

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.010

不同地基处理方式下组合式板桩 码头结构的受力变形分析

秦网根^{1,2}, 蔡正银¹, 关云飞¹, 侯伟³

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029; 2. 中设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 226004;
3. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要:为解决软弱土地基深水板桩码头的技术难题,采用不同水泥掺入比的满堂式加固法和水泥搅拌桩加固法对软弱土地基进行处理,并与传统单锚板桩结构进行组合,研究组合式板桩码头结构的受力变形状况。结果表明:不同水泥掺入比满堂式加固软弱土地基主要通过增加刚度抵挡竖向和水平向的荷载,减少作用于前墙的侧向土压力;随着水泥掺入比的增大,整体承受侧向土压力作用增强,前墙的变形显著减小。采用水泥搅拌桩处理软弱土地基,形成的搅拌桩桩体和桩间土共同协调了结构与土的受力状况,且通过限制前墙位移降低了锚杆的内力,减小了前墙内力。

关键词:组合式板桩码头;水泥掺入比;水泥搅拌桩;受力变形;南通港

中图分类号:U656.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)02-0158-05

Forced deformation analysis of combined sheet-pile wharf structure after different foundation treatments

QIN Wanggen^{1,2}, CAI Zhengyin¹, GUAN Yunfei¹, HOU Wei³

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 226004, China;
3. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to solve the technical problem of deep-water sheet pile wharf on weak soil foundations, which is treated with different cement mixing ratios and cement mixing piles, and combined with the traditional single anchor sheet pile structure, the influence of combined sheet pile wharf structure is studied. The studying results of the force and deformation indicate that the reinforcement of weak soil with different cement mixing ratios can be used to strengthen the weak soil foundation for increasing the stiffness for resisting vertical and horizontal loads, and to reduce the lateral earth pressure on the front wall. With the increase of the mixing ratio, the overall effect of lateral earth pressure is increased, and the deformation of the front wall is significantly reduced. While the cement mixing pile is used to treat weak soil foundation, the mixed pile and the soil between piles are formed to coordinate the stress conditions of structure and soil. By limiting the displacement of the front wall, the internal force of the anchor rod as well as the internal force of front wall is reduced.

Key words: combined sheet pile wharf; cement mixing ratio; cement mixing pile; forced deformation; Nantong Port

基金项目: 南通市科技局计划项目(GY2017013);江苏省交通运输科技项目(2017T17)

作者简介: 秦网根(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事水运工程的试验检测、监测和评估研究。E-mail:303179372@qq.com

引用本文: 秦网根,蔡正银,关云飞,等. 不同地基处理方式下组合式板桩码头结构的受力变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(2):158-162.

QIN Wanggen, CAI Zhengyin, GUAN Yunfei, et al. Forced deformation analysis of combined sheet-pile wharf structure after different foundation treatments[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020,48(2):158-162.

遮帘式、分离卸荷式、T 型卸荷式等^[14]地下连续墙式板桩码头可以解决前板桩墙抗弯能力差和施工难度高的问题,它们通过墙后布设遮帘桩、卸荷平台减小作用于前墙的土压力,大大提高了码头的靠泊等级,缩短了与国内外重力式码头、高桩码头之间的靠泊等级差距。这些深水化、大型化板桩码头大都建造在软弱土地基上,而软弱土具有含水率高、抗剪强度低、压缩性高、孔隙比大(大于1)等特性,易出现地基承载力不足、边坡失稳破坏等问题^[5]。在软弱土地基上建设深水板桩码头的关键是地基处理方式的选择,所选地基处理方式既要经济合理又需要能满足板桩码头建设的需要。1938 年,美国奥克拉荷马公路部门^[6]率先对水泥土的各种特性进行了研究,将水泥用于改善软土路基的性能,Neal^[7]对水泥拌合体的处理效果进行了分析,认为水泥拌合体在改善地基稳定性方面效果显著。我国首次应用是在天津港东突堤南、北侧高桩码头的泊位软基处理工程中^[8],处理成块状的水泥搅拌桩极大地提高了软弱地基强度,减少了地基变形。本文采用不同水泥掺入比满堂式加固和水泥搅拌桩 2 种方法加固软弱土地基,将加固后的软弱土地基与单锚板桩结构进行组合(简称组合式板桩码头),研究组合式板桩码头结构的受力变形状况,并详细分析其工作机理,以期能为今后软弱土地基上建设深水化板桩码头提供技术支撑。

1 组合式板桩码头的三维数值模型架构

1.1 工程概况

南通港吕四港区某港池区域拟建 2 万 t 级通用泊位(图 1),码头泊位设计尺寸为 390 m×30 m,设计年吞吐量为 170 万 t。拟建码头工程位于港池西侧岸线,与其相邻的为渔货码头,主要利用码头作业区北侧的深水岸线和边滩围垦区进行泊位布置。设计时通过深层水泥搅拌法对墙后软弱土进行深层搅拌处理,按照软弱土中掺入不同比例水泥形成拌合体或采用水泥搅拌桩处理形成桩与桩间土的复合地基增强体,并与单锚板桩结构构成组合式板桩码头^[9-10](图 1)。码头前板桩墙采用 $\varnothing 1\,200\text{ mm} @ 1\,300\text{ mm}$ 单排钻孔灌注桩结构作为支挡结构,施工时可同时干地施工,缩短建设工期,前墙后设置 2 排 $\varnothing 900\text{ mm} @ 600\text{ mm}$ 高压旋喷桩作为止水帷幕,其后 14.93 m 宽、处理深度为 18 m 的软弱土地基采用 18% 水泥掺入比按照 $\varnothing 600\text{ mm} @ 1\,000\text{ mm}$ 水泥搅拌桩进行加固或采用掺入不同比例的水泥进行加固,其中掺入 4.3% 的水泥用量等于水泥搅拌桩复合地基水泥用量,同时考虑水泥掺入比变化对地基土的物理力学性质影响,增加 2.5%、3.5%、5.5%、6.5% 这 4 种不同水泥掺入比进行分析。

1.2 组合式板桩码头三维有限元模拟

码头所在区域位于长江下游冲积平原区,地势低平,为第四系全新统滨海相沉积层和上更新统海陆交互沉积,该地区表层分布着范围广、厚度大的软弱土层^[11],场区内各土层主要物理力学指标见表 1。

表 1 各土层物理力学性质指标

Table 1 Physical properties of soil in each layer

层号	土层	深度/m	含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	压缩系数 $a_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	承载力 f_k/kPa
2-1	淤泥质粉质黏土混粉砂	2.0~5.6	41.3	1.80	1.174	0.76	3.00	60
2-2	粉砂夹粉质黏土	1.2~8.2	30.8	1.94	0.842	0.24	7.85	120
3	粉砂夹粉土	2.4~6.2	27.2	1.99	0.747	0.14	12.96	150
4	粉土夹粉质黏土	6.5~13.4	32.1	1.88	0.926	0.34	5.92	120
5	粉砂夹粉土	5.9~11.1	28.1	1.98	0.772	0.18	10.16	135
6	粉砂	2.3~5.2	25.7	2.06	0.667	0.11	15.56	200

由表 1 可知,场区内土层在垂向上性质差异较大,2-1 层、2-2 层、4 层土物理性质较差,尤其是 2-1 层含水率较高,层高平均达 3 m 左右,2-2 层平均层高达 5 m 左右。因此在灌注排桩形成的墙身后方,采用水泥搅拌桩对软弱土地基进行加固,形成整体、稳定、满足一定强度要求的复合地基,以改善土的性质和结构,保证

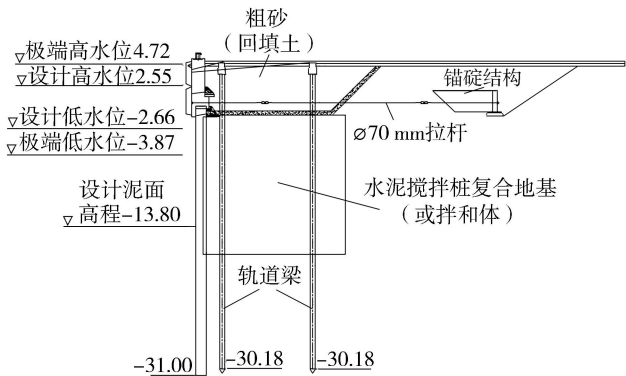


图 1 组合式板桩码头(单位:m)
Fig. 1 Combined sheet pile wharf(units:m)

处理后的复合地基能够满足整体受力和稳定性要求。数值分析时,水泥搅拌桩处理区域复合土体黏聚力取 90 kPa,内摩擦角取 22.60°^[12-13]。南水模型^[14]不仅能很好地反映土的非线性、弹塑性、剪胀性以及硬化性等特点,而且综合了邓肯-张模型和剑桥模型的优点,因此采用南水模型作为土的本构模型。对工程所在区域原状土以及不同水泥掺入比的满堂式拌合土进行三轴试验,所得土的南水模型参数见表 2。

表 2 土的南水本构模型参数

Table 2 NHRI model parameters of soil

土样名称	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	R_f	K	K_{ur}	n	c_d	R_d	n_d
淤泥质粉质黏土混粉砂	13.7	7.4	0.72	83.3	166.6	0.65	0.08	1.12	0.71
粉砂夹粉质黏土	6.6	26.2	0.7	90.9	181.8	0.7	0.06	0.66	0.66
粉砂夹粉土	4.6	30.6	0.7	238.1	476.0	0.4	0.04	0.81	0.70
粉砂	2.3	33.9	0.9	294.1	588.2	0.9	0.01	0.64	0.88
3.5%水泥掺入比拌合土	22.9	32.6	0.6	100.0	200.0	0.2	0.07	0.40	0.63
4.3%水泥掺入比拌合土	33.1	35.6	0.6	150.0	300.0	0.2	0.05	0.59	0.63
5.5%水泥掺入比拌合土	62.5	36.0	0.7	187.0	374.0	0.2	0.03	0.85	0.61
6.5%水泥掺入比拌合土	66.6	36.3	0.8	310.0	620.0	0.2	0.02	0.93	0.69
2.5%水泥掺入比拌合土	198.6	38.5	0.7	364.8	729.5	0.4	0.01	0.74	0.63

注:拌合土是对淤泥质粉质黏土混粉砂掺入 2.5%、3.5%、4.3%、5.5%、6.5% 的水泥形成的土。 c 为黏聚力, φ 为摩擦角, R_f 为破坏比,其余的参数为根据三轴试验数据拟合的无量纲参数。

组合式板桩码头结构三维有限元数值分析时应 对 受 力 特 性 进 行 简 化,依 据 模 型 的 总 体 布 置 和 模 型 的 边 界 约 束,计 算 模 型 的 平 面 尺 寸 设 为 150 m×70 m。前墙采用直径 1.2 m、长度为 36.2 m 的 钻 孔 灌 注 桩,陆 侧 土 体 进 行 高 压 旋 喷 处 理 作 为 止 水 结 构。根 据 刚 度 等 效 原 理 将 钻 孔 灌 注 桩 等 效 为 厚 度 为 1 m 的 地 下 连 续 墙。锚 碇 墙 厚 度 为 0.6 m,墙 高 2.5 m,其 距 前 墙 33 m。钢 拉 杆 长 33 m,等 间 距 1.5 m 布 置,距 地 面 4.2 m,其 型 号 为 Q390 mmØ70 mm。

因前墙和锚碇墙均选用钢筋混凝土材料,所以有限元建模采用 C3D8I 线弹性单元,该单元可以获得前墙和锚碇墙的变形和弯矩。钢筋混凝土弹性模量取 28 GPa,泊松比取 0.167。钢拉杆采用不传递力矩的 TRSS 单元进行模拟,钢筋的弹性模量取 206 GPa,泊松比取 0.3,模型的截面积与真实情况相同,忽略拉杆与土体的摩擦及其自重。

2 受力和变形分析

2.1 前墙和锚碇墙位移

由图 2(a)可知,板桩码头前墙的位移曲线犹如“弓”形。地基处理前、后的墙身位移计算值在墙身端部趋于一致,距墙身顶部 8 m 以内,水泥搅拌桩处理地基的前墙位移大于采用不同水泥掺入比处理地基的位移,8 m 以下反之。水泥掺入比越大,墙前位移越小,但在“两头”(墙身顶部和端部)趋于一致,是因为墙身顶部和端部分别被拉杆和土体约束了位移。

由图 2(b)可知,地基处理后的锚碇墙位移值均小于未处理的情况,且随着水泥掺入比的增大,锚碇墙的位移值逐渐减小,水泥搅拌桩处理地基后的锚碇墙位移大于不同水泥掺入比地基处理下的位移。由图 2 可知,无论采用哪种方式处理地基,锚碇墙与前墙的位移变化规律不一致。

2.2 前墙土压力

由图 3(a)可知,水泥搅拌桩处理后的前墙陆侧土压力整体上要大于采用不同水泥掺入比地基处理和地基未处理时的前墙陆侧土压力。出现这种现象的原因是水泥搅拌桩刚度较大,其前墙土压力更接近于静止土压力;而地基处理前和不同水泥掺入比复合地基的

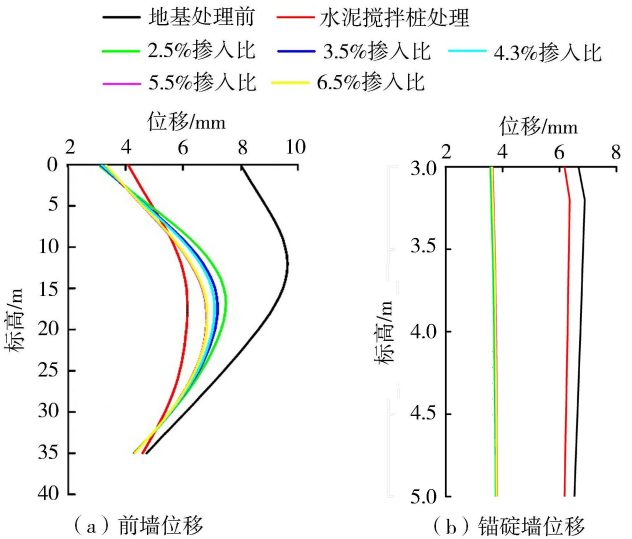


图 2 位移计算结果

Fig. 2 Displacement calculation result

前墙陆侧土压力与主动土压力接近。不同水泥掺入比地基处理的土压力小于主动土压力,是因为土体的物理力学性质已经改变,摩擦角和黏聚力变大,主动土压力变小。综上,水泥搅拌桩地基处理与不同水泥掺入比下地基处理在减小前墙内力的机理上有所差异;不同水泥掺入比下地基处理是通过改变土体的物理力学性质以减小作用于前墙的土压力,从而达到降低前墙内力的目的;水泥搅拌桩地基处理是通过限制前墙位移来降低锚杆的内力,最终达到减小前墙内力的目的。

不同水泥掺入比和水泥搅拌桩 2 种地基处理方式,土压力在距墙顶 20 ~ 24 m 范围内,前墙陆侧土压力突变现象明显,其余部分随着深度的增大,土压力逐渐增大。根据图 3(b)所知,地基采用不同水泥掺入比处理后,前墙海侧土压力明显减小。

2.3 前墙和锚碇墙的弯矩

由图 4(a)可知,由于有拉杆的作用,墙身弯矩在距墙顶 0 ~ 4 m 间均为负弯矩,其余位置均为正弯矩,整体曲线变化趋势可近似认为符合“S”形。距墙顶 20 m 范围以内,地基未处理的前墙弯矩大于地基处理的墙身弯矩,且水泥搅拌桩地基处理与不同水泥掺入比地基处理的前墙弯矩变化趋势基本一致。随着水泥掺入比的增加,前墙正弯矩最大位置不断下移。当深度超过 20 m 后,不同水泥掺入比的前墙弯矩变化先是略微增大再缓慢变小,而水泥搅拌桩处理地基后的墙身弯矩则先是快速增大,在深度 28 m 处则快速降低。由图 4(b)可知,地基处理后的锚碇墙墙身弯矩显著减小;水泥搅拌桩处理地基与地基未处理情况下的锚碇墙墙身弯矩变化趋势相同;不同水泥掺入比地基处理的墙身弯矩变化趋势基本一致,整体上可近似认为符合“>”形变化,在 4 ~ 4.5 m 间出现最大值,墙身内力承载能力极限状态最大弯矩计算值为 241.56 kN · m。

2.4 拉杆的拉力

采用水泥搅拌桩处理地基后,板桩码头拉杆拉力由 416.35 kN(地基处理前,即图 5 中掺入比为 0 时)减小至 271.34 kN,减大幅度达 35%;采用水泥掺入比处理后(图 5),拉杆拉力显著减小,基本维持在 260 kN,且随水泥掺入比的增大,拉杆拉力逐渐减小。

综上所述,采用不同水泥掺入比或水泥搅拌桩处理软弱土地基形成的复合地基与单锚板桩结构组合后,前墙的位移和弯矩、拉杆拉力比地基处理前减大幅度达 25% 以上。在码头前沿港池分阶段开挖至设计标高过程中,前墙海侧土压力会逐渐减小直至为零,从而造成前墙墙身两侧土压力不等。岸侧侧向土压力会推动前墙向前移动,前墙会通过拉杆将力传递给锚碇墙,

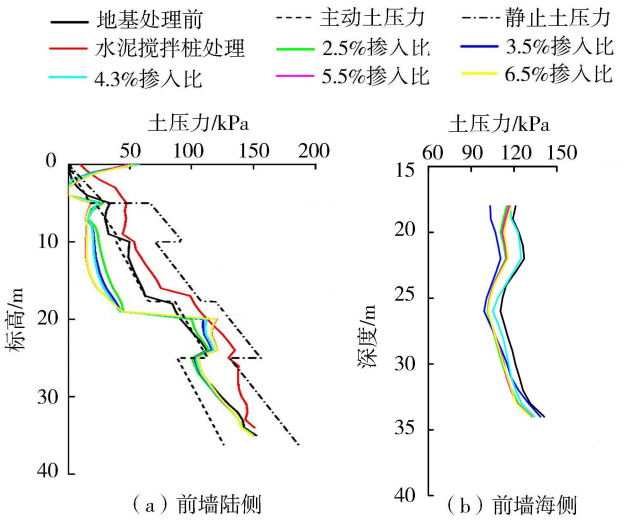


图 3 板桩码头前墙土压力计算结果

Fig. 3 Calculation results of earth pressure on the front wall of sheet pile wharf

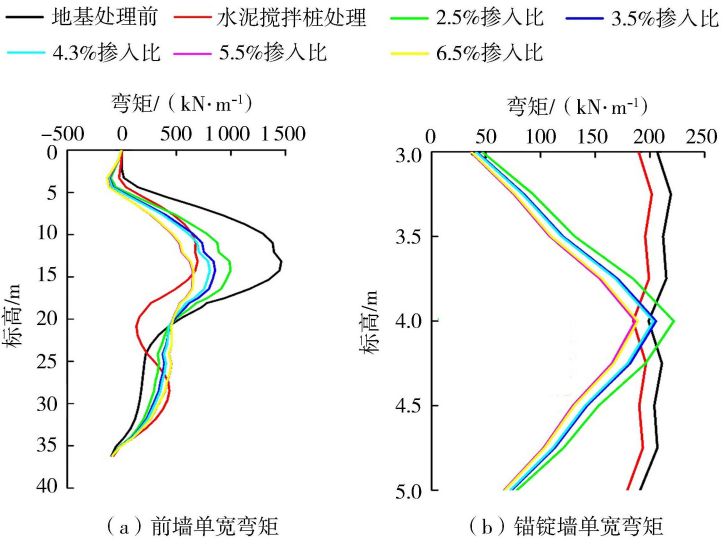


图 4 单宽弯矩计算结果

Fig. 4 Calculation results of bending moment with unit width

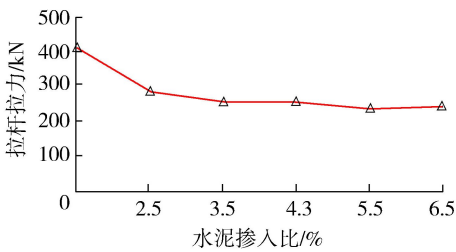


图 5 拉杆拉力

Fig. 5 Tension bar force

然后锚锭墙将力传递给前墙和锚锭墙之间的土,使结构(前墙、锚锭墙、拉杆)与土共同承受荷载作用。如果在单锚板桩码头结构之间有软弱土存在,因软弱土内摩擦角低,其与码头面作用荷载易转化为水平力,会在墙后产生巨大的水平力,致使板桩前墙弯矩过大。码头后方区域软弱土地基的处理,改变了这一受力状态。加固后的场地由加固区和非加固区组成,加固区的受力和变形是由上部褥垫层和基础等的调节作用实现加固区与非加固区土的共同承载,与地基未处理情况相比,刚度明显增大,竖向承载力明显增加。如采用不同水泥掺入比处理地基形成的整体、稳定的拌合体,便是通过增加刚度抵挡竖向和水平向的荷载,减少作用于前墙的侧向土压力,且随着水泥掺入比的增大,整体承受侧向土压力作用增强,前墙的变形显著减小。如采用水泥搅拌桩处理软弱土地基,形成的搅拌桩桩体和桩间土共同协调了结构与土的受力状况,其桩土的共同作用限制了前墙位移,进一步减小了锚杆拉力和前墙内力。

3 结 语

地基处理方式的选择是解决软弱土地基不能建设深水板桩码头这一难题的关键,采用满堂式和水泥搅拌桩处理的复合地基与传统板桩结构组合后,板桩码头的受力情况显著改善。满堂式加固软弱土地基主要通过增加刚度抵挡竖向和水平向的荷载,减少作用于前墙的侧向土压力,且随着水泥掺入比的增大,整体承受侧向土压力作用增强,前墙的变形显著减小。采用水泥搅拌桩处理软弱土地基,形成的搅拌桩桩体和桩间土,共同协调了结构与土的受力状况,通过限制前墙位移降低了锚杆的内力,减小了前墙内力。

参考文献:

[1] 刘永绣,吴荔丹,李元音. 一种新型码头结构型式:半遮帘式深水板桩码头结构的推出[J]. 港工技术,2005,39(增刊1): 16-19. (LIU Yongxiu,WU Lidan,LI Yuanyin. A new type of wharf structure the structure of semi covered type of deep water sheet pile wharf[J]. Port Engineering Technology,2005,39(Sup1): 16-19. (in Chinese))

[2] 崔冠辰,蔡正银,李小梅,等. 遮帘式板桩码头工作机理初探[J]. 岩土工程学报,2012,34(4):762-766. (CUI Guanchen,CAI Zhengyin,LI Xiaomei,et al. Preliminary investigation on working mechanism of covered sheet-pile wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(4):762-766. (in Chinese))

[3] 龚丽飞. 分离卸荷式地下连续墙板桩码头结构与土相互作用研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2007.

[4] 蔡正银,侯伟,周建,等. 20万吨级卸荷式板桩码头数值分析[J]. 岩土工程学报,2015,37(2):218-224. (CAI Zhengyin,HOU Wei,ZHOU Jian,et al. Numerical analysis of 200 000-tonnage sheet-pile wharf with relieving platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(2):218-224. (in Chinese))

[5] 赵志缙,应惠清. 简明深基坑工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.

[6] ROBERT J D. Performance of cement-modified soils;a follow-up report[J]. Transportation Research Record,1986(3):81-86.

[7] NEAL D V. Cement-modified Soil(CMS)[M]. Berlin:Springer,2014.

[8] 郭莲清. 深层水泥搅拌工法在天津港的应用[J]. 港工技术,1995,29(23):35-42. (GUO Lianqing. Application of MDM to the Port of Tianjin[J]. Port Engineering Technology,1995,29(23):35-42. (in Chinese))

[9] 秦网根,李晓径,王伟霞. 新型密排灌注桩板桩码头结构的应用探讨[J]. 港工技术,2017,54(5):49-52. (QIN Wanggen,LI Xiaojing,WANG Weixia. Application study of sheetpile wharf supported on crowded cast-in-place piles[J]. Port Engineering Technology,2017,54(5):49-52. (in Chinese))

[10] 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,2018,540(3):149-153. (QIN Wanggen,WANG Weixia,LI Xiaojing,et al. Structure of cement mixing pile composite foundation+closely packed piles composite sheet pile[J]. Port & Waterway Engineering, 2018,540(3):149-153. (in Chinese))

[11] 许映建. 海门市东灶新河河道工程地基处理设计[J]. 河南水利与南水北调 2015,24(4):32-33. (XU Yingjian. Foundation treatment design of DongzaoXinhe River Course in Haimen City[J]. Water Resources & South to North Water Diversion, 2015,24(4):32-33. (in Chinese))

[12] 李立华,范大林,金国强. 水泥土搅拌桩在地基整体稳定加固中的应用[J]. 港工技术,2008,47(3):47-49. (LI Lihua,FAN Dalin,JIN Guoqiang. Application of cement mixing pile on reinforcing the foundation integral stability[J]. Port Engineering Technology,2008,47(3):47-49. (in Chinese))

[13] 中华人民共和国交通运输部. 港口工程地基规范 JTS147-1—2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010.

[14] 司海宝,化西婷. 南水模型在 ABAQUS 中的实现及在工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(1):52-55. (SI Haibao,HUA Xiting. Development of NHRI constitutive model in ABAQUS and application in engineering[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2010,8(1):52-55. (in Chinese))