



超深厚软土地区板桩坞墙的计算*

朱镇洲^{1,2}

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200090;

2. 上海市海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 板桩坞墙结构由于其经济性而广泛应用于软土地区船坞设计中, 但目前存在前墙位移过大且位移限值不明确、计算结果与实际情况不适应等问题。以某境外工程的板桩坞墙为例, 结合其施工工序和结构特点, 采用 PLAXIS 软件进行数值模拟计算, 与实测数据进行对比; 在优化模型的基础上进行不同工况下的结构计算, 推导结构位移及内力变化规律。结果表明: 超深厚软土地区板桩坞墙结构采用硬化土模型计算的精确度较高; 硬化土模型的土体参数中, 割线模量 E_{50} 敏感度最高, 无试验数据时 E_{50} 建议取 2~2.5 倍标贯击数, 卸载-再加载模量 E_{ur} 建议取 3 倍 E_{50} ; 考虑坞室底板桩基与坞墙前土体的桩土共同作用时, 坞墙的水平位移计算结果最大值降低约 30%, 计算板桩坞墙时应考虑底板桩基对坞墙的作用。

关键词: 板桩式坞墙; 软土; PLAXIS; HS 模型

中图分类号: U656.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0232-06

Calculation of sheet-pile dock wall in ultra-deep thick soft soil area

ZHU Zhenzhou^{1,2}

(1. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Research Center of Ocean & Shipbuilding Engineering, Shanghai 200090, China)

Abstract: Sheet-pile dock wall is widely used in dock design at soft soil area because of its economy, but there are some problems, such as excessive displacement of front wall, unclear displacement limit, calculation results are not adapted to the actual situation. This paper takes a sheet-pile dock wall of an overseas project as an example, uses PLAXIS software to carry out numerical simulation calculation combining with the construction process and structural characteristics of the dock wall, and compare with the actual measured data. Then the paper carries out the structural calculation under different working conditions on the basis of optimization model, and deduces rules of structural displacement and internal force change. The results show that the hardening soil model is more accurate to calculate the structure of sheet-pile dock wall in ultra-deep soft soil area. Among the soil parameters of hardening soil model, the secant modulus E_{50} is the most sensitive. When there is no test data, E_{50} is recommended as 2~2.5 times SPT blow count, unloading-reloading modulus E_{ur} is recommended as 3 times E_{50} . Considering the interaction between pile of dock slab and soil in front of the dock wall, the maximum horizontal displacement of the dock wall is reduced by about 30%. The effect of pile foundation of dock slab should be considered when calculating of dock wall.

Keywords: sheet-pile dock wall; soft soil; PLAXIS; HS model

干船坞是一种供船舶修造的水工建筑物, 主要由坞室、坞口等结构组成, 坞室由底板和两侧

坞墙组成, 坞墙可采用重力式、板桩式和桩基承台式、半重力式和衬砌式结构等。已有一些船坞

收稿日期: 2024-02-28

*基金项目: 上海市优秀学术/技术带头人计划资助项目(23XD1434800)

作者简介: 朱镇洲(1998—), 男, 从事修造船水工工程、港口与航道工程的设计和技术研究。

结构的变形(位移)研究,如章祝君等^[1]对船坞岸壁结构变形特性分析及控制进行分析,江杰等^[2]对船坞基坑开挖对临近桩基的影响进行分析。目前,软土地基船坞工程设计及施工中由于坞墙结构变形过大及变形限值不明确而导致的结构方案选择、施工过程中控制及竣工投产后残余变形继续发生等难题有待解决。本文根据某软土地质条件下坞墙案例,通过连续介质有限元分析进行反演计算,总结变形发生的规律及实际变形发生后的结构使用情况。

板桩坞墙一般由前墙、拉锚结构、锚碇桩(墙)等组成,适用于地基承载力较低的工程区域。其结构受力机理十分复杂,须采用有限元计算方法进行数值模拟分析,如曹邱林等^[3]、戴江山等^[4]对船坞坞墙施工期的结构及钢管板桩构件进行有限元分析。本文利用 PLAXIS 有限元软件对超深厚

软土地区板桩坞墙结构进行计算,结合坞墙施工工序和结构特点,在数值模拟的基础上推导结构位移及内力规律,并就坞墙对临近桩基影响及位移控制进行分析。

1 工程概况

某境外船坞工程的坞室顶高程为 7.8 m,坞底高程-4.8 m。坞墙采用单锚板桩结构,板桩墙采用 $\phi 1219$ mm 钢管桩和 AZ20-800 型钢板桩的组合结构,锚碇桩墙采用 AU18 型钢板桩,钢拉杆直径为 65 mm,间距 1.5 m。前墙上现浇混凝土廊道,廊道底板下布置 $\phi 600$ mm 预应力高强度混凝土(PHC)桩。坞室底板采用现浇钢筋混凝土结构,边板厚度 0.8 m,底板下布置 $\phi 700$ mm PHC 桩,桩间距 2.0~3.5 m,船坞典型断面见图 1。

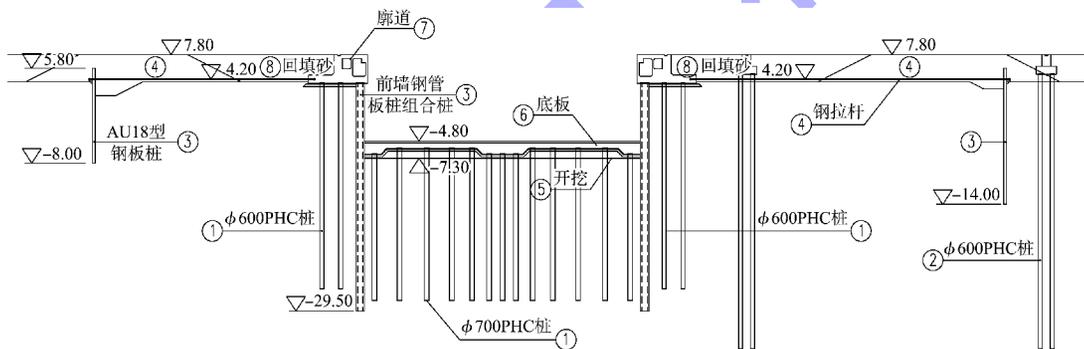


图 1 坞墙典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

该区域地质多为冲填土、淤泥质黏土、黏土等软弱土层,软土层厚度可达 20.8~25.4 m,具有含水率高、孔隙比大、强度低、压缩性高、土质不均匀的特点,承载力低,工程性质差。

2 数值模型

2.1 土体本构模型选取

目前岩土工程计算分析常见的本构模型有 Duncan-Chang 模型、Mohr-Coulomb 模型和硬化土(hardening soil, HS)模型等。根据已有研究,田利勇等^[5]使用 HS 模型对板桩结构进行分析应用,汤子扬等^[6]通过对比计算验证 HS 模型计算板桩码头结构的精确性。基于以上结论,本文的土体本构模型采用 HS 模型,该模型中土体刚度与应力相

关,是能够真实模拟包括软土和硬土在内的不同类型的土体行为的先进模型,在描述土体剪切硬化、加卸载和小应变等方面具有优势,更适合拉锚坞墙结构的模拟分析。

2.2 结构材料参数

选取钻孔进行计算,计算模型中各土层的重度、黏聚力和摩擦角等参数由工程勘察报告提供。根据王卫东^[7]、尹骥^[8]、钱宏伟^[9]对基坑开挖数值分析中 HS 模型参数的试验研究,本文结合工程所在地的行业经验取值及工程经验对土体参数进行确定,三轴固结排水试验割线模量 E_{50} (GPa) 取值为 2 倍标贯击数,卸载-再加载模量 E_{ur} 取 3 倍 E_{50} ,土的材料参数见表 1。

表 1 土体计算参数

土层名称	标贯击数 N /击	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	割线模量 E_{50}/MPa	卸载-再加载模量 E_{ur}/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
①黏土	3.9	1.82	7.8	23.4	12.0	13.3
② ₂ 淤泥质黏土	1.9	1.69	3.8	11.4	22.4	3.0
② ₃ 黏土	3.1	1.64	6.2	18.6	8.7	12.9
③ ₁ 黏土	12.4	1.92	24.8	74.4	58.5	5.5
③ ₂ 粉质黏土	12.1	1.92	24.2	72.6	23.8	14.4
④ ₂ 细中砂	44.7	2.01	89.4	268.2	0.0	33.0
回填砂	-	1.80	10.0	30.0	1.0	30.0
回填土	-	1.70	10.0	30.0	1.0	25.0

坞墙组合钢管板桩前墙、锚碇板桩、混凝土廊道、坞室底板采用板单元模拟，结构的截面积、惯性矩等计算参数折算成每延米。钢拉杆采用点对点锚杆模拟，PHC 桩采用 Embedded 桩单元模拟。通过设置界面强度折减因子对相应土体的黏聚力和内摩擦角进行折减，以此来考虑板桩墙与土体的相互作用。PLAXIS 程序中结构单元参数的选取见表 2、3。钢拉杆参数为：直径为 65 mm，轴线刚度 EA 为 0.689 GN，间距 L 为 1.5 m。

表 2 板参数

构件	轴向刚度 $EA/(GN \cdot m^{-1})$	抗弯刚度 $EI/(GN \cdot m^2 \cdot m^{-1})$	线密度/ $(kg \cdot m^{-1} \cdot m^{-1})$	泊松比 ν
坞墙前墙	5.358	0.963	200	0.300
锚碇板桩	3.081	0.081	200	0.300
坞室底板	25.500	1.535	700	0.167
廊道底板	36.000	4.320	700	0.167

表 3 PHC 桩参数

规格	弹性模量 E/GPa	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	直径 D/m	壁厚 T/m	间距 L/m
PHC700	30	0.7	0.7	0.13	2
PHC600	30	0.7	0.6	0.13	3

2.3 设计施工工况

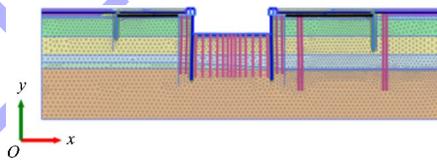
合理正确的施工顺序对模型的计算结果影响很大，本文利用 Plaxis 的激活、冻结单元的功能进行施工工况模拟。

坞墙结构主要施工顺序为：坞室底板、廊道下 PHC 桩施工→吊车道 PHC 桩施工→坞墙组合钢板桩、锚碇板桩施工→廊道底板施工、锚碇体系安装→坞室降水开挖→减压排水系统及船坞底板浇筑施工→廊道施工→坞墙后回填。

施工期控制工况为坞室内开挖到底，但坞室底板尚未浇筑施工时，施工期均载 10 kPa。

2.4 模型建立

在 PLAXIS 计算中，板桩坞墙结构可以简化为平面应变问题，考虑问题的合理性、计算速度和模型规模，模型采用 15 节点平面应变单元二维建模，计算模型及网格划分见图 2。



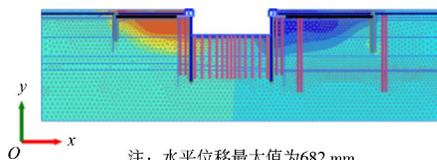
注：单元最大位移值为 930 mm。

图 2 坞墙计算模型

3 数值计算结果分析

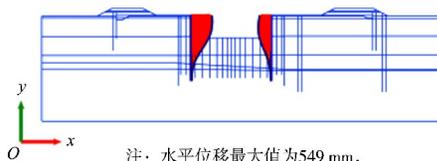
3.1 现场实测值对比

坞墙断面土体及坞墙前墙水平位移计算结果见图 3。



注：水平位移最大值为 682 mm，最小值为 -383 mm。

a) 坞墙断面土体水平位移



注：水平位移最大值为 549 mm，最小值为 -332 mm。

b) 坞墙前墙水平位移

图 3 坞墙断面土体及坞墙前墙水平位移计算结果

北坞墙前墙水平位移最大值为 549 mm，出现在高程 0.70 m 左右；南坞墙水平位移最大值为 328 mm，出现在高程 -1.1 m 左右。南北坞墙的计算结果差异主要是两侧的拉杆长度及锚碇板桩长度不同导致。

施工过程中对坞墙前墙后的土体深层水平位移、锚碇板桩水平位移及钢拉杆拉力等进行了长期监测，待船坞底板施工完成后监测值趋于稳定，收集实测数据与计算结果进行对比分析。坞墙前墙的水平位移计算值与现场实测值随深度变化的比较见图 4。

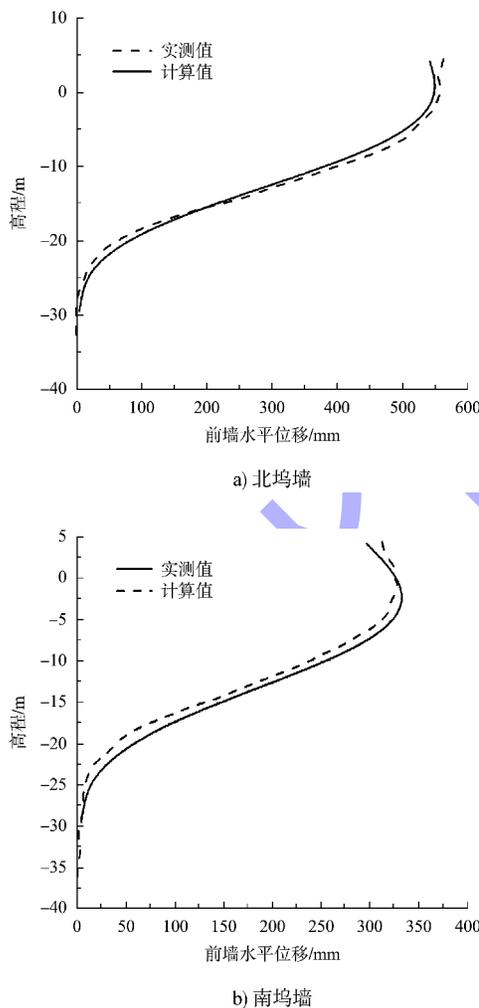


图 4 坞墙前墙水平位移对比

由图 4 可以看出，坞墙前墙的计算值与实测值能够很好地吻合，且坞墙拉杆内力、锚碇板桩水平位移的计算值与实测值吻合程度也较好，计算模型能够较好地反映工程实际。分析结果可得，坞墙前墙及锚碇板桩发生很大的水平位移，且锚

碇板桩与前墙的位移不协调，拉杆拉力偏小，前墙弯矩计算值过大，该结构应进行优化设计。

3.2 优化方案计算分析

针对 3.1 节的计算结果，本文提出一种优化后的坞墙结构方案，通过增加坞墙前墙及锚碇板桩的刚度、对锚碇板桩前的软土进行旋喷加固处理，以及增加施工期支撑控制坞墙水平位移。优化计算模型见图 5，计算结果对比见表 4。

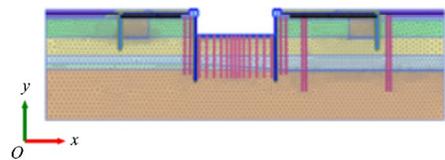


图 5 优化计算模型

表 4 南坞墙计算结果对比

方案	前墙弯矩 $M/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	前墙最大位移 σ/mm	廊道下 PHC 桩弯矩 $M/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	拉杆拉力 T'/kN
原方案	2 494	346	124	753
优化方案	2 106	133	43	610

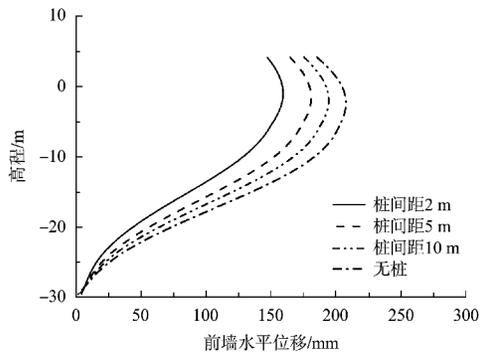
通过计算结果对比可得，优化模型南坞墙前墙的最大位移在施工完成时能控制在 133 mm 左右（约为开挖深度的 1%），且前墙最大弯矩、廊道下 PHC 桩的最大弯矩、拉杆内力等数值均降低，这表明优化措施能有效地控制坞墙位移、降低结构内力。其中，由于坞墙水平位移 90% 以上发生在施工阶段，增加施工期支撑是经济有效的坞墙结构位移控制措施。

3.3 底板桩基间距对前墙的影响分析

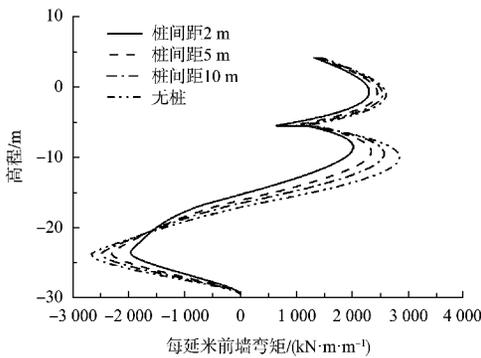
软土地区船坞底板大多采用桩基，目前坞墙设计中没有考虑底板桩基与桩间土的桩土共同作用。采用弹性线法、竖向弹性地基梁法计算板桩坞墙时，无法直接验证底板桩基对坞墙的影响。本文基于 3.2 节中优化后的计算模型分析底板桩基间距对前墙位移及内力的影响，考虑桩土共同作用。

底板桩基纵向间距对坞墙前墙位移及弯矩的影响见图 6。由图 6a) 可以看出，随着底板 PHC 桩纵向间距的增加，坞墙前墙位移逐步增大。结

果表明,不考虑底板桩基作用时坞墙前墙最大位移提高约30%,且数值计算的位移曲线,特别是底板以下的位移计算结果与实测数据差异较大。由此可见,目前坞墙设计没有考虑底板桩基桩土共同作用显得过于保守。



a) 不同桩间距对坞墙前墙位移曲线



b) 不同桩间距对坞墙前墙弯矩曲线

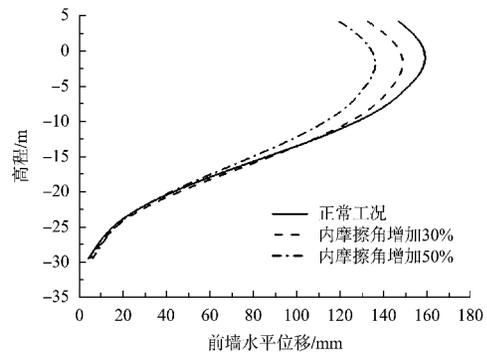
图6 底板桩基纵向间距对坞墙前墙位移及弯矩的影响曲线

由图6分析可得,即使底板桩基间距超过10m,前墙的计算结果与不考虑底板桩基的计算结果仍存在一定差异,即底板桩基在模型中依然在发挥一定作用。但软土地区船坞工程中,由于修造船型日益大型化,墩木荷载较大,导致底板桩基间距布置通常较密,一般在 $3D \sim 7D$ (D 为桩直径)之间,故坞墙计算应考虑底板桩基作用。

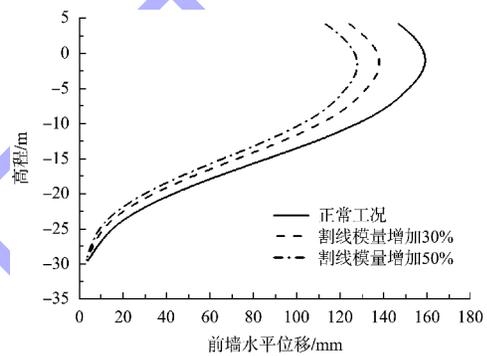
3.4 土体参数对坞墙位移的敏感性分析

HS模型中主要土体参数包括内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和割线模量 E_{50} 。本文基于3.2节中优化模型,按一定百分比调整上述参数,以验证坞墙前墙在不同土体参数下的前墙变形,同时分析模型中土体参数变化对计算结果影响的敏感性,计算得到的前墙位移见图7。可以看出,割线模量 E_{50}

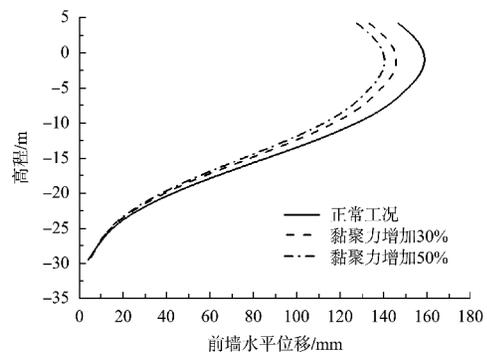
对前墙位移的敏感度最高,内摩擦角 φ 次之,黏聚力 c 影响最小。



a) 不同内摩擦角时前墙水平位移对比



b) 不同割线模量时前墙水平位移对比



c) 不同黏聚力时前墙水平位移对比

图7 优化模型土体参数变化对前墙水平位移的敏感性分析曲线

3.5 坞墙位移对临近桩基影响分析

随着坞室基坑的施工开挖,坞墙后土体必然会产生位移,施工期发生的坞墙水平位移占坞墙总水平位移的90%以上。前墙的水平位移越大,临近桩基的附加位移及附加弯矩随之增大,从而导致其竖向承载力降低,严重时甚至会损坏桩基。本工程监测数据表明,当坞墙前墙位移超过25cm(约合开挖深度的2%)时,坞墙廊道下桩基及临近

吊车道桩基产生裂缝。

本文基于 3.2 节中优化模型，按 30% 百分比同时调整土体的 c 、 φ ，以分析在不同的坞墙前墙位移时，临近桩基的位移及内力情况。计算得到的前墙位移、临近桩基的水平位移及弯矩见图 8。通过分析可得，当土体参数很低时，继续折减土体参数对计算结果影响很大，而增强土体参数对计算结果影响很小。超深厚软土地区土体性质较差，采用类似真空预压的地基处理措施对场地进行整体处理对较深 c 、 φ 的提升效果不明显，因此对坞墙结构帮助较小，经济性和工期上也不占优势。

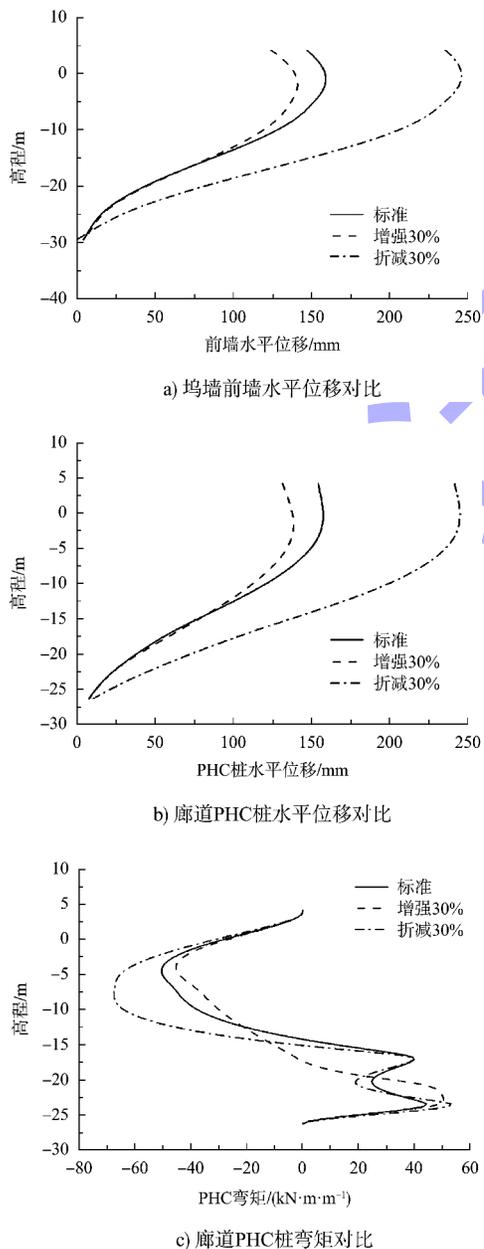


图 8 计算得到的前墙、临近桩基的水平位移及弯矩曲线

坞室开挖过程中坞墙前墙位移增大，临近桩基受坞墙后土体位移作用随之增大，临近桩基附加水平位移和附加弯矩逐渐增大，且三者的增长率基本一致。坞室开挖对临近桩基的影响随着桩基与坞室的距离增大而减小，随前墙位移增大而增大；且坞室在不同开挖深度时对临近桩基的影响不同，桩身附加弯矩和位移增长率远大于开挖深度的增长率。

4 结论

1) 在 PLAXIS 软件中应用不同的土体本构模型对某工程的船坞坞墙结构进行计算分析发现，HS 模型的数值模拟计算结果与实际位移、结构内力实测值的吻合度较好。因此在使用 PLAXIS 软件进行软土地区板桩坞墙结构分析时，建议采用 HS 模型。 E_{50} 无数据时建议取值为 2~2.5 倍标准贯入度， E_{ur} 建议取 3 倍 E_{50} 。

2) 考虑坞室底板桩基与坞墙前土体的桩土共同作用时，坞墙的水平位移计算结果最大值降低约 30%，且前墙位移曲线与现场实测数据吻合度更好。随着底板桩基间距的增大，坞墙的水平位移及弯矩逐步增大，在深厚软土地区的坞墙设计中应考虑底板桩基对坞墙的作用。

3) 通过对优化后的结构模型进行土体参数敏感性分析可得：割线模量 E_{50} 的敏感度最高，内摩擦角 φ 次之，黏聚力 c 影响最小。超深厚软土地区坞墙结构设计中须慎重选取土体参数，必要时应进行敏感性分析。

4) 超深厚软土地区小幅度地提高土体参数 c 、 φ ，对控制坞墙前墙位移及内力作用较小。坞墙位移会引起临近桩基的竖向承载力降低，位移超过开挖深度的 2% 时可能导致一定范围内临近桩基产生裂缝。超深厚软土地基下的坞墙设计须保证坞墙刚度、控制坞墙位移，密切关注开挖期间的临近桩基位移变化。

(下转第 251 页)