第 37 卷第 2 期 河北科技大学学报 Vol. 37, No. 2
2016 年 4 月 Journal of Hebei University of Science and Technology Apr. 2016

文章编号:1008-1542(2016)02-0198-07 doi:10.7535/hbkd.2016yx02014

考虑施工"路径"的钢板桩围堰内力分析

梁　栋[1,2],狄方殿[1],朱亚洲[1],刘　菁[1],段文博[1],陈红霞[1]

(1.河北工业大学土木与交通学院,天津　300401;2.河北省土木工程技术研究中心,天津　300401)

摘　要:针对钢板桩在安装内支撑的过程中其受力是连续的,即内支撑的安装总是发生在钢板桩所受内外水头压力差引起的累积变形之后,以某特大桥钢板桩围堰施工为例,利用有限元分析软件 ANSYS 建立了钢板桩围堰考虑施工"路径"的空间模型,并与实测结果进行了对比分析。计算结果表明:考虑施工"路径"效应的分析结果与实测值更为吻合。

关键词:地基基础工程;钢板桩围堰;"路径"效应;施工过程;有限元分析

中图分类号:TU337　　**文献标志码:**A

Internal force analysis of steel sheet pile cofferdam by considering the construction "path" effect

LIANG Dong[1,2], DI Fangdian[1], ZHU Yazhou[1], LIU Jing[1], DUAN Wenbo[1], CHEN Hongxia[1]

(1. College of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China)

Abstract: In the process of installing inner support, the force loaded on the steel sheet pile is continuous, that is, the installation of inner support always happens after the accumulative deformation caused by inside and outside pressure difference of the steel sheet pile cofferdam. Taking the steel sheet pile cofferdam construction of a specially long span bridge as example, the paper puts forwards a spatial model of steel sheet pile cofferdam considering the construction "path" based on ANSYS. The model calculation result and the actual measurement result are compared. The results show that the model based on considering the "path" effects has a more similar calculating result with the measured value.

Keywords: ground foundation engineering; the steel sheet pile cofferdam; "path" effect; the construction process; the finite element analysis

跨海、跨河桥梁的桥墩施工时需要在无水环境中进行,作为临时隔水的围堰为施工提供可能。钢板桩围堰以其经济、安装速度快和可重复使用等优点在跨河、海桥墩施工中得到广泛的运用[1-3]。为保证水下作业的安全,钢围堰的受力分析尤为重要。目前钢板桩围堰的计算主要采用等值梁法及平面有限元等简化方法,按不同工况单独计算[4-5]。

在实际工程中,钢板桩在安装内支撑的过程中其受力是连续的,即当前工况的应力和变形总是发生在上

收稿日期:2015-11-04;修回日期:2015-12-08;责任编辑:冯　民

作者简介:梁　栋(1976—),男,河北邢台人,教授,博士,主要从事桥梁结构基础理论方面的研究。

E-mail:13622114075@139.com

梁　栋,狄方殿,朱亚洲,等.考虑施工"路径"的钢板桩围堰内力分析[J].河北科技大学学报,2016,37(2):198-204.

LIANG Dong, DI Fangdian, ZHU Yazhou, et al. Internal force analysis of steel sheet pile cofferdam by considering the construction "path" effect[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2016,37(2):198-204.

一工况应力和变形的基础之上。一般的施工顺序是:钢板桩插打完成后,即开展抽水作业,至一定深度后自上而下的安装第 1 道内支撑,然后再抽水至下一道内支撑处,安装第 2 道内支撑,以此类推,直至全部内支撑安装完毕。内支撑的安装总是发生在钢板桩所受内外水头压力差引起的累积变形之后[6-7]。而常用的简化计算由于是按不同工况单独计算的,并未考虑每道内支撑相应位置处钢板桩已发生的累积变形。钢板桩围堰在施工过程中结构、荷载及边界条件是不断变化的,考虑这一变化过程即"路径"效应的计算结果与常用的一次性加载计算结果存在较大差异,与实际情况差距较大[8-11]。

本文以某特大桥钢板桩围堰施工工程为例,首次建立了考虑"路径"效应的空间有限元模型,并与现场监测结果进行对比,以验证考虑施工过程中"路径"效应后模型分析结果的准确性,为类似工程的钢板桩围堰模型分析提供建模参考。

1　工程实例

1.1　工程概况

某特大桥的桥墩位于河道中,施工环境极其复杂,其设计承台底标高为－10.259 m,河床标高为－3.0 m,承台尺寸为 30.5 m×18.95 m×5.0 m,墩高为 15 m。由于没有冲刷实测值,故在本计算中冲刷深度按 1.0 m 考虑;最高水位按最高潮水位＋3.8 m 考虑;水流速度按 2.0 m/s 考虑。根据地质勘察报告,该墩所处地质分层及土层参数取值如表 1 所示。

表 1　桥墩所处位置的土层参数及相应的主、被动土压力系数

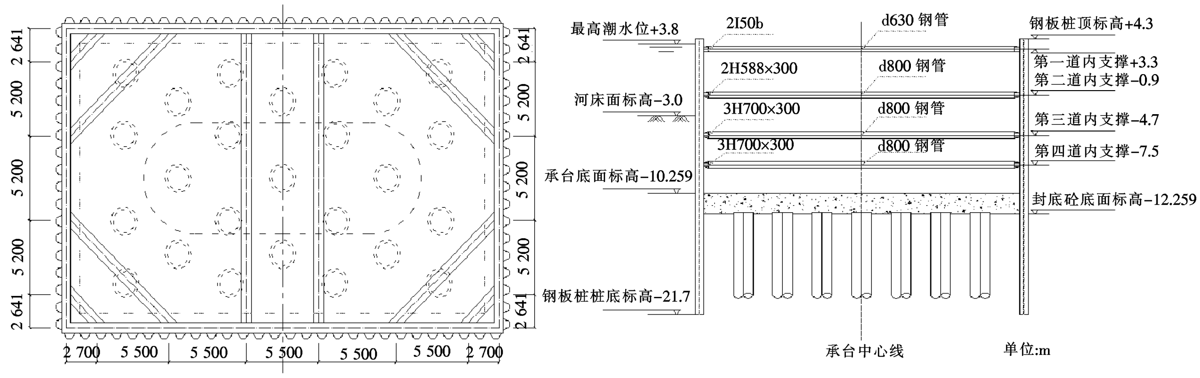
Tab.1　Soil layers' parameters and coefficient of active(passive) soil pressure

序号	土层名称	层顶标高/m	层底标高/m	容重/(kN·m^{-3})	浮容重/(kN·m^{-3})	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	K_a	K_p	$\sqrt{K_p}$
1	淤泥质黏土	－3.00	－8.70	18.7	8.7	7.6	0	0.766	1.142	1.069
2	粉砂	－8.70	－12.80	18.7	8.7	32.5	6	0.301	3.322	1.823
3	黏土	－12.80	－19.70	19.6	9.6	24.2	12.7	0.419	2.389	1.546
4	粉土	－19.70	－20.10	19.6	9.6	24.2	12.7	0.301	3.322	1.823
5	黏土	－20.10	－32.40	19.6	9.6	24.2	12.7	0.419	2.389	1.546

1.2　钢板桩围堰的施工监控

1.2.1　钢板桩围堰的布置

桩基施工完成后即进行钢板桩的施工。钢板桩采用拉森Ⅵ型,桩长 26 m,围堰尺寸为 20.6 m×32.6 m,共设置 4 道围檩及内支撑,设计承台底标高为－10.259 m,栈桥平台顶面标高为＋5.9 m,设计钢板桩顶面标高为＋4.3 m。桩底标高为－21.7 m。钢板桩围堰具体布置如图 1 所示。



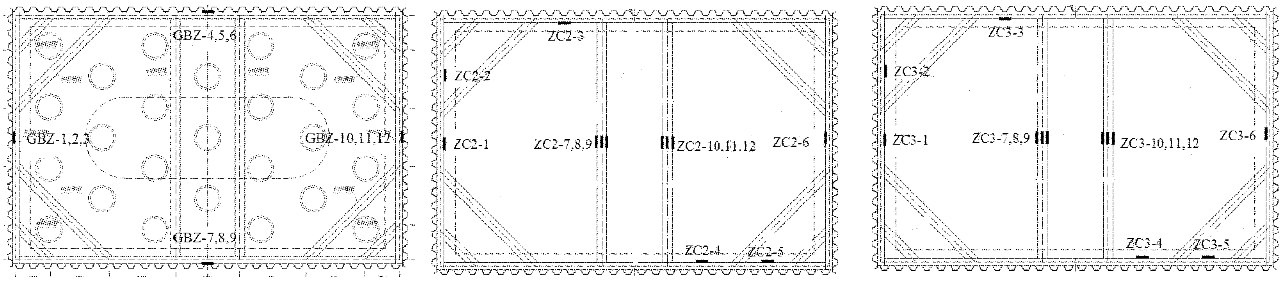
a) 平面布置图　　b) 立面布置图

图 1　钢板桩围堰的平面和立面布置图

Fig.1　Steel sheet pile cofferdam plan and rertical view

1.2.2 监控测点布置

为了监测钢板桩的应力变化情况，选取钢板桩围堰四边中点的4个钢板桩设置应变测点，每个钢板桩设置3个测点，分别位于相邻两道内支撑中间。为了监测内支撑的受力特点，拟在每层内支撑不利位置处安装12个传感器。第1层与第4层支撑测点布置同第2、第3层，围堰具体的应力监控测点见图2。



a) 钢板桩　b) 第2道内支撑　c) 第3道内支撑

图2 监控测点布置图

Fig.2 Monitoring point arrangement

1.2.3 钢板桩围堰的施工步骤工况

该墩在桩基施工完成后进行钢板桩施工，具体施工步骤工况如下。

工况1：安装第1道内支撑，围堰内抽水至－1.4 m；

工况2：安装第2道内支撑，围堰内继续抽水、清淤至－5.2 m处；

工况3：安装第3道内支撑，围堰内加水至围堰外水位，水下吸泥、清淤至－12.259 m；

工况4：浇注封底砼，围堰内抽水至－8.0 m处；

工况5：安装第4道内支撑，围堰内抽水至－10.259 m处。

其中最危险的是工况4。

2 考虑“路径”效应的有限元计算分析

根据土力学知识确定钢板桩的外荷载，按等值梁法确定钢板桩的计算长度，采用有限元软件ANSYS对钢板桩围堰建立整体空间有限元模型。

2.1 钢围堰所受荷载分析

对于1.2.3节的所有工况，按等值梁法确定钢板桩的计算长度，从主动土压力与被动土压力相等的反弯矩截面(即净土压力为零或弯矩为零)形成固定端约束。钢板桩主要受到流水压力、外侧静水压力和内侧静水压力。本工程钢板桩施工范围内土层为淤泥质土、黏土、粉砂，均为强透水性土层，土压力计算时采用朗肯土压力，计算时均考虑采用水土分算法[12-20](即土压力为按土的浮容重计算的有效土压力与土体间孔隙水的水压力之和)。依据工程经验，各土层主、被动土压力系数如表1所示。

下面以工况2为例介绍钢板桩所承受的流水压力、外侧静水压力和内侧静水压力。

该工况为安装第2道内支撑，围堰内继续抽水、清淤至－5.2 m处。此工况钢板桩受力如图3所示。

根据 $e_a+e_w=e_p+e'_w$，可得：

$$0.766\times8.7\times5.7+0.301\times8.7\times y+10\times(12.5+y)=$$
$$1.142\times8.7\times3.5+3.322\times8.7\times y+2\times6\times1.823+10\times(3.5+y),$$

解得 $y=2.71$ m，则等值梁计算长度为15.21 m。

在考虑动力压力后，钢板桩迎水面各控制标高处所受的压强分别为

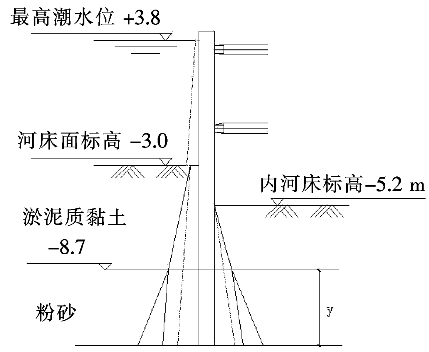
$p(+3.8)=0.0+F_w=4.64\ \text{kN/m}^2$；

$p(-3.0+)=\gamma_w h+F_w=10\times6.8+4.64=72.6\ \text{kN/m}^2$；

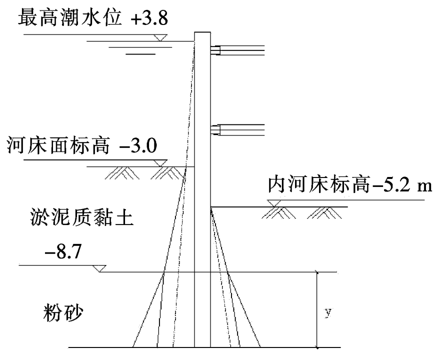
$p(-3.0-)=\gamma_w h=10\times6.8=68.0\ \text{kN/m}^2$；

$p(-5.2)=K_a\gamma h+\gamma_w h=0.766\times8.7\times2.2+10\times9.0=104.7\ \text{kN/m}^2$；

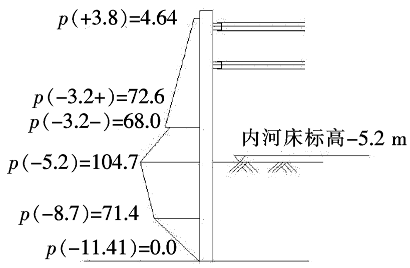
$p(-8.70)=71.35\ \text{kN/m}^2$；



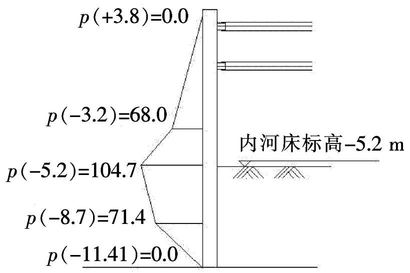
a) 工况 2 钢板桩迎水面受力示意图



b) 工况 2 钢板桩其他面受力示意图



c) 工况 2 钢板桩迎水面计算模型示意图



d) 工况 2 钢板桩其他面计算模型示意图

图 3　工况 2 钢板桩受力简图

Fig. 3　Forces on steel sheet pile under load case 2

$p(-11.41)=0.0\ \mathrm{kN/m^2}$。

除迎水面外，围堰其他面钢板桩所受压强为 $p(+3.8)=0.0\ \mathrm{kN/m^2}$；

$p(-3.0)=68.0\ \mathrm{kN/m^2}$；

$p(-5.2)=104.7\ \mathrm{kN/m^2}$；

$p(-8.70)=71.35\ \mathrm{kN/m^2}$；

$p(-11.41)=0.0\ \mathrm{kN/m^2}$。

其余各工况荷载可以按照同样的方法算出，不再赘述。

2.2　空间有限元模型的建立

钢板桩采用 SHELL63 壳单元模拟[21]。SHELL63 既具有弯曲能力又具有膜力，可以承受平面内荷载和法向荷载。本单元每个节点具有 6 个自由度：沿节点坐标系 X，Y，Z 方向的平动和沿节点坐标系 X，Y，Z 轴的转动。应力刚化和大变形能力已经考虑在其中。围檩及内支撑采用 beam188 梁单元模拟。beam188 单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构，该单元基于铁木辛哥梁结构理论，并考虑了剪切变形的影响。钢材的弹性模量为 210 GPa，泊松比取 0.3[22]。

从上至下各道围檩依次采用 2I50b，2H588×300，3H700×30，3H700×300 型钢。第 1 道内支撑采用 Φ630 mm×10 mm，其余内支撑均采用 Φ800 mm×10 mm 圆钢管，按照工程钢板桩围堰实际尺寸建立了有限元模型。整体钢板桩围堰的空间有限元模型见图 4。

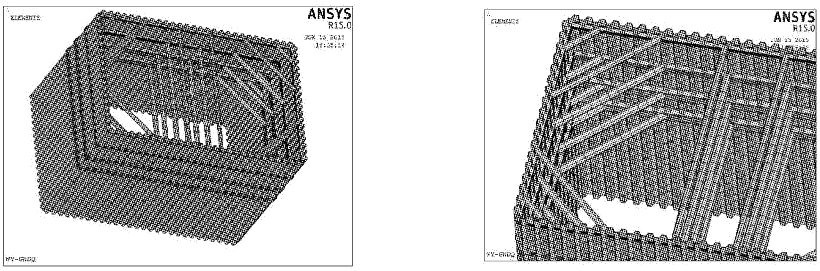
2.3　钢围堰所受荷载的施加

2.3.1　不考虑施工过程“路径”效应

不考虑施工过程“路径”效应，即模型一次成型，将按等值梁法所确定的荷载强度一次性施加在对应工况的有限元模型上。

2.3.2　考虑施工过程“路径”效应

钢板桩围堰的施工过程一般按施工顺序分不同工况进行模拟。内支撑是在前一工况钢板桩已发生变形的基础上安装的，与前一工况相比，当前工况的模型荷载、结构和边界条件都发生了变化。每一工况的约束条件通过等值梁法确定。考虑施工过程“路径”效应的主要计算步骤是以前一工况的计算结果作为当前工况



a) 整体模型 b) 模型局部

图4 钢板桩围堰有限元模型

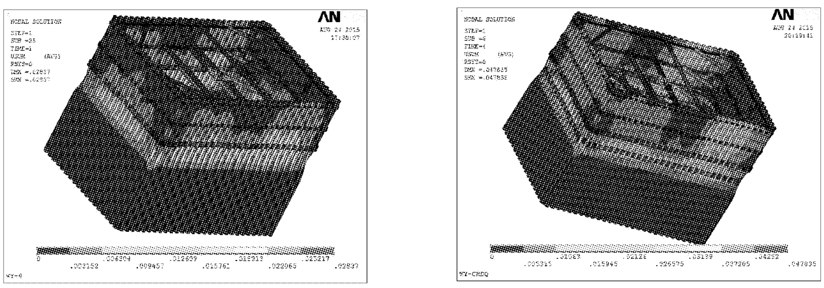
Fig. 4 Finite element model of steel sheet pile cofferdam

的初始条件，然后施加当前工况较前一工况的新增荷载或结构约束改变，进行求解，得到考虑“路径”效应的当前工况的模型计算结果；重复上述步骤，进而可以得到所有工况下考虑“路径”效应的计算结果。

对于模型结构和边界条件发生的变化，本文利用ANSYS软件生死单元功能来实现。具体步骤如下：首先建立完整的钢围堰模型(即包含所有内支撑)，在荷载步一中杀死多余单元，施加本阶段约束及荷载；前一荷载步的计算结果(应力、应变)作为当前荷载步的初始条件，进行荷载步二，激活相关单元，施加新增荷载，施加此工况下的结构约束，计算求解；依次进行后续荷载步的计算。

2.4 空间有限元模型的计算结果

以最危险的工况4为例，两种不同建模方式得到的变形结果如图5所示。



a) 不考虑“路径”效应 b) 考虑“路径”效应

图5 工况4下模型变形图

Fig. 5 Deformation pictures of the model for case 4

通过变形云图对比可以发现：是否考虑施工过程中“路径”效应，造成围堰模型变形结果有较大差异。考虑“路径”效应后，模型产生较大变形，模型上部位移较未考虑“路径”效应的偏大。即考虑“路径”效应后模型变形值及分布较未考虑“路径”效应的都有较大差异。

3 监控实测与计算结果对比

表2给出工况4下部分测点的模型与实测对比结果。

由表2可知，不考虑施工过程“路径”效应的模型分析结果较实测结果有较大的差异，最大绝对差值为15.46 MPa，相应的相对误差为76.57%。考虑施工过程“路径”效应的模型分析结果与实测结果比较，最大绝对差值为6.13 MPa，相应的相对误差为9.99%；最小绝对差值仅有0.49 MPa，相应的相对误差为1.21%；相对误差最大为21.70%。因此可以看出考虑“路径”效应后模型计算结果较为精确，理论分析值与实测值基本一致。

表 2　各测点应力实测值与计算值对比

Tab. 2　Comparative analysis between measured stress and calculated value with case 4

测点	实测应力/MPa	不考虑施工“路径”		考虑施工“路径”	
		理论应力/MPa	相对误差/%	理论应力/MPa	相对误差/%
GBZ-1	15.16	10.91	38.96	18.34	17.34
GBZ-2	19.45	15.28	27.29	24.84	21.70
GBZ-3	55.21	48.16	14.64	61.34	9.99
GBZ-4	12.28	8.55	43.63	15.67	21.63
GBZ-5	17.63	11.41	54.51	17.13	2.92
GBZ-6	52.94	47.14	12.30	53.91	1.80
ZC2-1	39.44	38.74	1.81	41.33	4.57
ZC2-2	31.85	22.95	38.78	30.02	6.10
ZC2-3	41.10	37.38	9.95	40.61	1.21
ZC2-8	35.65	20.19	76.57	33.52	6.35
ZC3-1	41.20	45.74	9.93	39.04	5.53
ZC3-2	21.65	28.23	23.31	18.64	16.15
ZC3-3	38.07	43.56	12.60	35.91	6.02
ZC3-8	28.21	37.61	24.99	31.44	10.27

4　结　论

通过优化钢板桩围堰的建模方法,得到更符合实际工程情况的有限元模型。对比考虑施工“路径”效应和不考虑施工“路径”效应的模型计算结果和实测结果,可得出以下结论:

1) 在实际的钢板桩围堰施工工程中,为方便内支撑的安装,先进行钢围堰内抽水作业,然后进行内支撑的安装,由此形成的压力差使得内支撑的安装总是发生在钢板桩的累积变形以后,传统的一次成型加载的模型分析与实际情况不符,分析结果可能存在较大误差。

2) 考虑到实际施工过程中钢围堰结构、约束和荷载是在不断变化的,应建立与施工“路径”相吻合的空间有限元模型。常用简化方法由于未考虑施工过程中的“路径”效应,计算所得最大应力和变形偏小,计算结果偏不安全。

3) 对比优化后模型与传统模型及实测结果,考虑施工过程“路径”效应的模型应力分析结果与实测结果基本一致,最大绝对差值为 6.13 MPa,相应的相对误差为 9.99%;最小绝对差值仅有 0.49 MPa,相应的相对误差为 1.21%;相对误差最大为 21.70%。

参考文献/References:

[1]　WISSMANN K. Sheet pile tensions in cellular structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2003,129(3):224-233.

[2]　CRAWFORD R J. A numerical modal for predicting the bending strength of Larssen steel sheet piles[J]. Journal of Coustructional Steel Research,2002,58(10):1361-1374.

[3]　STUART D M. Project-specific steel sheet piling applications[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction,2004,9(4):194-201.

[4]　江杰. 船坞双排钢板桩围堰施工过程的数值模拟分析[J]. 水运工程,2011(12):144-147.
JIANG Jie. Numerical simulation for construction stage of double-wall steel sheet pile cofferdam in dock[J]. Port&Waterway Engineering, 2011(12): 144-147.

[5]　张俊. 桥梁深水基础钢板桩围堰受力分析与应用[J]. 桥梁建设,2012,42(5):74-81.
ZHANG Jun. Force condition analysis and application of steel sheet pile cofferdam for brigde deepwater foundation[J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 74-81.

[6] 汤劲松,朱延翰.特殊地质条件下超长钢板桩插打施工技术[J].施工技术,2012,41(16):115-117.
TANG Jinsong, ZHU Yanhan. Piling construction of super-long steel sheet pile under special geological condition[J]. Construction Technology,2012, 41(16): 115-117.

[7] 汤劲松,熊保林. 深水基础大规模超长钢板桩围堰施工过程安全性分析[J]. 中国铁道科学,2013,34(3):32-39.
TANG Jinsong,XIONG Baolin. Analysis on safety during construction process for large-scale and super-long steel sheet pile cofferdam of deepwater foundation[J]. China Railway Science,2013,34(3):32-39.

[8] KORT D A. The transfer matrix method applied to steel sheet pile walls [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003(6): 453-472.

[9] BYFIELD M P, CRAWFORD R J. Oblique bending in U-shaped steel sheet piles: Proceedings of the institution of civil engineers [J]. Structures and Buildings,2003(3):255-261.

[10] 杜闯,丁红岩,张浦阳,等.钢板桩围堰有限元分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(sup2):159-164.
DU Chuang, DING Hongyan, ZHANG Puyang,et al. Analysis of steel sheet pile cofferdam using finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(sup2):159-164.

[11] 孙钧,侯学渊. 地下结构[M].北京:科学出版社,1987.

[12] 梁栋,魏龙,刘向东,等.单壁钢板桩围堰体系的力学性能研究[J].河北工业大学学报,2014,43(3):100-104.
LIANG Dong, WEI Long, LIU Xiangdong, et al. Study on mechanical properties of single wall steel sheet pile cofferdam system[J]. Journal of Hebei University of Technology,2014,43(3):100-104.

[13] 蔡忠泽.顺德水道特大桥深水钢板桩围堰设计与施工[J].铁道标准设计,2011(10):65-68.
CAI Zhongze. Design and construction of steel slab pile cofferdam in deep water for Shunde channel super lardge bridge[J]. Railway Standard Design,2011(10):65-68.

[14] 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检测[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. Optimal design and monitoring of steel sheet pile cofferdams of Xinguang bridge[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science),2006,34(2):124-129.

[15] 张俊.超长钢板桩围堰合理内支撑施工方案[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(2):19-24.
ZHANG Jun. Reasonable construction scheme of internal bracing for super-long steel sheet pile cofferdam[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science), 2012,25(2):19-24.

[16] 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. FEM analysis of working performance of a cofferdam system with steel sheet piles under different water heights[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition),2010,35(1):187-192.

[17] 王加利.钢板桩墙在不同施工工序下的变形及内力特性研究[D].广州:华南理工大学,2012.
WANG Jiali. Study on the Deformation and Internal Force Characteristics of Steel Sheet Pile Walls in Different Construction Orders [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2012.

[18] 潘泓,曹洪,尹一鸣. 广州猎德大桥钢板桩围堰的设计与监控[J].岩土力学与工程学报,2009,28(11):2242-2248.
PAN Hong, CAO Hong, YIN Yiming. Design and monitoring of steel sheet pile cofferdams of Liede bridge in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(11):2242-2248.

[19] 宋兴海,刘振京,张云, 等. 旋喷桩复合地基承载力的确定[J].河北科技大学学报,2012,33(1):74-78.
SONG Xinghai, LIU Zhenjing, ZHANG Yun, et al. Determination of bearing capacity of rotary jet grouting piled composite foundation [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2012, 33(1):74-78.

[20] 孙建超,叶朝良,刘尧军.京石客专声屏障桩基础受力特性数值分析[J].河北工业科技,2014,31(5):384-388.
SUN Jianchao, YE Chaoliang, LIU Yaojun. Numerical simulation analysis of the bearing and deforming behavior of sound barrier pile foundation along Beijing-Shijiazhuang[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, 31(5): 384-388.

[21] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

[22] JTJ 025—1986, 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].