

泡沫轻质土在板桩码头结构中的应用



陈勇康，李春阳，单恒年

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290)

摘要：板桩码头在采用传统回填材料时，由于回填料自重较大，易导致码头竖向沉降大、前墙水平位移较大，不利于码头结构整体稳定。针对上述问题，利用新型材料泡沫轻质土作为回填材料，采用 PLAXIS 3D 三维有限元软件构建码头结构与土体的空间三维模型，分别计算码头上方使用回填泡沫轻质土和中粗砂 2 种材料时结构的受力特性。通过结果对比分析可知，码头上部回填泡沫轻质土时，前墙弯矩、位移、拉杆拉力均有一定程度的降低，码头整体稳定性安全性增大，可为类似工程建设提供参考。

关键词：泡沫轻质土；板桩码头；三维有限元

中图分类号：U 654

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)10-0133-05

Application of foamed lightweight soil in sheet pile wharf structure

CHEN Yong-kang, LI Chun-yang, SHAN Heng-nian

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

Abstract: When traditional backfill materials are used for sheet pile wharfs, due to the self-weight of the backfill is heavy, it is easy to cause large vertical settlement of the wharf and large horizontal displacement of the front wall, which is not conducive to the overall stability of the wharf structure. In view of the above problems, a new material, foamed mixture lightweight soil is used as backfill material. The spatial three-dimensional model of sheet pile wharf structure and soil is constructed by PLAXIS 3D finite element software. The mechanical properties of the structure using the backfilling materials of foamed mixture lightweight soil and medium coarse sand on the upper part of the sheet pile wharf are calculated respectively. Through the comparative analysis of the results, it can be seen that when the upper part of the sheet pile wharf is backfilled with foamed mixture lightweight soil, there is a certain degree of reduction of the front wall bending moment, displacement and the pull rod tension, the overall stability and safety of the wharf is increased, which can provide a reference for similar engineering construction.

Keywords: foamed mixture lightweight soil; sheet pile wharf; 3D finite element

近年来，为适应航运业的快速发展和船舶大型化的需要，码头朝着深水化、大型化的趋势发展^[1]。板桩码头作为一种重要的码头形式，具有受力明确、适应变形能力强、整体性好、造价低、环境友好等特点，在实际工程中已大量应用。但当码头吨级过大时，板桩码头前墙位移、内力显著增大，不仅影响使用，且导致造价增加。另外，

板桩码头后方常用的回填材料为块石、砂等，由于国家环保政策趋严，导致近年来市场供应紧张，价格大幅上涨。在此背景下，利用泡沫轻质土不可压缩、直立性好、密度小等特点，既可以减少填土荷重和对前墙的土压力，同时也可减少板桩码头的水平位移变形和码头前沿作业地带的沉降，使得码头的整体稳定性系数增大，提高工程质量^[2]。

1 工程概况

码头顶面高程为 5.6 m, 港池前沿设计底高程为 -16.0 m。码头结构采用钢管组合板桩结构, 前墙采用壁厚 24 mm、直径 2 032 mm 钢管桩与 Z 型钢板桩组合, 顶高程 2.0 m。组合板桩上部结构为现浇 C40 钢筋混凝土胸墙。锚碇墙采用直径

1 000 mm 钢管桩与 Z 型钢板桩组合结构, 顶高程 2.0 m。前墙与锚碇墙采用钢拉杆相连, 钢拉杆间距 3.35 m, 安装高程为 0.5 m, 直径为 130 mm。墙后先采用真空联合堆载预压, 再采用水泥搅拌桩进行二次加固处理。前墙后高程 1.0 m 以上至路面结构回填泡沫轻质土。码头典型断面见图 1。

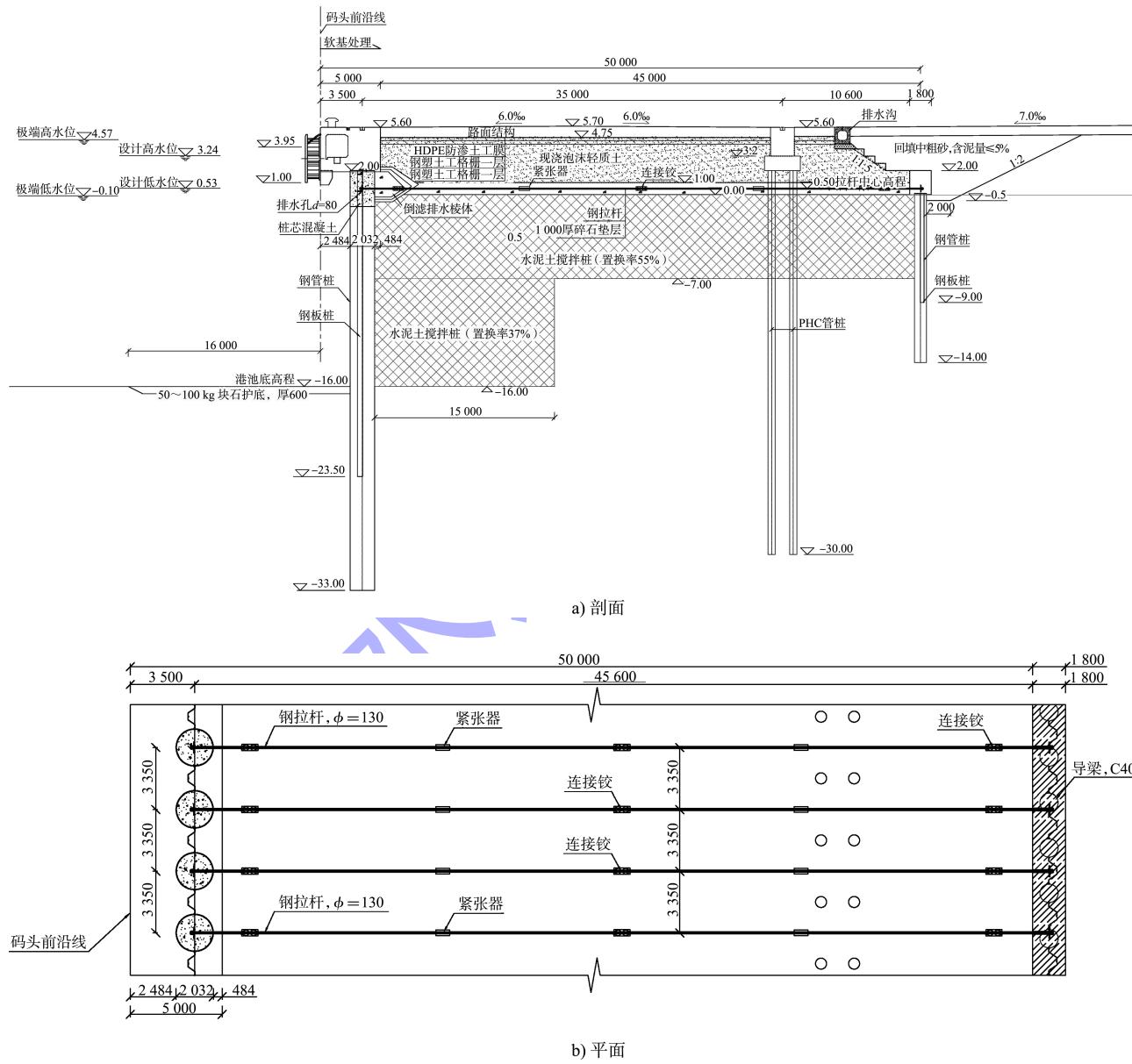


图 1 码头典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 模型建立

为研究钢管组合板桩空间受力特性及与土体的相互作用, 采用 PLAXIS 3D 空间三维有限元数值模拟软件, 分别计算码头后方回填泡沫轻质土和中粗砂 2 种结构, 对比研究前墙、锚碇墙、拉

杆、PHC 桩基等结构的受力特性。

2.1 土体本构模型及参数

为了便于建模, 首先将前墙钢管桩和 Z 型板桩根据截面等效原则简化为板桩结构。土体本构模型采用土体硬化模型(hardening soil model), 这

是一种高级土体模型, 其弹性部分可以分别考虑土体的加载、卸载刚度及土体模量随应力增加而增大的特性; 其塑性部分采用非相关联流动法则和各向同性的硬化准则, 可较好地描述曲线形式的应力-应变关系和土体的剪胀性^[3]。计算工况包括堆载预压、卸载以及开挖回填等, 可以考虑加载、卸载应力路径对土体的影响。

为真实模拟板桩-土体的相互作用, 用板单元模拟钢管组合板桩结构, 用实体单元模拟土体和回填材料, 在板桩与土体之间加入接触界面单元, 通过选取合适的界面强度因子模拟结构与土体之间的相互作用。用 Embedded 桩单元模拟后轨道梁

PHC 桩基, 用点对点锚杆单元模拟拉杆^[4]。三维有限元模型见图 2。

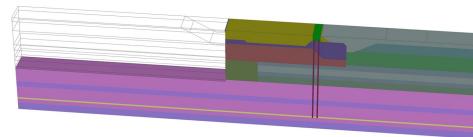


图 2 三维有限元模型

2.2 土体参数取值

为了便于模型计算, 对实际土层进行合理简化, 将土层较薄且参数相近的土层合并, 对土层厚度进行适当平均处理, 土体参数取值见表 1。

表 1 土体参数取值

土层名称	$\rho_{\text{unsat}} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_{\text{sat}} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E_{\text{so}} / \text{加载割线模量}/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\text{oed}} / \text{压缩切线模量}/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{\text{ur}} / \text{卸载再加载模量}/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-2})$	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
② ₁ 流泥	1.612	1.654	3.734	2.489	19.912	4.4	17.5
② ₂ 淤泥(夹砂)	1.621	1.668	3.168	2.112	16.896	10.5	16.0
② ₃ 淤泥质土	1.671	1.713	3.650	2.433	19.464	14.8	16.4
③ ₁ 黏土-粉质黏土	1.948	1.997	6.240	6.240	31.200	24.6	17.8
④ ₁ 淤泥质土	1.779	1.810	4.458	2.972	23.776	17.8	14.3
④ ₂ 黏土	1.872	1.924	4.820	4.820	24.100	29.7	16.3
⑤ ₁ 粉质黏土	1.973	2.033	6.219	6.219	31.095	32.2	17.3
⑥ ₁ 淤泥质土	1.771	1.815	3.863	3.219	16.095	25.7	13.9
⑥ ₂ 黏土	1.818	1.848	4.828	4.828	24.140	35.3	16.3
⑦ ₁ 黏土-粉质黏土	1.898	1.937	7.578	7.578	37.890	40.4	16.0
⑦ ₂ 黏土-粉质黏土	1.781	1.845	5.962	5.962	29.810	34.2	16.9
松散砂($N < 10$)	1.800	1.900	8.000	8.000	24.000	0	28.0
稍密砂($10 < N < 15$)	1.800	1.950	15.000	15.000	45.000	0	30.0
中密砂($15 < N < 30$)	1.850	1.950	25.000	25.000	75.000	0	32.0
密实砂($30 < N < 50$)	1.850	2.000	40.000	40.000	120.000	0	36.0
极密砂($N > 50$)	1.900	2.000	50.000	50.000	150.000	0	40.0

2.3 模型范围及边界条件

模型的边界确定对计算结果和精度均有一定影响。为提高计算效率, 在模型的宽度方向选取 5 倍拉杆间距, 取 16.75 m。在模型的长度方向, 港池前方长度与后方长度对称, 考虑码头堆场荷载作用范围, 取 180 m。在模型深度方向, 从码头顶面一直考虑到板桩持力层以下, 取 40.3 m。综合考虑计算时间和模型大小, 本次模型范围为 16.75 m×180 m×40.3 m。

模型的边界条件为: 约束底面 3 个方向的位移, 4 个侧面采用法向约束。模型的排水边界条件

为: 排水边界设在顶面^[5], 4 个侧面及底面均为不排水边界。

2.4 计算条件及计算工况

1) 码头面荷载: 前沿 5 m 范围内为 20 kN/m², 5~37 m 范围为 30 kN/m², 37~90 m 范围为 20 kN/m², 90 m 范围外为 50 kN/m²。

2) 计算水位: 极端高水位 4.57 m; 设计高水位 3.24 m; 设计低水位 0.53 m; 极端低水位 -0.10 m。

3) 地震: 本场区内地震动峰值加速度值为 0.10g, 抗震设防烈度值取 VII 度, 设计地震分组为第 1 组。

计算工况选取施工期、使用期最不利工况，严格按照现场施工过程，设定具体工序如下：

- 1) 原泥面 3.89 m 高程初始应力平衡；
- 2) 场地堆载预压至 5.6 m 高程；
- 3) 场地卸载至原泥面 3.89 m 高程，打设前、后钢板桩，水泥搅拌桩施工；
- 4) 场地开挖至 0 m 高程，安装拉杆，打设 PHC 桩，现浇轨道梁；
- 5) 墙前港池开挖至 -8.4 m 高程；
- 6) 墙后回填泡沫轻质土；
- 7) 墙前港池开挖至 -16.5 m 高程（考虑超挖影响及墙前开挖抛石影响）；
- 8) 施加剩余水压力、系缆力、码头面均布荷载；
- 9) 利用强度折减法分析模型整体稳定性。

3 计算结果及对比分析

3.1 泡沫轻质土回填

码头后方上部采用泡沫轻质土回填时，模型计算结果见图 3。图 3a) 为三维有限元模型计算的使用期最不利工况下整体位移云图，图 3b)、c) 分别为前板桩弯矩和水平位移，图 3d) 为 PHC 桩基轴力。

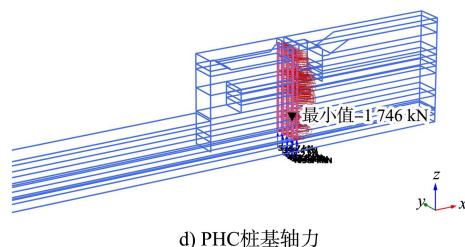
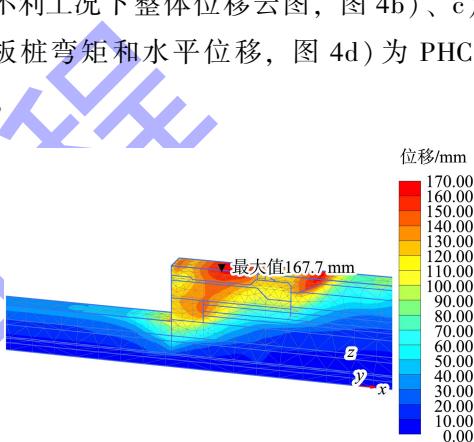


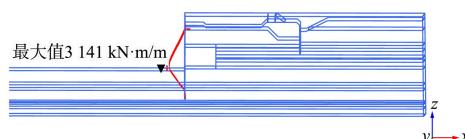
图 3 泡沫轻质土回填模型计算结果

3.2 中粗砂回填

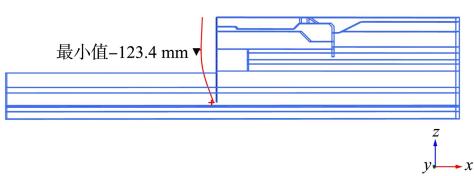
码头后方上部采用中粗砂回填时，模型计算结果见图 4。图 4a) 为三维有限元模型计算的使用期最不利工况下整体位移云图，图 4b)、c) 分别为前板桩弯矩和水平位移，图 4d) 为 PHC 桩基轴力。



a) 整体位移云图



b) 前板桩弯矩



c) 前板桩水平位移

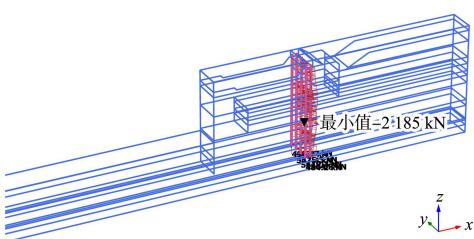
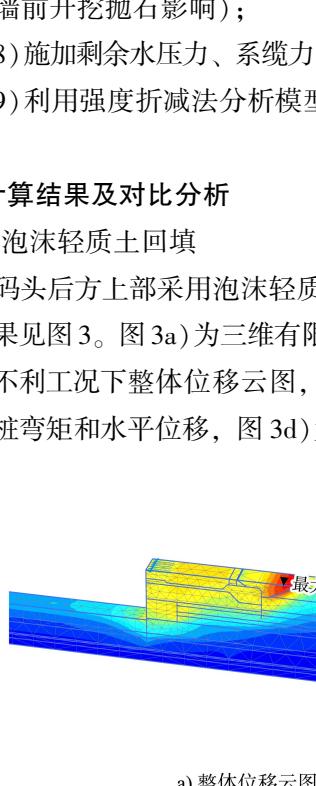
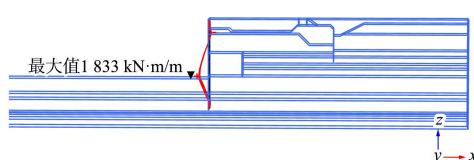


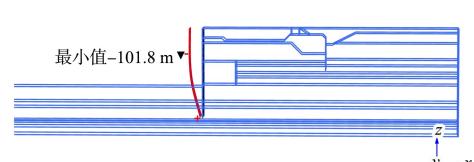
图 4 中粗砂回填模型计算结果



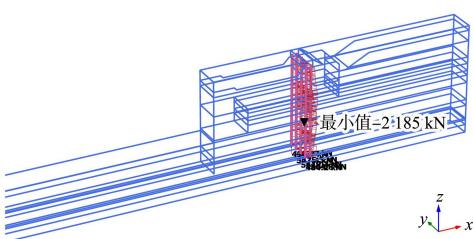
a) 整体位移云图



b) 前板桩弯矩



c) 前板桩水平位移



d) PHC 桩基轴力

表 2 列出了码头后方分别回填泡沫轻质土和中粗砂时的三维有限元模型计算结果及对比。

本工程泡沫轻质土回填厚度 3.75 m, 强度 $\geq 1.0 \text{ MPa}$, 密度为 1.05 kg/m^3 , 相比回填中粗砂, 降低了板桩墙的侧向土压力, 从而改善了板桩结构受力。

根据模型整体位移云图, 土体表层沉降在锚

碇结构后侧上方处时较大。这是因为此时锚碇板在拉杆作用下会往海侧产生水平位移, 由于下方锚碇桩的嵌固作用, 锚碇板上部水平位移大, 下部水平位移小, 造成板后的土体向下凹陷。在施工过程中, 对此处要加强监测并及时采取有效加强措施, 避免发生较大的局部沉降。

表 2 三维有限元数值模拟计算结果对比

项目	土体表层沉降 最大值/mm	前板桩弯矩最大 值/ $(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m})^{-1}$	前板桩水平位移 最大值/mm	PHC 桩基 轴力/kN	拉杆 拉力/kN	整体稳定 性系数
回填泡沫轻质土	97.7	2 069	101.8	1 746	817.02	1.829
回填中粗砂	113.0	3 141	123.4	2 185	879.92	1.659
变化率/%	13.54	34.13	17.50	20.09	7.15	-10.240

从表 2 的计算结果分析可得, 码头后方采用泡沫轻质土回填后, 土体表层沉降、前墙弯矩、位移、拉杆拉力、PHC 桩轴力均有一定幅度的降低, 码头的整体稳定性增大。其中前墙弯矩、PHC 桩轴力减小幅度较大, 在采用泡沫轻质土回填时, 结合现场施工情况, 桩基布置和前墙可以有一定的优化空间, 进而提高工程整体经济性。

计算结果表明, 采用泡沫轻质土材料对板桩码头后方进行回填, 可避免传统回填材料自重较大的缺陷, 减少对前板桩墙的土压力, 使结构更为安全^[6]。

4 结论

1) 国内采用泡沫轻质土的码头案例较少, 本工程通过 PLAXIS 3D 三维有限元数值模拟, 进行码头后方回填泡沫轻质土和中粗砂 2 种材料的结构计算, 并进行了对比分析。

2) 采用泡沫轻质土回填, 利用其不可压缩、直立性好、密度小、施工便捷等特点, 减小了填土自重和对前墙的土压力, 从而减少了板桩码头

的水平位移和码头前沿作业地带的沉降, 增大了码头的整体稳定性, 提高了工程质量。

3) 泡沫轻质土的应用, 有利于助推板桩码头大型化发展, 并可为类似工程的建设提供参考。

参考文献:

- [1] 王婷婷, 钱原铭, 陈良志. 新型深水分离卸荷式钢管板桩码头三维数值模拟研究 [C] // 中国交通建设股份有限公司. 中国交通建设股份有限公司 2016 年技术交流会论文集. 北京: 中国交通建设股份有限公司, 2016, 126-132.
- [2] 李春阳, 麦宇雄, 刘洋. 一种回填泡沫轻质土的板桩码头结构: 201921307973.4 [P]. 2019-08-13.
- [3] 林陈安攀, 孙艺. 基于 PLAXIS 3D 的钢板桩围堰空间数值模拟研究 [J]. 港工技术, 2018, 55(3): 40-44.
- [4] 刘志洋, 张海清. PLAXIS 高级应用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [5] 徐雪松, 王婷婷. 基于 Plaxis 3D 空间的钢圆筒围护结构稳定性控制 [J]. 水运工程, 2014(10): 161-164.
- [6] 王宇, 解宝新. 泡沫轻质土在软弱地基处理中的应用 [J]. 水运工程, 2015(10): 173-176.

(本文编辑 王传瑜)