

DOI: 10.11779/CJGE20241256

主动区水泥搅拌桩加固对锚式板桩墙侧向减载机理研究

陈盛原, 戴济群, 关云飞*, 蔡正银, 韩迅

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要: 水泥搅拌桩的侧向阻挡作用在软土地区基坑、码头等挡土结构工程应用中逐渐得到重视。采用土工离心模型试验研究了主动区水泥搅拌桩加固对锚式板桩墙侧向响应的影响; 同时建立三维有限元数值模型对离心模型试验结果进行反演分析, 进一步深究水泥搅拌桩复合地基的侧向减载效应及结构-土的相互作用机理; 明晰了水泥搅拌桩桩长、桩间距及强度等地基加固参数对锚式板桩墙侧向减载效能的影响规律。结果表明: 主动区水泥搅拌桩的设置会产生水平土拱效应, 导致侧向荷载更多地被桩体承受, 而桩间土体的侧向受力减小, 进而削弱了作用于前墙的侧向土压力, 有效改善墙体侧向变位和墙身弯矩; 与地基未加固情况相比, 主动区水泥搅拌桩加固减小了锚式板桩墙侧向主动土压力 25.6%, 弯矩 32.4% 和侧向变位 26.7%。锚式板桩墙侧向变位随水泥搅拌桩强度、桩长的增大而减小, 随桩间距的增大而增大; 水泥搅拌桩的侧向减载效果随着开挖深度的增加越突出; 当水泥搅拌桩桩长为端承桩, 桩间距为两倍桩径时, 其可获得较好的侧向减载效果。研究成果对控制挡土结构变形, 降低工程造价提供了思路, 可为日后类似工程的设计与施工提供参考依据。

关键词: 锚式板桩墙; 水泥搅拌桩; 侧向减载; 离心模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)10-2026-10

作者简介: 陈盛原(1995—), 男, 博士后, 主要从事海洋岩土、地基处理方面的研究工作。E-mail: sychen@nhri.cn

Research on lateral load reduction mechanism of anchored sheet pile wall by deep cement mixing pile in active zone

CHEN Shengyuan, DAI Jiqun, GUAN Yunfei, CAI Zhengyin, HAN Xun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The lateral retaining effect of deep cement mixing piles has gradually gained attention in the application of retaining structures, such as foundation pits and wharves in soft soil areas. This study employs geotechnical centrifugal model tests to investigate the impact of deep cement mixing piles reinforcement in active zone on the lateral response of anchored sheet pile walls. Simultaneously, a three-dimensional finite element numerical analyse is conducted to inversely analysis the centrifuge test results, and to further investigate the lateral load reduction effect of the deep cement mixing pile composite foundation and the interaction mechanism between the structure and soil. The impact of foundation reinforcement parameters such as pile length, pile spacing, and pile strength on the lateral load reduction efficiency of the anchored sheet pile wall is clarified. The results indicate that the installation of deep cement mixing pile in active zone produces horizontal soil arch effect, so that the lateral loads are borne more by the piles and less by the soil between the piles, thus weakening the lateral earth pressure acting on the front wall and effectively improving the lateral displacement and the bending moment of the wall. Compared with the unreinforced foundation, the deep cement mixing pile composite foundation in active zone reduces the lateral active earth pressure on the anchored sheet pile wall by 25.6%, the bending moment by 32.4%, and the lateral displacement by 26.7%, respectively. The lateral displacement of the anchored sheet pile wall decreases with the increase in strength and length of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604202); 中国博士后科学基金第 76 批面上资助项目(2024M761465); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y325006); 国家自然科学基金项目(52271286); 南京水利科学研究院创新团队基金项目(Y321008); 淮河入海水道二期工程重大科研项目(RHSD2/FW-2024-01)This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No.2023YFB2604202), China Postdoctoral Science Foundation Project (Grant No.2024M761465), the Special Fund for Basic Research of Central-Level Non-Profit Research Institutes Foundation of China (Grant No.Y325006), the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52271286), the Major Scientific Research Project for the Phase II Project of the Huai River Seaward Channel of China (Grant No.RHSD2/FW-2024-01).

收稿日期(Received): 2024-12-17 **修回日期(Revised):** 2025-05-12 **接受日期(Accepted):** 2025-06-17 **网络出版日期(Online):** 2025-06-18

*通信作者 (E-mail: yfguan@nhri.cn)

deep cement mixing pile, and increases with the increase of pile spacing. The lateral load reduction effect of the deep cement mixing pile becomes more prominent with greater excavation depths. When the deep cement mixing pile is end-bearing in and the pile spacing is twice the pile diameter, this allows the deep cement mixing pile to perform better lateral load reduction. The findings of this study provide insights for controlling the deformation of retaining structure and saving the project cost, offering a valuable reference for the design and construction of similar projects in the future.

Key words: anchored sheet pile wall; deep cement mixing pile; lateral load reduction; centrifugal test; numerical simulation

0 引言

中国沿江沿海地区广泛分布着高压缩性、低承载力、低抗剪强度的软土。在软土地基中建设基坑、码头等挡土工程, 结构的受力变形与安全稳定性一直是相关从业人员和研究学者最为关心、也最为头疼的重大问题^[1-2], 这主要原因归结为两点: 一是软土侧压力系数大, 使作用于挡土结构上的侧向土压力极大, 导致结构内力过大而增加工程造价; 二是软土承载能力低, 引起结构物的变位显著, 软土与结构物之间的相互作用极其复杂, 在工程设计中难以考虑周全, 导致结构不稳定性概率剧增。为此, 需要对软土地基中的基坑、挡土墙等挡土结构进行加固处理。

针对挡土结构的加固措施: 陈仁朋^[3]考虑基坑开挖对旁侧隧道影响, 采用隔断墙作为保护作用, 隔断墙的设置可以一定程度上减小地表沉降、隧道外土压力变化以及围护墙水平位移。郑俊杰等^[4]提出在刚性桩基挡墙结构中设置发泡聚苯乙烯(EPS)柔性垫层, 以达到减小墙背土压力、抗滑桩桩身弯矩和剪力, 增大结构整体稳定安全性的目的。刘勇等^[5]在软土基坑开挖过程中采用深层搅拌法对设计深度以下2~3 m的软土层进行水泥加固处理, 形成满堂式水泥土加固层以减少围护结构的侧向位移。刘溢等^[6]通过被动区深层搅拌桩加固以减小超大深基坑的变形, 很好控制支挡结构和基坑土体变形, 使基坑整体稳定性得到大幅提高。

为了增加软土地基中挡土结构的稳定性, 降低工程造价, 挡土结构主动区土体加固是一种经济有效的技术措施, 其通过提高和改善主动区土体抗力, 可减小挡土结构的内力、侧向位移、地面沉降及开挖面隆起等, 从而达到提高挡土结构稳定性的目的。

深层搅拌法作为适用于加固软黏土地基的一种地基处理方法^[7], 已广泛应用到公路、铁路、水利、市政以及建筑等工程中。过去很长一段时间, 关于水泥搅拌桩的绝大部分应用研究是基于其增加地基竖向承载能力、减小地基沉降的传统设计理念开展的^[8-9], 对于其侧向承载力及阻挡作用的研究较为匮乏。

近年来, 深层搅拌法在深基坑、挡土墙等关乎侧向变形稳定的挡土工程中逐渐得到应用。由于挡土结

构的稳定性与侧向荷载的大小密切相关, 把水泥搅拌桩作为增强体置于挡土结构后侧主动区中, 除了地基竖向承载力的提升, 其侧向承载力的变化更应该得到重视。加固的主动区经扰动后形成复合土体, 其复合参数、应力路径、力学特点等都有别于不加固情况, 应力-应变规律更为复杂。由于土体的力学特性受应力水平的影响很大, 常规的小比尺物理模型很难真实模拟其原型受力特性。因此, 目前对水泥搅拌桩的水平承载能力和侧向阻挡作用还没有充分的认识, 更没有一个成熟的理论体系。

针对主动区水泥搅拌桩加固对挡土结构侧向减载机理尚未厘清的问题, 本文依托课题组所研究的锚式板桩码头相关工程, 通过开展水泥搅拌桩加固锚式板桩码头主动区土体的土工离心模型试验, 研究在水泥搅拌桩加固下板桩码头前墙的工作性状, 并采用有限元数值方法反演离心模型试验, 对结构-土相互作用规律及水泥搅拌桩侧向减载机理进行深入分析; 此外, 开展了水泥搅拌桩加固参数对板桩码头前墙侧向变位的敏感性分析, 所得研究成果可为今后类似工程的初步设计与施工提供参考依据。

1 离心模型试验

1.1 试验设备

本项土工离心试验在南京水利科学研究院土工离心模型试验厅 TLJ-60 型土工离心机上完成。该土工离心机的有效旋转半径(吊篮平台至旋转中心)为 2.0 m, 最大离心加速度为 200g, 最大容量为 60 g·t, 配有 36 路高精度数据采集系统, 吊篮平台尺寸为 900 mm×800 mm×800 mm。由于所模拟的板桩码头结构沿岸线布置, 模型布置按平面应变问题考虑, 故本试验选用了平面应变型模型箱^[10], 模型箱内部净空尺寸为 700 mm×350 mm×450 mm(长×宽×高), 由 100 mm 厚的铝合金材料制成, 一侧为透明有机玻璃板, 便于试验中观测箱内模型纵断面的土体变形情况; 模型箱内部接缝处涂抹玻璃胶, 确保防水。根据模型箱尺寸、模型结构物的高度和布置情况, 选定模型比尺 $N = 100$, 即本次试验在 100g 离心加速度下完成。

1.2 模型设计

根据实际工程设计安排,本试验采用水泥搅拌桩加固单锚式板桩码头前墙后侧主动区的软黏土,主要研究目的是揭示软基中水泥搅拌桩对板桩结构侧向减载的机理。单锚式板桩码头包括前墙、锚碇墙和拉杆等结构,按照模型比尺描述,具体试验方案见图 1。图 2 为离心试验模型实拍图。

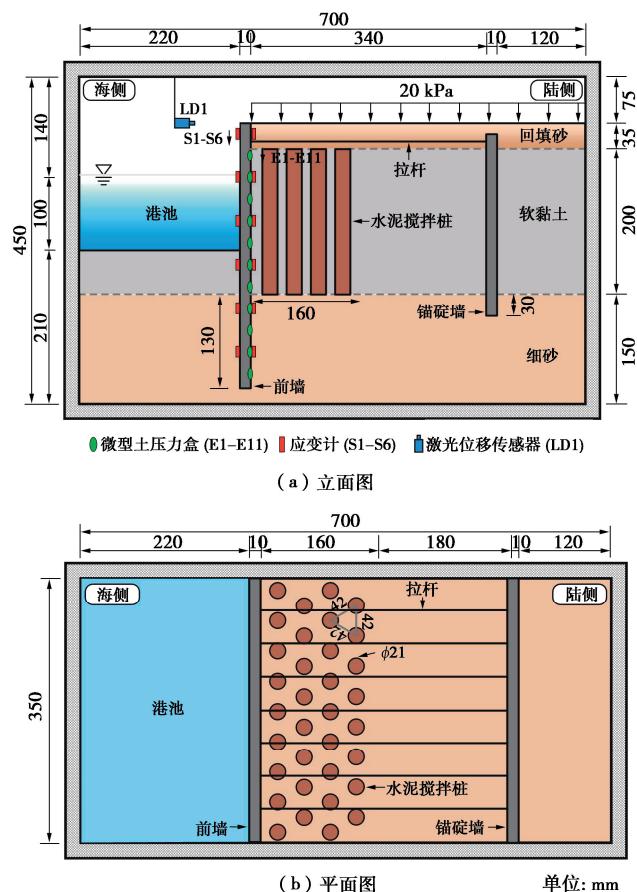


图 1 离心试验模型示意图

Fig. 1 Schematic view of centrifugal test model

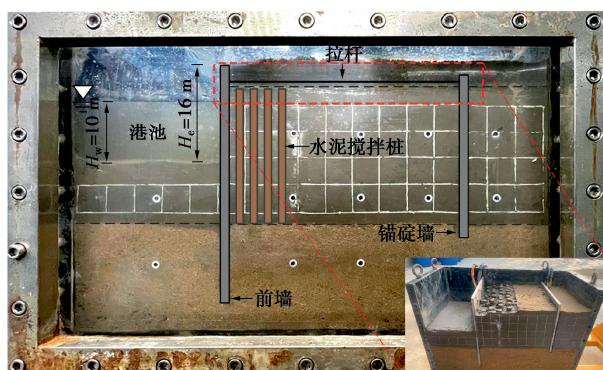


图 2 离心试验模型实物图

Fig. 2 Picture of centrifugal test model

1.3 模型地基与模型桩制备

为了最大限度减小土体与模型箱内壁之间的摩擦

对试验结果的影响,在模型地基制备前,对模型箱内壁涂抹凡士林,并在内壁放置了两层聚四氟乙烯(PTFE)膜,使其随模型地基自由移动。

试验模型地基共分为 3 层土,见图 1 (a),所模拟的地基土层自下往上依次为细砂、软黏土和回填粗砂,试验土料均取自南通港区工程现场。根据《土工试验方法标准: GB/T 50123》测得模型地基各土层的基本物理力学指标见表 1。

表 1 土的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层	含水率 w/%	重度 γ / (kN·m ⁻³)	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
回填砂	20.4	18.6	31.1	—
软黏土	42.5	18.0	8.6	21.71
细砂	21.9	19.7	33.5	—

砂土层、软土层分别按相对密度、原位不排水剪强度平均值作为其制备模型土层的主要控制指标。细砂层采用砂雨法^[11]分层铺设、刮平,控制其相对密实度在 80%左右;浇砂完成后进行浸水饱和处理。随后,在真空室中将黏土粉末与两倍黏土液限的水混合拌成泥浆,并将拌好的泥浆缓慢地倒入模型箱中。在 1g 条件下采用大型固结仪进行逐级加载,使整个地基进行一维静压预固结,固结时长约为 30 d。当软黏土层获得初步强度后,吊装上机并在离心加速度 100g 下继续固结,使之与原型地基强度相近。试验前采用袖珍触探仪可得到沿土层深度方向的不排水抗剪强度分布。由于土层表面良好的排水条件以及超重力固结之前的一维预压固结,使得浅层土严重超固结,其强度约为 27 kPa; 黏土层中部强度为 11~20 kPa; 因排水砂层的存在,底部抗剪强度也较高,接近 45 kPa。回填砂层则控制其相对密度,采用分层压实而成。

原型水泥搅拌桩桩长为 20 m,桩身穿透软黏土层达到持力层,桩端处于承载力较高的细砂层,桩径为 0.6 m,桩间距为 1.2 m,正三角形布置。为了尽可能真实地模拟原型桩-土的接触特性,制作模型水泥搅拌桩所用材料与原型一致。依据选定的相似比尺,按应变等效原则^[12]进行设计,模型桩桩长为 200 mm,直径为 21 mm,桩间距为 42 mm。按配比拌合水泥土灌入内径为 21 mm 的 PVC 管并振捣均匀密实,标准养护 28 d 后拆模备用。

1.4 模型结构物制作与布置

原型钢筋混凝土前墙和锚碇墙均属于抗弯构件,须按等抗弯刚度相似原理^[13]进行设计计算。原型钢筋混凝土墙体杨氏模量为 28 GPa,墙体厚度为 1.5 m;本研究采用实心铝合金板模拟墙体结构,铝合金板的杨氏模量为 72 GPa,基于抗弯刚度相似等效,模型墙

体为 10 mm 厚; 而它们的长度和宽度按几何相似设计, 具体尺寸为: 前墙 365 mm(长)×350 mm(宽)×10 mm(厚); 锚碇墙 250 mm×350 mm×10 mm。

钢拉杆为受拉构件, 模型拉杆采用相同的钢材料制作, 即模型拉杆与原型材料相同。为了测量拉杆中的内力, 根据以往的测试经验^[14], 须将圆截面拉杆变换为等截面积的矩形截面拉杆, 按等抗拉刚度相似原理进行设计, 最终设计采用的拉杆截面尺寸为: 6.0 mm×0.6 mm。

1.5 测试技术

模型试验测试项目包括前墙的侧向主动土压力、侧向变位和墙身弯矩。前墙侧向主动土压力采用 BW-4 应变式微型土压力盒^[15]测量。土压力盒外径为 12 mm, 厚为 4.2 mm, 量程为 400 kPa。在前墙陆侧面沿墙体高度方向等间距布置了 11 个土压力测点, 间距为 30 mm。前墙墙身弯矩采用应变计测量, 所有应变计均直接粘贴在前墙表面, 并在应变计表面涂上一层厚度为 1.5 mm 的环氧树脂以保护应变计; 沿墙体高度方向等间距布置了 6 个弯矩测点, 间距为 60 mm; 所有应变计均布置成 Wheatstone(惠斯通)全桥电路, 以补偿温度影响。前墙侧向变位采用德国 Wenglor 公司生产的 YP11MGVL80 非接触高精度激光位移传感器测量, 其量程为 50 mm, 精度为 20 μm。试验前, 对所有测量传感器进行标定和筛选, 使其能满足试验的各项要求。

1.6 试验步骤

(1) 配制土样: 制作模型地基。

(2) 试验准备: 制作模型墙体结构物和模型桩, 并在模型指定位置安装传感器。形成地基土层后, 进行前墙和锚碇墙的基槽开挖, 然后采用静压法将前墙和锚碇墙安装就位。制作外径稍大于模型桩 1~2 mm 的引孔定位导向模具保证桩孔垂直度, 在 1g 条件下, 使用薄壁取土器进行引孔取土, 取土完成后同样通过引孔定位导向模具, 将预制好的模型水泥搅拌桩以 1 mm/s 的速度^[16]压入模型地基中。使用外径稍小于薄壁取土器内径的实心打土管将薄壁取土器管内废土取出, 完成一根模型桩的插桩; 重复以上操作, 直至完成所有模型桩的安装。随后安装拉杆, 调整好松紧度。

(3) 恢复自重应力: 在拉杆安装前后, 模型先后两次置于离心力场中恢复自重应力的作用, 使结构与土体紧密接触。

(4) 港池开挖和工作荷载施加: 在 1g 停机状态下将模型港池区域的地基土体挖除形成港池, 借助后续离心机升速过程近似模拟港池开挖; 采用等效荷载法在码头面指定区域铺设粗砂层, 模拟竖向 20 kPa 的码头面荷载作用。

(5) 模型试验: 最后将模型置于离心机吊篮平台上, 转动离心机匀速升高离心加速度至 100g, 并保持恒定加速度继续运行 1 h, 让板桩码头结构承受港池开挖和面载施加两方面的作用, 期间进行数据采集。根据模型时间比尺相似律, 1 h 相当于模拟原型竣工 1 年后的码头整体稳定性状和各构件内部受力状况。需要说明的是, 在试验中采用溢流水位法^[14]控制港池水位。

2 三维有限元数值分析

为了对离心模型试验进行反分析, 对比测量结果, 并进一步挖掘水泥搅拌桩对锚式板桩墙侧向减载的深层原因, 建立了基于离心模型试验的三维有限元模型。

2.1 模型几何网格与边界条件

三维有限元模型尺寸理论上应与离心试验原型一致, 考虑到沿码头纵向结构的对称性, 并考虑边界效应, 最终确定数值模拟的范围为: 深度 60 m, 长度 80 m, 宽度(纵向) 3.6 m。模拟的前墙、锚碇墙和地基土层的宽度均为 3.6 m, 沿宽度(纵向)方向设置 3 根拉杆。结构其余尺寸采用基于离心模型尺寸的原型比尺进行建模。

将结构物与周围土体离散为若干单元, 有限元模型包含 56243 个节点和 72131 个单元。采用空间实体单元模拟地基土、墙体和水泥搅拌桩; 拉杆采用桁架单元模拟, 以方便获取拉杆的轴力及变形。约束土体网格底部在 3 个方向上的运动及竖直界面上的法向位移。图 3(a) 为板桩码头的整体模型有限元网格和边界条件, 模拟的板桩码头结构及水泥搅拌桩如图 3(b) 所示。

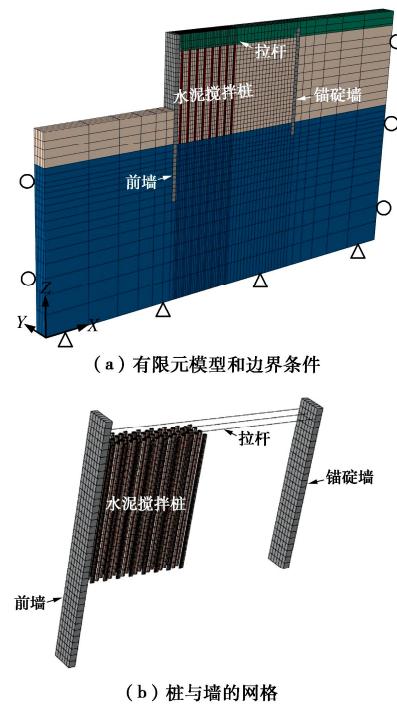


图 3 板桩码头有限元模型

Fig. 3 Finite element model of sheet pile wharf

2.2 本构模型及模型参数

土体的应力应变关系采用南水双屈服面弹塑性本构模型^[17-18]（简称“南水模型”）模拟，南水模型能够较好捕捉土体非线性响应，相关参数由三轴固结排水试验获得，如表 2 所示。

表 2 地基土南水模型参数

Table 2 NHRI model parameters for soils

土层	回填砂	软黏土	细砂
c/kPa	0	8.6	0
$\phi/(\circ)$	32.0	21.7	30.9
R_f	0.920	0.522	0.911
K	476	39	438
K_{ur}	952	78	876
n	0.980	0.618	0.886
c_d	0.0049	0.0589	0.0120
n_d	0.500	0.116	0.394
r_d	0.91	0.59	0.79

前墙和锚碇墙采用线弹性模型^[19]模拟，杨氏模量取为 26 GPa，泊松比为 0.167，单位重度为 25 kN/m³。拉杆也采用线弹性模型^[20]模拟，杨氏模量取为 206 GPa，泊松比为 0.3，计算中不考虑拉杆自重。采用 Mohr-Coulomb (MC) 应力-应变关系^[21]描述水泥搅拌桩行为，黏聚力为 500 kPa，内摩擦角为 30°，杨氏模量为 140 MPa，单位重度为 18 kN/m³，水泥土剪胀角取为内摩擦角的 1/3 以反映水泥土的剪胀特性。

2.3 接触模拟

采用基于 Coulomb 摩擦准则的面-面接触来模拟墙-土和桩-土界面的行为；分别用界面摩擦系数 (μ) 和硬接触的罚函数定义了面-面接触的切向特性和法向特性。根据式 (1) 确定两接触面之间的切向应力 (τ_{clip}) 与法向接触应力 (p) 的关系：

$$\tau_{\text{clip}} = \mu \times p \quad . \quad (1)$$

前墙、锚碇墙与土体界面处的 μ 设为 0.3，水泥搅拌桩与土体界面处的 μ 设为 0.4。拉杆自由段端点与墙体以点-面接触的方式建立耦合约束 (coupling constraints) 连接。拉杆与土体间的接触通过嵌入功能 (embedded) 实现，将拉杆作为嵌入区域 (embedded region) 嵌入到土体主区 (host region)。

2.4 数值模拟过程

在本研究中，数值模拟过程与离心试验原型施工过程相同。

(1) 建立边界条件，进行初始地应力平衡。

(2) 采用“生死”单元法模拟港池开挖施工过程，港池分 3 次开挖，每次开挖的深度分别为 3, 3, 10 m。

(3) 开挖完成后，在码头面施加 20 kPa 均布荷载。

3 试验与数值结果分析

为了便于与数值结果进行比较分析，离心模型试

验结果均转换成原型尺寸表示。侧向主动土压力 (P_A)、墙身弯矩 (M) 分别经一个标准大气压力值 ($P_a = 101.325 \text{ kPa}$)、墙体抗弯能力 ($M_c = 2900 \text{ kN}\cdot\text{m}$) 无量纲化。采用最终开挖深度 ($H_e = 16 \text{ m}$) 分别对深度 (z) 和前墙侧向变位 (δ_h) 归一化。

3.1 前墙侧向主动土压力

如图 4，前墙侧向主动土压力计算值与离心试验实测值接近，表明本数值分析模型所选用的材料本构模型及其参数是合理的，该模型能够反映离心模型试验结果。

为便于比较，主动区未加固情况的前墙侧向主动土压力数值结果，静止土压力 E_0 和朗肯 (Rankine) 主动土压力 E_a 结果 (分别为 K_0 和 K_a 线) 均绘于图 4。结果表明：与主动区未加固的情况相比，本试验在主动区设置水泥搅拌桩能明显减小前墙侧向主动土压力，减小程度总体上随深度增加而增大，减小率最大达到了 25.6%，位于高程 $-1.36H_e$ 处。究其原因，主要归因于：水泥搅拌桩复合地基作为侧向增强体，对主动区的侧向荷载起到了一定的阻挡作用；桩体又作为竖向增强体，把上部荷载向较深土层传递，减小直接作用于前墙上的侧向荷载。而图 4 中，相比主动区未加固的情况，主动区加固情况下桩端 (软土层与细砂层界面) 以下的土压力增大则是上部荷载通过水泥搅拌桩往下传递至细砂层的结果，佐证了上述观点。

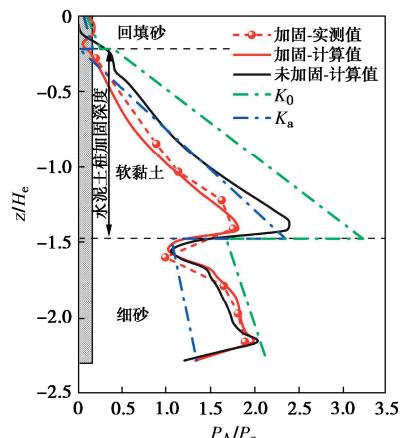


图 4 前墙侧向主动土压力

Fig. 4 Lateral active earth pressures on front wall

此外， K_a 线能较好反映地基未加固情况的前墙侧向主动土压力值；而对于水泥土加固情况，采用 K_a 线预测前墙受到的侧向主动土压力偏大，这表明对于主动区加固情况下，由于水泥搅拌桩的加固与减载作用，土体的应变-应变关系发生了变化，采用 Rankine 法预测开挖引起的前墙侧向主动土压力偏保守。

3.2 前墙墙身弯矩

图 5 为港池开挖完成后前墙墙身弯矩沿深度的分布，假定开挖侧受拉为负，反之为正。由图 5 可知，

实测的弯矩分布与数值计算值基本吻合, 趋势相似, 说明数值模型能够合理反映离心模型试验结果变化情况。当开挖完成后, 前墙上半部分的弯矩为负值, 表明墙体上部海侧受拉; 而前墙下半部分弯矩为正值, 表明墙体下部陆侧受拉; 结构弯矩分布形态整体上呈“S”形, 这是在基坑地下墙、港口码头板桩墙等结构中, 墙顶和墙脚同时受到约束时, 典型的墙身弯矩分布情况。前墙墙身最大正弯矩计算值为 $0.35M_c$, 位于高程 $-1.52H_e$ 处; 最大负弯矩计算值为 $-0.55M_c$, 在高程 $-0.72H_e$ 处。在无水泥搅拌桩加固的情况下, 前墙墙身最大正弯矩计算值为 $0.51M_c$, 最大负弯矩计算值为 $-0.8M_c$ 。与地基未加固情况相比, 本研究中前墙墙身弯矩减小率最大达到32.4%, 这可归因于水泥搅拌桩的侧向阻挡作用, 削弱了侧向荷载直接作用于前墙的强度, 导致墙身内力减小。

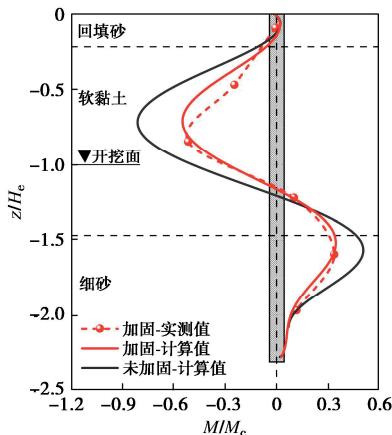


图5 前墙弯矩分布

Fig. 5 Bending moment distribution of front wall

3.3 前墙侧向变位

前墙的侧向变位主要受港池开挖和码头面载施加的影响。前墙的侧向变位情况如图6所示, 随着开挖深度增加, 墙体嵌土厚度减小, 由于侧向土压力作用, 前墙不断向海侧位移, 侧向变位逐渐增加, 变形形态也发生变化: 第一步开挖后, 墙体侧向变位最大值(δ_{hm})出现在墙顶, 呈现典型的三角形变形模式; 随着开挖的进行, 墙体逐渐出现“凸肚状”变形, δ_{hm} 位置向下移动, 开挖完成时, δ_{hm} 出现在开挖面中上部。

当港池开挖至16 m时, 未加固情况下的 δ_{hm} 为 $0.90\%H_e$, 采用水泥搅拌桩加固情况下的 δ_{hm} 为 $0.66\%H_e$, 水泥搅拌桩的设置使 δ_h 减小了26.7%, 且加固后墙体中部侧向变位趋势变得平缓。不管主动区是否被加固, 开挖完成时 δ_{hm} 都出现在开挖面附近, 水泥搅拌桩加固对前墙中部的位移抑制最为明显, 这说明采用水泥搅拌桩对前墙主动区进行加固可以限制前墙侧向变位, 且效果显著。

此外, 图4中前墙受到的侧向土压力在细砂层深

度以上均小于 E_a , 而在细砂层深度以下逐渐接近 E_0 , 这进一步印证了前墙整体向海侧移动, 墙体上部变位大, 下部变位小的情况。

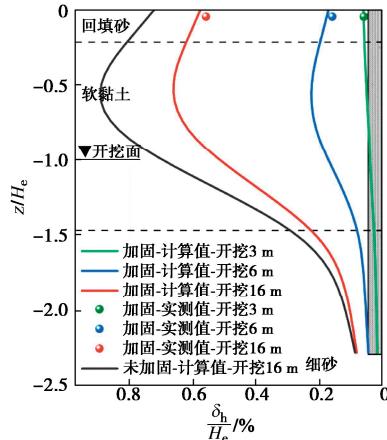
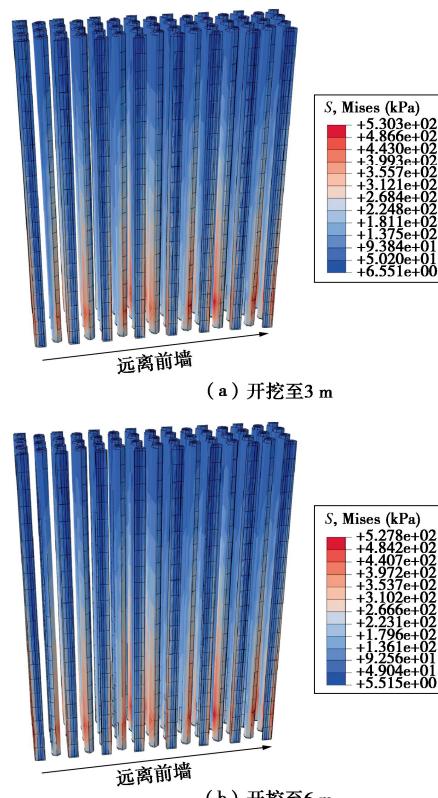


图6 前墙侧向变位

Fig. 6 Lateral displacements of front wall

3.4 水泥搅拌桩应力分布及变形

图7为不同开挖深度下水泥搅拌桩的Mises应力分布及变形情况。为了更好地观察水泥搅拌桩的受力变形情况, 把变形因子放大20倍。可以看到, 随着开挖深度的增加, 水泥搅拌桩的侧向受力逐渐增大; 远离前墙的水泥搅拌桩受力比靠近前墙的要大, 说明了前者承受着更大的侧向荷载; 水泥搅拌桩在靠近桩端附近的受力变化值要比桩身上部位置的大, 这就解释了3.1节中, 与未加固的前墙相比, 已加固的前墙其侧向主动土压力在水泥搅拌桩桩端位置处的减小幅度最大。



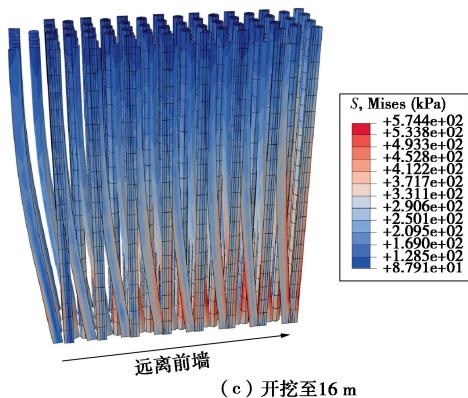


图 7 不同开挖深度下水泥搅拌桩 Mises 应力分布

Fig. 7 Mises stress contour of DCM columns under different excavation depths

此外,根据水泥搅拌桩的变形情况可以判断主动区水泥搅拌桩主要承受两种作用力:土体的侧向推挤作用和嵌固作用。当桩身所受的嵌固作用大于推挤作用时,水泥搅拌桩对前墙的水平位移减载作用较为明显;反之,水泥搅拌桩对的侧向减载作用大大减弱,甚至会对前墙产生二次位移的作用,不利于对前墙的保护。

3.5 桩体与土体单元应力路径

港池开挖是一个土体卸载的过程,而码头面荷载施加则是一个土体加载的过程,随着开挖和荷载施加的先后进行,土体的应力状态发生了巨大的变化。为了揭示墙后桩周土体、水泥搅拌桩的应力变化规律及两者的荷载分配机制,在深度 $H=20\text{ m}$,距前墙水平距离 $d=4\text{ m}$ 、 $d=12\text{ m}$ 的陆侧地基中沿横截面方向分别取 1 个水泥搅拌桩单元和 1 个桩周土体单元,记为 E_{p-1} 、 E_{s-1} 、 E_{p-2} 、 E_{s-2} 。图 8 所示是计算得到的桩周土体单元和桩体单元的应力路径。

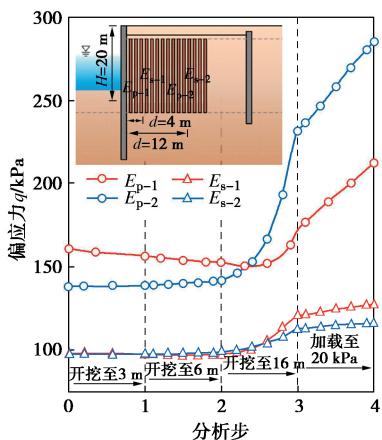


图 8 前墙陆侧土体、水泥搅拌桩应力路径

Fig. 8 Stress paths of soil elements and DCM pile elements on land side of front wall

港池开挖产生的卸载作用会导致主动区水平向应力减小。可以观察到,开挖初始阶段引起的应力释放

使 $d=4\text{ m}$ 处的 E_{p-1} 单元和 E_{s-1} 单元的偏应力 (q) 都减小,但随着开挖深度的增加,陆侧土体向海侧移动,而移动产生的挤压应力使 E_{p-1} 单元和 E_{s-1} 单元的偏应力 q 增大。由于 $d=12\text{ m}$ 处的 E_{p-2} 单元和 E_{s-2} 单元距离前墙较远,开挖引起的卸荷效应对其应力状态影响不大,因此两者的应力状态变化甚微;但随着开挖深度的增加,水泥搅拌桩复合地基加固体后方土体呈现向海侧移动的趋势,土体的挤压作用同样会使得 E_{p-2} 和 E_{s-2} 的偏应力增加。

施加码头面荷载过程中,相比于 $d=4\text{ m}$ 处的 E_{p-1} 单元, $d=12\text{ m}$ 处的 E_{p-2} 单元偏应力急剧增大,说明远离前墙的水泥搅拌桩承受了更多的侧向荷载,阻挡作用更显著。此外,单元 E_{p-1} 单元、 E_{p-2} 单元的偏应力增量 (Δq) 均大于 E_{s-1} 单元、 E_{s-2} 单元,这也证明了存在土拱效应使得应力重分配,桩体承受了更多的荷载,而桩周土体承受的荷载较小。

综上分析,对前墙主动区土体采用水泥搅拌桩加固,加固区复合土体强度增大,能有效阻挡侧向荷载,减小作用于前墙上的侧向土压力及其引起的结构内力;较好地限制土体侧向变形的作用,大大减小墙体侧向变位量,有利于板桩码头稳定。

4 参数分析

在验证数值计算模型的基础上,选取水泥搅拌桩无侧限抗压强度 (q_u) 分别为 400, 1000, 1400, 2000 MPa, 水泥搅拌桩桩长 (l_{DCM}) 分别为 10, 15, 20, 22 m, 水泥搅拌桩桩间距 (S_{DCM}) 分别为 1.0, 1.2, 1.4, 1.5 m, 共建立 10 个三维数值有限元模型进行参数分析,系统地研究主动区水泥搅拌桩不同加固参数对前墙侧向变位 (δ_h) 的影响。

4.1 水泥搅拌桩无侧限抗压强度

表 3 列出了水泥搅拌桩 4 种无侧限抗压强度对应的 MC 模型参数。图 9 为不同开挖深度 (H_e) 下, q_u 对 δ_h 的影响情况。

由图 9 可得,随着 H_e 的增加,前墙嵌土深度 (H_p) 逐渐减小,侧向变位更加显著。 q_u 对 δ_h 有较大影响, δ_h 随着 q_u 的增大而减小,总体上 δ_h 与 q_u 呈负相关。随着 q_u 的增加,前墙最大侧向变位量的降低幅度 ($\Delta\delta_{hm}$) 随着 H_e 的增加而变大,说明 H_e 影响了 δ_h 对 q_u 的敏感性。

开挖深度较大时 ($H_e=16\text{ m}$), q_u 在 400~1400 kPa 变化对 δ_h 影响显著,当 q_u 超过 1400 kPa 时, q_u 的影响较小, δ_h 基本保持不变;这表明,只有当 q_u 较低时, q_u 对 δ_h 的影响才显著; q_u 的增加提升了前墙抵抗侧向变位的能力,但过度增加水泥搅拌桩的强度会造成资

源浪费。

表 3 不同水泥搅拌桩强度对应的 MC 本构参数

Table 3 Mohr-Coulomb constitutive parameters of various strengths of DCM piles

序号	q_u/kPa	c/kPa	$\varphi/^\circ$	E/MPa	ν
1	400	200	20	40	0.3
2	1000	400	25	100	0.3
3	1400	500	30	140	0.3
4	2000	700	40	200	0.3

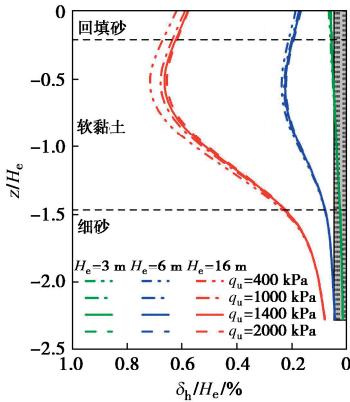


图 9 q_u 对 δ_h 的影响

Fig. 9 Effect of q_u on δ_h

4.2 水泥搅拌桩桩长

根据 l_{DCM} 与目标加固土层厚度 (t_s) 之间的相对大小关系^[22], 水泥搅拌桩一般可划分为 3 种类型: 悬浮桩、端承桩和嵌岩桩。软黏土层厚度 $t_s=20\text{ m}$, 本节选取的 l_{DCM} 为: 10, 15, 20, 22 m, 分别属于悬浮桩、悬浮桩、端承桩和嵌岩桩。 l_{DCM} 对 δ_h 的影响如图 10 所示。

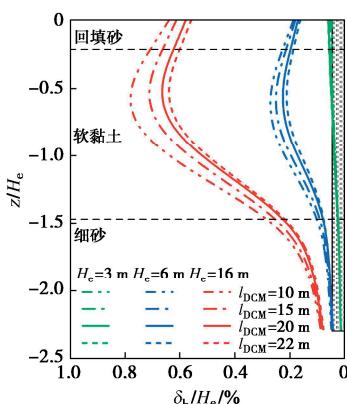


图 10 l_{DCM} 对 δ_h 的影响

Fig. 10 Effect of l_{DCM} on δ_h

可以看出, 在不同 H_e 下, δ_h 随着 l_{DCM} 的增大而减小; H_e 越大, $\Delta\delta_{hm}$ 越大, 水泥搅拌桩的侧向减载效果越明显。开挖完成时, 前墙最大侧向变位 (δ_{hm}) 的位置在高程 $0.65H_e$ 处。 l_{DCM} 在 10~20 m 的变化对 δ_{hm} 的影响显著; 当 l_{DCM} 小于 20 m 时, 水泥搅拌桩作为悬浮桩, 与端承桩相比, 前墙发生了相当大的 δ_h 。换

句话说, 悬浮式水泥搅拌桩的强度没有得到充分的利用, 因此这种设计成本效益较低。当 l_{DCM} 大于 20 m 时, δ_h 的减小率变化不大, 这意味着嵌岩式水泥搅拌桩会造成工程浪费。然而, 水泥搅拌桩的桩端应放置在持力层的顶部, 即设计为端承桩, 以防止软土在其下方滑动; 此外, 上部荷载能通过桩体直接传递到持力层, 有效减少上部荷载传递到前墙。

4.3 水泥搅拌桩桩间距

图 11 给出了 S_{DCM} 对 δ_h 的影响情况, $S_{DCM}=1.0, 1.2, 1.4, 1.5\text{ m}$ 对应的面积置换率 (α_{DCM}) 分别为 0.33, 0.23, 0.17, 0.15。 δ_h 随着 S_{DCM} 减小而降低; 较小的 S_{DCM} 意味着较大的 α_{DCM} ; α_{DCM} 越大, 水泥搅拌桩复合地基具有更大的整体性和刚度, 从而调动了水泥搅拌桩复合地基的抗剪阻力。当 S_{DCM} 较小时, 由于在主动区内桩身水平位移小于桩后土体侧移量, 水泥搅拌桩不断受到大量桩后土体的挤压作用, 从而桩周土体内力会进行重分布形成土拱效应, 使应力的传递得到了有效的阻挡作用。相反, S_{DCM} 较大时, 由于桩土之间的相互作用受到削弱, 水泥搅拌桩表现为孤立单桩, 导致土体水平土拱效应不足, 弱化了水泥搅拌桩复合地基的侧向阻挡作用, 使土体应力穿过桩间土体向海侧传递, 从而导致前墙受到更大的侧向土压力。当 S_{DCM} 从 1.5 m 降低到 1.2 m (相当于 $2d_{DCM}$) 时, δ_h 显著降低。当 S_{DCM} 小于 $2d_{DCM}$ 时, δ_h 略有下降。因此, 本分析中水泥搅拌桩有效桩间距可认为 $S_{DCM}/d_{DCM}=2$ 。

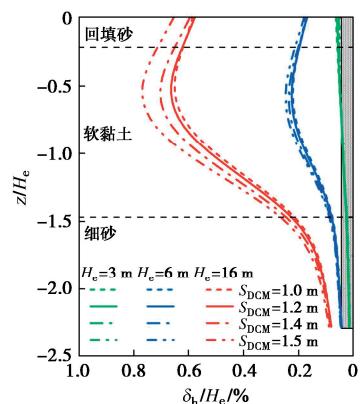


图 11 S_{DCM} 对 δ_h 的影响

Fig. 11 Effect of S_{DCM} on δ_h

综上所述, 在实际工程中, 如盲目地加大水泥掺入比以提升水泥搅拌桩强度、减小桩间距以提高置换率将造成严重的浪费。应根据不同地质条件和不同的设计荷载要求, 选择合理的水泥搅拌桩加固参数, 可以很好控制挡土结构的侧向变位, 使其整体稳定性得到大幅提高。

5 结 论

本文通过土工离心模型试验和三维有限元数值模拟,研究了主动区水泥搅拌桩加固对锚式板桩墙侧向减载的工作机制,分析了水泥搅拌桩桩长、桩间距及强度等地基加固参数对锚式板桩墙侧向减载效能的影响规律,主要得出以下3点结论。

(1) 主动区水泥搅拌桩的设置会产生水平土拱效应,导致侧向荷载更多地被桩体承受,而桩间土体的侧向受力减小,进而削弱了作用于前墙的侧向土压力,有效改善墙体侧向变位和墙身弯矩,提高锚式板桩墙的侧向承载能力。

(2) 锚式板桩墙主动区加固对墙体侧向力学响应的控制效果显著,相对于未加固工况,设计方案下的锚式板桩墙侧向主动土压力、侧向变位及墙体弯矩的下降幅度分别为25.6%, 26.7%, 32.4%。水泥搅拌桩的设置减小了锚式板桩墙侧向主动土压力、侧向变位及墙体弯矩,阻碍了港池开挖引起的卸载效应,使锚式板桩墙在开挖和堆载过程中保持良好的整体稳定性。

(3) 锚式板桩墙侧向变位随水泥搅拌桩强度、桩长的增大而减小,随桩间距的增大而增大。随着开挖深度的增加,水泥搅拌桩的侧向减载效果越突出。水泥搅拌桩强度、桩长和桩间距都存在一有效范围,当它们超出该范围之后,加固效果提高不明显。综合考虑经济性与安全性,对于地层条件及开挖深度与本文类似的工程而言,采用端承桩,桩间距为两倍桩径的水泥搅拌桩加固方案可取得较好的侧向减载效果。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 陈盛原、关云飞和韩迅设计研究内容,戴济群和蔡正银提供研究指导,陈盛原完成计算分析,陈盛原和关云飞参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by CHEN Shengyuan, GUAN Yunfei and HAN Xun, and supervised by DAI Jiqun and CAI Zhengyin. The numerical analyses were conducted by CHEN Shengyuan. The manuscript was drafted and revised by CHEN Shengyuan and GUAN Yunfei. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参 考 文 献:

- [1] 王年香,周春儿,吴加武,等.推移区树根桩网复合地基加固效果离心模型试验验证[J].岩土工程学报,2022,44(增刊2): 107-111. (WANG Nianxiang, ZHOU Chun'er, WU

Jiawu, et al. Centrifugal model tests on reinforcement effects of root pile-net composite foundation in slip zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 107-111. (in Chinese))

- [2] 蔡正银.板桩结构土压力理论的创新发展[J].岩土工程学报,2020,42(2): 201-220. (CAI Zhengyin. Innovation and development of earth pressure theories for sheet-pile structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 201-220. (in Chinese))
- [3] 陈仁朋, AL-MADHAGI ASHRAF, 孟凡衍. 基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊2): 6-11. (CHEN Renpeng, ASHRAF ALMADHAGI, MENG Fanyan. Three-dimensional centrifuge modeling of influence of nearby excavations on existing tunnels and effects of cut-off walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 6-11. (in Chinese))
- [4] 郑俊杰, 吕思祺, 曹文昭, 等. 高填方膨胀土作用下刚柔复合桩基挡墙结构数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 395-402. (ZHENG Junjie, LÜ Siqui, CAO Wenzhao, et al. Numerical simulation of composite rigid-flexible pile-supported retaining wall under the action of high-filled expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 395-402. (in Chinese))
- [5] 刘勇, 李福豪, 陈健, 等. 深层搅拌水泥土基底加固层的三维随机有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1542-1548. (LIU Yong, LI Fuhao, CHEN Jian, et al. Three-dimensional random finite element analysis of cement-admixed soil slab for stabilization of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1542-1548. (in Chinese))
- [6] 刘溢, 李镜培, 陈伟. 被动区深层搅拌桩加固对超大深基坑变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊1): 465-469. (LIU Yi, LI Jingpei, CHEN Wei. Effect of reinforcement of deep mixing piles on deformation of ultra-deep excavations in passive zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 465-469. (in Chinese))
- [7] 李然, 刘润, 徐余, 等. 水泥搅拌桩法处理软土地基中桥头跳车现象的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 725-729. (LI Ran, LIU Run, XU Yu, et al. Influence factor analysis of cement mixing pile method in treating vehicle bumping at bridge head in soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 725-729. (in Chinese))
- [8] 闫超, 刘松玉, 邓永锋, 等. 加筋水泥搅拌桩水平承载力

- 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 730-734. (YAN Chao, LIU Songyu, DENG Yongfeng, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of reinforced cement-soil piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 730-734. (in Chinese))
- [9] 陈盛原, 叶华洋, 张伟锋, 等. 路堤荷载作用下柔性桩复合地基的沉降分析[J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 3077-3086. (CHEN Shengyuan, YE Huayang, ZHANG Weifeng, et al. Settlement analysis of flexible pile composite foundation under embankment load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(9): 3077-3086. (in Chinese))
- [10] 徐光明, 王年香, 顾行文, 等. 模型箱约束对大变形破坏离心模型试验影响初探[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(2): 232-242. (XU Guangming, WANG Nianxiang, GU Xingwen, et al. Preliminary study on influences of model container constraint on large-deformation failure behaviors by centrifuge modeling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(2): 232-242. (in Chinese))
- [11] 蔡正银, 代志宇, 徐光明, 等. 离心模型试验中界面土压力盒标定方法研究[J]. 水利学报, 2020, **51**(6): 695-704. (CAI Zhengyin, DAI Zhiyu, XU Guangming, et al. Study on calibration method of interface soil pressure sensor in centrifugal model test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, **51**(6): 695-704. (in Chinese))
- [12] 胡勇刚, 罗强, 张良, 等. 基于离心模型试验的水泥土搅拌法加固斜坡软弱土地基变形特性分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(7): 2207-2213. (HU Yonggang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Deformation characteristics analysis of slope soft soil foundation treatment with mixed-in-place pile by centrifugal model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(7): 2207-2213. (in Chinese))
- [13] 徐光明, 蔡正银, 曾友金, 等. 一种新型板桩码头结构的离心模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 48-52. (XU Guangming, CAI Zhengyin, ZENG Youjin, et al. Centrifuge modeling for an innovative sheet-pile bulkhead of diaphragm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 48-52. (in Chinese))
- [14] 徐光明, 刘阳, 任国峰, 等. 20万吨级卸荷式板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(1): 46-53. (XU Guangming, LIU Yang, REN Guofeng, et al. Centrifuge modeling of 200000 tonnage sheet-pile wharfs with relief platform[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(1): 46-53. (in Chinese))
- [15] 徐光明, 任国峰, 顾行文, 等. 新型板桩码头群桩基础被动段桩侧压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(3): 502-511. (XU Guangming, REN Guofeng, GU Xingwen, et al. Experimental study on lateral pile-soil pressure on passive part of pile groups in innovative sheet-pile wharf[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(3): 502-511. (in Chinese))
- [16] TRUONG P, LEHANE B M. Effects of pile shape and pile end condition on the lateral response of displacement piles in soft clay[J]. Géotechnique, 2018, **68**(9): 794-804.
- [17] 张丙印, 贾延安, 张宗亮. 堆石体修正 Rowe 剪胀方程与南水模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1443-1448. (ZHANG Bingyin, JIA Yan'an, ZHANG Zongliang. Modified Rowe's dilatancy law of rockfill and Shen Zhuijiang's double yield surfaces elastoplastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1443-1448. (in Chinese))
- [18] 沈珠江. 南水双屈服面模型及其应用[C]//海峡两岸土力学及基础工程地工技术学术研讨会论文集, 西安, 1994. (SHEN Zhuijiang. Shen Zhuijiang's double yield surface model and application[C]// Proceedings of the Symposium on Soil Mechanics and Foundation Engineering Geotechnical Engineering on Both Sides of the Taiwan Strait, Xi'an, 1994. (in Chinese))
- [19] 蔡正银, 侯伟, 关云飞. 遮帘式板桩码头的工作机理[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1745-1750. (CAI Zhengyin, HOU Wei, GUAN Yunfei. Mechanism of sheet-pile wharf with barrier piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1745-1750. (in Chinese))
- [20] ZHANG W G, LI Y Q, GOH A T C, et al. Numerical study of the performance of jet grout piles for braced excavations in soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **124**: 103631.
- [21] SHI J W, WEI J Q, NG C W W, et al. Effects of construction sequence of double basement excavations on an existing floating pile[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **119**: 104230.
- [22] JAMSAWANG P, YOOBANPOT N, THANASISATHIT N, et al. Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment[J]. Computers and Geotechnics, 2016, **72**: 42-56.