的承重比变化范围为 3: 7 ~ 2: 3; 当承台混凝土浇筑完成时, 过渡层和封底承重比约为 1: 1, 与理论计算承重比接近。这表明, 过渡层有效承担了承台混凝土重量。

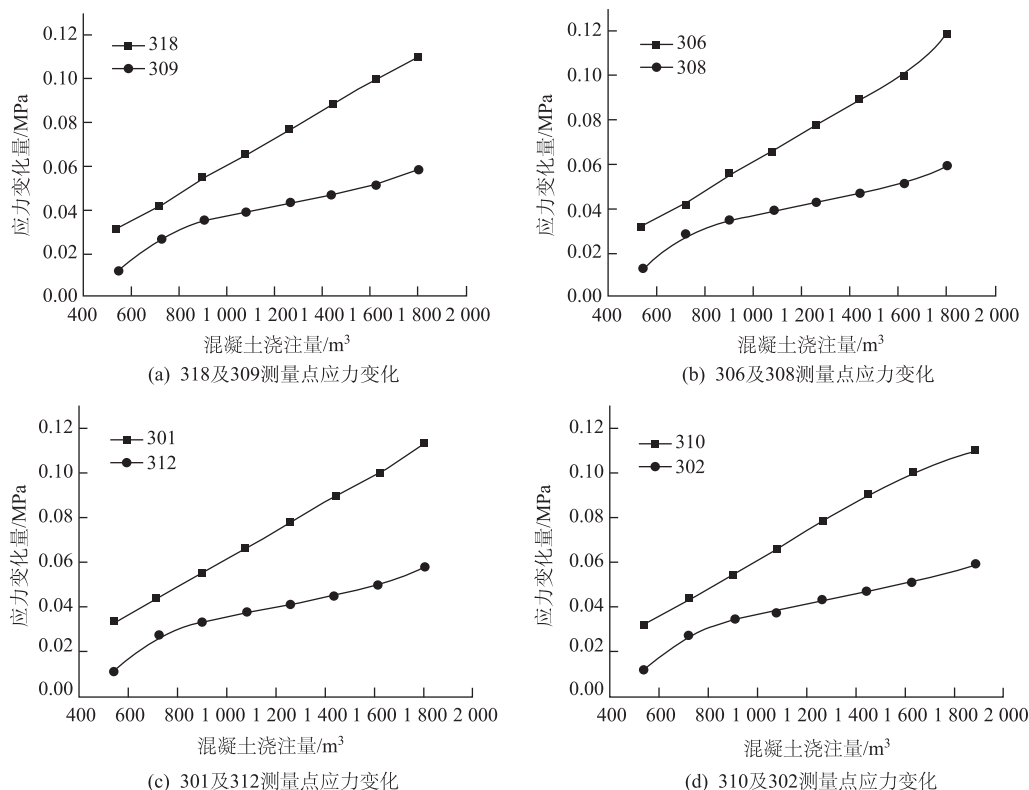


图 6 混凝土浇筑方量 - 应力变化曲线

Fig. 6 Curves of concrete pouring volume vs. stress

4 结论

本文提出一种在封底混凝土结构和承台结构之间设置钢 - 混组合过渡层结构的主墩大体积承台结构设计优化方法, 解决了承台混凝土一次性浇筑封底承载力不足的问题, 大大缩短工期。通过理论分析和试验研究得出:

(1) 承台结构优化设计过渡层和封底理论承重比为 1.01, 与试验结果吻合验证了承台结构优化理论的可靠性与实用性。

(2) 研究成果对解决承台及封底承载力不足等问题提供了新的解决方法, 可以考虑在类似工程中推广。

参考文献:

References:

[1] 张庆辉, 申爱国. 湛江海湾大桥主塔墩承台施工控制

阶段的分析计算 [J]. 公路, 2005 (5): 209 - 211.

ZHANG Qing-hui, SHEN Ai-guo. Analytical Calculation of Main Pylon Pier Cap of Zhanjiang Gulf Bridge in Construction Control Period [J]. Highway, 2005 (5): 209 - 211.

[2] 黄宇, 宁艳玲. 承台封底混凝土精细化受力分析 [J]. 公路, 2011 (10): 198 - 201.

HUANG Yu, NING Yan-ling. Fine Force Analysis of Pier Cap Subsealing Concrete [J]. Journal of Highway, 2011 (10): 198 - 201.

[3] 雷权有. 跨海大桥水中承台大体积混凝土施工技术 [J]. 中外公路, 2014, 34 (1): 213 - 215.

LEI Quan-you. Construction Technology of Large Volume Concrete of Pile Cap of Cross-sea Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34 (1): 213 - 215.

[4] 杨斌财. 跨海大桥埋置式承台施工关键技术 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

YANG Bin-cai. Key Construction Technology of

- Embedding Type Bearing Platform of Cross-sea Bridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [5] 项贻强,程坤,吴强强. 钢筋混凝土构件弯剪扭复合受力分析与研究 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (4): 46-54.
- XIANG Yi-qiang, CHENG Kun, WU Qiang-qiang. Research and Development on Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Combined Bending, Shear and Torsion [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (4): 46-54.
- [6] 周文. 江顺大桥 Z3 号主墩承台施工关键技术 [J]. 中外公路, 2013, 33 (5): 165-169.
- ZHOU Wen. Key Construction Technology of Bearing Platform of Main Pier No. Z3 Jiangshun Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33 (5): 165-169.
- [7] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范 [S].
- JTG D60—2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [8] 何雄君,李季. 预应力混凝土梁桥系统失效树分析 [J]. 工程力学, 2009, 26 (1): 74-78, 91.
- HE Xiong-jun, LI Ji. Fault Tree Analysis of Prestressed Concrete Beam Bridges [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (1): 74-78, 91.
- [9] 陈记豪,赵顺波,姚继涛. 既有预应力空心板桥加宽设计的荷载横向分布计算方法 [J]. 工程力学, 2012, 29 (9): 265-271.
- CHEN Ji-hao, ZHAO Shun-bo, YAO Ji-tao. Method for Calculating Vehicle Load Transverse Distribution in Widening Design of Existing PPCHS Bridge [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (9): 265-271.
- [10] 张建仁,王磊. 既有钢筋混凝土桥梁构件承载力估算方法 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (2): 49-55.
- ZHANG Jian-ren, WANG Lei. Estimated Approach to Carrying Capacity of Existing Reinforced Concrete Bridge Member [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (2): 49-55.
- [11] 时一波,何少华,刘荣,等. 武汉鹦鹉洲长江大桥 1# 墩塔钢板桩围堰施工关键技术 [J]. 中外公路, 2014, 34 (1): 225-228.
- SHI Yi-bo, HE Shao-hua, LIU Rong, et al. Key Construction Technology of No. 1 Pier Column Steel Sheet Pile Cofferdam of Wuhan Yingwuzhou Yangtze River Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34 (1): 225-228.
- [12] 汪维安,李乔,赵灿晖,等. 大跨度体外预应力钢-混组合结构桥梁的动力特性 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (3): 59-65, 71.
- WANG Wei-an, LI Qiao, ZHAO Can-hui, et al. Dynamic Property of Long-span Steel-concrete Composite Bridge with External Tendons [J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2013, 30 (3): 59-65, 71.
- [13] 马亚丽,王东威,李广慧. 基于单板受力的预应力混凝土空心板桥承载力评定 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (6): 45-48, 55.
- MA Ya-li, WANG Dong-wei, LI Guang-hui. Evaluation of Load-bearing Capacity of Pre-stressed Concrete Hollow Slab Based on Single Slab Load Bearing [J]. Journal of Highway Transportation Research and Development, 2013, 30 (6): 45-48, 55.
- [14] 王春生,宋天谥,冯亚成,等. 高强钢-混凝土组合梁受力性能分析 [J]. 交通运输工程学报, 2008, 8 (2): 27-33.
- WANG Chun-sheng, SONG Tian-yi, FENG Ya-cheng, et al. Structural Behavior Analysis of High Strength Steel-concrete Composite Girders [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8 (2): 27-33.
- [15] 杨红,任回兴,贺茂生,等. 苏通大桥承台封底混凝土与钢护筒间握裹力的试验研究与应用 [J]. 公路, 2008 (10): 8-13.
- YANG Hong, REN Hui-xing, HE Mao-sheng, et al. Test Research and Application of Bond Stress Between Bottom Concrete of Cap and Steel Casings for Sutong Bridge [J]. Highway, 2008 (10): 8-13.
- [16] 李杰. 承载力不足承台的加固设计研究 [J]. 公路, 2010 (7): 42-45.
- LI Jie. Study on Reinforcement Design of Bearing Cap with Insufficient Bearing Capacity [J]. Highway, 2010 (7): 42-45.