

DOI: 10.11779/CJGE2014S2027

钢板桩围堰有限元分析

杜 闯^{1, 2, 3}, 丁红岩¹, 张浦阳¹, 李 静^{2, 3}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401; 3. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401)

摘 要: 钢板桩围堰水下施工具有危险性。为了确保钢板桩围堰施工安全, 以天津海河特大桥 R[#]38 墩基础的钢板桩围堰为工程实例, 采用有限元软件 ANSYS 建立钢板桩围堰空间有限元模型, 考虑了 4 种工况, 进行了有限元施工分析。计算结果表明: R[#]38 墩基础的钢板桩围堰的强度和变形满足要求, 可以按设计安全施工。本文可为同类钢板桩围堰的安全施工分析提供参考。

关键词: 钢板桩; 围堰; 有限元; 工况; 模型

中图分类号: TU337

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0159-06

作者简介: 杜 闯(1976-), 男, 讲师, 主要从事结构工程方面的研究工作。E-mail: gqm1979@sina.com。

Analysis of steel sheet pile cofferdam using finite element method

DU Chuang^{1, 2, 3}, DING Hong-yan¹, ZHANG Pu-yang¹, LI Jing^{2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China; 3. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The construction of steel sheet pile cofferdam is dangerous under water. In order to ensure the safety of construction of steel sheet pile cofferdam, based on the case of the steel sheet pile cofferdam of No. R38 pier of Haihe River Bridge in Tianjin, a three-dimensional model for steel sheet pile cofferdam is established by use of the general finite element software ANSYS. Meanwhile, the construction process is analyzed in consideration of four load cases. The results show that the structural design of the steel sheet pile cofferdam of No. R38 pier meets the strength and deformation requirements, and it can be constructed safely according to the design. This work may provide reference for construction of the similar cofferdam.

Key words: steel sheet pile; cofferdam; finite element; load case; model

0 引 言

钢板桩围堰支护工程对跨海、跨河桥梁的桥墩施工起着至关重要的作用, 它保证了桥墩水下作业的可行性^[1]。然而由于水中施工情况复杂, 钢板桩围堰设计通常需要进行计算。但从现有的文献来看, 主要的计算方法是等值梁法或平面有限元等简化方法^[2-3]。而实际围堰是空间受力体系, 并且由于水下桩土受力复杂, 河床面下钢板桩嵌固模拟往往与实际情况差异较大^[4]。因此, 就钢板桩围堰受力分析而言, 无论是计算方法还是计算模型均需要进一步研究。

本文结合等值梁法和三维有限元法, 采用半经验半理论的方法, 对天津海河特大桥 R[#]38 主墩钢板桩围堰施工工程进行模拟分析, 依据预测结果确定施工方案, 并采取相应措施, 确保钢板桩围堰支护工程施工安全。

结构采用 100 m+160 m+100 m 变截面预应力混凝土连续梁, 采用直腹板单箱单室截面, 主跨支点处梁高 9.5 m, 跨中梁高 3.5 m, 梁高按 1.8 次抛物线变化。主桥下部结构中墩基础为承台+群桩基础, 采用桩径 $\phi 180$ cm 的钻孔灌注桩, 桩长采用 88 m, 承台厚度 5 m, 承台下布置 5 排桩共 24 根。主桥中墩均采用 12.45 m \times 5.0 m 实体墩。

R[#]38 主墩承台位于海河河道内。R[#]38 墩基础施工采用钢板桩围堰法。钢板桩采用拉森 VI 型钢板桩, 材质 SY295, 单根长度为 18 m, 围堰平面尺寸为 21.6 m \times 28.8 m。围堰顶高程为 +2.5 m, 围堰底高程为 -15.5 m。围堰共设置 3 道内支撑, 3 道内支撑标高分别为 +2.0 m、-0.5 m、-4.3 m, 其中第三道内支撑为开挖过程中临时支撑, 在垫层浇筑并达到强度后拆除。

R[#]38 墩基础的钢板桩围堰布置如图 1, 2 所示。

1 工程概况

天津海河特大桥分为主桥及两侧引桥, 主桥上部

基金项目: 河北科技支撑计划项目 (12276124); 河北省教育厅青年基金项目 (QN20131177)

收稿日期: 2014-07-28

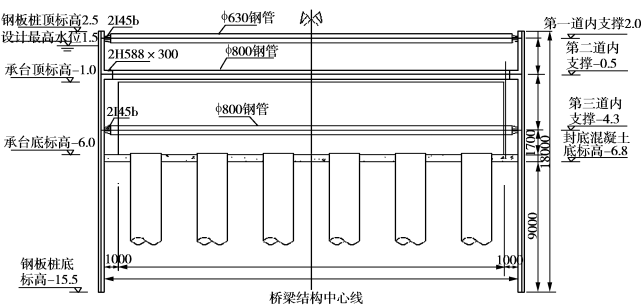


图 1 钢板桩围堰立面布置
Fig. 1 Elevation of steel sheet pile cofferdam

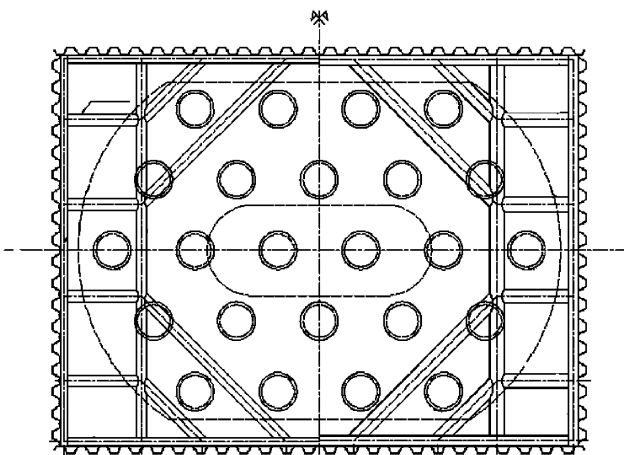


图 2 第一、二、三道内支撑平面布置
Fig. 2 Layout of 1st, 2nd and 3rd inner struts

2 基本参数

2.1 地质资料

根据地质勘察报告结合目前的实际河床情况及类似工程施工经验, R[#]38 墩地质分层及土层参数取值见表 1。

表 1 R[#]38 墩土层参数

Table 1 Soil parameters of No. R38 pier						
序号	土层名称	层顶 标高/m	层底 标高/m	重度 (kN·m ⁻³)	内摩 擦角/(°)	黏聚力 /kPa
1	淤泥质土	-0.32	-2.12	18.7	7.6	0
2	粉土	-2.12	-9.42	19.6	24.2	12.7
3	淤泥质土	-9.42	-10.82	18.7	8.4	2.3
4	粉质黏土	-10.82	-22.42	19.6	24.2	12.7

2.2 主、被动土压力计算

本工程钢板桩施工范围内土层为淤泥质土、粉质黏土及粉土, 均为强透水性土层, 土压力计算时均考虑采用水土分算法 (即土压力为按土的浮重度计算的有效土压力与土体间孔隙水的水压力之和)。

土压力计算采用朗肯土压力公式, 但由于朗肯土压力公式没有考虑墙体与土体之间的摩擦力, 使得主

动土压力偏大, 被动土压力偏小, 在计算时, 须将被动土压力加以提高修正。为安全起见, 对主动土压力则不予折减。各土层主、被动土压力系数及被动土修正系数如表 2。

表 2 土层主、被动土压力系数及被动土修正系数

Table 2 Coefficient of active (passive) soil pressure and correction coefficient of passive soils

土层名称	K_a	$\sqrt{K_a}$	K_p	$\sqrt{K_p}$	被动土修正系数 k
淤泥质土	0.766	0.875	1.142	1.069	1.00
粉土	0.419	0.647	2.389	1.546	1.68
淤泥质土	0.745	0.863	1.342	1.158	1.00
粉质黏土	0.419	0.647	2.389	1.546	1.68

2.3 施工步骤及工况

围堰的主要施工顺序是先插打钢板桩并合拢, 再进行围堰内抽水作业, 从上至下依次安装内支撑, 同时进行钢板桩堵漏, 再开挖河床以下基坑。具体 R[#]38 墩基础的钢板桩围堰施工步骤如下。①桩基施工结束后在钻孔平台定位桩上焊接牛腿, 安装钢板桩插打外导向; ②依次插打钢板桩至合拢; ③在 +2.0 m 处安装第一道内支撑; ④围堰内开挖至 -1.5 m, 在 -0.5 m 处安装第二道内支撑; ⑤围堰内开挖至 -4.8 m, 在 -4.3 m 处安装第三道内支撑; ⑥围堰内开挖至 -6.8 m, 浇筑 50 cm, C25 混凝土垫层; ⑦待垫层砼达到强度后拆除第三道内支撑, 破除桩头进行承台施工; ⑧承台施工后在其顶面与钢板桩间回填砂土混合物, 并在上部浇注 50 cm 厚砼冠梁作为临时支撑; ⑨拆除第二道内支撑; ⑩围堰内注水至 +1.0 m, 拆除第一道内支撑; ⑪最后依次拔出钢板桩。

按照施工工序, R[#]38 墩基础的钢板桩围堰分为以下 4 种计算工况: ①工况 1: 第一道内支撑安装后, 围堰开挖至 -1.5 m; ②工况 2: 第二道内支撑安装后, 围堰开挖至 -4.8 m; ③工况 3: 第三道内支撑安装后, 围堰开挖至 -6.8 m; ④工况 4: 封底砼达到强度后拆除第三道内支撑, 围堰内抽光水。

钢板桩及内支撑计算根据上述施工工况, 计算各支撑在各工况可能出现的最大反力和钢板桩最大内力, 以考察是否满足施工安全。

3 有限元模型

采用 ANSYS 有限元软件对 R[#]38 墩基础的钢板桩围堰进行受力分析。

3.1 单元选择

钢板桩采用 Shell63 壳单元模拟。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。该单元每个节点具有 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^[5]。

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。beam188 是三维线性 (2 节点) 或者二次梁单元。

3.2 材料本构关系

围堰施工采用的材料均为钢材, 根据《公路工程桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025—86)^[6], 钢材弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。钢板桩和钢支撑材料的本构关系采用双线性 Biso 弹塑性模型。

3.3 有限元模型

R[#]38 墩基础的钢板桩围堰布置如图 1, 2 所示。钢板桩顶标高+2.5 m, 底标高-15.5 m, 桩长 18 m。共设置 3 道内支撑, 围堰采用 2I45b、2H588×300 型钢, 内支撑分别采用 $\Phi 630$ mm×8 mm、 $\Phi 800$ mm×8 mm 圆钢管。根据钢板桩及内支撑系统的实际状况, 结构对称, 受力对称, 故为了简化计算, 取 1/4 模型进行有限元计算。有限元模型如图 3, 4 所示。

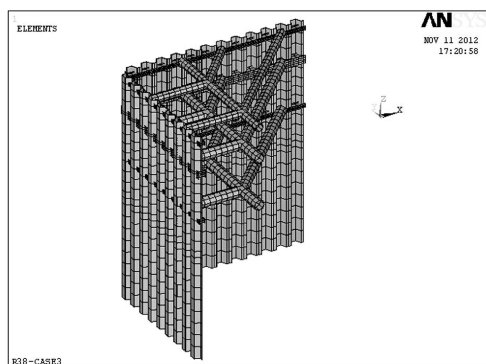


图 3 钢板桩围堰有限元模型

Fig. 3 Finite element model of steel sheet pile cofferdam

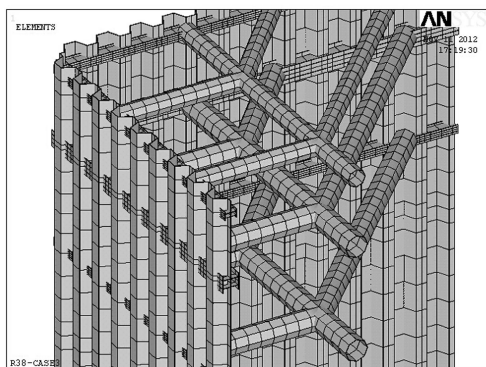


图 4 钢板桩围堰有限元局部详图

Fig. 4 Finite element local detail of steel sheet pile cofferdam

4 有限元计算分析

在 R[#]38 墩基础钢板桩围堰的计算过程中, 一共考虑了 4 种荷载工况。由于钢板桩围堰的入土深度较大, 土体对入土部分的围堰起到了嵌固作用, 此时围堰上端受到内撑的支撑作用, 下端受到土体的嵌固支撑作用。但下端的土体对围堰钢板桩的嵌固程度如何? 沿着钢板桩土体和钢板桩如何作用, 由于处于水下, 情况复杂, 很难精确确定。有文献模拟钢板桩下端嵌固采用弹簧单元^[7], 也有文献采用接触单元模拟钢板桩和土石之间的嵌固^[8]。笔者认为对于水下钢板桩, 很难准确测定其弹簧刚度参数和接触特性参数。边界条件的准确确定对于计算结果有着直接的影响。考虑到常规的等值梁法虽然简单, 但源于工程经验, 比较可靠, 但其简单地将空间的围堰结构简化为单根梁, 显然过于简化。因此, 本文采用等值梁法计算钢板桩围堰约束条件, 采用有限元建立空间模型进行计算。

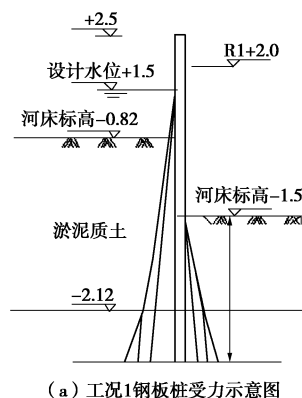
在计算时, 各工况下钢板桩计算长度按等值梁法确定, 从主动土压力与被动土压力相等的反弯矩截面 (即净土压力为零或弯矩为零) 形成固定端约束。

在工况 1 作用下, R[#]38 墩基础的钢板桩围堰计算过程如下。

4.1 工况 1 计算模型

第一道内支撑安装后, 围堰开挖至-1.5 m。围堰外荷载主要是主动土压力、被动土压力、静水压力和流水压力。流水压力与静水压力相比, 影响较小, 计算时忽略不计^[9-10]。此工况钢板桩受力如图 5 (a) 所示。根据工况 1 下围堰内外水压平衡, 由 $e_a + e_w = e_p + e'_w$ 可得: $0.766 \times 8.7 \times 1.8 + 0.419 \times 9.6 \times (y - 0.62) + 10 \times (3 + y) = 1.142 \times 1 \times 8.7 \times 0.62 + 1.68 \times 2.389 \times 9.6 \times (y - 0.62) + 10y$, 解得 $y = 1.66$ m。

内外压平衡的位置为标高-3.16 m, 则: $P_a(+1.5 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$, $P_a(-0.32 \text{ m}) = K_a \gamma' h + \gamma_w h = 10 \times 1.82 = 18.2 \text{ kN/m}^2$, $P_a(-0.5 \text{ m}) = K_a \gamma' h + \gamma_w h = 0.766 \times 8.7 \times 1.18 + 10 \times 3 = 37.86 \text{ kN/m}^2$, $P_a(-3.16 \text{ m}) = 0 \text{ kN/m}^2$ 。



(a) 工况1钢板桩受力示意图

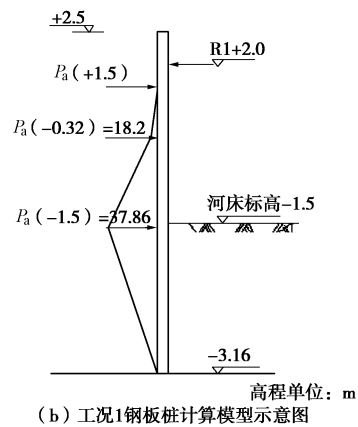


图 5 工况 1 钢板桩受力简图

Fig. 5 Forces on steel sheet pile under load case No.1

钢板桩计算模型按等值梁法确定如图 5 (b) 所示。施加压力和约束条件, 工况 1 下的 R#38 墩基础的钢板桩围堰有限元模型如图 6 所示。

4.2 工况 1 计算结果

经过有限元的计算, 得到工况 1 计算结果。钢板桩和支撑的变形及应力云图如图 7 所示。由图 7 可见, 钢板桩的最大变形量为 2.74 mm。钢板桩的最大 Mises 应力 33.46 MPa。支撑的最大变形量为 0.000887 mm。支撑的最大 Mises 应力为 13.78 MPa。

4.3 其他工况

工况 2、工况 3 和工况 4 计算过程类同工况 1, 不

再赘述。仅给出工况 3 有限元计算结果如图 8 所示。从计算云图, 可以清楚的了解各个工况下钢板桩和内支撑的受力及变形情况。各工况计算的钢板桩和内支撑的应力及变形计算结果, 汇总如表 3 所示。

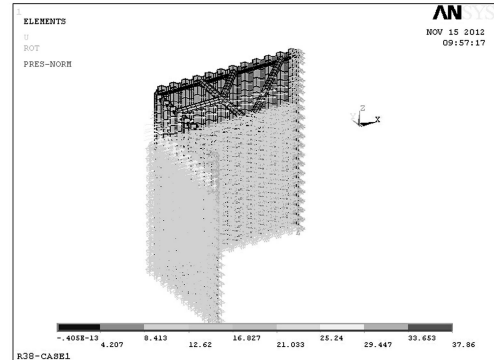


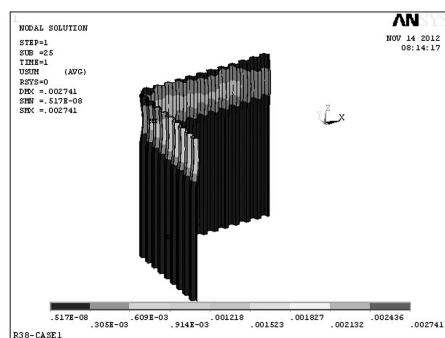
图 6 工况 1 有限元模型

Fig. 6 Finite element model under load case No. 1

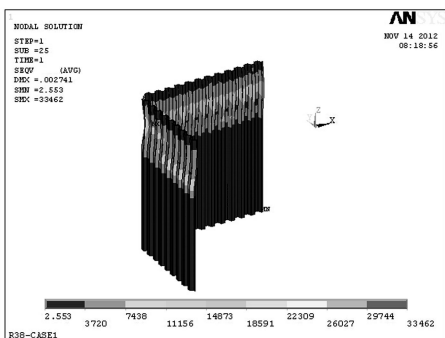
表 3 钢板桩围堰计算结果

Table 3 Calculated results of steel sheet pile cofferdam

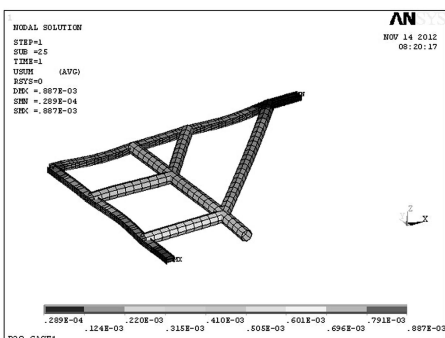
计算 工况	钢板桩 应力/MPa	钢板桩最 大位移/mm	支撑应 力/MPa	支撑最大 位移/mm
工况 1	33.46	2.74	13.78	0.000887
工况 2	141.46	13.83	61.84	3.91
工况 3	96.77	6.23	109.60	5.20
工况 4	120.23	10.69	50.40	3.12



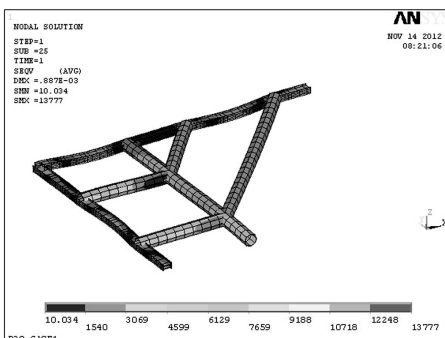
(a) 钢板桩的变形



(b) 钢板桩的应力



(c) 内支撑的变形



(d) 内支撑的应力

图 7 工况 1 计算结果

Fig. 7 Calculated results under load case No. 1

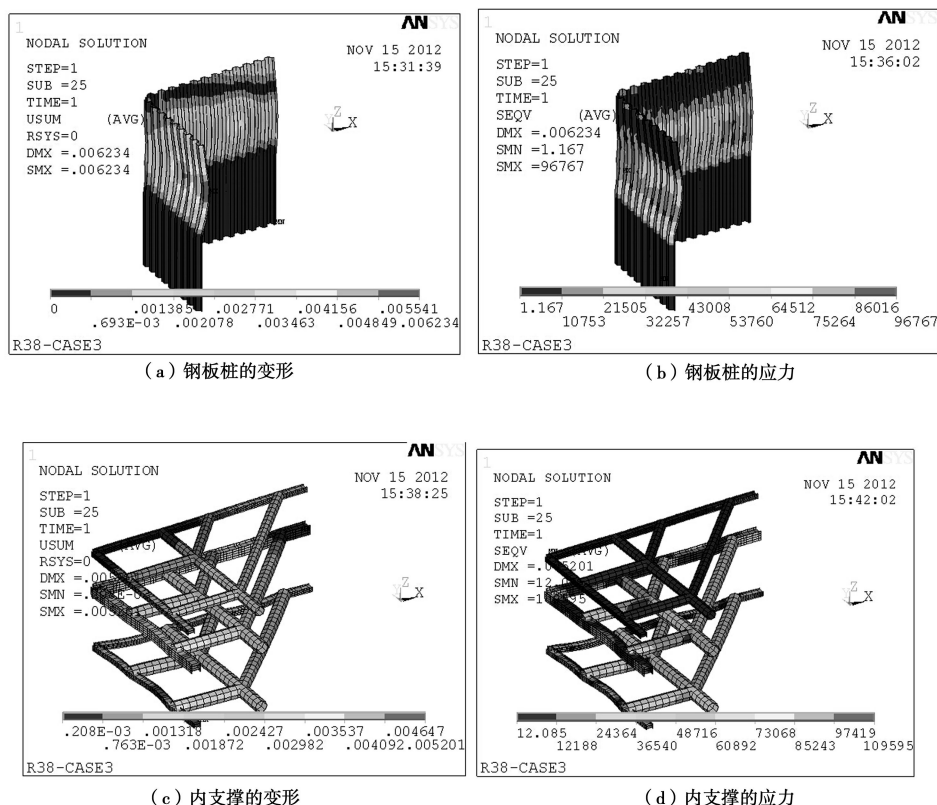


图 8 工况 3 计算结果

Fig. 8 Calculated results under load case No. 3

通过有限元计算分析 R[#]38 墩基础的钢板桩围堰的 4 种工况, 可以看出以下结果: ①对于钢板桩, 最薄弱、最危险的受力点在钢板桩的角部。因此, 重点加强围堰角部位置连接强度, 规避围堰可能产生的破坏。②对于内支撑, 下面的支撑受力大于上面的支撑, 且中间支撑比边支撑受力大。因此下面支撑可选择截面较大的型钢, 防止危险出现。③围堰的应力和位移验证: 工况四钢板桩的组合应力最大, 为 120.23 MPa; 工况三内支撑组合应力最大, 为 109.6 MPa。钢板桩材质为 Q295, 荷载分项系数取 1.35, 则许用应力 $[\sigma] = 218.52 \text{ MPa}$, $120.23 \text{ MPa} < 218.52 \text{ MPa}$ 。内支撑材质为型钢 Q235, 荷载分项系数取 1.35, 则许用应力 $[\sigma] = 174.07 \text{ MPa}$, $109.6 \text{ MPa} < 174.07 \text{ MPa}$ 。由计算可知, 围堰及内支撑强度均满足设计要求及规范要求。工况二钢板桩的位移最大, 为 13.83 mm; 工况三内撑位移最大, 为 5.20 mm。钢板桩的允许挠度 $[f] = L/400 = 18000/400 = 45 \text{ mm}$, $13.83 \text{ mm} < 45 \text{ mm}$ 。可见, 钢板桩刚度满足设计规范要求。

5 结 论

通过有限元数值分析, 针对天津海河特大桥 R[#]38 墩基础的钢板桩围堰的强度和变形进行了分析, 得到以下 2 点结论。

(1) 采用传统的等值梁法计算钢板桩的受力, 建立了合理的钢板桩围堰空间三维有限元模型。

(2) 根据钢板桩围堰施工顺序, 考虑了四种不同工况, 分别计算了钢板桩和内支撑系统的受力变形情况, 得出直观的受力变形图。计算结果表明: 对于钢板桩, 最薄弱、最危险的受力部位在钢板桩的角部, 应加强角部钢板桩的连接。应力和位移计算表明, 钢板桩围堰强度和刚度均满足规范要求。因此可以认为该钢板桩围堰设计的安全性是有保障的。

参考文献:

- [1] 李昌荣. 某桥梁钢板桩围堰计算[J]. 低温建筑技术, 2011(8): 92 - 94. (LI Chang-rong. Calculation for one steel pile cofferdam[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011(8): 92 - 94. (in Chinese))
- [2] 阮泽莲, 吴 炜. 厦漳跨海大桥 II 标主墩钢板桩围堰设计[J]. 水运工程, 2011(8): 24 - 27. (RUAN Ze-lian, WU Wei. Design of steel sheet pile cofferdam for the main pier of Xiazhang sea-crossing bridge Mark II [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(8): 24 - 27. (in Chinese))
- [3] 江 杰. 船坞双排钢板桩围堰施工工程的数值模拟分析[J]. 水运工程, 2011(12): 144 - 147. (JING Jie. Numerical simulation for construction stage of double-wall steel sheet

- pile cofferdam in dock[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(12): 144 - 147. (in Chinese))
- [4] 潘泓, 曹洪, 尹一鸣. 广州猎德大桥钢板桩围堰的设计与监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(11): 2242 - 2248. (PAN Hong, CAO Hong, YIN Yi-ming. 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. (in Chinese))
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (WANG Xin-min. Numerical analysis of ANSYS engineering structures[M]. Beijing: China Communication Press, 2007. (in Chinese))
- [6] JTJ 025—86 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S]. 1988. (JTJ 025—86 Code for design of steel structure and timber structure highway bridges and culverts[S]. 1988. (in Chinese))
- [7] 张骏. 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 bridge deepwater foundation[J]. Bridge Construction, 2012, **42**(5): 74 - 81. (in Chinese))
- [8] 催春义, 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, 2010, **35**(1): 187 - 192. (CUI Chun-yi, HUANG Jian, SUN Zhan-qi, et al. FEM analysis of working performance of a cofferdam system with steel sheet piles under different water heights[J]. Journal of Guangxi University, 2010, **35**(1): 187 - 192. (in Chinese))
- [9] 曾庆敦, 姚双龙. 钢板桩围堰及支撑系统的稳定安全性分析[J]. 中外公路, 2009, **29**(6): 174 - 177. (ZENG Qing-dun, YAO Shuang-long. Analysis of stability of steel sheet pile cofferdam and support system[J]. China Foreign Highway, 2009, **29**(6): 174 - 177. (in Chinese))
- [10] 武向东, 吴中鑫, 姚振海. 松花江大桥抢险维修加固钢板桩围堰设计[J]. 公路, 2013(1): 153 - 157. (WU Xiang-dong, WU Zhong-xin, YAO Zhen-hai. Design of steel sheet pile cofferdam in Songhua river bridge repair and reinforcement[J]. Highway, 2013(1): 153 - 157. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)