

· 地基与基础 ·

临水软土基坑双排钢板桩支护结构变形分析

武坤鹏^{1,2,3}, 罗俊兴^{1,2,3}, 梁小丛^{1,2,3}, 周红星^{1,2,3}

(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 510230;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

摘要: 针对软土地层中双排钢板桩支护结构变形过大的问题, 以某船厂基坑为依托, 通过现场测试数据分析、理论计算及数值模拟等手段研究双排钢板桩在软土地层中的变形特性, 分析变形过大的原因。采用极限状态识别和临界状态参数反演的的方式, 提出根据现场数据进行回填反压应急处理的方法以及采用大排距双排灌注桩进行加固的措施。结果表明, 提出的应急处理方法和加固措施取得了良好的效果。双排钢板桩围堰在软土基坑中变形往往较大, 进入临界状态后将迅速产生较大的变形, 应采取有效的坑内加固措施, 避免超挖。

关键词: 双排钢板桩; 临水基坑; 软土地层; 变形控制

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0157-07

Deformation of double steel sheet-pile support structure in soft soil foundation pit adjacent to water

WU Kun-peng^{1,2,3}, LUO Jun-xing^{1,2,3}, LIANG Xiao-cong^{1,2,3}, ZHOU Hong-xing^{1,2,3}

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

2. Key Laboratory of Environment Protection & Safety of Transportation Foundation Engineering of CCCC, Guangzhou 510230, China;

3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

Abstract: Regarding the problem of excessive deformation of double steel sheet-pile in soft soil stratum, we take a foundation pit of a shipyard as an example, study the deformation characteristics of double steel sheet-pile in soft soil stratum by means of field test data analysis, theoretical calculation and numerical simulation, and analyze the causes of excessive deformation. By means of the identification of limit state and the inversion of critical state parameters, we put forward the emergency treatment method of backfill back pressure according to the field data and reinforcement measures of double-row cast-in-place piles with large row spacing. The results show that the proposed emergency treatment method and reinforcement measures achieve good results. Double steel sheet-pile cofferdam is often deformed greatly in soft soil foundation pit, and it will be deformed rapidly when it enters critical state. Effective reinforcement measures should be taken to avoid overbreak.

Keywords: double steel sheet-pile; adjacent water foundation pit; soft soil stratum; deformation control

钢板桩是水运工程中建设船坞、船闸、明挖隧道、码头等水工建筑物常用的挡水和支护结构。其中在大型工程中双排钢板桩运用较多, 由于双排钢板桩目前缺乏较为成熟的计算理论, 设计中往往根据经验或采用有限元方法进行计算。实际

施工过程中常常出现钢板桩变形过大的问题, 这种情况在软土临水地区尤为突出。

对于双排钢板桩设计施工, 国内外学者多采用理论分析、模型试验及数值分析的方法进行研究。张玉成等^[1]综述了双排钢板桩的优缺点和几

收稿日期: 2022-05-10

作者简介: 武坤鹏(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事基坑工程、地基处理、边坡等咨询、设计及研究。

种计算方法，并采用简化的土压力有限元法进行计算，得出简化模型计算的钢板桩内力和位移均比实测大的结论；朱艳等^[2]针对岩溶发育的岩性地基、高渗透性的砂性地基和深厚淤泥质软土地基对双排钢板桩的性能影响和设计约束进行分析，提出这 3 种情况下双排钢板桩特点及应注意问题；史红福等^[3]为解决深厚软土中双排钢板桩拉杆受力不确定的难题，提出拉杆改进措施同时兼顾施工方便、简单快捷、重复利用的特点，对工程实践具有一定的指导意义；Khan 等^[4]开展了砂性地基和黏性地基双排钢板桩静力离心机试验，提出影响双排钢板桩静力稳定性的设计参数；杨熠^[5]分析双排钢板桩围堰内部填土的土压力分布规律，提出一种无内填土的双排钢板桩围堰结构，并分析该围堰结构在施工与运行全过程下受力变形及稳定性；吴留伟等^[6]研究双排钢板桩围堰结构安全性，利用有限元法对围堰施工全过程进行数值分析，得到不同施工工况下结构受力状态以及围堰变形情况；朱艳等^[7]通过水槽试验对比研究立波和近破波对双排钢板桩围堰产生的波浪荷载作用机理，探明不同波态时双排钢板桩围堰的不同响应。

以往的研究多关注于双排钢板桩的计算模型、荷载、稳定性，较少关注双排钢板桩在软土基坑

中应用的变形控制问题及处理措施。本文以某船厂双排钢板桩基坑为例，针对双排钢板桩在施工过程中变形过大的情况，通过现场测试、理论计算及分析等手段研究双排钢板桩在软土地层中的变形特性，并分析变形过大原因，提出相应的处置措施，可为类似基坑项目提供参考。

1 工程概况

某船厂是一个集修、造船为一体的综合性船厂，厂区岸线长 1 439 m，纵深 390 m，总面积 56 万 m²。整个船厂分三期建设：一期工程建设 4 座船台及配套设施，已于 2002 年建成；二期工程建设 4 座船台并续建部分配套设施，已于 2010 年建成；三期工程建设一座长 400 m 的干船坞、舾装码头及其他配套设施等。船厂西侧紧邻河流，基坑开挖深度 12.3 m，受场地条件限制，基坑直接临水，设计采用双排钢板桩作为临时围堰及基坑支护结构，起到挡水支护的双重作用。临河侧采用 JU750×225 型双排钢板桩作为挡水及基坑支护结构，外侧钢板桩长 28.4 m，内侧钢板桩长 23.3 m。坑内采用大范围格栅状水泥土搅拌桩作为被动区坑内加固措施，搅拌桩直径 700 mm，间距 500 mm，设计强度 0.8 MPa。基坑支护断面见图 1。

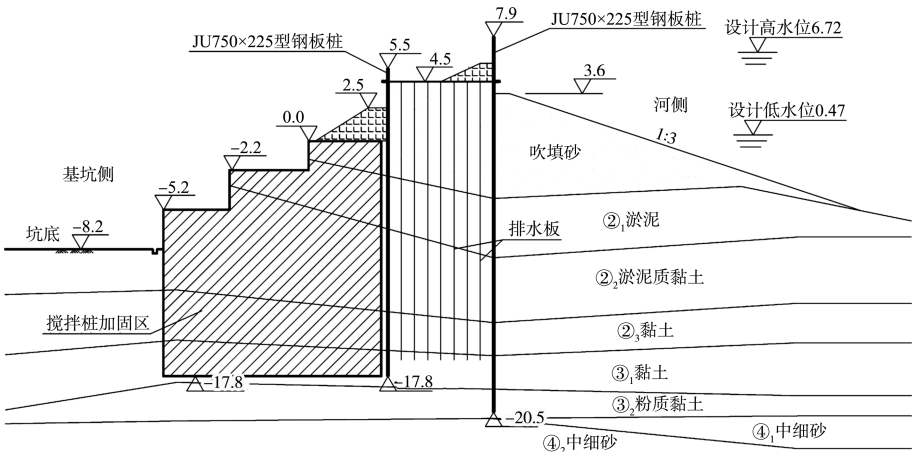


图 1 基坑开挖断面 (单位: m)

场地位于冲积平原上，出露于地表的主要是第四系全新世(Q₄)的湖沼相冲积层，陆域区厚度约为 20 m，其下为第四系更新世(Q₃)的陆相冲洪

积层，工程范围内自上而下主要分布有淤泥、淤泥质黏土、黏土、粉质黏土、中细砂。钢板桩位于淤泥及淤泥质粉质黏土范围内。

2 双排钢板桩变形分析及处理措施

2.1 现场出现的问题

根据设计方案首先打入双排钢板桩, 在钢板桩内侧回填中粗砂并打设排水板, 然后施工坑内水泥土搅拌桩加固体。施工搅拌桩后进行抽芯检测发现仅有上部 4 m 范围内成桩质量较好, 下部土体的强度几乎没有提升, 在未做处理的情况下现场继续施工, 于 2022-02-06 开挖至-3.0 m 时, 局部开挖范围内双排钢板桩位移从 13 mm 突变至 445 mm, 因此考虑采用再打设两排钢板桩作为加固措施。由于进度压力在加固方案没有实施的情况下继续开挖至-5.0 m, 2022-02-09 的最大位移达到 1 277 mm, 2022-02-10 达到 1 913 mm。钢板桩测点布置见图 2, 监测数据见图 3。

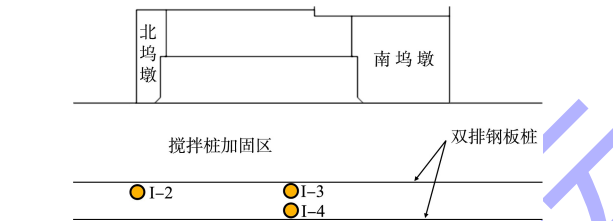


图 2 钢板桩围堰监测点布置

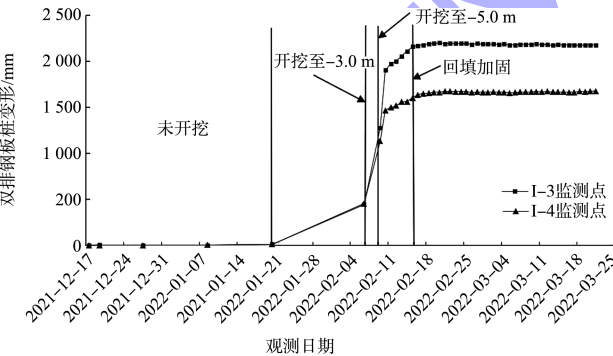


图 3 双排钢板桩位移实测数据

2.2 变形过大原因分析

分析导致现有变形过大的原因将有助于制定应急措施和加固方案, 以保证基坑围堰的安全稳定及确定现有大变形状态下的土体参数, 为后续的处理方案提供依据。

采用极限平衡与有限元计算相结合的方法进行分析。根据本工程的地质参数建议值及相关经

验, 坑内采用 45% 置换率的格栅布置搅拌桩加固, 加固填土按置换率计算复核土层。计算模型土体初始参数和加固土体参数取值见表 1。

表 1 计算模型土体初始参数和加固土体参数取值

状态	土层	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	压缩模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
初始	② ₁ 淤泥	1.57	1.75	7.0	0.7
	② ₂ 淤泥质黏土	1.69	2.15	13.1	1.1
	② ₃ 黏土	1.64	2.41	16.3	1.5
	③ ₁ 黏土	1.92	7.22	25.5	5.5
	③ ₂ 粉质黏土	1.92	9.06	23.8	14.4
	④ ₂ 中细砂	1.70	30.00	0	33.0
	回填砂	1.70	16.00	2.0	28.0
	回填砂袋	1.70	16.00	5.0	30.0
复合土层 (45%置 换率)	② ₁ 淤泥	1.80	7.38	43.4	19.5
	② ₂ 淤泥质黏土	1.80	9.27	41.7	20.0
	② ₃ 黏土	1.80	10.62	67.8	20.9
	③ ₁ 黏土	2.00	30.80	71.5	14.2

采用有限元与极限平衡相结合的方法, 分析施工过程中不同开挖工序对双排钢板桩的影响情况。为了较为真实地模拟实际施工情况, 减小模型的边界效应对计算结果的影响, 计算模型深度从现地表取至细中砂层, 模型深度取 45 m, 宽度取 95 m。

依据现场情况, 坑内土体开挖至-3.0 m 时, 钢板桩顶部变形 445 mm, 土体开挖至-5.0 m 时位移达到 1 277 mm, 在未继续开挖的情况下位移持续增加并达到 1 913 mm, 因此可认为开挖至-5.0 m 为土体塑性变形的临界状态(此时滑动稳定安全系数约为 1.0)。首先对临界状态稳定性进行分析, 由于搅拌桩只在-4.0 m 以上成桩较好, 稳定性计算时滑弧上部可能通过上部搅拌桩, 为了忽略此种情况的有利影响, 将-4.0 m 以上水泥搅拌桩复合土层等效为荷载, 通过调整坑内侧土体强度参数, 使得地基土体滑动剪切面在内侧 1~2 m 位置的高程约为-8.5 m(由于受到基坑变形的侧向挤压作用影响, 坑内 81 根结构桩中有 23 根在-9.0~-8.5 m 范围内的低应变检测结果存在问题), 并且稳定安全系数控制为略小于 1.0, 此时认为调整后的土体参数能反映现有大变形状态。然后使用调

整后的参数进行受力变形计算，分析土体和双排钢板桩结构的位移情况。

当坑内土体强度参数折减为原强度的 0.75 时，地基土体滑动剪切破坏安全系数为 0.985，如图 4 所示，其稳定性接近临界状态，但此时变形计算已无法正常收敛：计算进程为 91.55%时，原搅拌桩加固土体发生失稳变形，使得计算无法收敛，如图 5 所示。

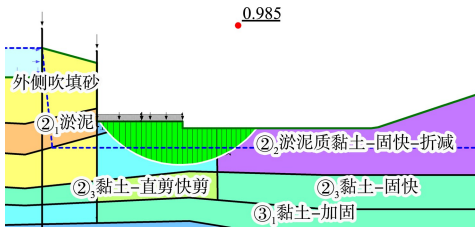
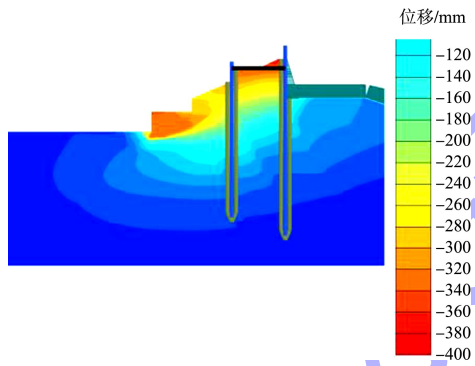


图 4 临界状态稳定性分析



注：位移绝对值最大为 384.5 mm，最小为 0 mm，计算不收敛。

图 5 折减为 0.75 时土体位移云图

当坑内土体强度参数折减为原强度的 0.95 时，地基土体滑动剪切破坏安全系数为 1.221，如图 6 所示，原加固区内土体能够满足稳定性要求，此时用该参数进行的变形计算能正常收敛：土体的水平位移最大值为 420.9 mm，钢板桩的水平位移最大值为 484.7 mm，见图 7。

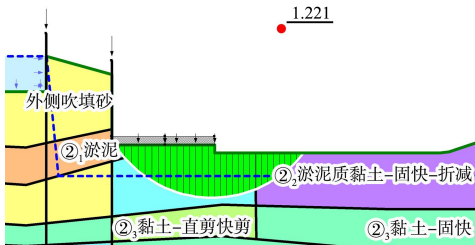
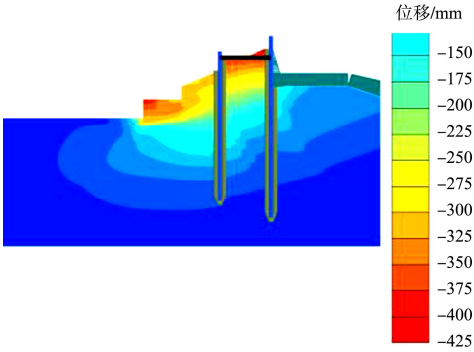


图 6 折减为 0.95 时稳定性分析



注：位移绝对值最大为 420.9 mm，最小为 0 mm。

图 7 折减为 0.95 时土体位移云图

综合对比图 5、7 可知，当原搅拌桩加固区域土体处于稳定状态时，双排钢板桩尽管在不平衡力作用下仍会发生较大变形，但变形数值远小于现场实测值。因此，原搅拌桩加固区域土体发生失稳变形后带动双排钢板桩发生大变形这一原因推测较为合理，也证明了双排钢板桩结构在开挖至-5.0 m 时能够满足稳定性要求，与图 3 的现场实测结果影响规律相吻合。

工程处于滨海地区，每天会经过 1 次涨潮和落潮。钢板桩变形趋于稳定后，于 2022-02-17 开始观测潮汐变化对于钢板桩位移的影响，期间最高潮位 6.155 m，最低潮位 2.266 m(表 2)，由图 8 可知钢板桩变形随着潮位升高而向坑内增大(正值)，随着潮位的降低向坑外增大(负值)，呈现出周期性变化趋势，但是整体变化幅度较小，维持在毫米级别，总体来说稳定状态下潮汐变化对钢板桩的位移影响较小。

表 2 潮位观测结果

序号	监测时间	潮位/m
1	2022-02-17T16:30	5.994
2	2022-02-18T07:30	3.674
3	2022-02-18T17:00	5.147
4	2022-02-19T10:15	2.266
5	2022-02-19T17:30	6.155
6	2022-02-20T07:30	5.017
7	2022-02-20T14:30	2.928
8	2022-02-21T07:30	5.431
9	2022-02-21T14:30	2.285
10	2022-02-22T07:30	5.356
11	2022-02-22T15:00	2.416
12	2022-02-23T10:20	4.125

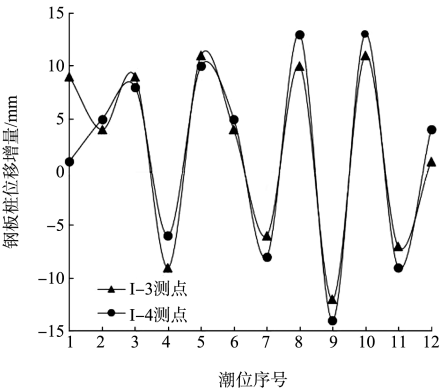


图 8 潮位变化与钢板桩变形关系

结合分析结果及现场资料，导致基坑发生大变形的原因为：已施工的水泥搅拌桩在高程-4.0 m以下部分未能满足设计强度要求且在开挖至-5.0 m 时未作加固而超挖，由于高程-4.0 m 下伏淤泥质层因未得到有效加固而导致抗剪强度不足，开挖面高程以上的水泥搅拌桩及土体整体往坑内发生剪切滑动破坏。进一步地，由于-4.0~0 m搅拌桩及土体往坑内发生位移，并且-4.0 m 以下软弱土层未达到加固要求，导致原设计由水泥搅拌桩提供的坑内被动抗力不足以抵抗外侧荷载，进而使双排钢板桩结构整体往坑内发生大变形，且主要发生在上部发生剪切破坏位置。根据现场情况，钢板桩发生近 2 m 的变形并未破坏，可推测钢板桩绕底部发生了一定角度的旋转或平移。

2.3 坑内加固措施

为了控制双排钢板桩变形不至于造成基坑支护发生失稳破坏，对开挖区域进行应急回填砂处理。根据现场监测数据分 5 个阶段逐步回填的方法，如图 9 所示。

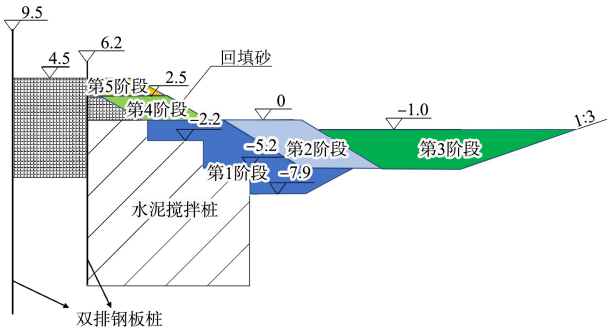


图 9 回填砂断面 (单位: m)

首先进行第 1 和第 2 阶段的回填稳住滑动剪出口，位移发展得到控制。第 3 阶段采用逐步向后推填的方式进行，通过计算及现场实测数据分析，回填宽度对于钢板桩位移的影响范围为坑深的 1.2~1.5 倍，宽度再增加对于位移的影响较小。第 4 和第 5 阶段增加回填高度对于位移控制效果较为明显，回填后位移明显放缓，如图 10 所示。该应急回填方案最终使双排钢板桩断面土体及支护结构变形趋于稳定，基坑支护结构重新达到安全状态。

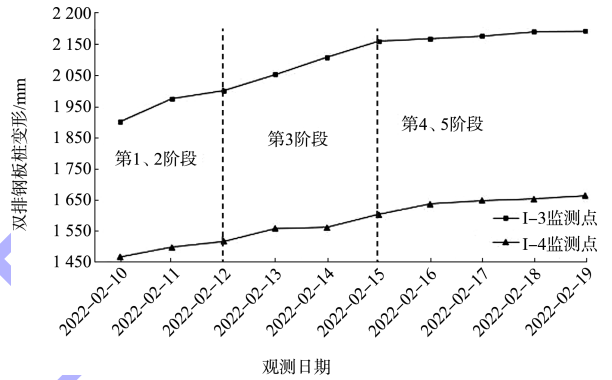


图 10 各回填阶段钢板桩位移实测值

基于现场情况、工期进度、经济成本及施工质量保障措施等综合需求，考虑更改坞口基坑双排钢板桩断面支护形式。由于原支护设计方案采用的双排钢板桩已经施工完毕，现将水泥搅拌桩加固方案进行变更，由上述大变形原因分析可知，加固土体、控制变形的关键在于截断滑动剪出口，因此，加固方案备选有：3 排预应力高强混凝土 (PHC) 管桩(排距 3 m)、3 排钢管桩(排距 4 m)、双排灌注桩(排距 8 m)、双排管桩组合双排钢板桩。经综合评估新支护形式加固后的土体位移、结构受力位移及围堰稳定性结果、施工措施便捷程度及经济成本等方面因素，最终采用双排灌注桩作为水泥搅拌桩的替换方案，见图 11。

此外，灌注桩施工是在场地回填至围堰处于稳定状态下进行的，同时灌注桩采用旋挖成孔工艺，孔壁通过泥浆护壁而能保持稳定，且旋挖灌注桩是非挤土桩，因此对周边环境影响小，参考相关工程经验，可认为灌注桩施工不会对坞口桩基造成不利影响。

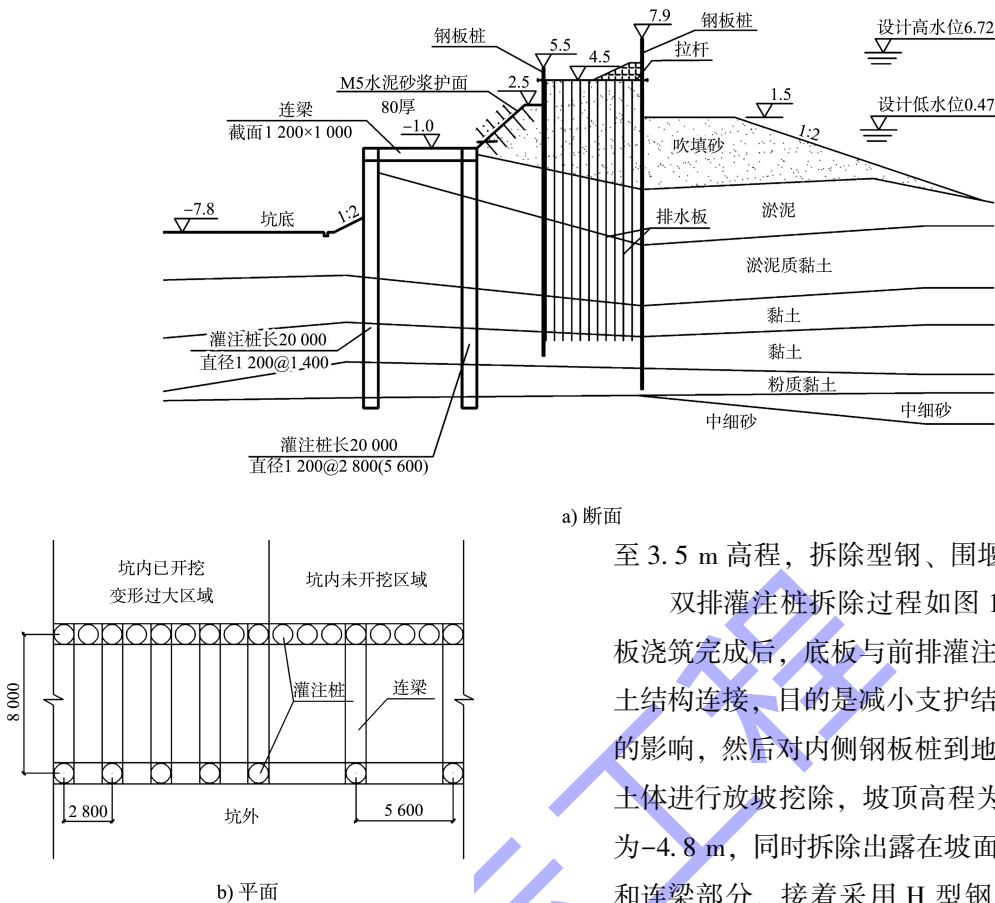


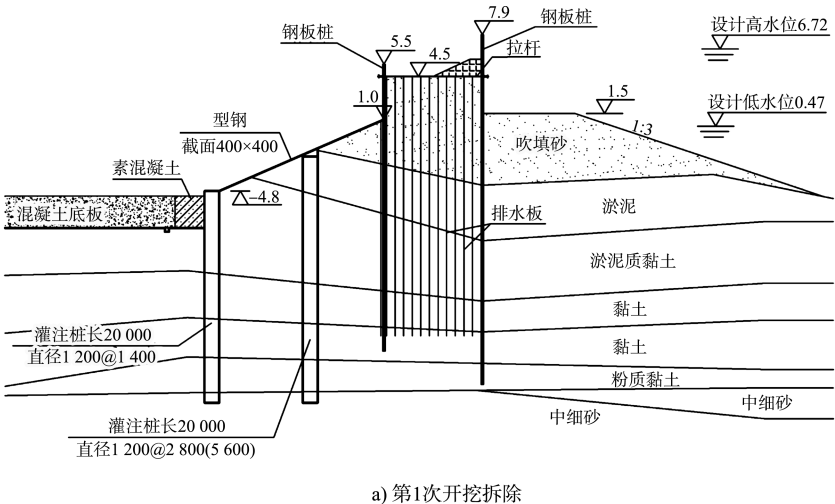
图 11 双排灌注桩加固布置 (高程: m; 尺寸: mm)

2.4 加固措施的拆除方案

根据现场施工安排,在主体结构(坞墩、底板、泵房及直立护岸)、周边基坑回填及坞门安装均施工完成后,进行港池疏浚,设计港池疏浚底高程为-4.8 m,因此双排灌注桩结构-4.8 m 以上均需要拆除。为确保拆除质量及效率,计划陆上作业。待灌注桩凿除完成后,坞门与围堰中间部位灌水

至 3.5 m 高程,拆除型钢、围堰拉杆及附属结构。

双排灌注桩拆除过程如图 12 所示。在基坑底板浇筑完成后,底板与前排灌注桩之间浇筑素混凝土结构连接,目的是减小支护结构变形对坞口桩基的影响,然后对内侧钢板桩到地基处理边线范围内土体进行放坡挖除,坡顶高程为 1.0 m,坡底高程为-4.8 m,同时拆除出露在坡面上的灌注桩、冠梁和连梁部分,接着采用 H 型钢(截面为 400 mm×400 mm)支撑在前排灌注桩和内侧钢板桩之间,采用焊接方式连接,继续开挖土体至后排灌注桩-4.8 m 位置,接着拆除-4.8 m 以上的钢筋混凝土结构。H 型钢的水平间距初步设置为 8.4 m(相当于每 6 根前排灌注桩设置 1 根 H 型钢),H 型钢在整个拆除过程中发挥出换撑传力的作用,把作用在双排钢板桩围堰上的荷载传递到前排灌注桩上,避免灌注桩拆除过程中双排钢板桩围堰变形过大。



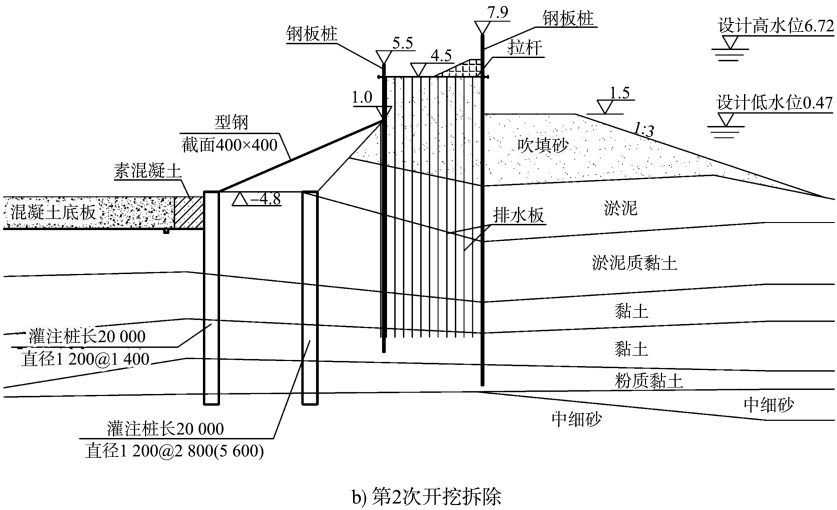


图 12 灌注桩拆除方案

3 结论

- 1) 通过临界状态识别和参数反演方法对双排钢板桩变形过大进行分析是合理且可靠的, 为变形过大原因分析、精确回填以及加固措施计算提供了一种分析思路。
- 2) 工程实践表明, 在深厚软土采用水泥土搅拌桩作为被动加固效果往往较差, 尤其在临水软弱深基坑中应当慎用。
- 3) 设计中需要考虑坑内加固土体的折减, 单轴搅拌桩功率较小, 不能对土体进行充分搅拌, 在深厚软土基坑工程中应尽量避免采用单轴搅拌桩进行土体加固。
- 4) 双排钢板桩围堰往往在软土基坑中变形较大, 进入临界状态后将迅速产生较大的变形, 相对悬臂高度变形可达 17.7%, 应采取有效的坑内加固措施, 避免超挖。
- 5) 钢板桩发生较大位移后, 应急回填宽度对位移的影响范围为基坑深度的 1.2~1.5 倍, 先对滑动剪出口进行一定宽度回填加固后再进行上部回填, 对基坑上部进行局部回填对位移控制效果较好。
- 6) 采用大排距非等间距双排桩作为双排钢板

桩围堰在软土层中的坑内加固措施是可行且经济合理的, 可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 张玉成, 杨光华, 姜燕, 等. 软土地区双排钢板桩围堰支护结构的应用及探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 659-665.

[2] 朱艳, 石振明, 卢耀如, 等. 海岸带特殊地质条件下双排钢板桩适用性案例分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1849-1861.

[3] 史红福, 李涛. 深厚软弱土层中新型的双排钢板桩围堰结构设计[J]. 中国市政工程, 2021(6): 120-123, 133.

[4] KHAN M R A, TAKEMURA J, KUSAKABE O. Centrifuge model tests on behavior of double sheet pile wall cofferdam on clay[J]. International journal of physical modelling in geotechnics, 2006, 6(3): 1-23.

[5] 杨熠. 双排钢板桩围堰结构受力变形及稳定性分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.

[6] 吴留伟, 郑国兵, 吴蕾, 等. 双排钢板桩围堰在超深厚软土地基中的应用[J]. 水运工程, 2018(3): 143-148.

[7] 朱艳, 林靖, 彭铭. 立波和近破波对双排钢板桩围堰作用的试验研究[J]. 水利水电科技进步, 2022, 42(1): 85-90, 102.