



临水船闸基坑水泥土搅拌桩施工对围堰的影响

武坤鹏^{1,2,3}, 周红星^{1,2,3}, 陈 胜^{1,2,3}, 梁小丛^{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, 广东 珠海 519000)

摘要: 临水船闸基坑由于需要提供坑内较大作业空间而较多地采用重力式水泥土搅拌桩作为支护结构, 基坑外侧常采用钢板桩作为临时的挡水围堰。针对水泥土搅拌桩施工过程对钢板桩围堰产生位移过大的问题, 以某船闸基坑为例, 采用数值模拟与现场监测数据相结合的方法研究搅拌桩施工过程中对于钢板桩临时围堰的影响, 分析钢板桩围堰变形过大的原因。通过现场孔隙水压力试验得出搅拌桩施工过程中土体孔压在深度和宽度上的变化规律和水泥土搅拌桩施工对周围土体的影响范围, 并提出一种钢板桩围堰变形过大的解决方案。本研究可为类似基坑的设计和施工提供借鉴。

关键词: 水泥搅拌桩施工; 临水基坑; 超孔隙水压力; 环境影响

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0188-07

Influence of cement soil mixing pile construction on cofferdam of ship lock foundation pit adjacent to water

WU Kun-peng^{1,2,3}, ZHOU Hong-xing^{1,2,3}, CHEN Sheng^{1,2,3}, LIANG Xiao-cong^{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: Due to the need to provide a larger working space in the pit of the ship lock near the water, the cement mixing pile is often used as the supporting structure. Steel sheet piles are mostly used as temporary water-retaining cofferdams outside the foundation pit. Taking the foundation pit of a ship lock as an example, we analyze the influence of temporary mixing cofferdams on steel sheet piles during the construction of cement mixing, and obtain the variation law of soil pore pressure during the construction of mixing piles through the field pore water pressure test, based on which a solution for excessive deformation of the cofferdam is proposed. According to the field pore water pressure test, we obtain the variation law of soil pore pressure in the depth and width of the mixing pile construction process and the influence range of the cement soil mixing pile construction on the surrounding, and propose a solution for the excessive deformation of steel sheet pile cofferdam. This study can provide a reference for the design and construction of similar foundation pits.

Keywords: construction of cement mixing pile; adjacent water foundation pit; excess pore water pressure; environmental impact

水泥土搅拌桩广泛用于基坑支护、边坡加固、软土地基处理等工程中^[1-2]。由于现有设备的局限性, 其施工不可避免地会对周围环境产生一定的

影响, 尤其是在软土地层中影响更加明显。对于搅拌桩施工的影响问题国内外学者多采用现场试验及数值分析的方法进行研究^[3-4]。叶观宝分析了

收稿日期: 2020-05-05

作者简介: 武坤鹏(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事基坑工程、地基处理、边坡等岩土咨询、设计及科研工作。

搅拌桩施工对周围土体产生扰动的原因, 并提出如何通过工艺过程的控制来降低扰动^[5]。潘行庄通过对水泥土搅拌桩施工期间监测数据的分析, 指出淤泥质土中搅拌桩的施工会引起周围土体严重的不均匀变形^[6]。Shen 等对土体在搅拌桩施工过程中产生的剪切力进行了室内试验和现场试验, 得到搅拌桩施工过程中刀片转动产生的切力对土体孔压影响^[7-8]。基于 Shen 的研究, 吴燕开提出粉喷桩施工过程中周围土体超静孔隙水压力的分布^[9]。沈水龙基于室内土体试验成果, 分析了搅拌桩施工引起的孔隙水压力的变化规律^[10]。桩体的施工往往借鉴圆柱形孔扩张理论^[11], Chai 等基于圆柱形孔扩张理论, 提出适用于湿喷法和干喷法 2 种情况的周围土体侧向位移的方法^[12]。

以往的研究大多是针对搅拌桩对土体的作用本身进行研究, 陆地上或者是水域施工水泥土搅拌桩的区域在平面上一一般是连续的, 即搅拌桩周围的水土压力相同, 环境影响不容易引起重视。而在水陆交界处由于水泥土搅拌桩两侧的压力不平衡施工中会造成土体偏向一侧的压力, 对工程造成危害。本文以某水泥土搅拌桩作为支护结构

的船闸基坑工程为例, 针对搅拌桩施工过程中邻近钢板桩产生了较大位移的问题, 通过数值模拟分析、监测数据分析及现场孔压试验分析搅拌桩施工过程对于钢板桩围堰的影响。

1 工程概况

某船闸于 1989 年建成投产, 至今已有近 30 年的历史, 期间进行过 2 次大修, 由于部分运营指标达不到设计标准, 船闸现状存在较为严重的安全问题。因此新建 1 座主体结构满足 1 000 吨级船舶通航要求的船闸, 船闸有效尺度为 166 m×16 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)。船闸基坑采用格栅布置的水泥土搅拌桩重力式挡墙作为支护结构, 支护搅拌桩直径 700 mm, 设计 28 d 无侧限抗压强度为 0.8 MPa, 桩长 19.5 m, 基坑开挖深度 6.9 m。船闸上闸地势较低, 上闸首紧邻珠江, 因此采用钢板桩作为挡水结构形成干施工作业条件。围堰钢板桩型号为拉森 IV, 桩长为 29 m, 桩顶高程为 3.0 m, 底高程为 -26.0 m。钢板桩外侧设置钢结构栈桥作为人行便道, 船闸平面布置见图 1。

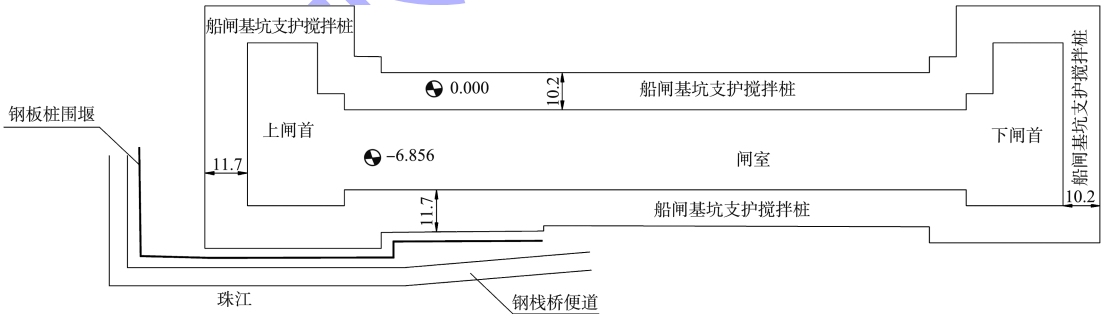


图 1 船闸基坑平面布置 (单位: m)

该工程地处珠江三角洲, 地貌为海陆交互冲积平原, 以河口三角洲为基本特征。地形平坦, 堤后原始地面主要为水塘、荒地、藕池。建设范围内自上而下主要分布有淤泥、淤泥质粉质黏土、粗砂、砂质粉质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩。钢板桩位于淤泥及淤泥质粉质黏土范围内。

2 支护搅拌桩施工产生的影响

2.1 现场出现的问题

根据设计方案首先打入钢板桩并在钢板桩内侧回填粉细砂及黏土垫层整平场地, 然后施工水泥土搅拌桩支护结构。在向上闸首钢板桩围堰内回填粉细砂、黏性土垫层及水泥搅拌桩施工过程中, 钢板桩持续发生位移。尤其在钢板桩围堰内

水泥搅拌桩施工期间，钢板桩围堰连同靠近围堰的人行栈桥持续发生了较大位移，监测点布置见图 2。钢板桩向航道侧发生的最大位移达1 814 mm (9[#]监测点)，最大位移速率 176 mm/d；人行栈桥的最大位移达 1 337 mm (5[#]监测点)，最大位移速率 149 mm/d。钢板桩及人行栈桥变形情况见图 3、4。

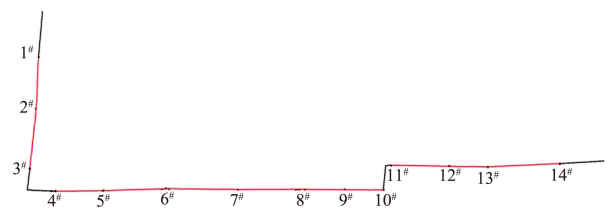


图 2 钢板桩围堰监测点位布置



图 3 钢板桩围堰偏位



图 4 人行栈桥桩基偏位

2.2 水泥土搅拌桩施工过程分析

2.2.1 数值分析模型

考虑施工过程中的时效性及三维空间特性，采用三维有限元方法，利用岩土工程专用软件 Midas/GTS，分析施工过程中搅拌桩打设对钢板桩

的影响。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强风化花岗岩底部，模型深度取 50 m，长 170 m，宽 120 m (图 5)。

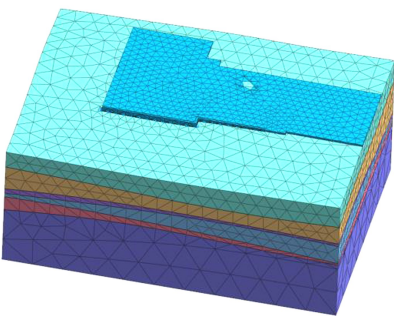


图 5 三维有限元计算模型

施工期间布置的监测点位移情况如下：测点 1[#]~3[#]距离施工区域较远且发生的位移变形较小，测点 4[#]~14[#]距离施工区域近且发生的位移变形较大。因此，选择对变形比较敏感的测点 4[#]~14[#]进行模拟分析。测点设置见图 6。

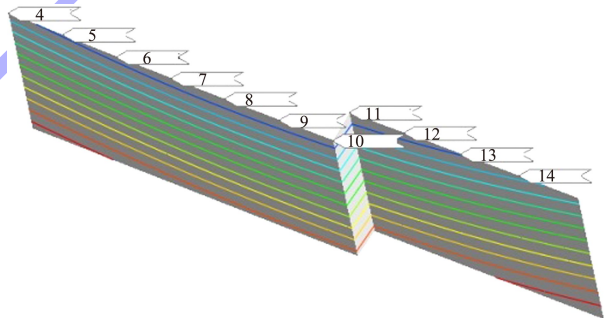


图 6 计算模型监测点设置

2.2.2 计算参数及荷载条件

根据地质参数建议值及工程经验，数值模型参数取值见表 1。

表 1 模型计算参数

土层	密度/ (t·m ⁻³)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
淤泥	1.61	2.10	6.5	3.5
淤泥质粉质黏土	1.69	2.61	8.6	4.2
粗砂	1.80	25.00	0.0	35.0
砂粉质黏土	1.85	3.58	15.3	10.2
全风化花岗岩	2.02	30.00	40.0	35.0
强风化花岗岩	2.26	35.00	80.0	45.0

原状土取表 1 中所列参数值，采用 2 个阶段模拟水泥土搅拌桩的打设：第 1 阶段搅拌桩为淤

泥与水泥土的混合物取较小的土体参数，计算值采用按十字板试验确定的扰动土强度；第 2 阶段为搅拌桩固化后的状态取较大的土体参数，计算值采用由设计强度(0.8 MPa)确定的参数。各施工阶段中根据实际监控量测结果反算水泥土搅拌桩复合体的参数。本工程主要荷载来自于填土荷载、运输车辆及整平机械荷载、搅拌桩施工时的设备荷载、自卸汽车荷载等。

现场搅拌桩施工机械重力 250 kN，机械设备下设 4 个支撑点，每个支撑点面积为 1.5 m²，据此计算出施工机械荷载为 41.6 kPa，按面荷载施加，并沿打桩方向移动。按准静态模拟，将施打某一搅拌桩分为多个施工过程，每个施工过程中施加搅拌桩机械荷载，进入下一过程后撤除第一阶段机械荷载，变更荷载位置重新施加。运输土体的自卸汽车负重后整车重力 150 kN，每车 4 个轮胎，每个轮胎与地面接触面积按 0.05 m² 计算，由于自卸汽车行走速度快，轮胎接触面积与整个场地面积相比可以忽略不计，按可变动集中荷载考虑。整平机械为反铲挖掘机，自重力 180 kN，履带面积 2.88 m²，计算得到荷载为 62.5 kPa，按与履带面积相同的面荷载施加，具体实施方法同搅拌桩机械荷载。

2.2.3 搅拌桩分区施工过程影响分析

水泥土搅拌桩施工顺序及完成现状见图 7，其中 1①区、1②区、1③区、1④区、2①区、2②区、2③区、2④区、3 区为已经完成搅拌桩施工的 9 个区域，第 4 区为待施工的搅拌桩区域。钢板桩采用壳单元进行模拟。本次分析各个施工阶段搅拌桩施工后钢板桩的位移情况并对第 4 区施工后钢板桩的变形进行预测。

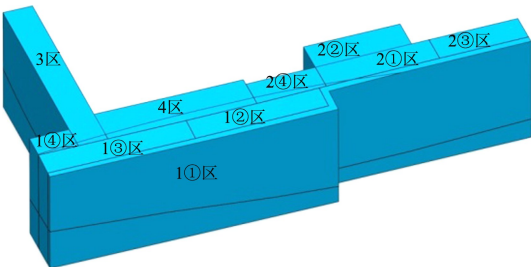


图 7 搅拌桩分区施工

根据上述施工顺序计算各阶段搅拌桩施工后钢板桩围堰的位移，由于施工阶段较多，仅列出 3 区及 4 区搅拌桩施工完成后的计算结果(图 8)。

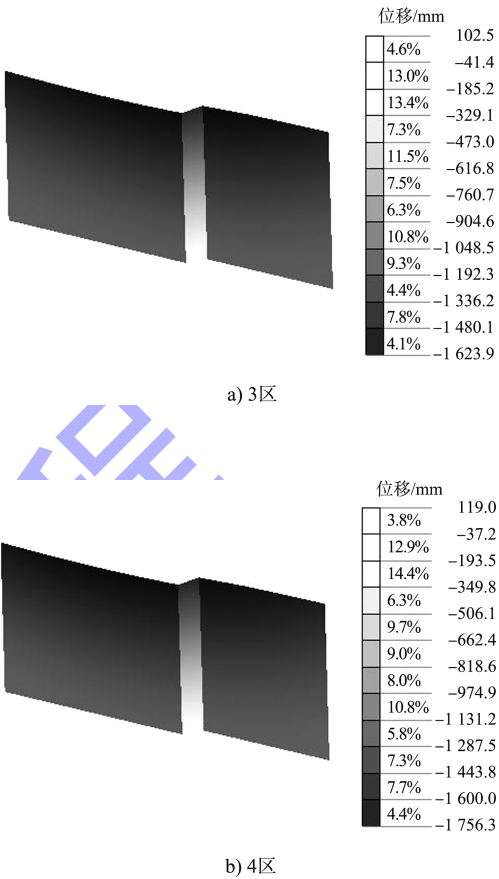
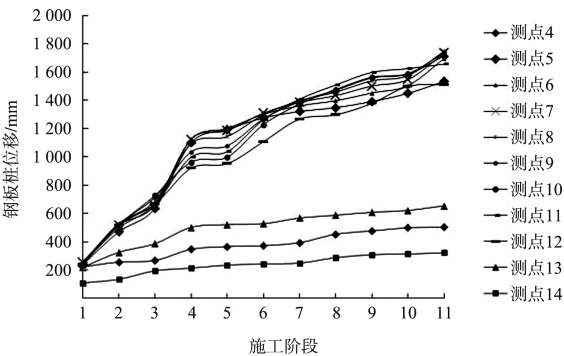


图 8 填土 1.5 m 时搅拌桩施工后钢板桩变形

根据上述计算云图得知各阶段最大位移变化(图 9)。



注：1 为填土施工；2 为 1①区搅拌桩施工；3 为 1②区搅拌桩施工；4 为 1③区搅拌桩施工；5 为 1④区搅拌桩施工；6 为 2①区搅拌桩施工；7 为 2②区搅拌桩施工；8 为 2③区搅拌桩施工；9 为 2④区搅拌桩施工；10 为 3 区搅拌桩施工；11 为第 4 区搅拌桩施工。

图 9 模拟各施工阶段钢板桩监测点位移变化

数值模拟计算结果表明，钢板桩底部位移较小，未发生平移，钢板桩绕底部发生转动及一定程度的弯曲，产生了较大的变形位移，当前钢板桩尚未出现屈服迹象。若进行第 4 区搅拌桩施工，钢板桩位移将会继续增加，最大增量约 130 mm(9# 监测点)；钢板桩桩顶变形较大的 8#~11# 监测点实测位移随时间变化曲线见图 10。现场进行了 4 区的试施工，在施工 2 排搅拌桩后钢板桩位移增加了 53 mm，因此放弃了继续施工的方案。

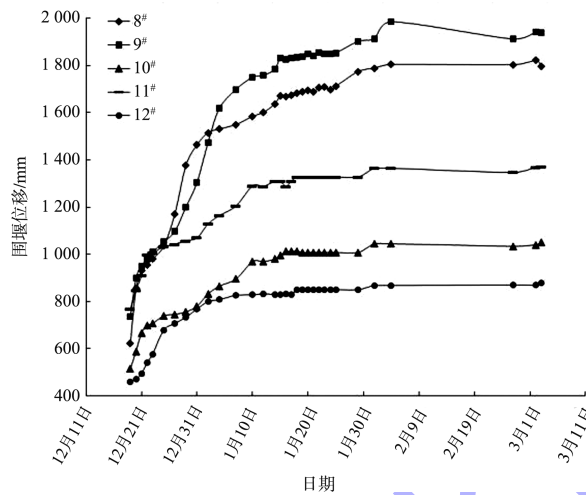


图 10 钢板桩位移现场实测值

将变形最大的 9# 监测点计算值和相对应时间点的实测值进行对比分析见图 11，两者变形趋势基本相同，呈现出施工初期变形发展较快后期发展较慢逐渐趋于稳定的趋势。实测值在曲线前段出现缺失，现场发现异常时已经出现了约 650 mm 的位移，且发生的时间很短。由于数值计算为理想条件，初期过程相对缓和。搅拌桩在施工初期对钢板桩产生的位移占总位移的 35%左右，若此时进行加固处理对后续变形控制将起到重要的作用。通过拟合分析发现实测值和计算值均能较好地符合对数分布的形式，相关系数较高，可利用对数函数实现对钢板桩位移变化趋势的预测。

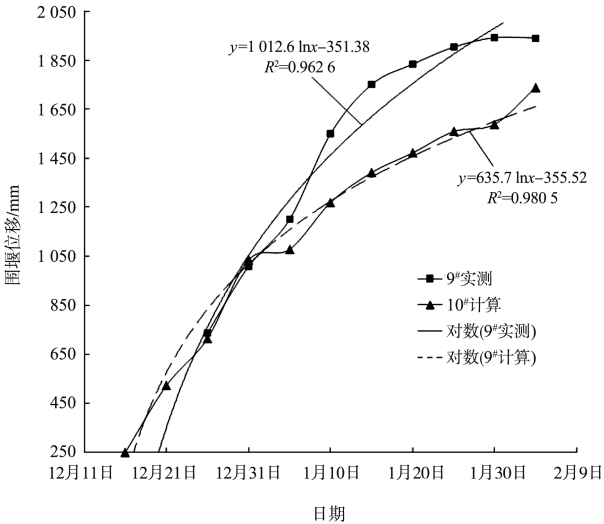
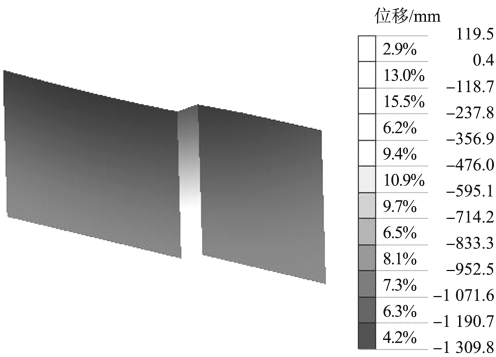


图 11 钢板桩位移对比及趋势拟合

2.2.4 填土条件改变影响分析

由于原设计的钢板桩围堰内高程为±0 m，填土厚度为 0.5 m。现场施工时，工作面找平至±0 m后仍为淤泥，不具备搅拌桩和其他施工机械的作业条件。考虑到本项目 5 a 一遇的水位为 2.614 m，当水位超过粉细砂顶高程 0.5 m 后，河水会渗入到围堰内，导致无法施工，在粉细砂上再回填 1 m 厚的黏土，因此实际填土厚度为 1.5 m。前述 2.2.3 节的分析都是基于填土 1.5 m 进行的计算，为了得到钢板桩位移过大是否是改变原设计填土厚度造成的，现将填土改为 0.5 m 进行重新计算，后续施工过程及机械荷载与填土 1.5 m 时一致，计算结果见图 12。



a) 3区

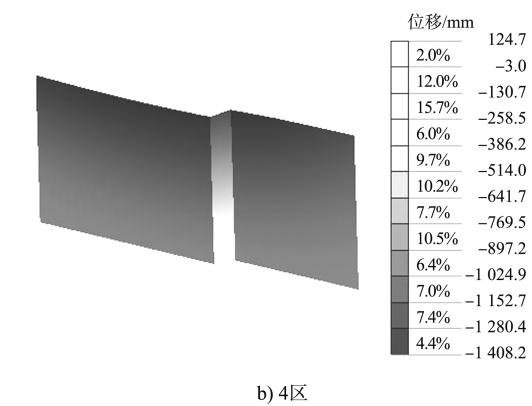


图 12 填土 0.5 m 时搅拌桩施工后钢板桩变形

将填土 0.5 m 与填土 1.5 m 两种情况下钢板桩变形最大监测点 9# 位移随施工步骤变化进行对比, 结果见图 13。

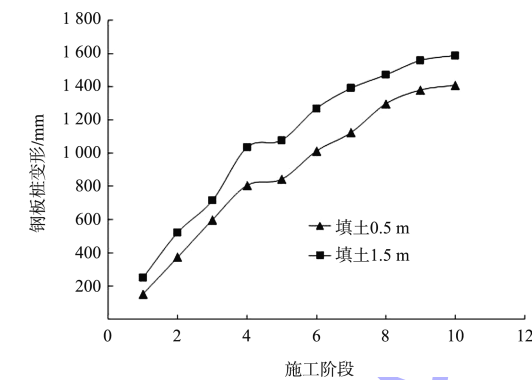


图 13 2 种工况下钢板桩变形对比

由上述分析可知, 填土厚度由 1.5 m 减小至 0.5 m, 各施工阶段钢板桩变形依然较大, 钢板桩最大变形为 1 409 mm(9# 点), 与 1.5 m 厚填土相比位移变形减小了 10%。填土厚度的增加不是造成钢板桩过大位移变形的主要因素。

2.2.5 孔隙水压力测试

为了研究水泥土搅拌桩施工对周边环境的影响程度, 分析钢板桩产生位移的原因, 在项目附近同样地质条件下进行孔隙水压力测试试验。测试搅拌桩桩长 15 m、桩径 700 mm, 在距离搅拌桩 0.7、1.4、2.1、2.8 m 的水平线上个布置 4 个孔压观测孔, 每个观测孔分别在 2、4、6、8、10、12、14 m 位置安装孔压计, 测点布置见图 14。现场埋设孔隙水压力计后静置 48 h 后采取初始值。在搅拌桩施工完成后立即进行空隙水压力的采集, 得到的各个测点的超静孔隙水压力分布(图 15)。

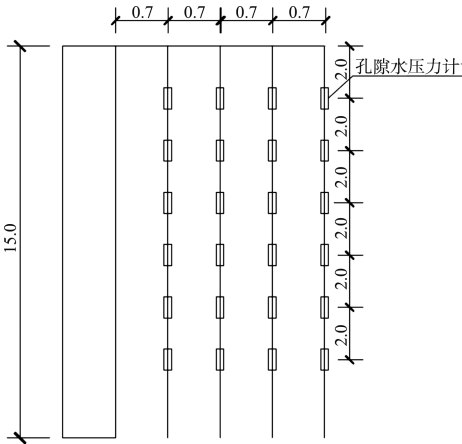


图 14 孔隙水压力测点布置 (单位: m)

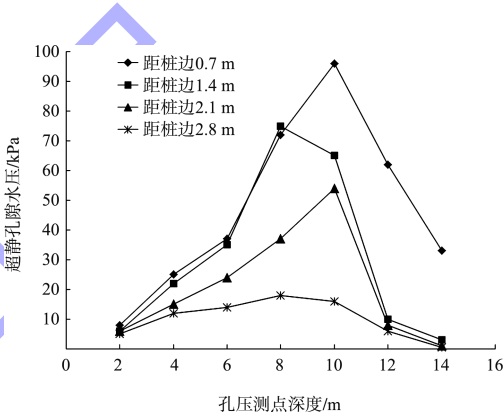


图 15 不同测点超静孔隙水压力分布

根据测试结果可知, 由于搅拌桩施工引起的超静孔隙水压力随深度先增加后减小, 最大值在 8~10 m 深度即桩中间靠下位置。随着与桩边距离的增大超静孔隙水压力的衰减比较明显, 在 1 倍桩径位置测孔最大超静孔隙水压力为 98 kPa, 在 4 倍桩径位置的测孔只有 17 kPa。可认为搅拌桩施工对 4 倍桩径以外的范围影响较小。本项目施工期间搅拌桩距离钢板桩最近处仅 1 m, 产生的超静孔隙水压力较大, 使钢板桩上部发生了位移。由于下部产生的孔压较小, 因此钢板桩下部的位移也较小。

2.2.6 处理措施

根据分析结果和实测数据可知, 若继续施工, 搅拌桩钢板桩围堰变形将继续增加。因此, 考虑先施工靠基坑开挖侧的搅拌桩, 在搅拌桩中间插入型钢增强刚度, 并通过钢拉杆将型钢与钢板桩围堰进行连接, 见图 16。

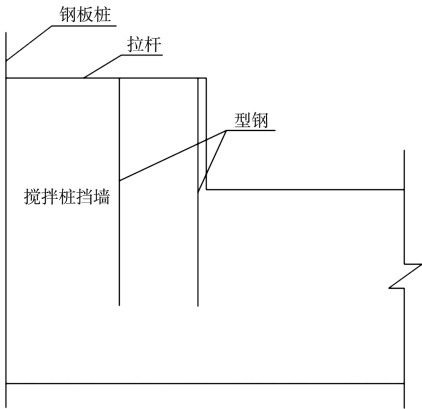


图 16 处理方案断面

为论证该方案的可行性建立了数值模型并进行分析(图 17)，计算参数见表 1。分析插入型钢及拉杆的内力及基坑开挖后变形及搅拌桩应力情况，结果见表 2。

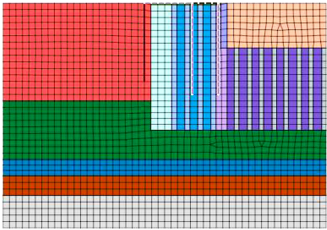


图 17 处理方案计算模型

表 2 加固后搅拌桩及钢板桩计算结果

最大竖向应力/kPa		最大水平向应力/kPa		最大剪应力/kPa	开挖后挡墙最大位移/cm	应力合力/kPa	
压	拉	压	拉			压	拉
243.00	61.80	175.00	35.40	45.40	4.90	299.46	71.22

根据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》最大搅拌桩挡墙最大压应力小于水泥土开挖龄期时的轴心抗压强度设计值(0.8 MPa)，最大拉应力小于 0.15 倍水泥土轴心抗压强度设计值(0.12 MPa)，最大剪应力小于 1/6 的水泥土轴心坑压强度设计值(0.133 MPa)。计算结果满足上述要求，根据后续现场开挖情况，在搅拌桩施工过程中钢板桩位移无明显增加，基坑开挖后位移较小。

3 结论

1)采用三维数值计算的方法对搅拌桩施工过程进行模拟分析是可行的，现场试验证实其对后续施工变形的预测结果较为准确。

2)钢板桩后填土厚度从 1.5 m 减小至 0.5 m，但钢板桩变形位移只减少 10%，说明填土厚度增大不是造成钢板桩过大位移变形的主要因素。

3)软土地层中钢板桩受到水泥土搅拌桩施工影响的主要因素是超静孔隙水压力，搅拌桩施工过程中对 4 倍桩径范围内土体孔压影响显著，并沿深度呈先增加后减小的趋势。

4)利用对数函数可较为准确地对钢板桩位移进行预测，水泥土搅拌桩施工初期对钢板桩围堰产生的位移贡献率约为 35%，此时进行处理对后续位移控制将起到关键作用。

5)采用在基坑侧搅拌桩内插设型钢并与钢板

桩对拉的方案既较好地解决了钢板桩位移大的问题，又未对基坑开挖造成影响。

参考文献：

[1] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].2 版.北京:中国建筑工业出版社,2000.

[2] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:水利水电出版社,1996.

[3] 沈一帆,胡敏云,计国贤.基坑水泥搅拌桩桩身水平位移影响因素的颗粒流数值模拟[J].浙江工业大学学报,2011,39(30):273-278.

[4] 孙宪春.水泥深层搅拌桩的设计及施工方法技术要点[J].筑路机械与施工机械化,2008,25(10):63-65.

[5] 叶观宝,王艳.如何控制水泥土搅拌法对土体的扰动[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):263-267.

[6] 潘行庄,潘建华,许伟成.深层搅拌桩施工对环境的影响[J].大坝观测与土工测试,2001,25(1):46-49.

[7] SHEN S L, MIURA N, HAN J, et al. Evaluation of property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns[C]//JOHNSEN L F, BRUCE D A, BYLE M J.Grouting and ground treatment.Reston: ASCE Press, 2003: 634-645.

[8] MIURA N, SHEN S L, KOGA K, et al.Strengthen change of the clay in the vicinity of soil cement column[J].Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering(ASCE), 1998, 596(Ⅲ-43):209-221.