



管板组合结构拉森型锁扣咬合数值模拟研究*

皇鹏飞^{1,2}, 唐明刚³, 胡兴昊^{1,2}, 姜学谦^{1,2}, 兰金平⁴

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510288;

3. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510290; 4. 中交四航局第三工程有限公司, 广东 湛江 524022)

摘要: 针对管板组合结构振打施工过程中的拉森型锁扣容易被撕裂的问题, 依托管板组合桩结构形式的尼日利亚莱基深水港码头工程, 采用有限元方法对管板组合桩拉森型锁扣拉伸、扭角、倾斜3种咬合情况进行受力仿真研究。结果表明: 管板锁扣咬合精度越低, 锁扣咬合应力越大, 对拉森型锁扣产生越不利的影响, 并提出管板锁扣在不同咬合状态下偏移、扭角、垂直度等精度参考限值。最后建议加强对管-板桩沉桩工艺的研究, 提高沉桩精度控制与监测, 降低锁扣不利的咬合应力, 减小锁扣撕裂风险。精度参考限值可为管板组合结构施工技术标准提供依据, 以及为提高管板组合结构施工质量提供重要参考。

关键词: 管板组合结构; 数值模拟; 拉森型锁扣; 咬合应力

中图分类号: TU473; U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0182-06

Numerical simulation of Larsen type latch occlusion for steel pipe-sheet pile combined structure

HUANG Pengfei^{1,2}, TANG Minggang³, HU Xinghao^{1,2}, LOU Xueqian^{1,2}, LAN Jinping⁴

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510288, China;

3. CCCC Fourth Navigation Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

4. The Third Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Zhanjiang 524022, China)

Abstract: In view of the problem that Larsen type latch is easy to be torn during the driving construction of the steel pipe-sheet pile combined structure, based on the combined structure of the steel pipe-sheet pile of Lekki Deepwater Port Terminal project in Nigeria, the finite element method is used to numerically simulate and analyze the three bite conditions of Larsen type latch tension, torsion angle and inclination conditions. The research results show that the lower the occlusion accuracy of Larsen type latch, the greater the occlusion stress of the latch, and the more adverse influence on the Larsen type latch. Reference limits for the accuracy of the steel pipe-sheet pile combined structure are proposed under different occlusion states, such as tension, torsion angle and verticality conditions. Finally, it is suggested to strengthen the research on the pipe-sheet pile sinking process, improve the accuracy control and monitoring of pile sinking, reduce the unfavorable occlusion stress of the lock occlusion, and minimize the risk of lock tearing. The reference limits of the accuracy can provide a basis for the construction technical standard of the steel pipe-sheet pile combined structure, and an important reference for improving the construction quality of the steel pipe-sheet pile combined structure.

Keywords: steel pipe-sheet pile combined structure; numerical simulation; Larsen type latch; stress of occlusion

随着码头泊位向大型化与深水化发展需求剧增, 传统的板桩结构码头形式在强度、刚度及稳定性方面具有一定局限性, 已经不满足大型深水

泊位的需求^[1-2]。管板组合桩结构由钢管桩和钢板桩通过锁扣组合连接而成, 如图1所示管板组合结构(美标AZ 26-700型板桩/C9锁扣), 结构具有

收稿日期: 2023-12-20

*基金项目: 广州市科技计划项目(201906010023)

作者简介: 皇鹏飞(1991—), 男, 硕士, 从事桩基检测和结构有限元计算等研究工作。

强度高、协调性强、地质适应能力强、防水性好等特点^[3], 可承担前墙后方的水平载荷和垂直荷载, 满足深水码头对前墙竖向承载力以及水平抗弯能力的需求。目前管板桩结构逐渐应用在国内外大型深水化码头中, 如土耳其的 YARIMCA15 万吨级集装箱码头、德国汉堡港 15 万吨级 No. 7 集装箱泊位^[4-5]、深圳港妈湾港海星码头改造项目、广州南沙港项目^[6-7]。众多科研工作者针对此类码头受力方面进行了研究。汤子扬等^[8]运用有限元软件

Plaxis 对板桩结构的受力特性进行非线性有限元分析, 并与竖向弹性地基梁法的计算结果进行对比。然而, 管板组合结构对施工精度要求较高, 钢管桩施工精度将对钢板桩的受力和锁扣咬合质量均产生较大影响。目前此方面的研究较少, 因此采用有限元方法对管板组合桩沉桩过程的拉森型锁扣拉伸、扭角、倾斜 3 种咬合情况进行仿真分析, 研究锁扣咬合应力变化规律, 提出施工精度限值, 旨在为管板组合桩施工提供借鉴。

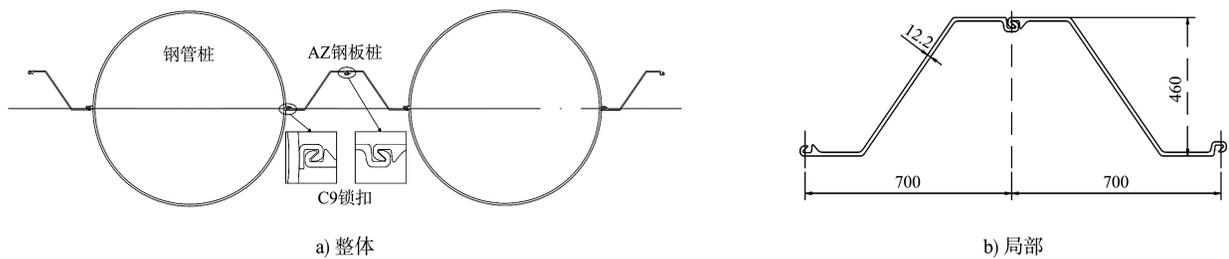


图 1 管板组合桩结构 (单位: mm)

1 管板组合结构锁扣咬合的数值模型

1.1 计算模型

利用 Midas FEA 有限元分析软件建立管板组合桩有限元模型, 根据码头 1 号泊位前墙中较典型管板组合结构的足尺参数(表 1)建立有限元模型, 管板组合桩有限元模型见图 2, 拉森型锁扣咬

合见图 3。钢材参数质量密度 7.85 t/m^3 , 弹性模量 E 为 210 GPa , 泊松比为 0.3 。因锁扣形状不规则, 为模拟计算不同情况下锁扣受力状态, 采用六面体应力单元, 对锁扣单元进行精细化网格划分, 见图 3。在计算模型中设置锁扣与钢管桩进行刚接, 锁扣与锁扣之间的接触为一般接触。

表 1 管板组合桩结构参数

名称	桩长/ m	壁(板)厚/ mm	设计桩顶 高程/m	设计桩底 高程/m	泥面 高程/m	钢材等级 标准	屈服/抗拉 强度/MPa	屈强比
钢管桩 $D=2\ 300 \text{ mm}$	41.00	23.00	2.60	-38.40	3.00	Grade X-70(API)	515/643	0.80
钢板桩 AZ26-700	21.00	12.00	± 0.00	-21.00	3.00	S355GP(CEN)	355/480	0.74
拉森型锁扣	-	-	-	-	-	Grade65(ASTMA572)	460/550	0.84

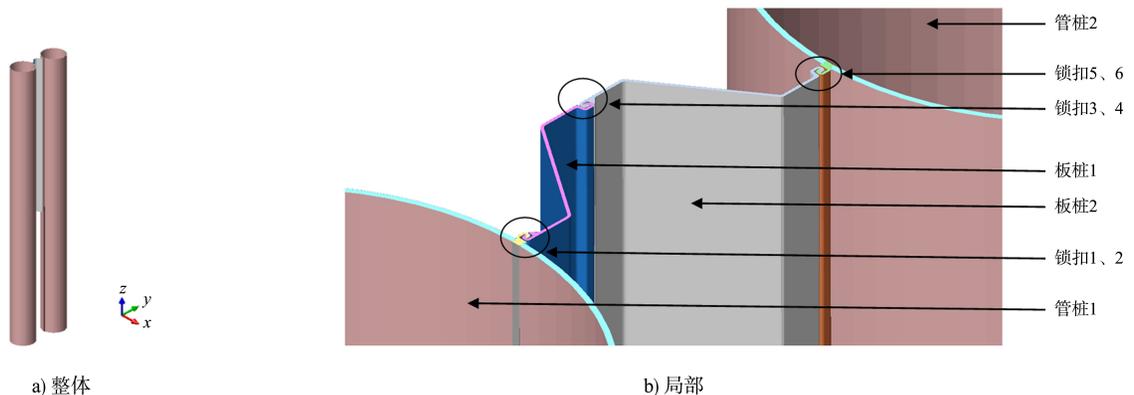


图 2 管板组合桩有限元模型

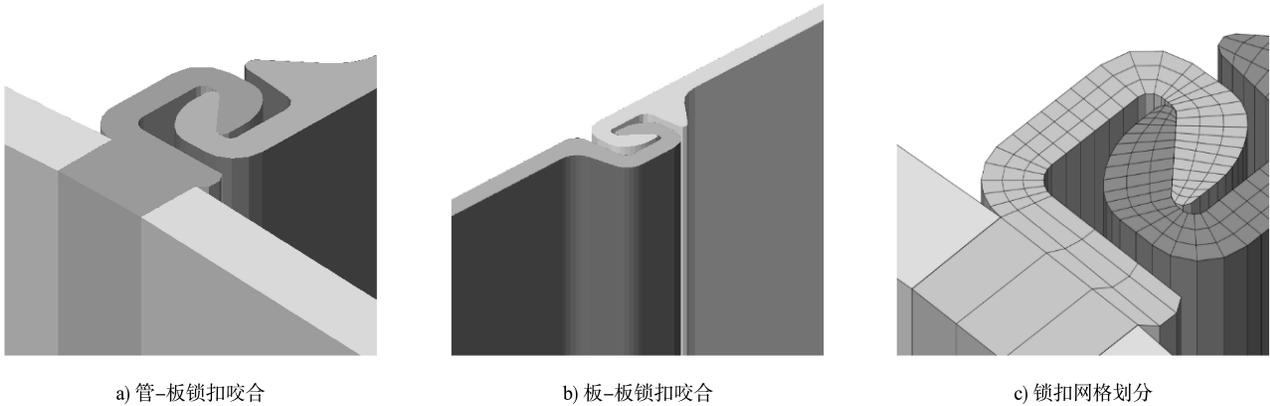


图3 AZ拉森型锁扣咬合

型号 ICE44B 液压振动锤的技术参数为偏心力矩 51 kg·m、最高振频 1 800 次/min、额定振打力 1 844 kN、最大振幅 30 mm。钢板桩沉桩过程中，液压振动锤的振打力通过下式计算：

$$F = ma = m\omega^2 r = M(2\pi f/60)^2 \quad (1)$$

式中： F 为振打力，kN； m 为振动锤芯质量，kg； a 为向心加速度， m/s^2 ； ω 为转动角速度，rad/s； r 为振动锤转动半径，m； M 为偏心力矩，kg·m； f 为振动频率，次/min。

现场沉桩过程中，设置最高振频为 1 600 次/min，计算得出振打力为 1 430 kN，模拟振动锤夹桩器的振打力转化为均布线荷载，施加在钢板桩模型的顶端部，方向竖直向下。

1.2 计算工况

管板组合桩在沉桩过程中，管板锁扣之间咬

合可能出现不利于该结构受力的 3 种情况：偏移拉伸锁扣咬合、偏转扭角-锁扣咬合、倾斜-锁扣咬合，见图 4。根据现场管板组合桩施工精度技术控制要求设定模拟计算工况，经过大量模拟计算，对这 3 种受力情况各分析 5 组控制值，见表 2。

表2 受力情况计算控制值

控制值	沿 y 轴正方向位移 Δ/mm	偏转角度 $\alpha/(^\circ)$	垂直度 β
1	50	3	1/200
2	100	5	1/100
3	150	7	1/95
4	200	9	1/90
5	250	10	1/80

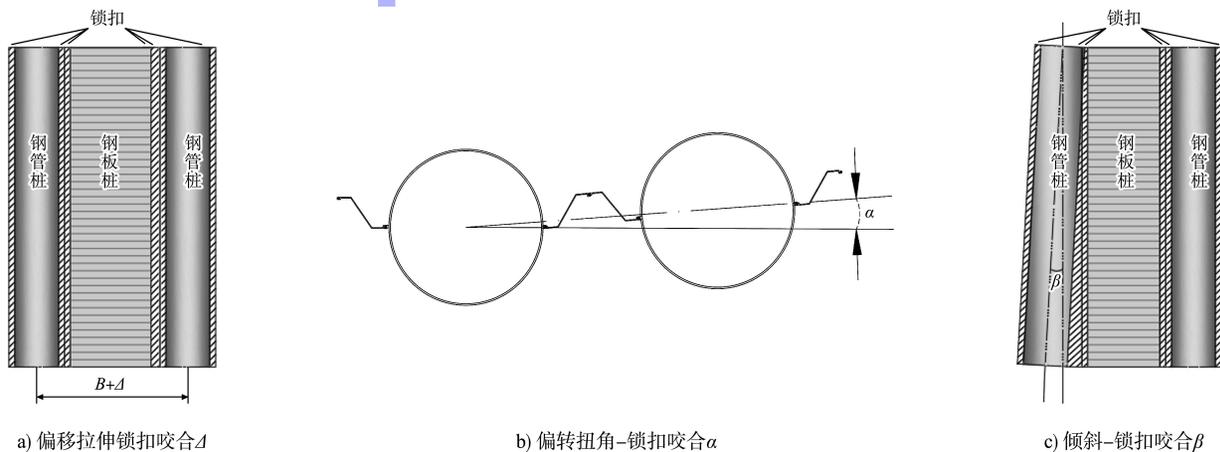
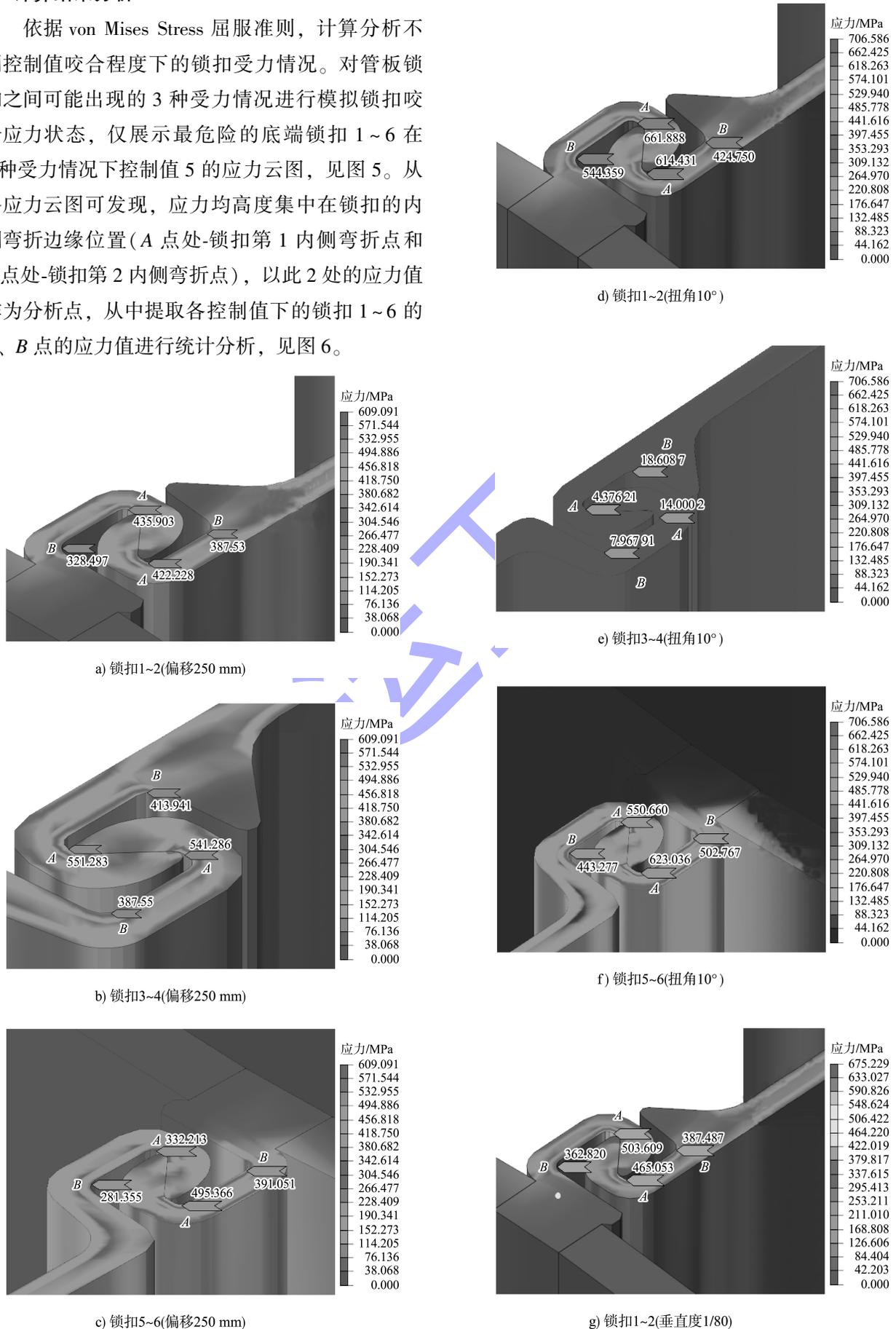
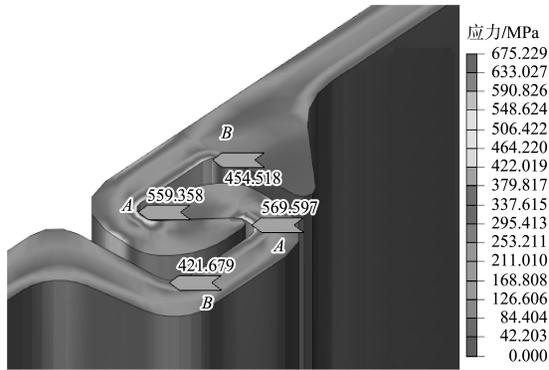


图4 管-板锁扣咬合不利情况

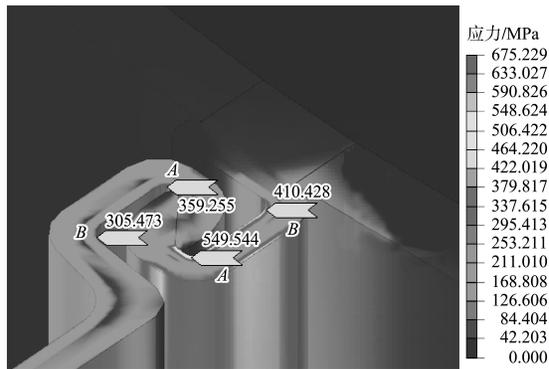
2 计算结果分析

依据 von Mises Stress 屈服准则, 计算分析不同控制值咬合程度下的锁扣受力情况。对管板锁扣之间可能出现的 3 种受力情况进行模拟锁扣咬合应力状态, 仅展示最危险的底端锁扣 1~6 在 3 种受力情况下控制值 5 的应力云图, 见图 5。从各应力云图可发现, 应力均高度集中在锁扣的内侧弯折边缘位置(A 点处-锁扣第 1 内侧弯折点和 B 点处-锁扣第 2 内侧弯折点), 以此 2 处的应力值作为分析点, 从中提取各控制值下的锁扣 1~6 的 A、B 点的应力值进行统计分析, 见图 6。



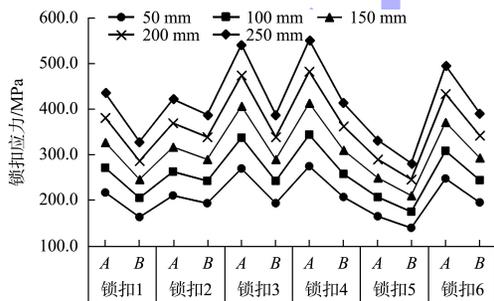


h) 锁扣3~4(垂直度1/80)

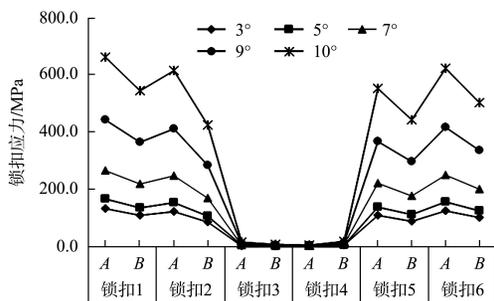


i) 锁扣5~6(垂直度1/80)

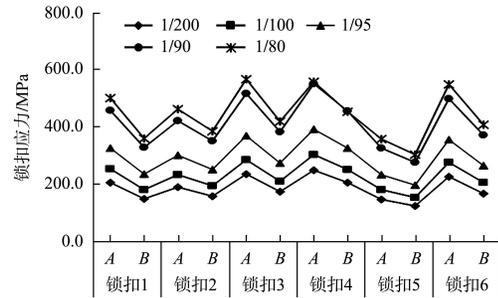
图5 应力云图



a) 不同偏移工况下



b) 不同偏转工况下



c) 不同垂直度工况下

图6 锁扣咬合A、B点处应力

由图6可以看出,各锁扣所受应力随偏移拉伸距离 Δ 、偏转扭角 α 、垂直度 β 的增加而逐渐变大,且各指标控制值下锁扣A点处的应力均大于B点处。在锁扣偏移拉伸和倾斜情况下的锁扣3、4的应力值普遍大于锁扣1、2、5、6的A点处应力值;在锁扣偏转扭角情况下受力的管-板锁扣1、2的AB点处的等效力值大于对应其他锁扣3、4、5、6的AB点处等效力值。

如表3所示不同控制值下的计算应力最大值,在3种锁扣受力情况下,计算控制值为偏移50 mm、扭角 7° 、垂直度1/100的计算工况下,最大应力值低于板桩(350 MPa)和锁扣(460 MPa)的屈服强度。

表3 不同控制值下的计算应力最大值

受力情况	计算控制值	计算最大值/MPa	是否超过屈服强度/MPa	
			锁扣 460	板桩 355
偏移拉伸	偏移 50 mm 咬合	304.5	否	否
	偏移 100 mm 咬合	380.7	否	是
	偏移 150 mm 咬合	456.8	否	是
	偏移 200 mm 咬合	532.9	是	是
	偏移 250 mm 咬合	609.1	是	是
偏转扭角	扭角 3°	141.3	否	否
	扭角 5°	176.6	否	否
	扭角 7°	282.6	否	否
	扭角 9°	471.0	是	是
	扭角 10°	706.6	是	是
垂直度	1/200 锁扣咬合	278.9	否	否
	1/100 锁扣咬合	341.4	否	否
	1/95 锁扣咬合	439.6	否	是
	1/90 锁扣咬合	615.2	是	是
	1/80 锁扣咬合	675.2	是	是

表 3 中偏移 100 mm 咬合工况下, 应力计算最大值为 380.7 MPa, 虽未超过锁扣屈服强度值, 但超过了板桩屈服强度值。其他受力情况计算控制值工况下均超过板桩和锁扣屈服强度。

根据计算结果可知, 钢管桩沉桩偏位精度应控制在 50 mm 以内, 扭角精度控制在 7° 以内, 垂直度控制在 1/100 以内, 可以作为管板组合桩施工精度的参考值。

3 结语

1) 各锁扣所受应力随偏移拉伸距离 Δ 、偏转扭角 α 、垂直度 β 的增加而逐渐变大,

2) 管板组合结构应力高度集中在锁扣的内侧弯折边缘位置(A 点处-锁扣第 1 内侧弯折点和 B 点处-锁扣第 2 内侧弯折点), 且锁扣 A 点处的应力均大于 B 点处。模拟结果得出, 计算控制值为偏移 50 mm、扭角 7° 、垂直度 1/100 的计算工况下, 最大应力值低于板桩 (350 MPa) 和锁扣 (460 MPa) 的屈服强度。

3) 数值模拟结果表明: 钢管桩偏位在 ± 50 mm 以内, 钢板桩扭角不大于 7° , 钢管桩垂直度不大于 1/100, 以上控制范围内的管板组合结构应力在许可范围, 可作为管板组合桩施工控制精度的参考值。

4) 由于管板组合结构中锁扣咬合较为关键, 管板沉桩施工精度要求较高, 建议加强对管-板桩沉桩工艺的研究, 提高沉桩精度控制与监测, 降低锁扣不利的咬合应力, 减小锁扣撕裂风险, 确保管板组合结构满足设计和质量要求。

参考文献:

- [1] 季则舟, 杨兴宴, 尤再进, 等. 中国沿海港口建设状况及发展趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31 (10): 1211-1217.
- [2] 蔡正银. 板桩结构土压力理论的创新 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 201-220.
- [3] 王福强, 李庭辉. 钢管板桩结构的特点及在深水码头中的应用 [J]. 港工技术, 2010, 47(6): 24-26.
- [4] 朱英, 王福强. 钢管板桩结构有限元计算方法 [J]. 水运工程, 2011(10): 24-27, 32.
- [5] 曾青松, 王福强, 薛瑞龙. 钢管板桩结合的新型码头结构形式的基桩施工工艺 [J]. 中国港湾建设, 2012(5): 47-49.
- [6] 李彬. 深圳港妈湾港区海星码头结构改造方案 [J]. 港口科技, 2021(10): 34-40.
- [7] 刘洪超, 李华. 广州港南沙港区板桩码头结构设计方案比选分析 [J]. 海岸工程, 2020, 39(1): 53-59.
- [8] 汤子扬, 牛志国, 陈春燕. Plaxis 在板桩码头分析中的应用 [J]. 水利水运工程学报, 2013(1): 81-85.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 169 页)

- [3] 李超军, 叶雅思, 唐洁. BIM 技术在船闸金属结构全生命周期中的应用 [J]. 水运工程, 2019(3): 159-164.
- [4] 黄亚栋, 邬显强, 王定略, 等. BIM 技术在汉江雅口航运枢纽工程浮式检修闸门设计中的应用 [J]. 水运工程, 2019(11): 133-138.
- [5] 李玲君, 陈璐. BIM 技术在船闸三角闸门设计中的应用 [J]. 水运工程, 2019(6): 147-151.
- [6] 严沾谋. 基于 BIM 技术的平面钢闸门三维设计计算和出图一体化软件的研发 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(3): 11-14.
- [7] 李超军, 叶雅思, 李金朋. 基于 BIM 技术的船闸浮式系船柱结构设计 [J]. 水运工程, 2023(9): 171-176, 210.
- [8] 颜红亮, 周坤, 李鸿忠. 船闸工程金属结构模块设计 BIM 技术应用 [J]. 水运工程, 2021(8): 163-168.

(本文编辑 王璁)