



# Z 型钢板桩码头转角段三维数值模拟

郭浩霖，李春阳，王志斌

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290)

**摘要：**为了探讨板桩码头转角段的受力与变形特性，以广州南沙港某 Z 型钢板桩码头为例进行研究。土体本构采用小应变土体硬化模型，利用国际大型通用有限元软件分别建立了板桩码头标准段、内转角段和外转角段 3 个空间数值模型，对比分析了前墙、拉杆和锚碇墙的内力和位移分布特征。计算结果表明：1)Z 型钢板桩码头转角段前墙的弯矩和位移、拉杆拉力、锚碇墙位移均比标准段小。2)按照标准段的计算成果进行转角段设计偏于保守，可进一步优化。

**关键词：**Z 型钢板桩；转角段；三维数值模拟

中图分类号：U 656

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)10-0099-06

## 3D numerical simulation of corner segment in Z-type steel sheet pile wharf

GUO Hao-lin, LI Chun-yang, WANG Zhi-bin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** In order to discuss the stress and deformation characteristics of the corner segment in sheet pile wharfs, this paper studies a Z-type steel sheet pile wharf in Guangzhou Nansha Port. In addition, the paper adopts a hardening soil model with small strain as the soil constitutive model, establishes three spatial numerical models including the standard segment, the inner corner segment, and the outer corner segment of the sheet pile wharf by international large-scale finite element software, and analyzes the internal force and displacement distribution characteristics of the front wall, anchor tie, and anchor wall through comparison. The calculation results show that: 1) The bending moment and displacement of the front wall, the tension force of the anchor tie, and the displacement of the anchor wall of the corner segment in Z-type steel sheet pile wharf are all smaller than those of the standard segment. 2) According to the calculation results of the standard segment, the design of the corner segment is conservative and can be optimized.

**Keywords:** Z-type steel sheet pile; corner segment; 3D numerical simulation

板桩码头具有结构简单、对复杂的地质条件适应性强、施工便捷、造价低等优点<sup>[1]</sup>，得到广泛应用。对于挖入式港池而言，板桩码头存在向内侧或向外侧弯折的转角段，见图 1。

转角段具有明显的空间特征，目前国内外针对板桩码头转角段受力与变形的相关研究较少。板桩码头转角段设计一般采用板桩码头标准段的

计算成果。为了探讨板桩码头转角段的受力与变形特性，本文以广州南沙港某 Z 型钢板桩码头为例，运用国际大型通用岩土有限元软件建立三维有限元模型，对板桩码头标准段、内转角段和外转角段的受力与变形特性进行对比分析，为板桩码头转角段的精细化设计提供参考。

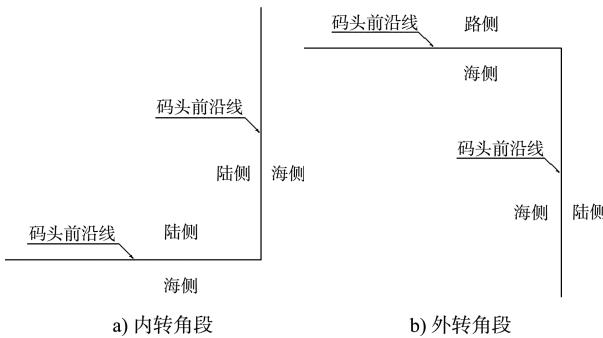


图 1 板桩码头转角段

## 1 工程概况

广州南沙港某板桩码头顶面高程为 5.6 m, 港

池前沿设计底高程为 -5.7 m。前墙采用 Z 型钢板桩, 顶高程 1.9 m、底高程 -19 m。锚碇结构采用现浇 C40 钢筋混凝土锚碇墙, 顶高程 4.0 m、墙高 4 m、墙厚 0.6 m。板桩墙后回填中粗砂, 锚碇墙前回填 10~100 kg 块石, 顶宽 10 m。前墙与锚碇墙采用钢拉杆相连, 钢拉杆间距 2.1 m、安装高程为 1.5 m、直径为 70 mm。地基表层及下卧的淤泥和淤泥质土采用真空联合堆载预压进行处理, 处理范围为码头前沿线向海侧 25 m 至码头前沿线向陆侧 45 m。码头典型断面见图 2。

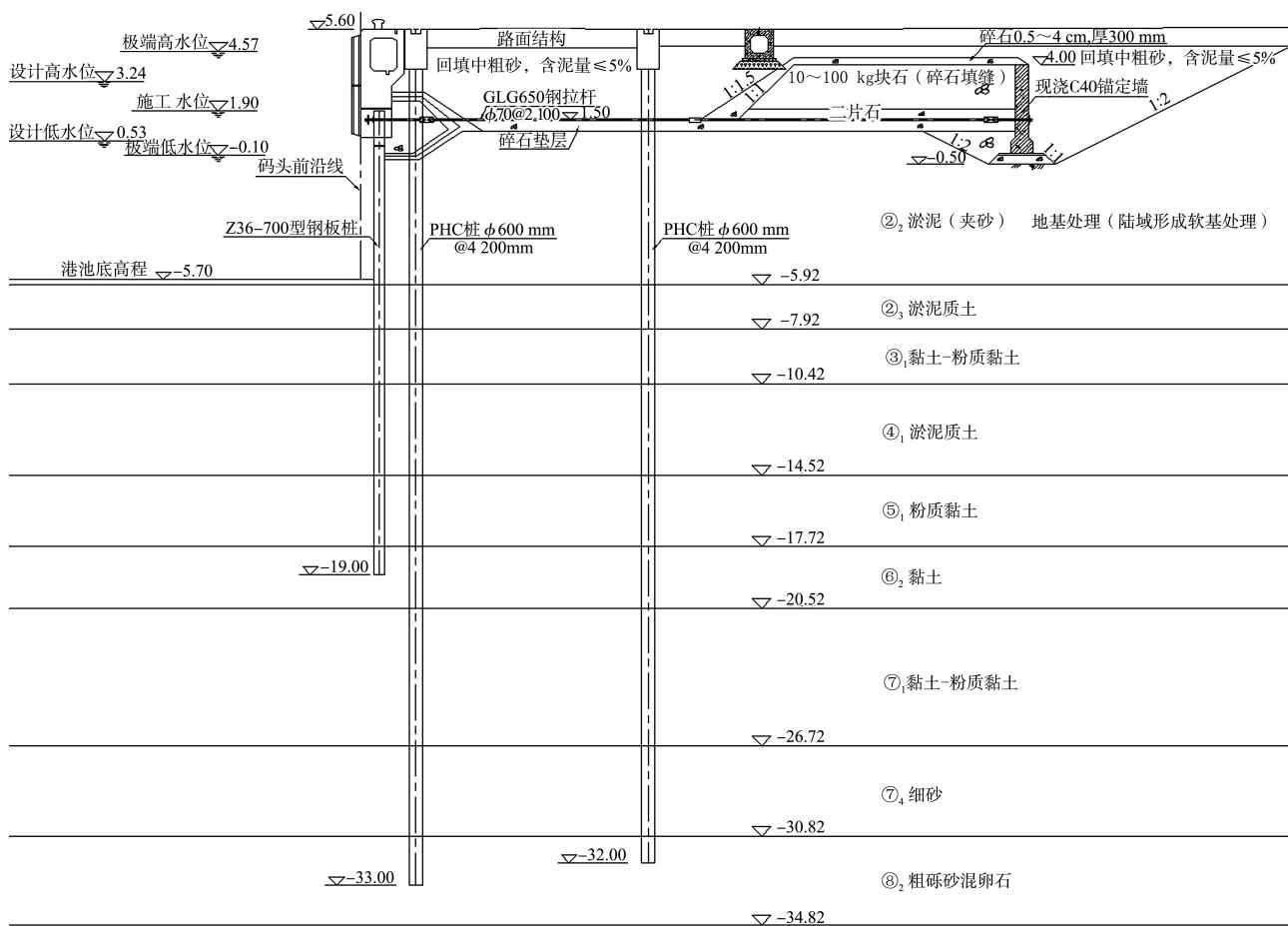


图 2 码头典型断面 (高程: m)

## 2 模型建立

### 2.1 土体本构模型及单元选取

土体本构模型采用小应变土体硬化模型(简称 HSS 模型), 该模型为弹塑性双曲线模型, 其在土体硬化模型的基础上引入了小应变属性<sup>[2]</sup>, 考虑了土的受荷历史和刚度的应变相关性, 可模拟从

小应变到大应变范围内土体的不同响应<sup>[3]</sup>。

为真实模拟板桩-土的相互作用, 用板单元模拟板桩结构, 用实体单元模拟土体、回填材料, 在板桩与土体之间加入接触界面单元, 用点对点锚杆单元模拟拉杆, 锚碇墙也采用实体单元。板桩码头不同结构段的三维有限元模型见图 3。

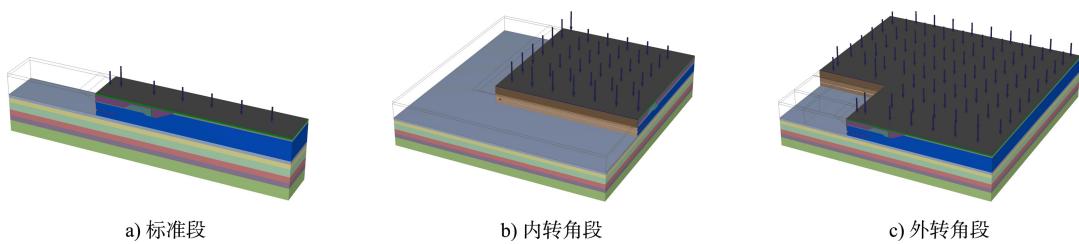


图 3 板桩码头三维有限元模型

## 2.2 土体参数取值

反映土体特性的相关参数取值是岩土有限元计算的关键, 常规地勘报告往往无法提供所有土体建模参数, 需要参考相关的理论研究和工程经验综合考虑确定。文献[4-6]对 HSS 模型整套参数

的取值进行了深入研究, 为工程应用提供了借鉴。本文土体强度根据地勘报告的三轴试验取值, 变形模量根据地勘报告的压缩模量由经验公式计算确定, 土体参数见表 1。

表 1 土体参数

土层名称	$E_{50}$ 割线刚度/MPa	$E_{oed}$ 切线刚度/MPa	$E_{ur}$ 卸载/再加载刚度/MPa	有效黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	小应变参考剪切模量 $G_0$ /MPa	剪切应变 $\gamma_{0.7}$
② <sub>2</sub> 淤泥(夹砂)	5.28	5.28	26.40	6.5	30.1	52.80	$2 \times 10^{-4}$
② <sub>3</sub> 淤泥质土	6.08	6.08	30.41	11.7	29.1	60.83	$2 \times 10^{-4}$
③ <sub>1</sub> 黏土-粉质黏土	9.36	9.36	46.80	15.3	26.7	93.60	$2 \times 10^{-4}$
④ <sub>1</sub> 淤泥质土	7.43	7.43	37.15	12.1	25.6	74.30	$2 \times 10^{-4}$
⑤ <sub>1</sub> 粉质黏土	9.33	9.33	46.64	19.8	26.8	93.29	$2 \times 10^{-4}$
⑥ <sub>2</sub> 黏土	7.24	7.24	36.21	25.4	25.9	72.42	$2 \times 10^{-4}$
⑦ <sub>1</sub> 黏土-粉质黏土	7.58	7.58	37.89	29.0	24.7	75.78	$2 \times 10^{-4}$
砂垫层	15.00	15.00	45.00	0	30	75.00	$3 \times 10^{-4}$
中粗砂	25.00	25.00	75.00	0	32	125.00	$3 \times 10^{-4}$
块石	40.00	40.00	120.00	0	42	200.00	$3 \times 10^{-4}$

## 2.3 模型边界

为了减弱边界效应, 模型边界越大越好, 但计算量相应增加。综合考虑模型的精度和计算效率, 模型宽度方向(即模型 X 轴边界)为码头前沿线向海侧 50 m 至码头前沿线向陆侧 100 m, 共 150 m; 模型长度方向(即模型 Y 轴边界)标准段模型选取了 10 倍拉杆间距, 即 21 m, 转角段模型基于对称性考虑, 长度与宽度取值相同, 为 150 m; 模型高度方向(即模型 Z 轴边界)为码头顶高程至⑦<sub>1</sub>黏土-粉质黏土底高程。

## 2.4 拉杆、锚碇墙交叉区处理

由于板桩码头内转角段两侧拉杆和锚碇墙在平面位置上相互交叉, 为了保证两个方向拉杆和锚碇墙的受力与变形互不干扰, 在拉杆交叉处将拉杆沿竖向错开布置, 一侧拉杆安装高程取 1.5 m

(对应锚碇墙的底高程为 0 m)、另一侧取 0.5 m (对应锚碇墙的底高程为 -1 m), 在锚碇墙交叉处设置结构缝处理。

## 2.5 施工阶段

在软件中定义施工阶段如下: 1) 场地初始应力平衡; 2) 场地开挖至拉杆和锚碇墙底高程; 3) 打设前墙钢板桩, 现浇锚碇墙, 安装拉杆; 4) 墙后回填, 上部结构施工; 5) 墙前港池开挖至设计底高程; 6) 施加码头前沿堆货荷载、剩余水压力、波吸力或系缆力等荷载。

## 3 计算结果及对比分析

### 3.1 前墙

分别提取标准段、内转角段和外转角段前墙的弯矩和位移云图, 见图 4、5。

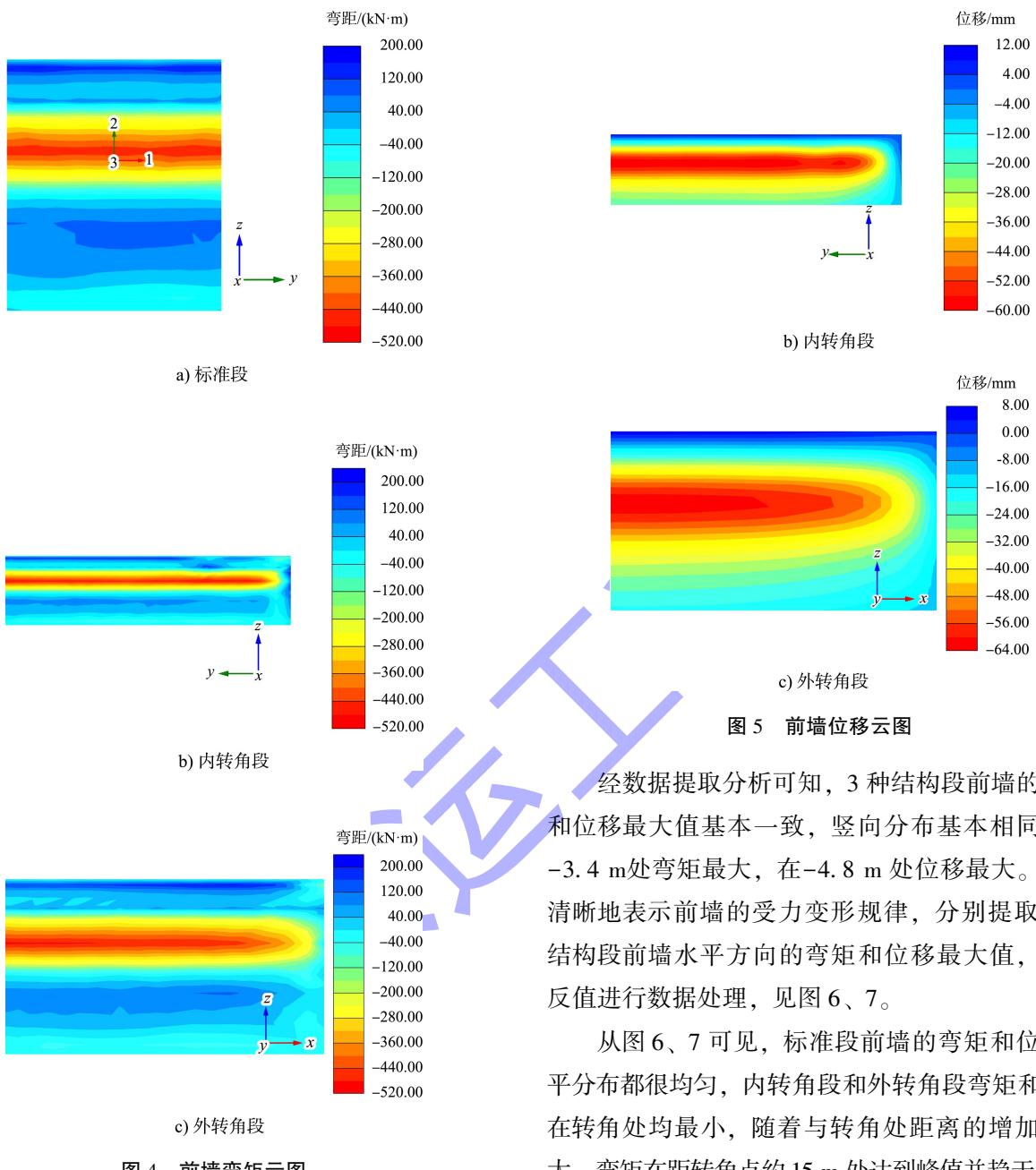
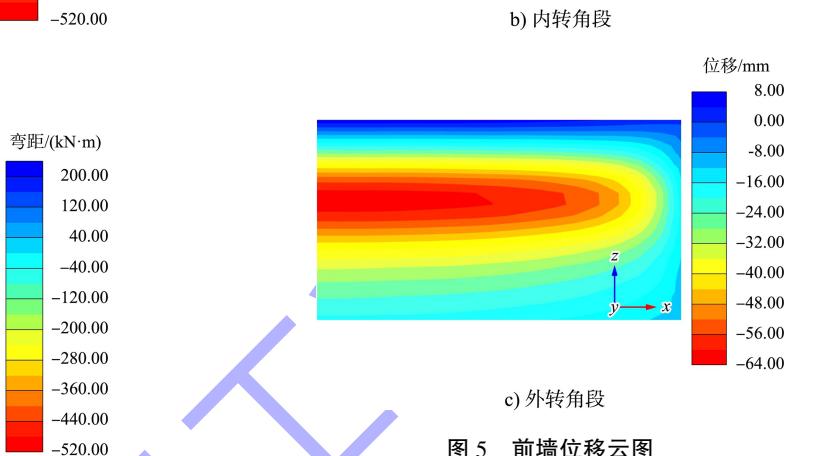


图 4 前墙弯矩云图

图 5 前墙位移云图



经数据提取分析可知，3 种结构段前墙的弯矩和位移最大值基本一致，竖向分布基本相同，在 -3.4 m 处弯矩最大，在 -4.8 m 处位移最大。为更清晰地表示前墙的受力变形规律，分别提取 3 种结构段前墙水平方向的弯矩和位移最大值，取相反值进行数据处理，见图 6、7。

从图 6、7 可见，标准段前墙的弯矩和位移水平分布都很均匀，内转角段和外转角段弯矩和位移在转角处均最小，随着与转角处距离的增加而增大，弯矩在距转角点约 15 m 处达到峰值并趋于平稳，位移在距转角点约 20 m 处达到峰值并趋于平稳。

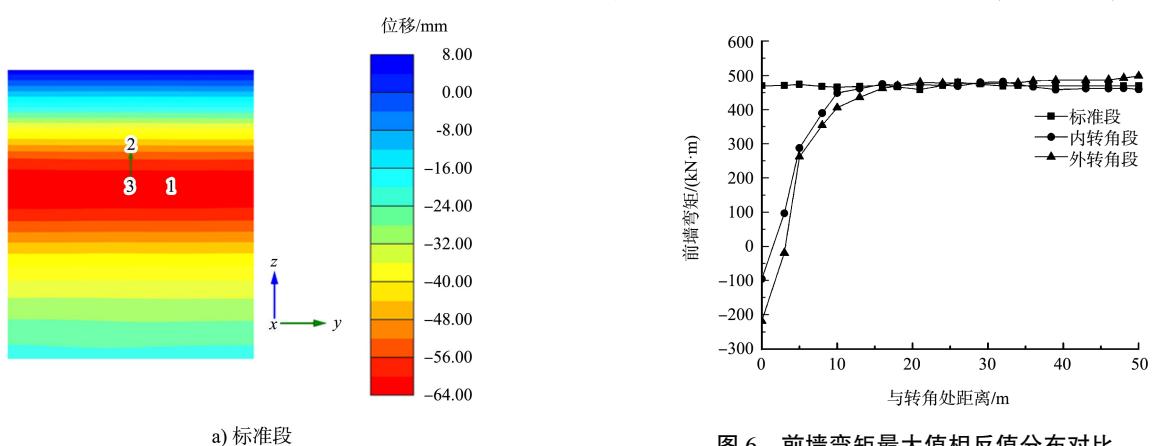
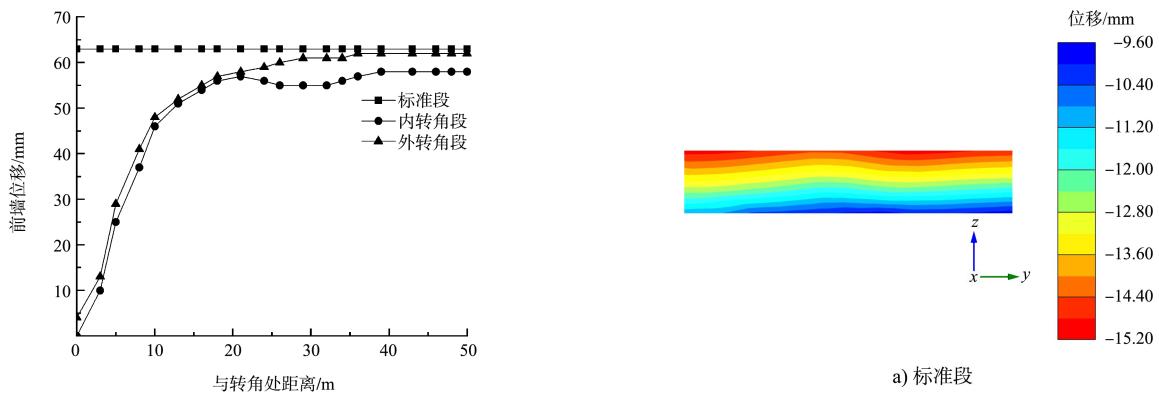
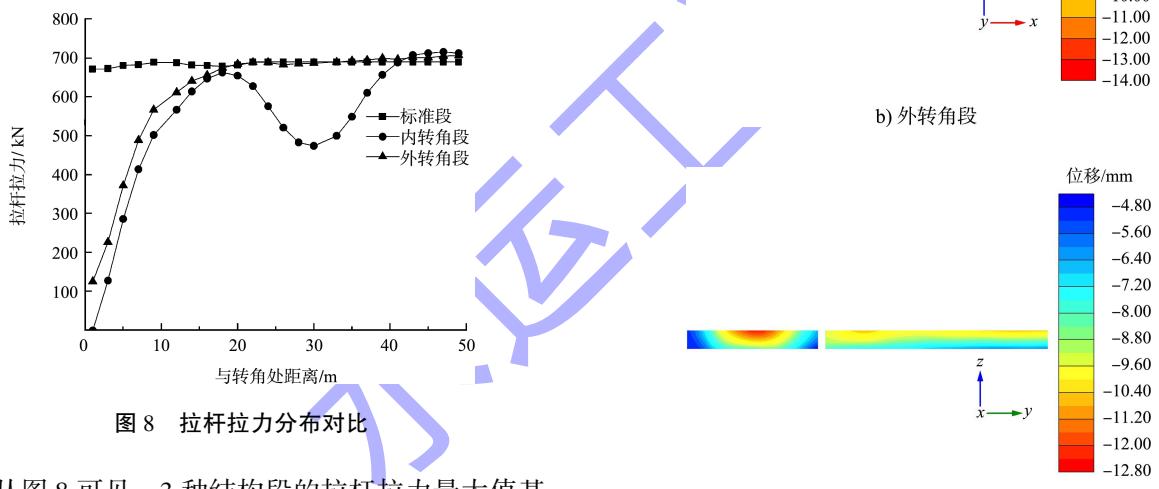


图 6 前墙弯矩最大值相反值分布对比



### 3.2 拉杆

分别提取标准段、内转角段和外转角段的拉杆拉力进行数据处理, 见图 8。



从图 8 可见, 3 种结构段的拉杆拉力最大值基本一致。标准段的拉杆拉力分布很均匀; 内转角段在转角处拉杆几乎不受力, 拉杆拉力随着与转角处距离的增加而增大, 在距转角点约 20 m 处达到峰值后又小幅回落, 然后在距转角点约 40 m 处再次升至峰值并趋于平稳; 外转角段在转角处拉杆拉力较小, 约为最大值的 1/6, 随着与转角处距离的增加而增大, 在距转角点约 20 m 处达到峰值并趋于平稳。

### 3.3 锚碇墙

提取标准段、内转角段和外转角段锚碇墙的位移云图, 见图 9。

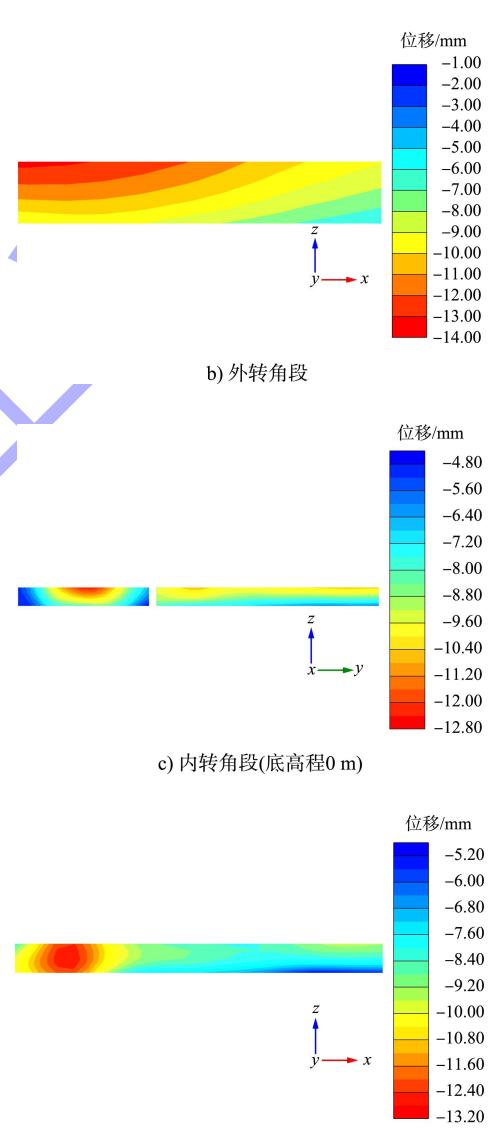


图 9 锚碇墙位移云图

从图 9 位移云图可见, 3 种结构段的锚碇墙位移最大值相差不大。分别提取 3 种结构段前墙水平

方向的位移最大值相反值进行数据处理, 见图 10。

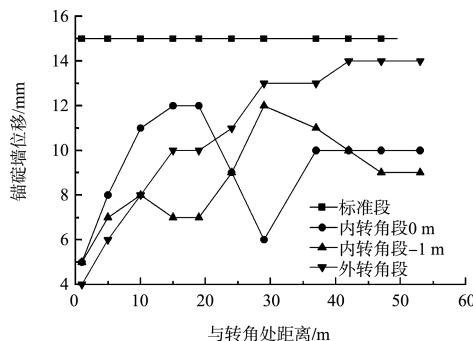


图 10 锚碇墙位移绝对值的最大值分布对比

从图 10 可知, 标准段锚碇墙水平方向的位移分布很均匀; 内转角段和外转角段在转角处位移均最小; 外转角段锚碇墙的位移随着与转角处距离的增加而增大, 在距转角点约 40 m 处达到峰值并趋于平稳; 内转角段由于两个方向的拉杆竖向相互错开, 锚碇墙的高度有差异, 因此锚碇墙的位移分布较为复杂, 底高程为 0 m 的锚碇墙距转角点约 15 m 处位移最大, 底高程为 -1 m 的锚碇墙距转角点约 30 m 处位移最大。

综上所述, 根据前墙、拉杆、锚碇墙的受力与变形特征, Z 型钢板桩码头的转角段范围为 15~40 m, 在该范围内前墙的弯矩和位移、拉杆拉力、锚碇墙位移均比标准段小, 这与转角处的边界效应以及拉杆、锚碇墙在该处交错布置的空间效应有关。

#### 4 结论

1) Z 型钢板桩码头的转角段范围为 15~40 m, 在该范围内前墙的弯矩和位移、拉杆拉力、锚碇

(上接第 52 页)

- [2] 赵严, 何世伟, 黎浩东. 水铁联运发展模式及其运输组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(6): 23-26.
- [3] 中交第四航务工程勘测设计院有限公司. 钦州港大榄坪港区大榄坪南作业区 7#~10#泊位工程初步设计报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘测设计院有限公司, 2020.
- [4] 吴铁锋, 朱晓宁. 集装箱海铁联运发展的方案研究[J].

墙体位移均比标准段小, 按照标准段的计算成果进行转角段设计偏于保守, 可进一步优化。

2) 转角段在转角处前墙的弯矩和位移、拉杆拉力、锚碇墙体位移均最小。

3) 内转角段前墙的弯矩、位移随着与转角处距离的增加而增大, 分别在距转角点约 15、20 m 处达到峰值并趋于平稳; 拉杆拉力随着与转角处距离的增加而增大, 在距转角点约 20 m 处达到峰值后又小幅回落, 然后在距转角点约 40 m 处再次升至峰值并趋于平稳; 锚碇墙的位移分布较复杂, 规律性不强。

4) 外转角段前墙的弯矩和位移分布特征同内转角段; 拉杆拉力、锚碇墙体位移随着与转角处距离的增加而增大, 分别在距转角点约 20、40 m 处达到峰值并趋于平稳。

#### 参考文献:

- [1] 韩理安. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 刘志洋, 张海清. PLAXIS 高级应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 刘志洋, 张海清. PLAXIS 3D 基础教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [4] 汪中卫, 王海飙, 戚科骏, 等. 土体小应变试验研究综述与评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1518-1524.
- [5] 王海波, 徐明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 39-43, 136.
- [6] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.

(本文编辑 武亚庆)

北京交通大学学报(社会科学版), 2011, 10(2): 27-32.

- [5] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘测设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [6] 李冰漪. 创新驱动下的多式联运系统解决方案: 专访中车长江车辆有限公司董事长胡海平[J]. 中国储运, 2018(12): 48-49.

(本文编辑 王璁)