

深水基础钢板桩围堰三维仿真验算分析

罗建华, 唐 娴

陕西铁路工程职业技术学院道桥工程系, 陕西渭南 714000

摘要 针对深水承台所处的地质、水文、土质参数等情况, 设计了密扣式拉森钢板桩 FSPIV 型围堰支护方法。根据钢板桩的实际受力情况, 采用 Midas-Civil 三维结构软件建立双排钢围堰空间整体模型, 并进行三维仿真验算分析。按钢板桩施工阶段不同, 选取 6 种工况进行加载计算, 对三种最不利工况引起的结构变形、钢板桩弯矩、支撑内力进行分析, 通过数值模拟与施工过程中的位移监控, 较好地预测了支护系统的动态变化趋势, 确保了支护结构的精确性和安全性, 达到满足工程施工需要、节省投资、缩短工期、提高社会效益的目的, 也为其他类似工程提供应用参考。

关键词 深水基础; 钢板桩围堰; 三维仿真; Midas-Civil 三维结构软件

中图分类号 U443.16

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.12.009

Analysis of Three-dimensional Simulation for Steel Sheet-pile Cofferdam in Deepwater Foundation

LUO Jianhua, TANG Xian

Department of Highway and Bridge Engineering Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi Province, China

Abstract Based on the deepwater geological and hydrological conditions, and the soil parameters, a steel sheet pile cofferdam FSP IV supporting method of the closed button Larsen type is developed. According to the actual stress conditions of the steel sheet pile, the Midas-Civil software is used to establish the three-dimensional structure of the double-wall steel cofferdam in space and the three-dimensional simulation is carried out for the overall model to check the analysis. According to different stages of steel sheet pile construction, 6 kinds of load conditions are selected in the calculation, and three most adverse conditions are analyzed with respect to structural deformation, the moments in steel sheet pile, and the brace forces, through numerical simulations and the monitoring of displacement in the construction process, to better predict the trends of the supporting structure and to meet the needs of construction, in view of saving investment, shortening the construction period, and improving social and economic benefits.

Keywords deepwater foundation; steel sheet-pile cofferdam; three-dimensional simulation; Midas-Civil software

0 引言

钢板桩围堰是深水基础施工中常用的一种非常重要的临时施工设施, 同时也是深水基础施工中最常用的一种围护形式。目前, 双排钢板桩型围堰结构由于其整体性强、施工手段方便成熟、监测手段较多, 在国内外桥梁和港口工程中被广泛采用^[1]。对于大型围堰, 需要对围堰的整体结构进行设计, 从而保证围堰的整体结构强度、刚度和稳定性, 满足施工要求。迄今为止, 国内外围绕双排钢板桩围堰体系研究取得了许多研究成果和经验^[2-4], 如计算时将钢板桩视为一端固定

的连续梁, 每道支撑为铰支座, 由力矩分配法计算^[5]; 按多跨连续梁用力矩分配法计算各支点的支反力及各点和跨中的弯矩并找出最大弯矩以验算钢板桩的截面^[6]。本文采用 Midas-Civil 三维结构软件建立空间整体模型, 对钢板桩施工过程中的 6 种工况进行分析计算, 计算精度高, 计算结果更接近于钢板桩围堰的实际受力情况。因篇幅有限, 只选取最不利的 3 种工况, 从结构的变形、钢板桩的弯矩、支撑内力 3 个方面进行分析研究, 并通过数值模拟与施工位移监控, 预测了支护系统的动态变化趋势, 达到了及时反馈进而完善支护体系的

收稿日期: 2011-01-10; 修回日期: 2011-04-01

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715003)

作者简介: 罗建华, 副教授, 研究方向为桥梁深基础设计与施工, 电子信箱: bridgeluo@163.com

目的,为进一步完善同类大桥基础施工中围堰设计提供良好的经验。

1 工程概况

某大桥起止里程为:K74+858.77—K84+155.55,桥全长 9296.78m,线路法线与水流方向夹角为 12°,汇水面积 $F=1099\text{km}^2$,流量 $Q_{1\%}=2102\text{km}^3/\text{s}$,水位 $H_{1\%}=17.85\text{m}$,流速 $V_{1\%}=3.0\text{m/s}$,施工水位 $H=14.2\text{m}$,经现场踏勘调查,测时水位 11.5m,涨水季节洪水水位为 13.0m。大桥 186#—192# 桥墩位于江中,设计采用钻孔桩基础,密扣式拉森钢板桩 FSPIV 型围堰支护,穿过地层依次为粉土、细圆砾土、泥质粉砂岩、砂岩、强风化含砾砂岩。

承台基坑支护结构的设计与地质情况、地下水位、土质参数及周围环境等都有密切的关系,主要包括围护结构、支撑体系、挖土方案、换撑措施、降水方案和地基加固等^[4]。钢板桩围堰具有强度高、接合紧密不易漏水、施工简便、速度快、可减少基坑土方开挖量、可多次重复使用等特点,广泛应用于水中承台的施工中^[5]。经对方案的安全性、经济性、实用性、实施性、工期等方面分析比较,决定选用钢板桩围堰方案。

2 钢板桩计算基础资料

(1) 钢板桩设计参数和施工条件

根据现场工程地质与水文评价报告,钢板桩围堰设计与施工条件见表 1。

表 1 钢板桩围堰设计与施工条件

Table 1 Design and construction conditions of steel sheet pile cofferdam

序号	项目	指标
1	钢板桩顶面标高	+12.5m
2	设计水位	+11.5m
3	承台顶标高	+5.192m
4	承台底标高	+2.692m
5	封底混凝土底标高	+0.692m
6	水流速度	1.5m/s
7	水重度	10kN/m ³
8	钢材重度	78.5kN/m ³
9	混凝土重度	24kN/m ³
10	混凝土与钢的黏结力	[f]=150kPa
11	封底混凝土厚度	2.5m
12	封底 C30 混凝土抗拉强度设计值	$f_t=1.43\text{MPa}$
13	Q235 钢材的允许应力	$[\sigma]=188.5\text{MPa}$
14	允许剪应力	$[\tau]=110.5\text{MPa}$
15	拉森钢板桩 FSPIV 型的允许应力	$[\sigma]=273\text{MPa}$
16	允许剪应力	$[\tau]=156\text{MPa}$

注:[]为允许值。

Note: [] means allowable value.

(2) 河床底土层性能指标

河床底从上至下土层的指标如下。细圆砾土(标高 2.4—7.0m),中密,III 级,容量 $\gamma_1=20.5\text{kN/m}^3$,内摩擦角 $\psi_1=30^\circ$,黏聚力 $c_1=2\text{kN/m}^2$,土层厚度 $h_1=4.6\text{m}$,弹性模量 $E_1=100\text{MPa}$;风化岩层(岩层顶面标高 2.4m), $\gamma_2=23\text{kN/m}^3$, $\psi_2=35^\circ$, $c_2=100\text{kN/m}^2$,弹性模量 $E_2=300\text{MPa}$ 。

(3) 土压力系数

根据库伦定律,土压力系数见表 2。

表 2 土压力系数

Table 2 Soil pressure coefficient

序号	类型	主动土压力系数	被动土压力系数
1	细圆砾土	$K_{a1}=0.33$	$K_{p1}=3.00$
2	风化岩层	$K_{a2}=0.27$	$K_{p2}=3.69$

(4) 水流压力

考虑河流水流压力,经计算,取 $F_w=1.5\text{kN/m}^2$,计算水位取标高+11.5m。

3 钢板桩设计和计算荷载

3.1 拉森钢板桩 FSPIV 型的技术参数

钢板桩选用主要考虑其支护深度、土质及周围水的情况^[6]。经综合考虑,采用 16m 长密扣式拉森钢板桩 FSPIV 型,其技术参数如下。

(1) 钢板桩:宽度 $B=400\text{mm}$,高度 $h=170\text{mm}$,厚度 $t=15.5\text{mm}$,截面积 $A=96.99\text{cm}^2$,重量 $W=76.1\text{kg/m}$,惯性矩 $I_x=4670\text{cm}^4$,截面模量 $W_x=362\text{cm}^3$ 。

(2) 每延米钢板桩技术参数:重量 $W=190\text{kg/m}$,惯性矩 $I_x=38600\text{cm}^4$,截面模量 $W_x=2270\text{cm}^3$,半截面面积矩 $S_x=1564\text{cm}^3$ 。

3.2 钢板桩支护基本结构尺寸

围堰尺寸为 1455cm×1198cm,围堰的支护方案为钢板桩+2 道内支撑,钢板桩采用密扣式拉森 FSPIV 型钢板,长度为 16m,钢围檩、角斜撑均采用 2I36a 的工字钢组合梁,横撑为 529 钢筒支撑梁,同时采用角撑和横撑确保围堰的整体刚度和整体稳定性,钢板桩支护基本结构见图 1。结合工程实际情况,参考其他类似工程^[7]确定计算模型,在模型最下方壁板单元节点上添加固定铰约束。

3.3 围堰施工阶段工况计算

(1) 计算参数

Q235 钢材的弹性模量 $E=2.06\times 10^5\text{MPa}$,容重 76.98kN/m^3 ,泊松比为 0.3;C30 混凝土的弹性模量 $E=3\times 10^4\text{MPa}$,容重为 25kN/m^3 ,泊松比为 0.2;细圆砾土(标高 2.4—7.0m),中密,III 级, $\gamma_1=20.5\text{kN/m}^3$, $\psi_1=30^\circ$, $c_1=2\text{kN/m}^2$, $h_1=4.6\text{m}$,弹性模量 $E_1=100\text{MPa}$,泊松比为 0.3;风化岩层(岩层顶面标高 2.4m), $\gamma_2=23\text{kN/m}^3$, $\psi_2=35^\circ$, $c_2=100\text{kN/m}^2$,弹性模量 $E_2=300\text{MPa}$,泊松比为 0.25。

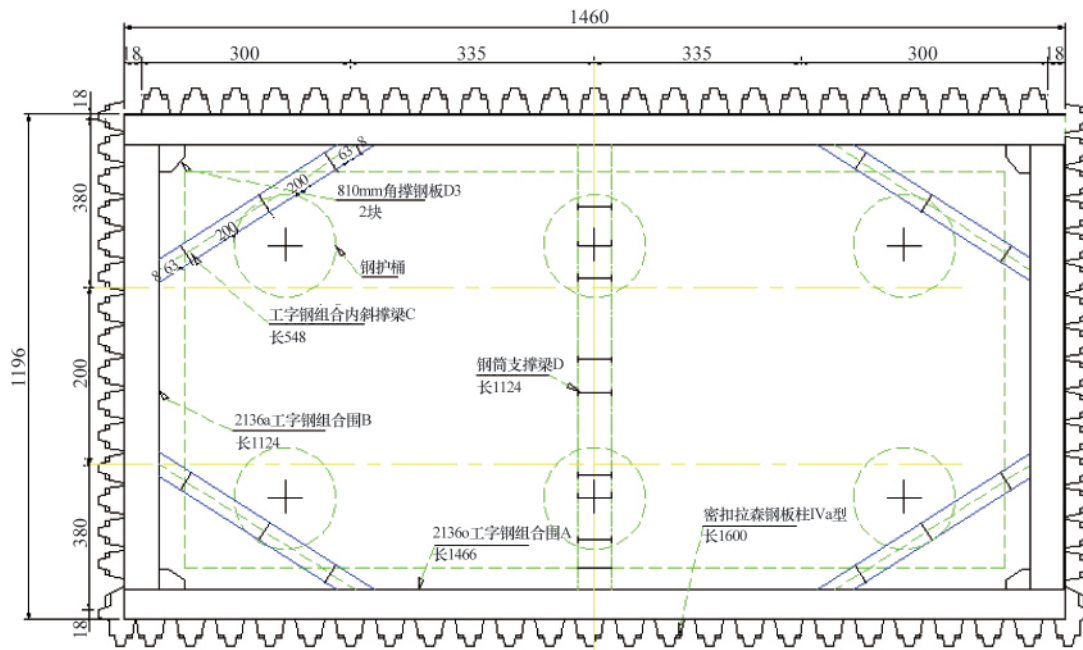


图1 钢板桩支护基本结构(单位:cm)

Fig. 1 Basic structure of steel sheet pile supporting (unit: cm)

(2) 计算荷载

采用 Midas-Civil 中的自重自动加载。重力加速度值为 9.806m/s^2 。

(3) 静水压力

计算得到模型最底端的静水压力为 150kPa ;流水压力数值相对于静水压力而言比较小,本工程中不予考虑;波浪力按 $P=15\text{kPa}$,浪高 3m 计算。

4 钢板桩建模思路和边界条件

(1) 建模思路

Midas 是专门针对岩土工程开发的有限元计算软件,该软件界面简洁,前处理功能强大^[5-6]。双排钢围堰采用 Midas-Civil 三维结构软件建立空间整体模型^[1],利用 Midas 有限元分析软件对钢围堰进行空间和平面分析^[7]。计算模型中,钢板桩按照每延米的惯性矩等效为矩形截面的钢板,用 4 节点板单元模拟,围堰檩、水平斜杆和横撑梁按杆单元模拟,而围堰内河床底的土层、封底混凝土采用实体单元进行模拟。钢板桩围堰的整体模型见图 2,围堰内支撑体系模型见图 3。

(2) 计算工况的确定

为了详细考虑围堰各施工阶段不同受力状态下,结构的刚度、强度以及稳定性是否满足施工要求,对围堰进行以下工况的分析。

工况 1:用抽水泵将围堰内积水抽到标高+10.5m 处,安装第二道内支撑(标高+11.0m)。

工况 2:当第一道内支撑安装调试完毕后,用抽水泵将围堰内积水抽到标高+7.0m 处,安装第二道内支撑(标高+

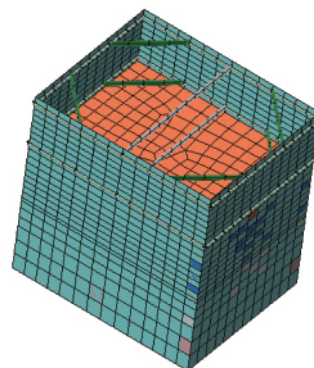


图2 钢板桩围堰的整体模型

Fig. 2 Whole model of steel sheet pile cofferdam

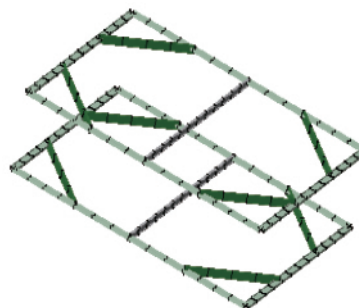


图3 围堰内支撑体系模型

Fig. 3 Cofferdam in-support system model

7.5m)。

工况 3:当第二道内支撑安装调试完毕后,让河水回流到

围堰内,当围堰内外水位持平后,开始带水开挖围堰内土方至+0.692m,并用 C35 混凝土封底。

工况 4:当封底混凝土强度达到设计要求后,用抽水泵将围堰内积水抽到封底混凝土顶面+2.692m 处。

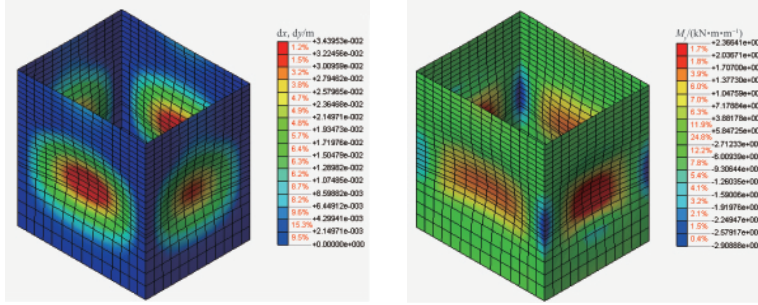
工况 5:当主墩分次浇筑至标高为+7.0m 处并拆模后,往围堰内回填砂至标高+7.0m,同时拆掉第二道内支撑(标高+7.5m)。

工况 6:当主墩分次浇筑至标高为+10.5m 处并拆模后,往

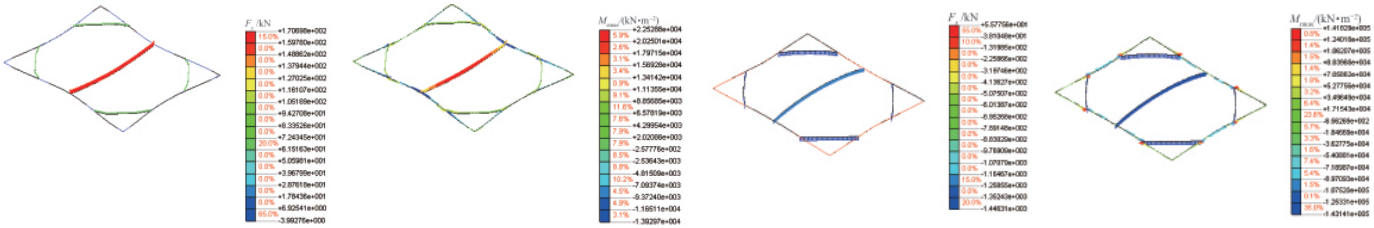
围堰内回填砂至标高+10m,同时拆掉第一道内支撑(标高+11.0m)。

5 结果分析

依据建立的双壁钢围堰空间整体模型,采用 Midas-Civil 三维结构软件对 6 种工况进行分析计算。选取最不利的 3 种工况(工况 4,5,6),工况 4,5,6 结构的变形、钢板桩的弯矩、支撑内力见图 4—图 6。

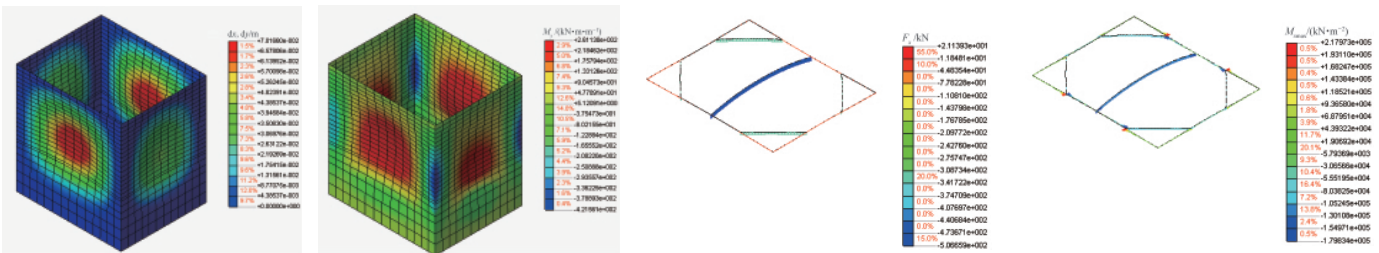


(a) 结构变形云图
(a) Nephogram of structural deformation
(b) 钢板桩弯矩云图
(b) Nephogram of steel sheet pile bending moment



(c) 第一道支撑体系受到的轴压力
(c) Shaft pressure of the first line supporting system
(d) 第一道支撑体系的应力云图
(d) Stress nephogram of the first line supporting system
(e) 第二道支撑体系受到的轴压力
(e) Shaft pressure of the second line supporting system
(f) 第二道支撑体系的应力云图
(f) Stress nephogram of the second line supporting system

图 4 工况 4 的结构变形情况
Fig. 4 Structural deformation under case 4



(a) 结构变形云图
(a) Nephogram of structural deformation
(b) 钢板桩弯矩云图
(b) Nephogram of steel sheet pile bending moment
(c) 第一道支撑体系受到的轴压力
(c) Shaft pressure of the first line supporting system
(d) 第一道支撑体系的应力云图
(d) Stress nephogram of the first line supporting system

图 5 工况 5 的结构变形情况
Fig. 5 Structural deformation under case 5

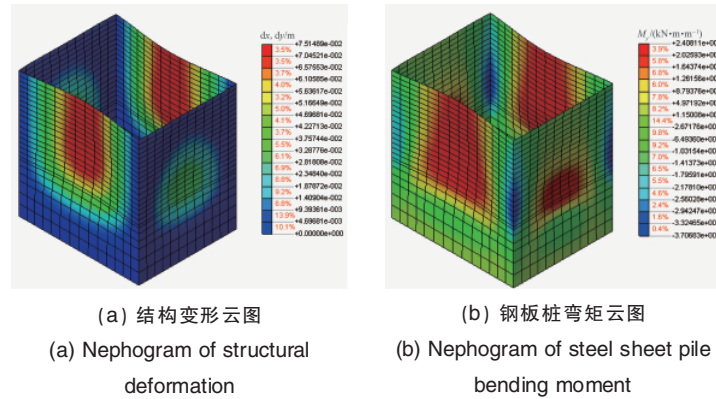


图 6 工况 6 的结构变形情况

Fig. 6 Structural deformation under case 6

按照设计的构件尺寸和钢材的力学性能,钢板桩每延米的极限弯矩为 $600\text{kN}\cdot\text{m}$,钢板桩弯矩最大值为 $422\text{kN}\cdot\text{m}$ (工况 5);支撑的极限轴力为 2876kN ,支撑的最大轴压力为 1446kN (工况 4),则钢板桩的抗弯安全系数为 $600/422=1.42$,钢支撑的安全系数为 $2876/1446=1.99$ 。

由计算云图可以看出,钢围檩只是在与支撑的节点处应力才出现局部增大的现象,其他部位钢围檩的应力基本在 $10\text{--}100\text{MPa}$ 之间,由于节点都有加强措施,故允许应力可以增大为原来的 1.2 倍,钢围檩允许应力为 188.5MPa ,钢围檩最大应力为 218MPa ,则 $218\text{MPa} < 1.2 \times 188.5 = 226\text{MPa}$ 。因此,钢围檩的应力满足要求。钢板桩变形符合要求。

设计方案与实测结果对比表明,钢板桩墙的刚度随钢板桩的变形而变化,当钢板桩的变形较小时,其刚度也较小,抗弯能力较差,当变形增加时,刚度和抗弯能力随之增加^[8]。

通过对钢板桩围堰施工过程的监控监测,钢板桩围堰的各种受力工况良好,钢板桩变形及内支撑轴力均符合设计要求,且具有较大的安全储备,围堰结构始终处于安全状态^[9]。

6 结论

利用 Midas-Civil 三维结构软件对钢板桩围堰进行三维仿真分析,解决了深水支护结构的设计和检算问题,取得了预期的效果,得到如下结论。

(1) 用 Midas-Civil 三维结构软件可以方便地计算出不同施工阶段的受力情况,确保在施工过程中不同工况下的钢板桩安全可靠。

(2) 结合钢板桩结构在深基坑支护中的应用,通过围堰结构的设计分析可知,采用 FSPⅣ型密扣式拉森钢板桩及内支撑的平面形式、层数,既可满足钢板桩的内力、变形及内支撑的内力、稳定性要求,又可通过采用角撑减少对撑数量的方式提供较大的施工工作面,方便施工,大大减少内支撑的工程量,在缩短工期的同时降低工程造价。

(3) 利用 Midas-Civil 三维结构软件对钢板桩支护进行模拟分析,通过数值模拟与施工过程中的位移监控,较好地

预测了支护系统的动态变化趋势,达到了及时反馈进而完善支护体系的目的。

参考文献 (References)

- [1] 崔春义, 黄建, 孙占琦, 等. 不同水位下钢板桩围堰工作性状有限元分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 187-192.
Cui Chunyi, Huang Jian, Sun Zhanqi, et al. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2010, 35(1): 187-192.
- [2] 韩跃国, 陈永勇, 皮海波. 永修大桥主墩钢板桩围堰设计与施工[J]. 铁道标准设计, 2008(5): 74-77.
Han Yueguo, Chen Yongyong, Pi Haibo. *Railway Standard Design*, 2008 (5): 74-77.
- [3] 薛政群, 顾卫东. 单层钢板桩深水围堰[J]. 公路, 2003(3): 81-85.
Xue Zhengqun, Gu Weidong. *Highway*, 2003(3): 81-85.
- [4] 卓全. 钢板桩支护设计与施工中应注意的若干问题 [J]. 建筑科学, 2002, 18(4): 42-44.
Zhuo Quan. *Building Sciences*, 2002, 18(4): 42-44.
- [5] 王阳平, 崔颖辉. 基于 Midas/Gts 的 FLAC3D 的建模方法[J]. 北方工业大学学报, 2010, 22(3): 78-81.
Wang Yangping, Cui Yinghui. *Journal of North China University of Technology*, 2010, 22(3): 78-81.
- [6] 卢洋, 傅德胜, 郑关胜. 基于 MIDAS 多层结构的构建与开发 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004, 28(1): 141-144.
Lu Yang, Fu Desheng, Zheng Guansheng. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition*, 2004, 28(1): 141-144.
- [7] 李慧君, 陈建峰. 斜交框架桥的有限元分析 [J]. 铁道工程学报, 2007, 24(2): 59-60.
Li Huijun, Chen Jianfeng. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007, 24(2): 59-60.
- [8] 戴汕, 杨明军. 单排钢板桩围堰施工工艺[J]. 水运工程, 2007(7): 81-84.
Dai Shan, Yang Mingjun. *Port & Waterway Engineering*, 2007(7): 81-84.
- [9] 骆冠勇, 曹洪, 潘泓, 等. 新光大桥桥墩钢板桩围堰的优化设计与监测 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 124-129.
Luo Guanyong, Cao Hong, Pan Hong, et al. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2006, 34(2): 124-129.

(责任编辑 代丽)