



桩-土界面摩擦特性及其在船闸闸室 结构受力变形计算中的应用

罗通¹, 钟振宇¹, 唐译²

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙410014;
2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏南京210029)

摘要: 水运建筑物桩基础与地基土的力学性质差异较大, 桩-土界面的接触关系是开展水运建筑物受力变形数值计算时常需考虑的关键问题。针对桩-土界面接触问题, 利用自主研发的大型多功能桩-土界面剪切仪, 开展了不同法向应力和桩身材料条件下接触面摩擦特性试验研究。试验结果表明, 界面剪切应力随着剪切位移增加增长到峰值后趋于稳定, 该峰值与法向应力呈正比, 并与桩身材料的粗糙度相关。基于接触力学, 建立考虑界面土体无损伤状态和损伤状态的桩-土界面摩擦系数计算模型, 模型计算值与接触面摩擦试验数据误差小于5%, 可准确反映桩-土接触面摩擦特性。将该模型应用于某船闸闸室PHC桩承载特性和结构受力变形分析, 单桩荷载-位移关系和整体结构位移计算结果均与现场载荷试验结果及监测数据相符, 模型将有助于提升水运建筑物受力变形分析的准确性。

关键词: 桩-土界面; 接触关系; 摩擦特性; 船闸闸室; 受力变形; 有限元分析

中图分类号: U641; TV697.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0185-08

Friction characteristics of pile-soil interface and its application to the calculation of stress and deformation of ship lock chamber structure

LUO Tong¹, ZHONG Zhenyu¹, TANG Yi²

(1. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;
2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The contact relationship at the pile-soil interface is a key issue that should be considered in numerical calculations of the stress and deformation of hydraulic structures since the significant differences in the mechanical properties between the pile foundations and the foundation soil. To address the pile-soil interface contact problem, a large-scale multifunctional pile-soil interface shear apparatus independently developed is used to conduct experimental study on the frictional characteristics of the contact interface under different normal force and pile material conditions. The experimental results indicate that the interface shear stress increases with the growth of shear displacement until it reaches a peak value and then stabilizes. This peak value is proportional to the normal stress and is related to the roughness of the pile material. Based on contact mechanics, a calculation model for the pile-soil interface friction coefficient is established, considering both the undamaged and damaged states of the interface soil. The error between the calculated values of the model and the experimental data from interface friction tests is less than 5%, accurately reflecting the frictional characteristics of the pile-soil interface. This model is applied to analyze the bearing characteristics and structural stress-deformation of PHC piles in a lock chamber.

收稿日期: 2025-08-25 录用日期: 2025-11-06

作者简介: 罗通(1989—), 男, 高级工程师, 从事水利和水运工程研究工作。

The single pile load-displacement relationship and the overall structural displacement calculation results are consistent with field load test results and monitoring data. This model will contribute to enhancing the accuracy of force and deformation analysis for hydraulic structures.

Keywords: pile-soil interface; contact relationship; friction characteristics; ship lock chambers; stress and deformation; finite element analysis

桩基础是一种常用的基础形式，桩-土间的摩擦特性是影响水运建筑物结构与地基相互作用的关键因素^[1-5]。由于桩基础与土体的力学性质差异较大，桩与土之间形成接触面或接触带，如果直接采用土和结构体各自的本构关系分别进行计算并直接耦合，则存在诸多问题。目前一般采用接触面单元模拟土体与桩的接触关系，包括薄层单元、无厚度单元等，这些单元的计算参数存在诸多假定，相关参数选取较为困难，计算过程也较为繁琐^[6-8]。

采用界面摩擦模型来模拟桩-土的界面特性是一种可行的做法，界面摩擦系数是衡量桩-土界面摩擦行为的重要指标，也是桩-土接触面模型的关键参数，若直接凭经验取值，则严重影响计算结果的合理性和准确性^[9-13]。目前通常采用界面摩擦试验或界面剪切试验进行界面摩擦系数测定，但现有界面摩擦设备存在试样尺寸较小且单一、剪切位移受限等问题；界面剪切试验以“平面型”剪切设备为主，存在试验结果受上部剪切盒与下部剪切盒之间开口宽度设置以及加载边界为刚性等问题，这对界面摩擦系数测定准确性产生了一定影响^[14-6]。

可行的做法是采用柔性加载边界和施加围压的方式模拟法向应力，设置较大试样尺寸和剪切位移，并增设试样尺寸可调整空间。

本文针对桩-土界面摩擦特性，研发桩-土界面摩擦试验设备，开展桩-土界面摩擦特性试验，提出了接触面摩擦系数模型，并将建立的接触面模型应用于某船闸闸室结构受力变形有限元计算中。

1 桩-土界面摩擦特性试验研究

1.1 试验材料

试验用土为取自赣江下游某船闸的覆盖层地基含细颗粒砂土，土样比重 $G_s = 2.68$ ，平均粒径

$D_{50} = 0.18$ mm，不均匀系数 $C_u = 2.33$ ，最大孔隙比 $e_{\max} = 1.05$ ，最小孔隙比 $e_{\min} = 0.53$ ，细粒含量 $F_c = 6.26\%$ 。试验用土的颗粒级配曲线见图 1。

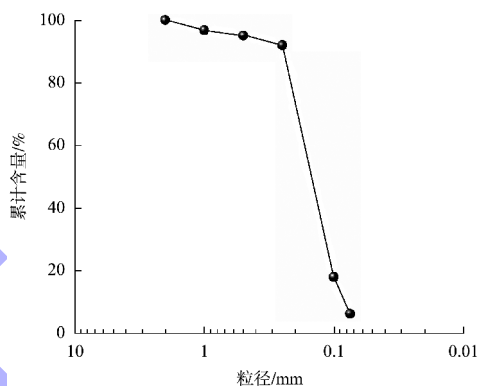


图 1 试验用土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve of test soil

试验用模型桩考虑了铝合金和混凝土两种材质。铝合金桩利用 6061 型铝合金管制作，弹性模量为 68.3 GPa，泊松比为 0.33，桩长为 125 cm，桩径为 4 cm。混凝土桩以钢筋和混凝土为材料，为确保桩的强度，待混凝土初凝后，对其脱模并放入标养室进行 28 d 标养，制作完成的混凝土桩弹性模量为 36.5 GPa，泊松比为 0.17，桩长为 95 cm，桩径为 4 cm。

1.2 试验设备

本文开展的桩-土界面摩擦试验采用了自主研发的大型多功能桩-土界面剪切仪，其实物见图 2，主要包括剪切罐、竖向荷载控制系统和数据采集系统。

剪切罐兼顾了试样的“轴对称性”、结构稳定性和密封性、设备调平、试样尺寸、剪切位移、模型桩安装、法向应力施加、加载边界、土样制备和密封等问题。剪切罐解决了制备土样的空间均匀性、土样和模型桩轴心线重合度、土样两端与模型桩接触部位的密封等问题，突破了传统设备

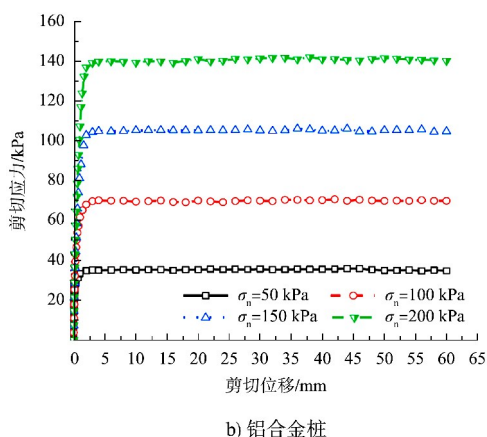


图3 不同法向应力下界面剪切应力-剪切位移曲线
Fig. 3 Interface shear stress-shear displacement curves under different normal stresses

当取界面剪切应力随剪切位移变化趋于稳定的首个剪切应力值作为界面剪切应力峰值时,分析界面剪切应力峰值及其对应的剪切位移。对于混凝土桩,当法向应力由 50 kPa 增长至 200 kPa 时,界面剪切应力峰值依次增长了 98%、195% 和 303%,与界面剪切应力峰值对应的剪切位移值分别增加了 40%、78% 和 110%,说明桩身材料一定时,界面剪切应力峰值与法向应力呈正比,界面剪切应力峰值对应的剪切位移与法向应力存在线性关系。

对于不同的桩身材料,在同一法向应力条件下,混凝土桩与土体界面峰值剪切应力以及对应的剪切位移均显著高于铝合金桩,桩身材质带来的桩-土界面摩擦特性的差异可归结于表面粗糙度的不同,混凝土桩的表面粗糙度显著大于铝合金桩,在某一法向应力下,土颗粒需克服更大模型桩表面的摩擦力从而产生剪切位移。

2 桩-土界面摩擦系数模型

由界面摩擦试验结果可知,接触面剪切变形主要包括试验土样的剪切变形和桩-土接触表面的剪切变形两部分。界面剪切试验初期,接触面的剪切变形主要以试验土样的剪切变形为主,随着剪切变形的增大,接触面剪切变形的主体由试验土样的剪切变形逐渐向桩-土接触表面的剪切变形发展;当界面剪切应力达到峰值以后,接触面的

剪切变形以桩-土接触表面的剪切变形为主。

联系损伤力学机理分析可知,采用损伤演化的概念可以很好地解释接触面破坏的整个过程。接触面破坏损伤主要是较弱的介质出现损伤导致的,对于土体与结构接触面而言,土体为较弱的介质,接触面破坏过程中以土体的损伤为主,研究接触面损伤问题时主要考虑土体的损伤。桩-土接触面在剪切过程中损伤不断累积,整个接触面土体由无损伤土逐渐向损伤土转变。

考虑界面土体的无损伤状态和损伤状态,界面剪切应力 τ 为:

$$\tau = (1 - \psi) \tau_i + \psi \tau_d \quad (1)$$

式中: ψ 为损伤变量; τ_i 和 τ_d 分别为无损伤和损伤状态下的界面剪切应力。

参照胡黎明等^[17]对损伤参数的定义,损伤变量可采用指数函数进行描述:

$$\psi = 1 - e^{-\omega\gamma} \quad (2)$$

式中: e 为自然常数; γ 为标准长度相对剪切位移变化速率; ω 为反映法向应力对界面土体损伤影响的参数。

由于法向应力恒定,界面摩擦系数 μ 为:

$$\mu = (1 - \psi) \mu_i + \psi \mu_d \quad (3)$$

式中: μ_i 和 μ_d 分别为无损伤和损伤状态下的界面摩擦系数。

假定无损伤土的接触面模型为非线性弹性模型,为符合接触面土体变形特点,参照 Duncan 等^[18]、Stutz 等^[19]、Yang 等^[20]提出的界面摩擦系数 μ_i 和剪切位移关系表达式,无损伤土在 $t + \Delta t$ 时刻的界面摩擦系数 $\mu_{i(t+\Delta t)}$ 可表示为:

$$\mu_{i(t+\Delta t)} = \mu_{i(t)} + G_i \Delta\gamma \quad (4)$$

式中: $\mu_{i(t)}$ 为无损伤土在 t 时刻的界面摩擦系数; $\Delta\gamma$ 为应变增量; G_i 为与无损伤土体的界面摩擦系数 μ_i 对应的切线剪切刚度。

则考虑损伤时 $t + \Delta t$ 时刻的界面摩擦系数 $\mu_{t+\Delta t}$ 计算表达式为:

$$\mu_{t+\Delta t} = (\mu_{i(t)} + G_i \Delta\gamma) e^{-\omega(\gamma+\Delta\gamma)} + (1 - e^{-\omega(\gamma+\Delta\gamma)}) \mu_d \quad (5)$$

界面摩擦系数计算模型中的所有参数均可通

过桩-土界面摩擦试验数据拟合获取。

结合本文开展的桩-土界面摩擦试验, 对界面接触模型的准确性进行了验证。模型计算结果见图 4, 在不同法向应力和桩身材质条件下, 指数损伤接触模型计算得到的界面摩擦系数-剪切位移曲线均先迅速上升, 然后逐渐趋于稳定, 模型计算结果与试验结果误差小于 5%。因此, 本文建立界面摩擦系数指数损伤接触模型, 对桩-土界面摩擦非线性特性的模拟效果较好。

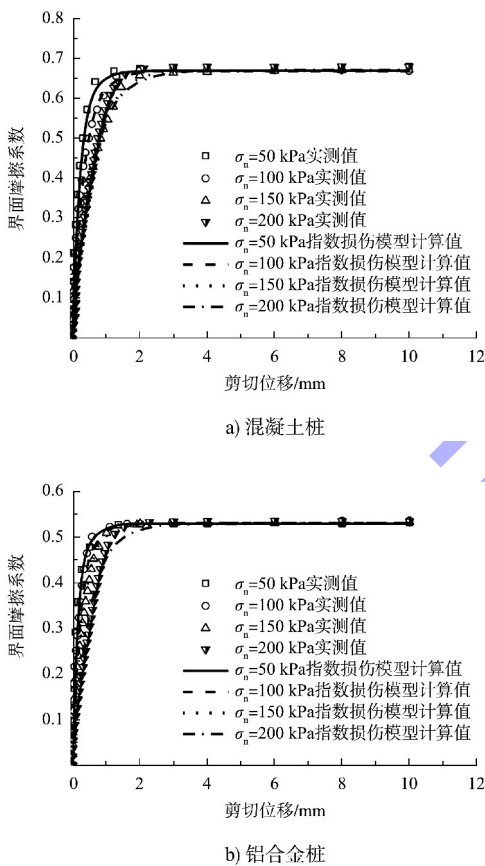


图 4 界面摩擦系数实测值与界面接触模型计算值对比
Fig. 4 Comparison between measured values of interface friction coefficient and calculated values of interface contact model

3 考虑桩-土界面的单桩承载特性及船闸闸室结构受力变形计算

3.1 工程概况

针对某枢纽项目开展考虑桩-土界面的单桩承载特性以及船闸闸室结构受力变形数值计算, 该枢纽项目船闸为双线船闸并行结构, 闸室结构长度为 311.1 m, 闸室顶高程 24 m, 底板高程 -1.02 m,

闸室边墙厚 2.5 ~ 20.0 m, 闸墙下部布置输水长廊道及出水口, 输水廊道尺寸为 5.2 m × 4.8 m (宽 × 高), 墙壁布置浮式系船柱和救生钢爬梯等。船闸上下闸首、闸室基础处理均采用 PHC (prestressed high-strength concrete, 预应力高强度混凝土) 桩, 桩长 25 m、桩径 60 cm, PHC 桩的承载及变形特性对船闸闸室结构整体受力变形影响显著, 因此在现场开展了 PHC 桩静载试验。

3.2 PHC 桩有限元计算模型

PHC 桩与地基土均采用三维 C3D8R 单元模拟, PHC 桩有限元模型见图 5。将 PHC 桩与周围地基土的网格划分加密, 离桩体较远的地基土网格划分相对稀疏。在模型侧面施加限制其法向位移的约束, 在底面施加限制全方向位移的约束。PHC 桩和地基土接触采用考虑损伤的桩-土界面接触模型, 桩身材质为混凝土。PHC 桩采用线弹性模型进行模拟, 弹性模量 38 MPa, 泊松比 0.2, 重力密度 30 kN/m³。数值计算过程中对 PHC 桩逐级施加竖向荷载, 荷载值与现场试验桩载荷试验相同。

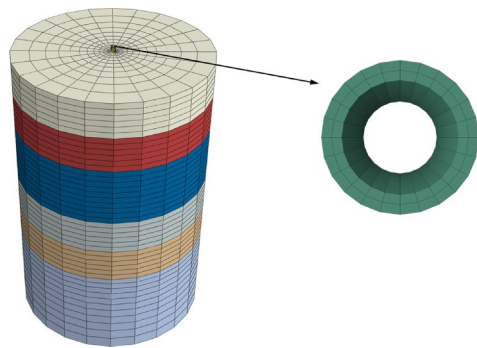


图 5 PHC 桩三维有限元模型
Fig. 5 Three-dimensional finite element model of the PHC pile

3.3 PHC 桩承载特性计算结果

对 PHC 桩在竖向荷载作用下的位移发展进行有限元模拟, 计算结果与静载试验结果的对比见图 6。可以看出, PHC 桩随着竖向荷载的逐级施加, 沉降量逐渐增加, 增长趋势接近线性, 直到荷载超过约 4 000 kN 后, 沉降量增长幅度有所增大。同时, 采用考虑损伤的桩-土界面接触模型计算得到的荷载-沉降关系曲线与静载试验结果较为相符, 而采用常规罚函数接触模型的计算结果相

较实测值明显偏大，通过对比可以验证考虑损伤的桩-土界面接触模型可准确模拟 PHC 桩的承载特性，在船闸闸室结构整体受力变形分析时采用该模型可有效提升计算精度。

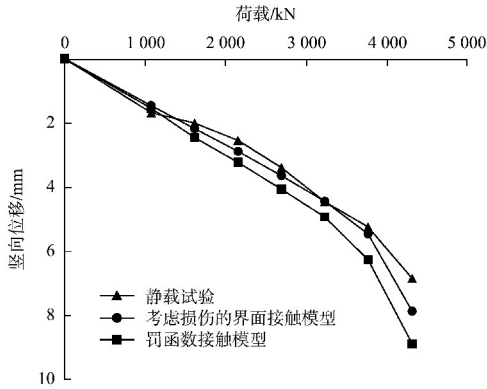


图 6 PHC 桩荷载-沉降曲线计算结果与实测值对比
Fig. 6 Comparison between calculated and measured load-settlement curves for PHC piles

3.4 船闸闸室结构有限元计算模型

将考虑损伤的桩-土界面接触模型运用于船闸闸室结构的受力变形计算。由于闸室为对称结构，可取单侧闸室典型段建立模型，船闸闸室三维有限元模型见图 7，模型横河向宽度取 148 m，顺河向宽度为 26 m，竖向地基深度取 43 m。闸室结构、PHC 桩和地基土层采用三维八节点六面体实体单元模拟，结构与土接触的区域加密网格，PHC 桩共 154 根，单元总数为 503 650 个。图中顺水流方向为 X 轴，指向下游为正；垂直水流方向为 Y 轴，指向右岸为正；竖向为 Z 轴，指向上为正。应力正、负分别表示受拉和受压。

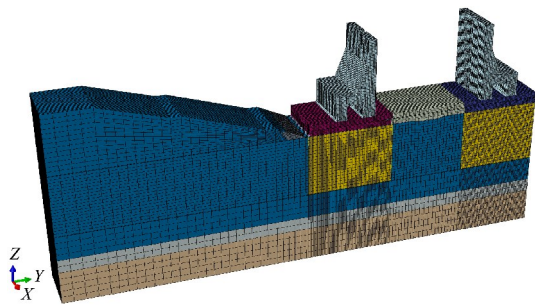


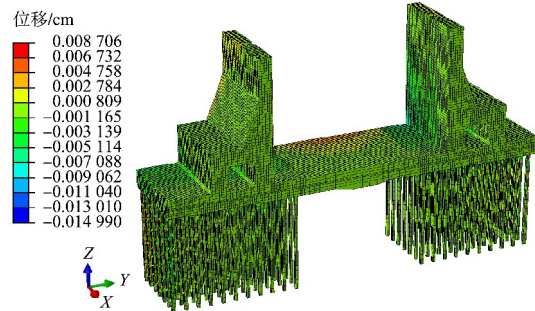
图 7 船闸闸室三维有限元模型
Fig. 7 Three-dimensional finite element model of the ship lock chamber

模型所有侧面均法向约束，底面为三向约束。地基土层采用南水双屈服面模型进行模拟，模型参数采用大型三轴剪切试验结果进行取值。船闸结构采用线弹性模型进行模拟，弹性模量 30 MPa、泊松比 0.2、重力密度 24.5 kN/m³。

本文针对闸室结构在运行工况下的受力和变形进行计算，闸门关闭，上游水位 20.80 m，下游水位 11.88 m，模拟过程分为施工过程和运行过程。施工过程先通过单元“生死”功能将结构和回填土单元在计算中扣除，进行地基土层的地应力平衡，然后激活结构单元，施加上部结构重力，模拟结构建造过程，最后分步激活回填土单元，模拟分步回填过程。在施加结构及回填土荷载后，施加由于结构内外水位差造成的施加于结构的水压力。

3.5 闸首结构及桩基础变形计算结果

运行工况下闸室结构及桩基础 3 个方向的位移分布计算结果见图 8。可以看出，闸室结构在完工况下整体发生向下的沉降，沉降分布为两侧较大、中部较小，最大沉降约为 2.31 cm，位于左右两侧闸室底板位置，主要原因为该位置结构及回填土质量较大。闸室结构整体沿河向位移较小，均小于 0.015 cm。闸室结构横河向最大正向位移约为 1.48 cm，位于远离河岸侧闸墙顶部；最大负向位移约为 0.70 cm，位于靠河岸侧闸墙顶部；回填土的侧向土压力是闸墙顶部位移较大的主要原因。



a) 沿河向

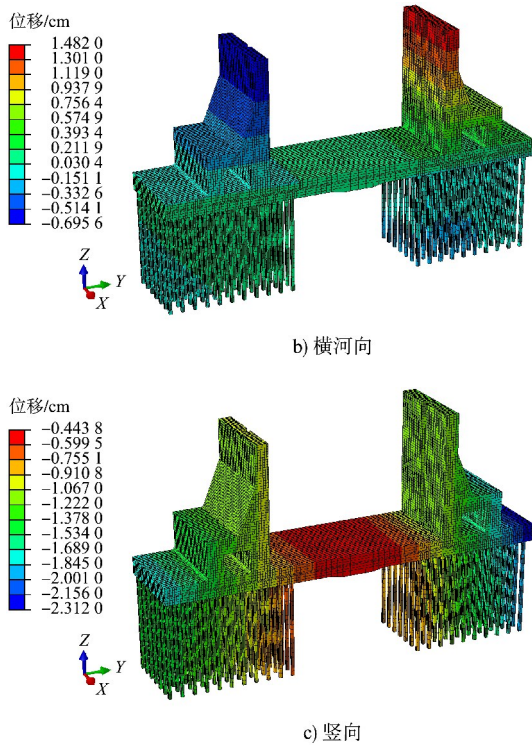
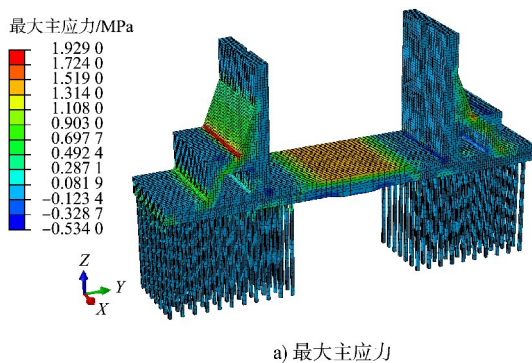


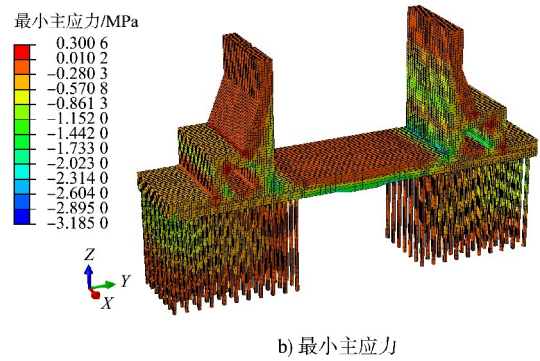
图 8 运行工况下闸室结构及桩基础位移分布云图
Fig. 8 Cloud diagram of displacement distribution of ship lock chamber structure and pile foundation under operation condition

运行工况下闸室结构及桩基础最大及最小主应力分布计算结果见图 9。可以看出, 运行工况下闸室结构最大拉应力为 1.93 MPa, 位于输水廊道上方闸墙拐角处; 最大压应力为 3.19 MPa, 位于闸墙和底板交接处。

运行工况下闸室结构的受力变形计算表明, 结构应力及变形均较小, 其中位移计算值与该船闸闸室在运行期间的实测值相符, 进一步验证了本文提出的桩-土界面摩擦系数模型的准确性, 以及在结构受力变形有限元计算中考虑桩-土相互作用的必要性。



a) 最大主应力



b) 最小主应力

图 9 运行工况下闸室结构主应力分布云图

Fig. 9 Cloud diagram of main stress distribution of ship lock chamber structure under operation condition

4 结论

1) 利用自主研发的大型多功能桩-土界面剪切仪开展桩-土界面摩擦特性试验, 发现界面剪切应力随着剪切位移增加先增长后逐渐趋于稳定, 界面剪切应力峰值与法向应力呈正比, 且与桩身材料的粗糙程度相关。

2) 考虑界面土体的无损伤状态和损伤状态, 提出了基于接触力学的桩-土界面摩擦系数计算模型, 模型参数均可通过接触面剪切试验获取, 模型计算值与桩-土摩擦试验数据相符。

3) 通过模拟 PHC 桩承载特性并与现场载荷试验结果进行对比, 验证了桩-土接触模型的准确性。应用该模型计算得到的某船闸闸室结构位移值与实测值相符, 表明了模型对于分析水运建筑物受力变形问题的可行性和精确度。

参考文献:

[1] 李成强, 陶桂兰, 曹称宇. 船闸闸室结构刚性桩加固地基承载特性分析[J]. 水道港口, 2017, 38(3): 263-268.
LI C Q, TAO G L, CAO C Y. Bearing characteristic analysis on lock chamber with rigid-pile strengthening foundation[J]. Journal of waterway and harbor, 2017, 38(3): 263-268.

[2] 马育斌, 莫杰. 复合桩基础在键为船闸中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2022(11): 71-73.
MA Y B, MO J. Application of composite pile foundation in Qianwei Ship Lock [J]. China water transport (the second half of the month), 2022(11): 71-73.

[3] 胡雪梅, 徐炬平, 葛松. 双向搅拌桩在船闸工程软基加

- 固中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(24): 251-252.
- HU X M, XU J P, GE S. Application of bidirectional mixing pile in soft foundation reinforcement of ship lock project[J]. China water transport(the second half of the month), 2015, 15(24): 251-252.
- [4] 孙保虎, 何良德, 何英发, 等. PHC 刚性管桩基础上的闸首底板内力计算方法[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 73-80.
- SUN B H, HE L D, HE Y F, et al. Calculation method for internal force of soleplate of lock head on PHC rigid tubular pile foundation [J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(1): 73-80.
- [5] 解立波, 苏雷, 王建峰, 等. 波浪作用下高桩码头-海床系统动力响应特性研究[J]. 水运工程, 2025(2): 27-35.
- XIE L B, SU L, WANG J F, et al. Dynamic response characteristics of pile-supported wharf-seabed system under wave action [J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 27-35.
- [6] 崔春义, 孟坤, 程学磊, 等. 船闸闸室-地基相互作用体系地震动力特性三维数值分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 251-258.
- CUI C Y, MENG K, CHENG X L, et al. 3D numerical analysis of dynamic response of lock chamber system[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(natural science), 2017, 33(2): 251-258.
- [7] 吴梦娅, 陈文. 设置基坑支护结构的船闸坞式闸室底板有限元分析[J]. 水运工程, 2018(9): 139-144.
- WU M Y, CHEN W. Finite element analysis of docking chamber floor with foundation pit support [J]. Port & waterway engineering, 2018(9): 139-144.
- [8] 周珩, 苏谦, 杨智翔, 等. 软土地基双排桩基础悬臂式挡土墙受力变形的现场测试及数值模拟分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(3): 88-91.
- ZHOU H, SU Q, YANG Z X, et al. Field test and numerical simulation of cantilever retaining wall using double-row piles on soft soil foundation [J]. Railway engineering, 2019, 59(3): 88-91.
- [9] 石熊, 张家生, 刘蓓, 等. 红黏土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1826-1831.
- SHI X, ZHANG J S, LIU B, et al. Experimental research on shearing properties of interface between red clay and concrete[J]. Journal of Central South University(science and technology), 2015, 46(5): 1826-1831.
- [10] 李武, 朱琳. 复合地基桶式基础结构下沉力原位试验研究[J]. 水运工程, 2025(3): 92-95, 108.
- LI W, ZHU L. In-situ experimental study on sinking force of bucket-foundation structure on composite foundation[J]. Port & waterway engineering, 2025(3): 92-95, 108.
- [11] DOVE J E, FROST J D. Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 1999, 125(7): 544-555.
- [12] LINGS M L, DIETZ M S. The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation [J]. Soils and foundations, 2005, 45(6): 1-14.
- [13] DEJONG J T, WESTGATE Z J. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(11): 1646-1660.
- [14] 李春红, 孔纲强, 张鑫蕊, 等. 温控桩-土接触面三轴试验系统研制与验证[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4955-4962.
- LI C H, KONG G Q, ZHANG X R, et al. Development and verification of temperature-controlled pile-soil interface triaxial shear test system [J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(12): 4955-4962.
- [15] 郑铮, 杨钢, 张世兴, 等. 深海沉积物-结构界面仪试验装置研发及其验证试验[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 173-180.
- ZHENG Z, YANG G, ZHANG S X, et al. Development and verification tests of deep-sea sediment-structure interface equipment[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2022, 44(1): 173-180.