

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.032

# 软土地基大型船坞深基坑数值分析

袁伟杰,熊传祥

(福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 根据位于福建沿海软土地区的某大型船坞基坑工程的设计与施工过程,利用 PLAXIS 3D 有限元软件建立相似度较高的三维模型,采用其中的 HS-Small 模型模拟土体,分析了不同施工步骤现行方案下基坑整体与支护结构的变形及受力特性,并且对影响基坑整体与支护结构的变形及受力特性的各因素进行分析,为了达到最好的效果,这些研究都是很有必要的。通过数值模拟计算结果明确其变化趋势,最后参考工程造价角度得出有效结论,给出合理的建议。根据计算结果可知,关于此船坞基坑的方案设计存在着可进一步优化的空间。为本船坞以及类似基坑工程的设计与施工提供有益参考。

**关键词:** 船坞;深基坑;软土地基;PLAXIS 3D;HS-Small

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0162-07

## Numerical Analysis of Deep Foundation Pit from a Large Dock in Soft Clay Ground

YUAN Weijie, XIONG Chuanxiang

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

**Abstract:** In the schematic design and the construction process of a large-scale dockyards deep excavation which is located at the coast of Fujian Province, the finite element numerical model was developed to analyze the deformation and mechanical performance of the deep foundation pit and the supporting structure under different construction conditions. To bring positive effects on deformation control and overall stability of the excavation, it is necessary to investigate the behavior of deep excavation in soft clay ground. The factors which influence the deformation and mechanical performance of the deep excavation and the supporting structure are analyzed using finite element software Plaxis 3D, with the simulation of soil by HS-Small model. The results show that a better schematic design of the deep excavation exists. Finally, valid advice was proposed based on the results.

**Keywords:** dock; deep foundation pit; soft clay ground; plaxis 3D; HS-Small

船坞<sup>[1]</sup>是用于修造船舶的水工建筑物,坞室是修造船舶的工作场所,是干船坞的主体。在船坞工程规模逐渐大型化发展的今天,软土地上建造船坞的数量日趋增多,影响因素逐渐复杂使得对方案设计与工程施工的要求急剧提高,同时船坞坞墙也出现了一些新的结构型式,地基处理和支护方式也更加多样化,引发了许多新的亟待解决的课题。船坞基坑工程建设主要特点是开挖深度与开挖面积较大,且多数位于临江口、入海口等地质条件较差的地区,涉及到支护结构类型的选择、基坑开挖围护与监

测、软土地基处理等内容。为了研究、探索更加优化、合理的大型船坞工程的设计方案,本文在广泛了解国内外船坞工程设计的基础上,结合具体实例,根据有限元计算软件得出的计算结果,提出有效的设计建议。

贺强<sup>[2]</sup>利用 PLAXIS 对软土中深开挖的水泥搅拌桩与排桩墙组合支护体系进行研究,认为水泥土搅拌桩止水帷幕会起到较为明显的支挡作用;排桩桩径的增大,其支护能力改变不大;而基坑底部土体的加固措施则有较好的效果。汤子扬等<sup>[3]</sup>运用

PLAXIS 软件分析了板桩码头结构,通过与经验简化计算方法对比,认为 PLAXIS 有限元程序可以更加真实、准确、全面地反映结构的整体变形及受力情况。黄海云<sup>[4]</sup>结合新加坡某新建船厂工程,对船坞基坑降水施工过程中板桩位移的实际监测成果进行分析与研究,并应用 PLAXIS 有限元程序进行数值模拟分析,验证了监测结果位移趋势的正确性。陈永辉等<sup>[5]</sup>将板桩加固护岸结构数值计算结果与现场实测、规范计算结果进行比对分析,与规范土压力计算结果相比,有限元计算的板桩土压力分布更加符合实测的土压力分布情况,且能较好的反映新老护岸结构相互作用下板桩土压力分布情况。刘熙媛<sup>[6]</sup>根据 PLAXIS 计算结果及试验研究结果证明基坑开挖的侧向卸荷过程对土体的应力、应变状态具有重要影响。模型中采用的 HS - Small 模型很好考虑了基坑开挖的卸荷过程,其是由 Benz T<sup>[7]</sup>在 HS 模型的基础上进一步修正而来,既可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化,又考虑了剪切模量在微小应变范围内随应变衰减的行为<sup>[8]</sup>,因此,HS - Small 模型较 HS 模型具有更好的适用性,计算结果可以给出更为合理的墙体变形及墙后土体变形<sup>[9]</sup>。

本文首先根据本船坞深基坑设计方案和施工图设计说明书以及其他相关资料,利用刘志祥等<sup>[10-11]</sup>熟悉使用 PLAXIS 3D 数值模拟软件,采用 HS - Small 模型模拟土体,建立与实际船坞工程接近一致的深基坑模型,根据实际监测结果和模拟结果进行分析,然后根据原来的计算模型,通过对模型内各项参数分别在进行一定范围内调整,建立新的计算模型,最后根据计算结果进行分析,提出在原方案基础上可进一步优化的经济可行性建议。

表 1 大型船坞基坑 HS - Small 模型计算参数

编号	种类	厚度 /m	$\gamma$ / $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c'$ /kPa	$\varphi$ / $(^\circ)$	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa	$E_{50}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	$G_0^{\text{ref}}$ /MPa	$\gamma_{0.7}$ / $10^{-4}$	$v_{\text{ur}}$	$P^{\text{ref}}$ /kPa	$K_0$	$m$	$R_f$
①	填土	5.0	18.1	32.3	13.7	5.8	5.8	5.8	29.0	58.0	1	0.2	100	0.76	0.65	0.9
②	淤泥	18.0	16.3	15.0	15.0	1.7	1.7	2.5	13.0	40.0	1	0.2	100	0.74	0.80	0.6
③	粉质黏土	6.0	18.5	35.0	14.7	7.0	7.6	7.6	38.0	76.0	1	0.2	100	0.75	0.65	0.9
④	残积性黏土	4.0	18.6	30.2	19.6	5.5	8.5	8.5	43.0	100.0	1	0.2	100	0.66	0.60	0.9

该工程位于闽江口,最高潮差为 6.8 m,平均潮差为 4.0 m。设计高水位为 3.21 m,设计低水位为 -2.16 m。常规船舶进出坞水位为 1.30 m,海工产品进出坞水位为 2.34 m,以上水位都是罗零高程。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

工程位于闽江入海口处,船坞工程区位于厂区中北部,本船坞主要包括船坞主体工程含坞口及水泵房、坞墙、底板,坞口临时基坑围护、船坞附属工程如吊车道、总组平台及管沟,船坞周边护岸及突堤码头等。基坑平面布置及周边环境如图 1 所示。船坞主体工程有效尺度为 280 m × 82 m × 13.5 m,船坞坞顶高程为 +5.0 m,坞底面标高为 -8.50 m,底板下桩基采用 PHC $\Phi$ 600 管桩满堂加固,周边设置 800@600 旋喷桩止水,坞墙采用钻孔灌注桩排桩加高桩承台锚拉式结构。坞室内基坑土方采用盆式开挖方法分区分层开挖,船坞主体结构总体上采用桩基上的减压排水式船坞结构。

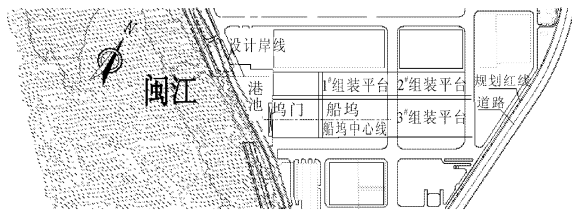


图 1 基坑平面布置图

### 1.2 工程地质及水文条件

根据地质勘察报告,本次勘察在勘探深度 52.50 m 范围内所揭露的地层,拟建场地基岩面起伏较大,上覆各种土层分布很不稳定,属于工程地质条件复杂场地。自上而下主要分布为①填土、②淤泥、③粉质黏土、④残积性黏土、⑤<sub>1</sub> 全风化凝灰岩岩及⑤<sub>2</sub> 强风化凝灰岩。各土层物理力学性质指标如表 1 所示。

## 2 工程支护结构设计方案与模型

基坑围护墙两侧土压和水压的平衡会随着基坑开挖与工程降水逐渐被破坏,导致围护结构产生变形,排桩墙及拉杆等相继受力,最终支护体系呈现复

杂的受力状态及变形情况。本工程基坑方案设计三维有限元软件 PLAXIS 3D 进行数值计算,土体本构模型采用 HS - Small 模型,该模型可同时考虑剪切硬化和压缩硬化,并采用摩尔库仑破坏准则,其在土体硬化模型的基础上考虑了土的受荷历史和刚度的应变相关性,可以模拟从低于  $10^{-5}$  到高于  $10^{-3}$  的工程应变范围内土体的不同响应。该模型共有 13 个参数,可以通过根据王卫东等<sup>[12]</sup>、刘畅<sup>[13]</sup>、刘国彬等<sup>[14]</sup>、叶琪等<sup>[15]</sup>人的研究,具体工程的勘察报告及经验确定。各土层的 HS - Small 模型参数,如表 1 所示。

根据地勘报告中提供的内容,坞室基坑横断面的变形需要重点关注,因此本文选取该船坞工程地质条件最不利的区域进行建模分析。船坞工程基坑计算断面如图 2 所示,根据该工程的实际施工过程,本文选取 9 个典型的施工步骤建立数值计算模型,计算步骤如表 2 所示。本基坑断面为对称模型,故可取半结构进行计算分析。模型的尺寸为  $115 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,数值分析模型及网格划分如图 3 所示。

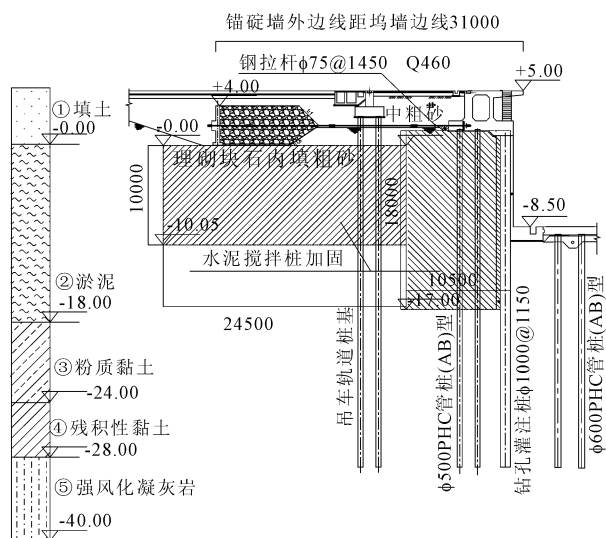


图 2 船坞结构典型断面

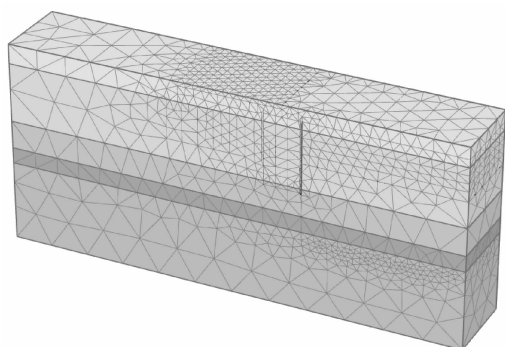


图 3 模型几何尺寸及网格划分

表 2 船坞施工计算步骤表

施工步骤	施工内容
1	锚碇墙、块石棱体、钢拉杆的施工
2	基坑内开挖至 +0.0 m
3	右侧开挖至 -2.0 m
4	右侧开挖至 -4.0 m, 左侧开挖至 -2 m
5	右侧开挖至 -6.0 m, 左侧开挖至 -4 m
6	右侧开挖至 -8.5 m
7	基坑内右侧底板的施工
8	左侧开挖至 -8.5 m, 并进行基坑底板施工
9	坞室墙后土方回填

### 3 船坞基坑变形主要影响因素分析

为了对本船坞工程设计方案进行优化,依据对本船坞基坑工程进行数值模拟计算结果,对影响船坞基坑位移和内力的各相关因素进行分析,找出其中的敏感因素,明确各自的变化规律,进而对各相关量的取值大小给出有效的建议。

影响船坞深基坑位移和内力的因素主要包括:淤泥土  $c$  值、淤泥土  $\varphi$  值、基坑内管桩加密排数、基坑开挖方式、盆式开挖下坑底预留土宽、初始地下水位值、围护桩进入深度、被动区管桩入土深度、止水帷幕进入基坑底板下深度、拉杆  $EA$  值、块石棱体强度与刚度、拉杆预应力等。下文选取几个重要影响因素分别进行分析。在原数值计算模型基础上在对各因素单独分析时,其他因素的取值不变,只改变所研究的影响因素的取值。原计算模型的土层参数见表 1,淤泥  $c$  值为  $15 \text{ kN/m}^2$ ,  $\varphi$  值为  $15^\circ$ ,基坑内管桩按照施工方案布置不加密,基坑采用盆式开挖,基坑内最上方预留土宽度为  $4 \text{ m}$ ,基坑底预留土宽度为  $12 \text{ m}$ 。

#### 3.1 淤泥质土 $c$ 值的影响

对于淤泥土,分别取  $c$  值为  $12 \text{ kN/m}^2$ 、 $15 \text{ kN/m}^2$ 、 $18 \text{ kN/m}^2$ 、 $21 \text{ kN/m}^2$ 、 $24 \text{ kN/m}^2$ ,其他影响因素的取值不变。值得说明的是表 1 中淤泥质黏土层相关物理力学参数均为真空预压软基处理前的力学参数,设计中考虑真空预压引起的强度增长。水泥搅拌桩在主动土压力区完全进入淤泥土,故而淤泥土的整体含水率会降低,设计中应考虑由此引起的强度的增长。

由计算结果可知(如图 4、图 5、表 3 所示),围护桩水平位移、承台水平位移、锚碇板水平位移、拉杆拉力以及基坑外侧地表沉降均随着淤泥土  $c$  值的增大而减小,淤泥土  $c$  值的变化对围护桩正负弯矩、基

坑内土方的隆起量、拉杆拉力以及锚碇板竖直位移影响较小。弯矩曲线为下凸上凹,最大正弯矩出现在 -5 m 左右,最大负弯矩均出现在 -22 m 左右即基坑底下 13.5 m,弯矩曲线在 -8.5 m 处向内弯折,这是由于基坑底板的浇筑完成后形成了对围护墙的顶撑作用导致此处弯矩减小。

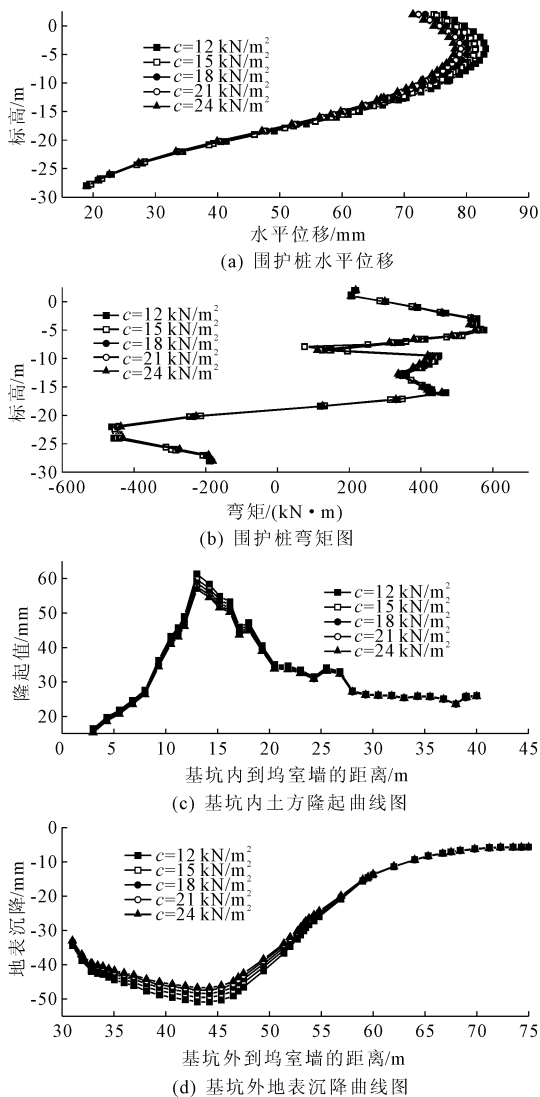


图 4 淤泥质土  $c$  值影响因素计算结果图

表 3 不同情况下拉锚系统计算值

淤泥土 $c$ 值 /kPa	最终拉力 /kN	承台水平位移/mm	锚碇板水平位移/mm	锚碇板竖直位移/mm
12	78.5	76.3	67.2	-34.4
15	74.9	74.7	65.7	-33.8
18	72.7	73.3	64.4	-33.6
21	70.9	72.3	63.4	-33.2
24	69.1	71.4	62.5	-32.9

图 4(d)为基坑外 31 m ~ 75 m 地表沉降曲线,这是由于基坑外侧到坞室墙 0 m ~ 31 m,地面下 5 m 到

地表空间范围内,需要进行拉锚系统、承台廊道、砌块石棱体的施工,土体被开挖和置换处理,导致这段距离内的地表沉降无法考虑,在 0 m ~ 31 m 这段距离内,如图 5(a)所示为工程实例模型的地下 5 m 水平面的沉降值。由图 5 可以看出,随着开挖深度的增加基坑外侧土体沉降值逐渐增大,并且最大沉降点逐渐向远离基坑方向移动,并且最大沉降点会超出基坑外侧 31 m,因此本文后面篇幅中均只画出基坑外 31 m ~ 75 m 地表沉降曲线。地表最大沉降点离坞室墙较远是由于在基坑外侧 0 m ~ 35 m 的范围内进行了水泥土双轴搅拌桩加固淤泥土层。

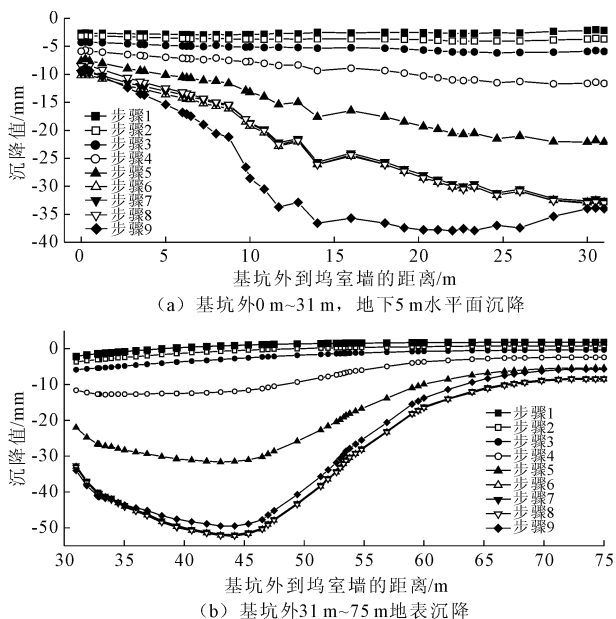


图 5 不同施工步骤下沉降

### 3.2 淤泥质土 $\varphi$ 值的影响

对于淤泥土分别取  $\varphi$  值为 12°、15°、18°、21°,其他影响因素取值不变。若进行真空预压处理, $\varphi$  值可进一步增大。值得说明的是,表 1 中淤泥土层相关物理力学参数均为真空预压软基处理前的力学参数,设计中考虑真空预压引起的强度增长。

由计算结果图 6、表 4 可知,围护桩水平位移、围护桩正负弯矩、承台水平位移、锚碇板水平位移、拉杆拉力、基坑内土方的隆起量、基坑外侧地表沉降均随着淤泥土  $\varphi$  值的增大而减小,且影响显著。淤泥土  $\varphi$  值的增大对锚碇板竖直位移影响不大。根据计算结果可知增大淤泥土内摩擦角效果显著,对控制基坑变形与稳定性,提高基坑安全性作用明显。但是淤泥土  $\varphi$  值增幅度有限,故而在结合工程造价的基础上进行真空预压软基处理。

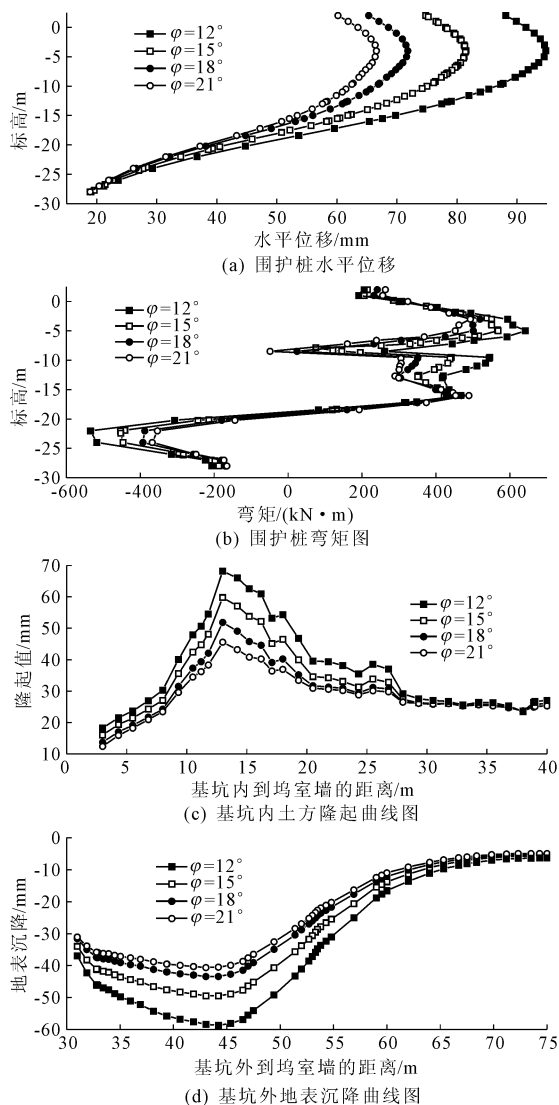


图 6 淤泥质土  $\varphi$  值影响因素计算结果图

表 4 不同情况下拉锚系统计算值

淤泥土 $\varphi$ 值 /( $^{\circ}$ )	最终拉力 /kN	承台水平位移/mm	锚碇板水平位移/mm	锚碇板竖直位移/mm
12	102.3	88.1	78.3	-36.9
15	74.9	74.7	65.7	-33.8
18	49.7	65.2	56.9	-31.5
21	33.7	60.2	52.5	-31.0

排,加密方式如图 7 所示。

表 5 基坑内各排管桩最大水平位移

排数	1	2	3	4	5	6	7	8
水平位移 /mm	76.8	77.0	77.3	75.7	59.8	54.5	42.0	33.0
排数	9	10	11	12	13	14	15	
水平位移 /mm	27.9	24.1	21.8	18.0	16.8	15.7	14.2	

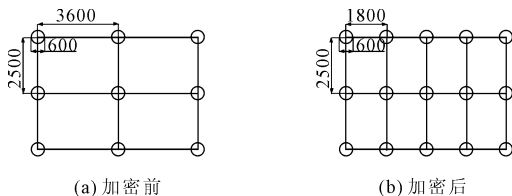


图 7 坞室墙加密方案

基坑内管桩加密排数分别取值为 1 排、2 排、3 排、4 排、5 排五种情况进行有限元分析,其他影响因素的取值不变。由计算结果可知(如图 8、表 6 所示),围护桩水平位移、承台水平位移、锚碇板水平位移、基坑内土方的隆起量、基坑外侧地表沉降均随着管桩加密排数的增大而减小。基坑内土方的最大隆起点、基坑外侧地表最大沉降点随着加密排数的增加均逐渐向远离坞室墙的方向缓慢移动。围护桩上下弯矩随管桩加密排数的增大几乎不变,而底板下 10 m 左右深度范围内的围护桩正弯矩随着加密排数的增加而减小,且效果显著。管桩加密排数的增加对拉杆拉力、锚碇板竖直位移影响不大。

表 6 拉锚系统计算值

加密排数	最终拉力 /kN	承台水平位移/mm	锚碇板水平位移/mm	锚碇板竖直位移/mm
0	74.9	74.7	65.7	-33.8
1	73.6	70.4	61.4	-31.6
2	77.1	67.9	58.8	-30.5
3	81.5	66.7	57.4	-29.9
4	83.3	64.6	55.3	-28.8
5	85.8	62.5	53.1	-28.0

通过对淤泥土  $c$  值与  $\varphi$  值的研究,我们可以看到真空预压地基处理方法对于处理淤泥土、控制基坑变形能取得较好的效果,因而该法比较适合应用在沿海地区淤泥及淤泥质土地基处理中。

### 3.3 基坑内管桩加密排数的影响

根据表 5 可知,基坑内管桩的最大水平位移随着靠近基坑中心而逐渐减小,而前 5 排管桩侧向变形相对较大,根据此结果,加密方案只考虑加密 5

由计算结果可知,随着加密排数的增加,效果逐渐减弱。由于每根管桩长度较大,坞室长度也较大,总体来说,每加密一排管桩,总成本会增加不少,故而从造价角度综合分析,加密一排或两排效果较好。

### 3.4 盆式开挖下坑底预留土宽的影响

基坑采用盆式开挖,基坑内最上方预留土宽度为 4 m,基坑底预留土宽度分别取值为 6 m、8 m、10 m、12 m、14 m、16 m 六种情况进行有限元分析,其他

影响因素的取值不变。由计算结果可知(如图 9、表 7 所示),围护桩水平位移、承台水平位移、锚碇板水平位移、拉杆拉力、基坑内土方的隆起量、基坑外侧地表沉降均随着基坑底预留土宽度的增大而减小,且影响显著。基坑内土方的最大隆起点、基坑外侧地表最大沉降点则逐渐远离坞室墙,最大隆起点移动较快。围护桩靠近顶部正弯矩随预留土宽度增大逐渐增大;中间及下面部位,正负弯矩都在逐渐减小。基坑底预留土宽度的增大对锚碇板竖直位移影响不大。这是因为随着基坑底预留土宽度的增大逐渐形成由直立开挖到放坡开挖的效果,故而整体变形及内力都会变小。

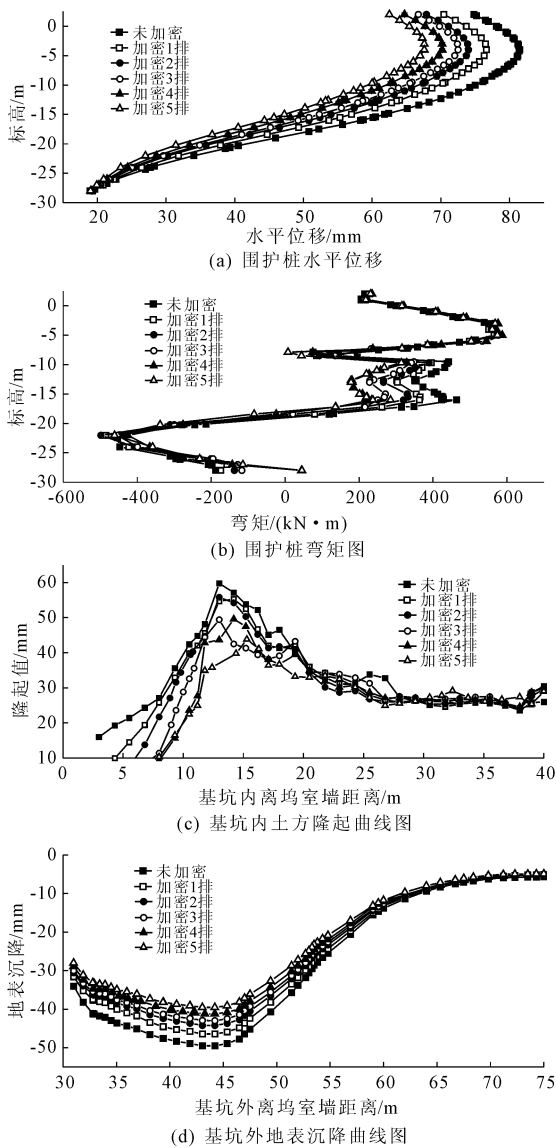


图 8 管桩加密影响因素计算结果图

根据计算结果可知,当基坑内无预留土直接垂直开挖时,其各项变形及内力都大于盆式开挖,且差异显著,由此显示出了盆式开挖的优越性。随着基

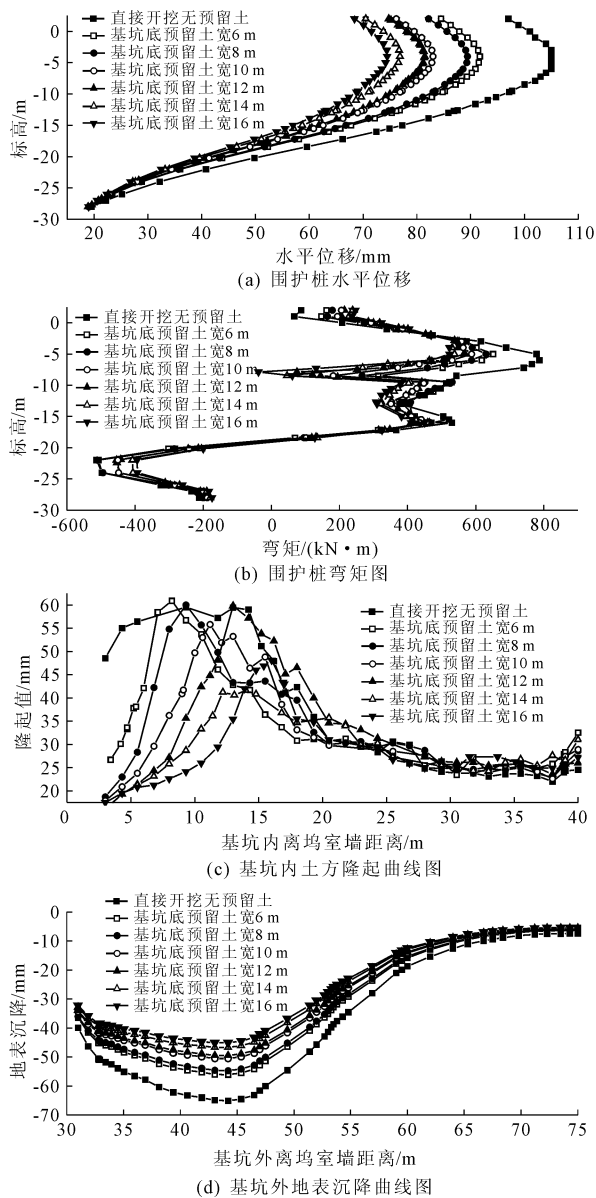


图 9 基坑底预留土宽影响因素计算结果图

表 7 不同情况下拉锚系统计算值

基坑底预留土宽度/m	最终拉力/kN	承台水平位移/mm	锚碇板水平位移/mm	锚碇板竖直位移/mm
0	172.9	97.0	89.5	-39.8
6	107.7	84.4	74.5	-36.5
8	96.7	82.1	72.5	-35.9
10	81.7	76.1	68.7	-34.3
12	74.9	74.7	65.7	-33.8
14	66.5	70.5	61.7	-32.8
16	62.7	68.3	61.4	-32.1

坑底预留土宽度的增加,船坞基坑总体变形以及结构的变形内力逐渐变小,基坑趋于稳定;但随着预留土宽度的增大,对于基坑内土方开挖工作进展不利,会影响开挖进度。故而从施工效率及变形控制等因

素综合分析,根据计算结果,在该船坞基坑采用盆式开挖时,当基坑底预留土宽度在 10 m 或者 14 m 时效果好。

## 4 结 论

(1) 淤泥土的强度参数对计算结果影响显著,  $c$ 、 $\varphi$  值的提高对控制基坑整体变形、结构变形与内力效果较好。由于真空预压地基处理方法对于处理淤泥及淤泥质土具有处理效果好、污染少、经济效益好等优点,因而该法比较适合应用在沿海地区淤泥及淤泥质土地基处理中。故而在结合造价因素考虑,适当提高淤泥土强度会有较好的效果。

(2) 关于该大型船坞基坑内管桩加密方案,有一定的效果,但随着加密排数的增加,其控制效果逐渐减弱,与此同时施工成本会增加不少,故而从造价角度综合分析,加密一排或两排效果较好。

(3) 与直接垂直开挖方式相比盆式开挖效果明显,盆式开挖下,随着基坑内预留土宽度的增大,有利于船坞基坑总体变形与内力的控制,但是对于基坑内土方开挖工作进展不利,会影响开挖进度。故而从施工效率及变形控制等因素综合分析,根据计算结果,该船坞基坑在采取盆式开挖方式时,当基坑底预留土宽度在 10 m 或者 14 m 时变形控制效果较好。

### 参考文献:

[1] 严 恺.海港工程[M].北京:海洋出版社,1996.  
[2] 贺 强.软土中深开挖水泥搅拌桩与排桩墙组合支护结构性能研究[D].西安:长安大学,2011.

[3] 汤子扬,牛志国,陈春燕. Plaxis 在板桩码头分析中的应用[J].水利水运工程学报,2013(1):81-85.  
[4] 黄海云.砂性地基中船坞基坑降水对临近板桩码头位移动影响分析[J].水运工程,2012(11):79-82.  
[5] 陈永辉,何 彬,许春虎.板桩加固护岸结构有限元分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(3):1-6.  
[6] 刘熙媛.基坑开挖过程的试验与数值模拟及土的微观结构研究[D].天津:天津大学,2004.  
[7] Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Germany: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2007.  
[8] 王浩然,王卫东,徐中华.基于数值分析的预估基坑开挖对环境影响的简化方法[J].岩土工程学报,2012,34(S1):108-112.  
[9] 徐中华,王卫东.敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J].岩土力学,2010,31(1):258-264.  
[10] 刘志祥,张海清. PLAXIS 3D 基础教程[M].北京:机械工业出版社,2014:12.  
[11] 刘志祥,张海清. PLAXIS 高级应用教程[M].北京:机械工业出版社,2015:8.  
[12] 王卫东,王浩然,徐中华.基坑开挖数值分析中土体 HS 模型参数的试验研究与分析[J].岩土力学,2012,33(8):2283-2290.  
[13] 刘 畅.考虑土体小同强度与变形参数及基坑支护空间影响的基坑支护变形与内力研究[D].天津:天津大学,2008.  
[14] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.  
[15] 叶 琪,简文彬,张 登,等.驳岸岸坡渗流及其稳定性有限元分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):38-42.

(上接第 156 页)

[9] 荣 冠,朱焕春.茅坪溪土石坝沥青混凝土心墙施工期变形分析[J].水利学报,2003(7):115-119.  
[10] 张慧萍,赵 迪,梁 越.金佛山沥青混凝土心墙坝二维渗流计算分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(2):449-454.  
[11] 刁志明,邓弟平,廖秀峰.金佛山沥青混凝土心墙坝有限元应力变形分析[J].水电能源科学,2013,31(5):55-58.  
[12] 王 娟,李勋峰.金平沥青混凝土心墙堆石坝三维有

限元数值分析[J].水电能源科学,2007,25(1):71-74.  
[13] 蔡 新.混凝土面板堆石坝结构分析与优化设计研究[D].南京:河海大学,2005.  
[14] 中华人民共和国水利部.水工混凝土结构设计规范:SL191-2008[S].北京:中国水利水电出版社,2008.  
[15] 闻世强.茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝反演分析[D].南京:河海大学,2004.  
[16] 王科峰,彭立斌,王洪洋.尼尔基水利枢纽主坝沥青混凝土心墙变形监测[J].大坝与安全,2008(6):28-30.