

软土地基条件下港区内大型排洪通道结构设计



曹凯平, 章康, 孔友南, 程培军

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 南方地区某码头工程需要在港区内设置一条大型排洪通道, 受填海政策的影响堆场面积较小, 表层为厚 20 m 左右的淤泥及淤泥质土, 须进行地基加固。对排洪通道的结构形式进行比选, 采用水泥搅拌桩进行软土加固; 因钢板桩施工速度快, 无需开挖基坑, 故推荐采用钢板桩; 对于水泥搅拌桩加固板桩的计算方法, 给出合理建议, 并通过 PLAXIS 软件对板桩墙两种加固方案进行比较验算。结果表明, 将水泥搅拌桩加固体作为一个刚体考虑, 可避免过度考虑加固体作用而导致不安全的情况; 板桩墙前加固方案比板桩墙后加固更有利。

关键词: 软土地基; 排洪通道; 钢板桩; 水泥搅拌桩

中图分类号: U 653

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0171-06

Structural design of flood-relief channel in port area with thick soft soil foundation

CAO Kai-ping, ZHANG Kang, KONG You-nan, CHENG Pei-jun

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: A wharf project in the southern area needs to be set up a large flood-relief channel in the port area. Restricted by the reclamation policy, the project has a relatively small storage yard. The surface soil layer is silt and silty soil with a thickness of about 20 m, which requires ground consolidation. We compare and select the structure of the flood-relief channel, use cement mixing piles to strengthen the soft soil foundation, recommend the steel sheet pile structure because of its fast construction speed and without foundation pit, give the reasonable suggestions for the calculation method of sheet pile strengthened by cement mixing pile, and compare and check the two strengthen schemes of sheet pile wall by PLAXIS software. The results show that the reinforced body of the cement mixing pile can be considered as a rigid body, which can avoid unsafe condition caused by excessive consideration of solid addition. The reinforcement scheme in front of sheet pile wall is more favorable than that behind sheet pile wall.

Keywords: soft soil foundation; flood-relief channel; steel sheet pile; cement mixing pile

港区布置有时会与区域水利规划发生关联, 后方地区的排洪通道需要从港区内通过。传统的排洪通道一般可采用斜坡形式, 其结构简单、施工便利, 但因顶面宽度大会占用较多的港区面积及较长的岸线。现今, 国内岸线资源日益减少, 在国家严控填海的政策影响下, 不少新建港区的堆场面积已显不足, 如继续采用斜坡式排洪通道, 会对港区运营产生不利的影响。

南方某码头工程受后方水利规划影响, 需要

在港区内设置一条大型排洪通道。工程受填海政策的影响, 自身堆场面积较小。如采用斜坡式结构, 排洪通道顶宽约 140 m, 减少堆场面积达 2.1 万 m²; 如采用直立式方案, 则排洪通道顶宽为 55 m, 仅减少堆场面积 0.8 万 m²。因此本工程不宜采用斜坡式结构。同时, 工程区域的地质条件较差, 存在厚 20 m 左右的淤泥及淤泥质土, 给结构方案设计带来了较大的挑战。

本文依托该工程, 对深厚软土地基条件下的

排洪通道结构形式从施工、造价等方面进行比选，对深厚软土地基的加固方案及计算方法进行研究。软土地基处理行业已有较多研究成果，并已形成《建筑地基处理技术规范》^[1]，其中水泥搅拌桩加固地基国内学者已开展了大量研究，如秦网根等^[2]、曾起召^[3]分析采用水泥搅拌桩对板桩墙后主动区的软弱土进行加固的方法；陈丽琴等^[4]探讨了在板桩墙前应用水泥搅拌桩进行软土地基加固的可行性。由于水泥搅拌桩加固范围有限，在加固范围之外的软土性质并未提高，如完全按水泥搅拌桩加固体的参数进行板桩计算，结构偏于不安全。目前国内规范对于钢板桩及水泥搅拌桩组合结构的计算方法尚无规定，本文建议将水泥搅拌桩加固体作为一个整体考虑，经过分析推导加固体与板桩之间作用的理论计算方法，从而避

免过度考虑加固体作用而导致结构不安全的情况。

1 工程概况

本工程为南方某港口工程，新建 3 个 5 万吨级通用泊位及相应的堆场，陆域总面积约 18.13 万 m²。根据后方水利规划，需要在堆场内设置一条排洪通道，要求过水宽度不小于 50 m，过流面积不小于 391 m²。

2 地质条件

工程场地内土层结构较复杂，场地表层为厚 6 m 左右的回填砂，其下主要为第四系冲、海积淤泥类土层，软弱土层总厚度近 20 m，含水量高、孔隙比大、灵敏度高、压缩性大、抗剪强度低、力学性质差。下部杂色卵石呈中密-密实状，工程性质较好，为良好的地基土层。各土层主要指标见表 1。

表 1 主要土层的物理力学指标

层号	名称	含水量/%	密度/(t·m ⁻³)	孔隙比 e	三轴不固结不排水试验		固结快剪	
					c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
①	填砂	-	1.65	-	-	-	0	26
② ₁	灰色淤泥	59.7	1.58	1.713	15.1	0.1	10.7	15
② ₃	灰色淤泥质黏土	52.4	1.64	1.499	16.9	0	12	13
⑦	杂色卵石	-	1.76	-	-	-	1	35

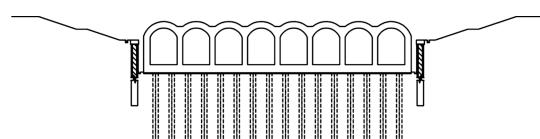
注：c、φ 分别为土体黏聚力、内摩擦角。

工程区域水位差大，设计高水位 7.67 m，设计低水位 0.25 m，极端高水位(50 a 一遇)9.11 m，极端低水位(50 a 一遇)-1.06 m，水位差对结构设计及施工的影响较大。

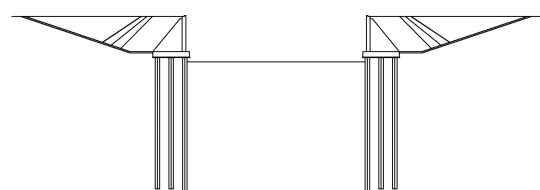
3 结构方案比选

为选择可行、经济、有效的排洪通道结构方案，需要综合考虑工程区自然条件、地质条件、施工条件等。排水通道结构一般可采用以下 3 种方案：1) 箱涵结构。一般采用现浇钢筋混凝土方形箱涵，因本工程区域下部软弱土层厚度大，且箱涵位于堆场下方，为满足使用要求，需要布置灌注桩基础，见图 1a)。2) 低桩承台结构。利用上部混凝土结构形成直立挡墙，通过灌注桩基础穿过软土层至下方良好持力层，上部承台采用扶

壁式现浇混凝土挡墙结构，见图 1b)。3) 板桩结构。板桩可穿透软土层到达下卧持力层，并利用自身桩体形成挡墙，考虑到软土下方存在卵石层，采用钢板桩，见图 1c)。



a) 箱涵结构



b) 低桩承台结构

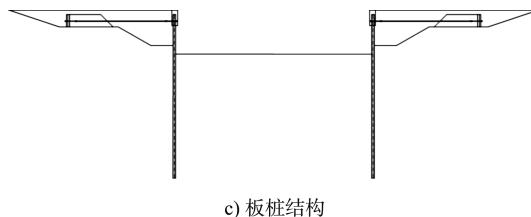


图 1 3 种结构方案

本工程堆场面积较小、潮差大, 施工受潮水影响较大。根据实际情况, 对以上 3 种结构形式优缺点进行对比, 见表 2。

经综合分析, 箱涵方案虽然可以节省陆域面积, 但造价高, 同时箱涵区域的堆场需要限载, 无

法充分发挥使用功能; 低桩承台结构施工受潮水影响, 需要开挖基坑并搭设围堰, 施工工序较多、工期长; 钢板桩结构密闭性好、无需形成基坑、施工便利、速度快、施工费用较低, 故推荐采用钢板桩板桩结构方案。挡墙采用单锚 AZ42-700N 型钢板桩, 上部通过现浇胸墙连成一体, 拉杆直径 70 mm, 间距 1.4 m, 锚定板采用预制钢筋混凝土结构, 板前设置 10~100 kg 码砌块石。为确保排洪通道两侧堆场的交通, 在排洪通道中部设置一座渠桥连接两侧陆域, 并对堆场内的路网布置进行调整, 确保排洪通道不影响堆场整体交通。

表 2 各结构形式优缺点对比

结构形式	优点	缺点	每延米造价估算/万元
箱涵结构	土地利用率较高(需要限载); 不影响交通组织	因潮水影响, 需要开挖基坑, 设置围堰; 施工工序较多, 工期较长	30(含基坑围堰)
低桩承台结构	上部承台挡土能力较好	因潮水影响, 需要开挖基坑, 设置围堰; 灌注桩及上部现浇混凝土量大, 施工工期较长	25(含基坑围堰)
板桩结构	施工便利, 速度快; 施工条件好, 无需形成基坑; 密闭性好, 挡土效果好	耐久性稍差, 需要采取防腐措施	17

4 软土地基加固

4.1 加固方案适用性分析

本工程软土层厚度大、含水量大、工程性质差, 如不经过加固处理, 无法满足工程需要。根据《建筑地基处理技术规范》, 对软土地基的主要加固方法有强夯法、挤密砂桩法以及水泥搅拌桩法等。本工程软土层为淤泥、淤泥质黏土, 含水量高、强度低, 强夯法难以抵达软土底部, 因此不适宜采用强夯法; 挤密砂桩通过土体置换改善场地性能, 本工程软土层厚度大, 砂桩须穿透软土层, 长度过长, 施工质量难以保证, 同时工程区域附近缺乏良好砂源, 因此也不适宜使用。水泥搅拌桩是一种有效的地基加固形式, 以水泥作为固化剂, 将水泥喷入土体并充分搅拌, 与软土产生物理化学反应, 硬化固结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土桩体, 并与桩间土形成复合地基, 尤其适用于淤泥、淤泥质土等含水量高且地基承载力较低的软土加固处理。

利用水泥搅拌桩加固板桩结构的方法, 既可采用水泥搅拌桩对板桩墙后主动区的软弱土进行加固, 也可在板桩墙前应用水泥搅拌桩进行软土

地基加固。两种加固方案均有可取之处: 对板桩墙前进行加固可以提高结构的水平承载能力及整体稳定性; 对板桩墙后进行加固则可以加强土体性质, 减小作用在板桩上的土压力, 同时水泥搅拌桩可以将表面均载传递至深层土层, 进一步降低板桩上的荷载。方案 1 采用墙前加固的方式, 方案 2 采用墙后加固的方式, 见图 2。



a) 方案1

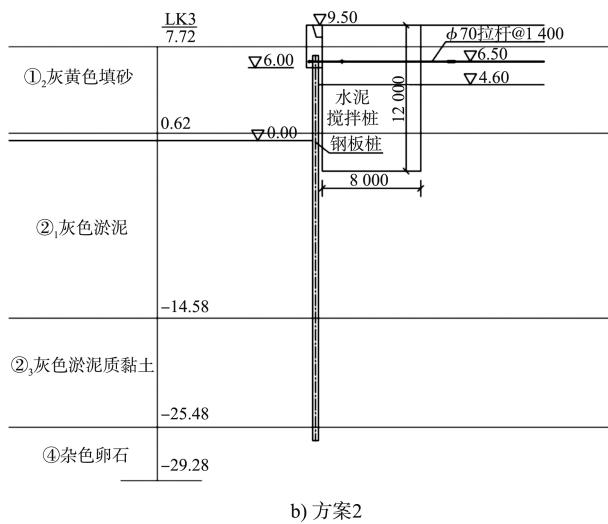


图 2 两种加固方案断面 (高程: m; 尺寸: mm)

4.2 加固方案计算方法比较

水泥搅拌桩加固体的等效抗剪强度指标可按面积置换法计算:

$$c_{sp} = mc_p + (1-m)c_s \quad (1)$$

$$\tan\varphi_{sp} = m\tan\varphi_p + (1-m)\tan\varphi_s \quad (2)$$

式中: c_{sp} 、 φ_{sp} 分别为复合土体的黏聚力、内摩擦角; c_p 、 φ_p 为水泥搅拌桩的黏聚力、内摩擦角; c_s 、 φ_s 分别为桩间土的黏聚力、内摩擦角; m 为面积置换率。根据《地基处理手册》^[5], 加固后复合土体黏聚力与无侧限抗压强度 q_u 的比值为 0.2~0.3, 其内摩擦角变化范围在 20°~30°。本工程的水泥搅拌桩采用格栅式布置, 见图 3, 面积置换率大于 60%。按上述原则取复合土体等效抗剪强度时的 $c_{sp} = 120$ kPa、 $\varphi_{sp} = 20^\circ$ 。

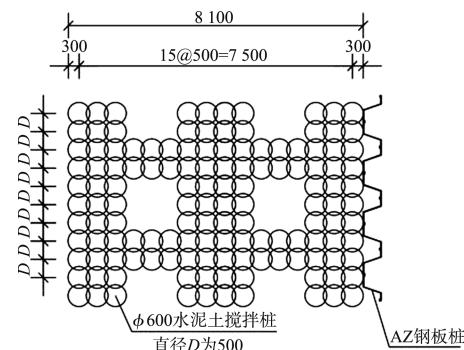


图 3 水泥搅拌桩布置 (单位: mm)

由于水泥搅拌桩加固范围有限, 在加固范围之外的软土性质并未提高, 仍须考虑软土的影响。因此, 如完全按水泥搅拌桩加固体的参数进行板桩计算, 结构偏于不安全。目前, 国内设计规范对于如何开展板桩及水泥搅拌桩加固体的协同计算尚无说明, 相关研究成果也较少, 本文建议将水泥搅拌桩加固体作为一个整体刚体来进行受力推导。

根据《建筑基坑支护技术规程》^[6], 水泥搅拌桩加固体可以提供的抗力包括自身重力产生的摩擦力 $G\tan\varphi'$ 及由底部土体黏聚力产生的 B_c 。在极限情况下, 认为水泥搅拌桩加固体的抗力充分发挥。

对于方案 1, 水泥搅拌桩加固体加固了板桩墙前的土体, 增强了土体的抵抗能力。增强部分由加固体的 $G\tan\varphi'$ 及由底部土体黏聚力产生的 B_c 组成。将此部分抗力简化为在水泥加固深度范围内均布, 并与加固体外侧的被动土压力叠加, 受力转化如图 4 所示。

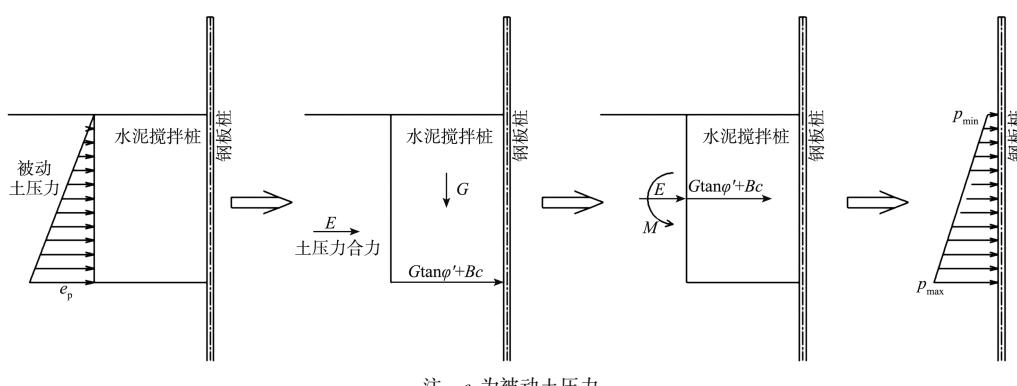


图 4 方案 1 受力转换

调整后的被动土压力公式:

$$p_{max} = \frac{E + G\tan\varphi' + Bc}{h} + \frac{M}{W} \quad (3)$$

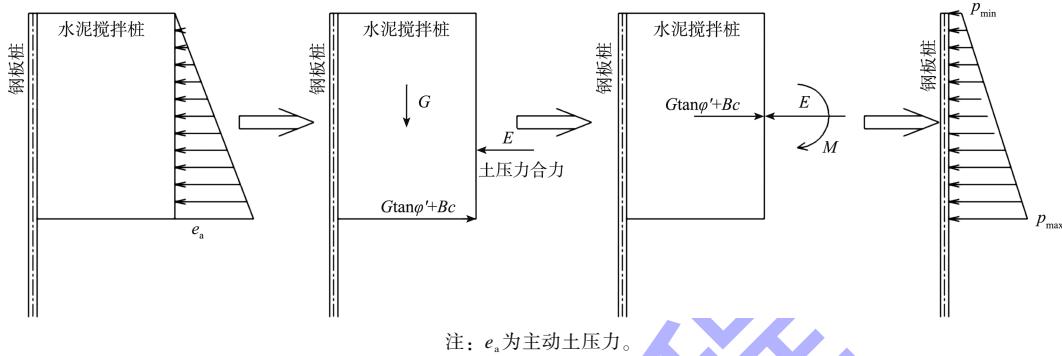
$$p_{min} = \frac{E + G\tan\varphi' + Bc - M}{h} \quad (4)$$

式中: p_{max} 、 p_{min} 分别为最大、最小边缘压力; E 为作

用在水泥搅拌桩加固体上的土压力水平合力; G 为水泥搅拌桩加固体自身重力; φ' 为水泥搅拌桩加固体底部土层的摩擦角; B 为加固宽度; c 为底部土层的黏聚力; h 为加固体高度; M 为将各力作用于水泥搅拌桩加固体中心后的弯矩和; W 为抗弯模量。

对于方案 2, 在加固区深度范围内, 将水泥搅

拌桩加固体自身重力及底部抗力与作用于加固体上的土压力等按刚体转换至加固体中心并进行合力转换, 可得通过加固体传递至板桩上的荷载, 具体转化可见图 5, 作用在板桩墙上荷载可按式(5)(6)计算。地面荷载通过加固体传递至加固体底部, 对于加固区深度外的土体, 仍按常规计算板桩上的作用。



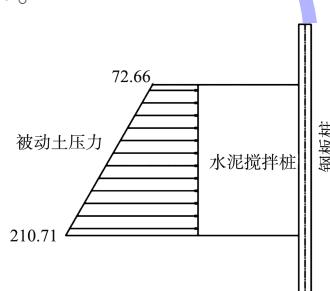
注: e_s 为主动土压力。

图 5 方案 2 受力转换

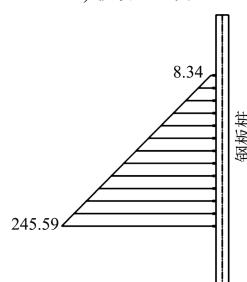
$$p_{\max} = \frac{E - G \tan \varphi' - Bc}{h} + \frac{M}{W}$$

$$p_{\min} = \frac{E - G \tan \varphi' - Bc}{h} - \frac{M}{W}$$

在设计低水位工况下, 将作用在水泥搅拌桩上自重产生的土压力及水泥搅拌桩的影响按式(3) (4)计算得墙前加固方案上钢板桩上的反力, 按式(5)(6)计算墙后加固方案上钢板桩上的荷载, 结果见图 6、7。



a) 被动土压力

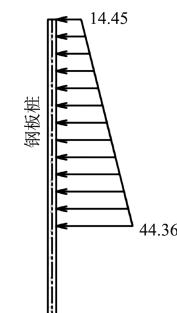


b) 作用在板桩墙上荷载

图 6 方案 1 被动土压力经水泥搅拌桩作用

至板桩墙 (单位: kPa)

a) 主动土压力



b) 作用在板桩墙上荷载

图 7 方案 2 主动土压力经水泥搅拌桩作用

至板桩墙 (单位: kPa)

将转化后的土压力荷载作用于板桩墙, 方案 1 通过在墙前采用水泥搅拌桩的方式, 增大稳定力矩; 方案 2 在墙后采用水泥搅拌桩, 减小倾覆力矩。经计算两个方案的稳定性均满足要求, 结果见表 3。

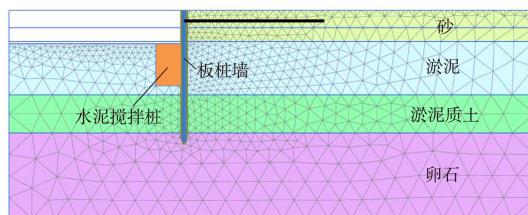
表 3 设计低水位绕桩尖稳定性计算结果

方案	稳定性矩/ (MN·m·m ⁻¹)	倾覆力矩/ (MN·m·m ⁻¹)	比值
1	125.024	89.827	1.39
2	123.638	87.616	1.41

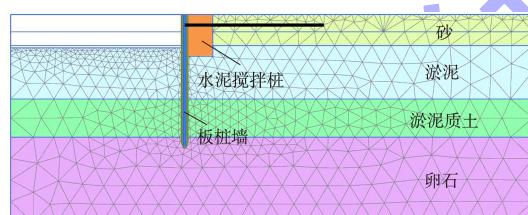
通过上述理论分析及转化，可较为实际地考虑水泥搅拌桩加固体的作用，避免过度考虑其作用而使结构偏于不安全。板桩结构可按转换后的荷载作用进行计算。

4.3 有限元模型验证

采用 PLAXIS 软件对两种方案分别进行验算。板桩墙采用板单元，拉杆采用锚杆单元进行模拟，土体采用三角形单元模拟。有限元模型见图 8。



a) 方案1



b) 方案2

图 8 PLAXIS 有限元模型

由于软土层较厚，先期采取堆载预压处理增强物理力学性质，在设计低水位下，不考虑板桩墙后剩余水头作用，板桩墙后 5 m 范围为绿化带，荷载按 10 kPa 考虑；5~12 m 为道路，使用荷载按 20 kPa 考虑；12 m 范围后为堆场，使用荷载按 50 kPa 考虑。采用 PLAXIS 软件计算的结果见表 4。可以看出，方案 1 的土体最大水平位移、板桩墙弯矩小于方案 2 结果，拉杆拉力略大于方案 2 结果。墙前加固增强了板前土体的抵抗能力，效果优于墙后加固。

表 4 PLAXIS 计算结果

方案	土体最大水平位移/mm	板桩墙弯矩/(kN·m·m ⁻¹)	拉杆拉力/kN
1	39	178	197
2	67	212	189

5 结论

1) 对于深厚软土条件下的港区内大型排洪通道结构形式，钢板桩结构施工速度快，无需进行基坑及围堰的施工，减少了施工工序及难度，推荐采用。

2) 对于采用水泥搅拌桩加固板桩的结构，目前国内尚无统一计算方法。水泥搅拌桩因加固范围有限，不宜均按加固后的复合地基参数来计算板桩结构。本文将水泥加固体假设为刚体考虑，推导了理论计算方法，从而较为实际地考虑了加固体的作用，避免过度考虑其作用而导致结构偏于不安全。

3) 通过 PLAXIS 软件进行分析，对于水泥搅拌桩加固方案，两个方案都是可行的。其中方案 1 墙前加固方案，土体最大水平位移、板桩墙弯矩小于方案 2 结果，拉杆拉力略大于方案 2 结果，加固效果优于方案 2 墙后加固方案，最终采用方案 1 墙前加固方案。

参考文献：

- [1] 中国建筑科学研究院.建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 秦网根, 王伟霞, 李晓径, 等.水泥搅拌桩复合地基+密排灌注桩组合式板桩结构[J].水运工程, 2018(3): 149-153.
- [3] 曾起召.密排灌注桩板桩码头在软弱土地基中的应用[J].中国水运(下半月), 2019, 19(4): 156-157, 193.
- [4] 陈丽琴, 陈志强, 孙英.水泥搅拌桩在板桩码头前软基加固的应用[J].中国水运(下半月), 2013, 13(8): 294-295, 141.
- [5] 龚晓南.地基处理手册[M].3 版.北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [6] 中国建筑科学研究院.建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(本文编辑 王璁)