某人工岛靠泊体滑移机制及处置措施*

李剑刚[1]，赵　阳[1]，周朝慧[2,3]，黄文斌[2]
（1. 天时集团能源有限公司，辽宁 盘锦 124000；2. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210024；
3. 河海大学 土木与交通学院，江苏 南京 210098）

摘要：针对某对拉板桩结构人工岛靠泊体滑移问题，构建三维有限元模型，采用“南水”双屈服面弹塑性本构模型，系统模拟不同施工加载过程、水位条件及使用荷载下的结构响应，揭示其滑移力学机制并提出相应处置方案。结果表明，滑移主要源于淤泥质粉质黏土地基承载力不足以及施工期间填筑与抛石不同步引起的侧向土压力失衡。在设计低水位工况下，东南侧挡墙拉应力峰值达到 1.60 MPa，虽未超出材料强度，但对长期耐久性构成潜在威胁；设计荷载非滑移主导因素，对结构响应的增幅远小于填筑和水位变化的影响。提出的补抛反压治理措施，通过增强土体承载力和侧向约束，使极端低水位工况下的抗滑安全系数提升至 1.050，满足规范的稳定性要求。

关键词：人工岛；靠泊体；滑移机制；三维有限元模拟；补抛反压
中图分类号：U655.54　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0217-07

Slip mechanism and treatment measures for berthing structure on an artificial island

LI Jiangang[1], ZHAO Yang[1], ZHOU Chaohui[2,3], HUANG Wenbin[2]
(1. Tianshi Group Energy Co., Ltd., Panjin 124000, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the sliding problem of the berthing structure in an artificial island with tied-back sheet piles, we build a 3D finite element model using the “Nanshui” double-yield surface elasto-plastic constitutive model. Then we systematically simulate structural responses under various construction loading processes, water level conditions, and service loads, thereby revealing the mechanical mechanism of sliding and proposing corresponding treatment solutions. The results indicate that sliding primarily stems from insufficient bearing capacity of the weak silty clay foundation and an imbalance in lateral earth pressure caused by asynchronous filling and rock dumping during construction. Under the design low water level condition, the peak tensile stress at the southeast retaining wall reaches 1.60 MPa; while this does not exceed the material strength, it poses a potential threat to long-term durability. Moreover, the non-slip dominant factor of the design load has a much smaller increase in the structural response than the influence of filling and water level changes. The proposed remediation measure of supplementary counter-pressure dumping enhances the bearing capacity of soil in the passive zone and lateral constraints, increases the anti-sliding safety factor to 1.050 under extreme low water level conditions, and meets code stability requirements.

Keywords: artificial island; berthing structure; sliding mechanism; 3D finite element simulation; counter-pressure reinforcement

收稿日期：2025-11-12　　**录用日期：**2025-12-12
***基金项目：**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y325003)；南京水利科学研究院 2025 年研究生学位论文创新基金(Yy325016)
作者简介：李剑刚(1978—)，男，硕士，工程师，从事海洋油气开发和管理工作。

水运工程

在全球沿海开发加速推进的背景下，海上油气开发、风电场等海洋工程建设显著提升了海洋资源开发效率[1-2]。作为拓展海洋空间的重要载体，人工岛因结构简单、施工便捷等优势被广泛应用[3-5]。然而，在复杂海洋环境下，人工岛工程地基不均匀沉降、结构滑移等问题频发，严重威胁工程安全与可持续发展[6-7]。

靠泊体是人工岛中用于船舶停靠、货物装卸及防波挡浪的结构，其地基多位于淤泥土或珊瑚礁沉积层等软弱和透水性差的土层，导致岛体施工期和工后沉降过大[8-9]，人工岛桩基结构则受岛体堆载与土体固结影响[10-11]，进一步削弱结构稳定性。因此，深入研究滩海人工岛靠泊体滑移的成因机制并提出有效的治理措施，具有重要的工程应用价值和学术意义。

国内外学者对滩海人工岛滑移问题进行了广泛研究，如 Brown 等[12]研究马尔代夫胡鲁马累人工岛的滑移问题，采用了一维有限元模型，但未能充分考虑三维土-结构相互作用；Nesic 等[13]基于传统 Duncan E-B 模型分析俄罗斯北极地区海上油气平台的滑移问题，但在处理软弱地基和动态水位变化时的精度有限；Kavitha 等[14]研究桩基技术在海上靠泊体滑移防控中的应用，但主要集中于桩基的侧向承载能力，没有给出治理方案。

本文以某对拉板桩结构人工岛为案例，研究人工岛靠泊体失稳问题。该岛胸墙东南角拐角处出现不均匀沉降与双向侧向变形，东侧自南向北约 18 m 范围内存在明显滑移，建设期间靠泊体累计向海侧位移达 19～32 cm。通过三维有限元模拟，系统剖析人工岛滑移的成因机制，并提出补抛反压处置对策，为滩海人工岛工程的安全运维提供科学参考。

1　工程概况与滑移特征

某对拉板桩结构人工岛平面形状为矩形，平面尺寸为 197.3 m×122.8 m（长×宽），护岸总长 443 m，靠泊体典型剖面见图 1。其护岸系统由外坡护面、堤心结构和坡脚防护三部分组成。

根据地质勘察报告，场地地基表层分布 7.6 m 厚的淤泥质粉质黏土，天然含水率达 44.0%～52.6%，呈流塑状态，属高压缩性软弱土层。为提高地基承载力，采用排水固结法进行加固处理，通过铺设排水垫层、打设塑料排水板并进行超载预压，进行软基处理。有效提高了地基土体的强度与刚度，为后续岛体结构施工与长期安全运营提供了必要的工程条件。

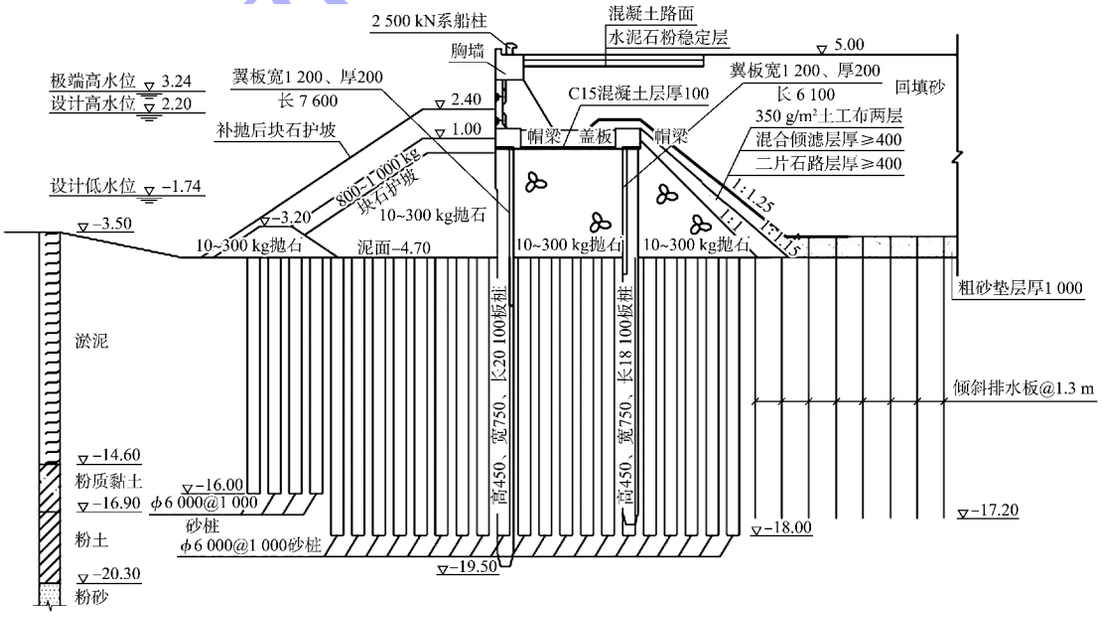


图 1　靠泊体剖面（尺寸：mm；高程：m）

Fig. 1　Section of berthing structure (dimension: mm; elevation: m)

该岛胸墙东南角拐角处存在不均匀沉降和双向侧向变形，影响岛体胸墙稳定；胸墙东侧自南向北约 18 m 处出现岛体滑移，建设期间靠泊体累计向海侧位移达 19~32 cm。结构缝错动严重，胸墙倾斜超过安全阈值，导致工程功能受限，亟须采取有效治理措施。

针对存在的问题，对该岛挡墙开展了无损检测，地质雷达和地震映像法的检测结果表明，该段挡土墙混凝土完整，未出现明显断裂。在埋深 4.0~5.5 m 区域，推断挡土墙后方土体孔隙率高、含水率大。

2　数值模拟验证

为揭示靠泊体滑移机制及关键影响因素，本文基于现场数据，构建三维有限元模型并开展数值模拟。通过模拟不同工况下的应力变形响应，结合理论分析，分析滑移的力学机理。

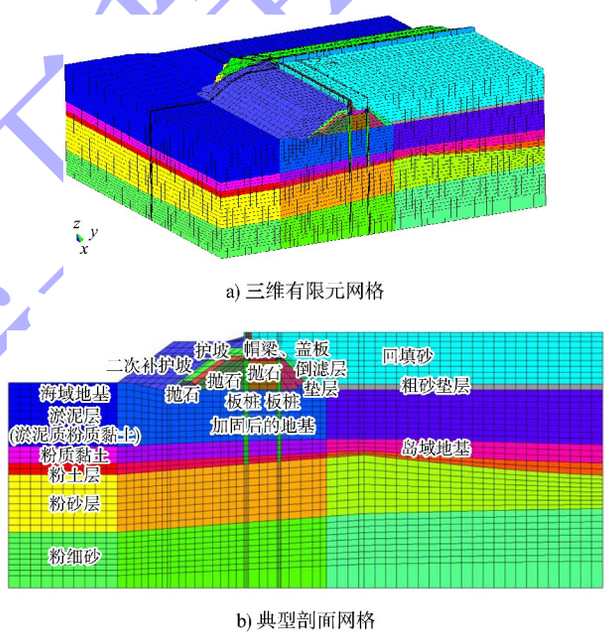
2.1　三维有限元模型构建

土石料本构采用“南水”双屈服面弹塑性模型。该模型通过两个屈服面和弹性-塑性应变增量表达式精确描述堆石料的非线性应力-应变关系。模型通过 8 个参数(黏聚力 c、内摩擦角 φ、杨氏模量系数 K、切线模量指数 n、破坏比 R_f、发生最大收缩时的偏应力差与渐近值之比 R_d、围压等于单位大气压力时的最大收缩体应变 c_d、收缩体应变随围压增大的幂次 n_d)和加卸载准则，同时考虑材料的剪胀、剪缩特性及加卸载行为，显著提升了对复杂变形过程的模拟精度。相比传统 Duncan E-B 模型，该模型通过双屈服面机制更真实地反映了土石料的力学特性。

对于接触面模拟，采用分离式变形模型将接触面位移分解为基本变形(弹性阶段)和破坏变形(滑动/拉裂阶段)。通过局部坐标系下的柔度矩阵和方向性刚度调整，有效模拟混凝土结构与周围材料的相互作用。混凝土材料建模采用线弹性本构，通过广义虎克定律建立应力-应变关系，而孔隙流体模型则通过水气混合体的压缩系数和 Henry 溶解系数，实现多相流体耦合分析。

2.2　模型参数与网格划分

基于现场地勘数据，构建东南侧靠泊体三维有限元模型，见图 2。模型中采用的“南水”双屈服面弹塑性模型参数见表 1。



a) 三维有限元网格

b) 典型剖面网格

图 2　靠泊体部位三维有限元网格

Fig. 2　Three-dimensional finite element grid of berthing structure

表 1　土石料计算参数

Tab. 1　Calculation parameters of soil-rock materials

区域	土层名称	ρ/(g·cm^{-3})	n'/%	c/kPa	φ/(°)	K	n	R_f	c_d/%	n_d	R_d	k_v/(cm·s^{-1})
海域地基	淤泥层(淤泥质粉质黏土)	1.72	59.6	17.7	12.3	20	0.75	0.90	2.30	0.65	0.85	8.21×10^{-8}
	粉质黏土层	1.90	47.2	29.4	12.5	90	0.60	0.80	1.55	0.68	0.77	6.04×10^{-8}
	粉土层	2.03	38.3	42.0	20.7	220	0.54	0.75	0.80	0.70	0.74	1.36×10^{-4}
	粉砂层	2.02	38.5	9.5	38.35	280	0.51	0.85	0.70	0.67	0.70	5.00×10^{-3}
岛体陆域地基	淤泥层(淤泥质粉质黏土)	1.78	54.7	26.2	11.4	85	0.73	0.88	1.60	0.67	0.82	2.62×10^{-8}
	粉质黏土层	1.91	46.6	34.3	15.0	150	0.58	0.78	1.20	0.68	0.75	3.16×10^{-8}
	粉土层	1.97	41.4	46.2	18.5	200	0.56	0.75	0.90	0.72	0.72	2.83×10^{-4}
	粉砂层	2.02	38.5	9.5	38.35	280	0.51	0.85	0.70	0.67	0.70	5.00×10^{-3}

续表1

区域	土层名称	ρ/(g·cm^{-3})	n'/%	c/kPa	φ/(°)	K	n	R_f	c_d/%	n_d	R_d	k_v/(cm·s^{-1})
岛体	抛石	1.89	28.0	–	40.0	450	0.45	0.86	0.55	0.75	0.80	–
	混合倒滤层	1.90	25.0	–	42.0	490	0.40	0.73	0.53	0.72	0.72	–
	二片石垫层	1.90	25.0	–	42.0	490	0.40	0.73	0.53	0.72	0.72	–
	回填砂	1.71	30.0	0	30.0	250	0.50	0.70	0.85	0.63	0.66	–

注：ρ 为密度；n'为孔隙率；k_v 为渗透系数。

2.3　数值模拟结果

2.3.1　加载过程模拟与变形

本文的计算工况见表 2。根据靠泊体施工加载过程，各计算工况的结果见表 3。

表 2　计算工况

Tab. 2　Calculation conditions

工况	岛体填筑高程/m	板桩前抛石高程/m
1	1.5	−4.7
2	1.5	1.0
3	5.0	2.4
4	5.0	3.45

计算结果表明，施工加载过程中，岛体及靠泊体结构的变形和应力随填筑高度与抛石高程的变化呈现显著趋势见表 3。随着填筑高度增加，岛体及混凝土结构侧向位移和沉降持续增大，工况 4 岛体水平位移达到−58.2 cm(工况 1 为−31.7 cm)，沉降则从 75.3 cm 增至 117.7 cm。结构缝水平向错动位移也从工况 1 的 22.6 cm 增至工况 4 的 52.4 cm，垂直向错动位移从 2.3 cm 增至 19.6 cm，表明结构在长期荷载下存在累积变形风险。

侧向土压力与结构响应是主导变形的核心因素。工况 3 和 4 虽填筑高程相同(5.0 m)，但抛石高程的差异导致工况 4 的结构缝错动位移进一步增大，说明抛石高程的增加会加剧侧向压力不平衡。混凝土结构的大主应力随填筑高度增加显著上升，从工况 1 的 3.83 MPa 增至工况 4 的 7.50 MPa，而小主应力绝对值也逐步增大(从 1.01 MPa 增至 1.50 MPa)，但均未超出材料允许范围。表明结构在持续荷载下应力水平上升，但整体仍处于安全区间。

表 3　平均水位下不同工况靠泊体结构主要计算结果

Tab. 3　Main calculation results of berthing structure under different working conditions at average water level

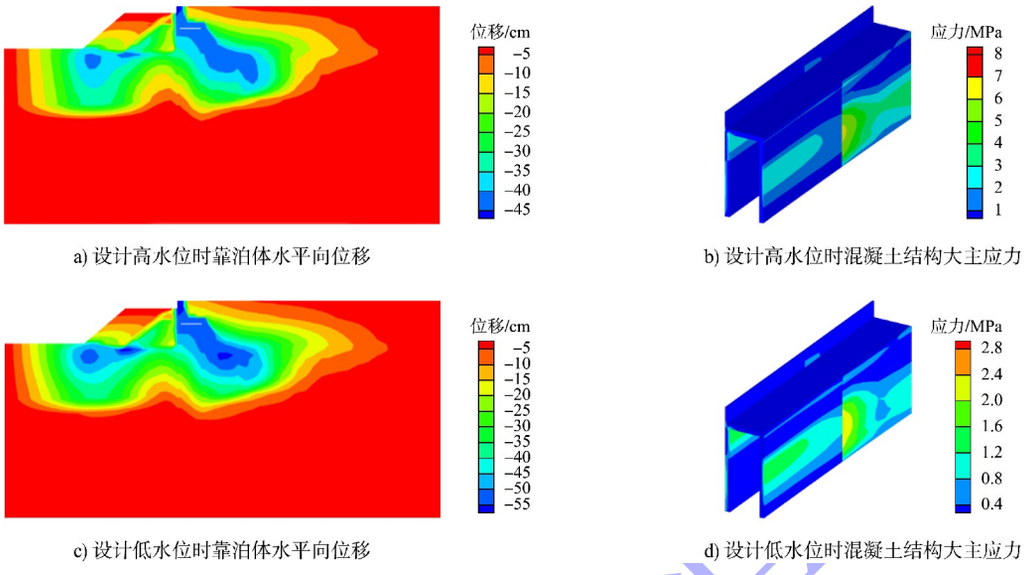
工况	岛体水平位移/cm	岛体沉降/cm	混凝土结构水平位移/cm	混凝土结构沉降/cm	混凝土结构大主应力/MPa	混凝土结构小主应力/MPa	结构缝水平向错动/cm	结构缝垂直向错动/cm
1	−31.7	75.3	−25.7	8.0	3.83	−1.01	22.6	2.3
2	−32.4	75.5	−31.6	13.8	3.40	−0.86	28.0	7.3
3	−50.8	117.5	−49.2	21.8	6.06	−1.40	42.3	13.2
4	−58.2	117.7	−58.2	28.0	7.50	−1.50	52.4	19.6

4 种工况对比揭示了施工加载顺序对结构安全的关键影响。填筑高程与抛石高程的协同作用是控制侧向变形和结构缝错动的核心参数。尽管应力和位移随时间持续累积，但材料性能仍能满足设计要求，这为类似工程提供了参考依据。然而，工况 4 结构缝错动位移的显著增长提示，长期监测与结构连接处的加固措施对维持工程稳定性至关重要。结构施工中应优先优化加载顺序，平衡填筑与抛石的高程，以减小累积变形。

2.3.2　不同设计水位影响

泊体典型剖面变形和应力云图见图 3。可以看出，设计低水位(−1.74 m)与设计高水位(2.2 m)下，靠泊体结构响应差异显著。设计低水位时，岛体水平位移达−60.8 cm，混凝土大主应力升至 8.43 MPa，主因是设计低水位下土体有效应力增加，加剧侧向土压力失衡。设计高水位时，变形与应力明显降低，水平位移仅−49.2 cm，大主应力降至 3.22 MPa。

水运工程



a) 设计高水位时靠泊体水平向位移　　b) 设计高水位时混凝土结构大主应力

c) 设计低水位时靠泊体水平向位移　　d) 设计低水位时混凝土结构大主应力

图 3　靠泊体典型剖面变形和应力云图

Fig. 3　Typical section deformation and stress cloud maps of berthing structure

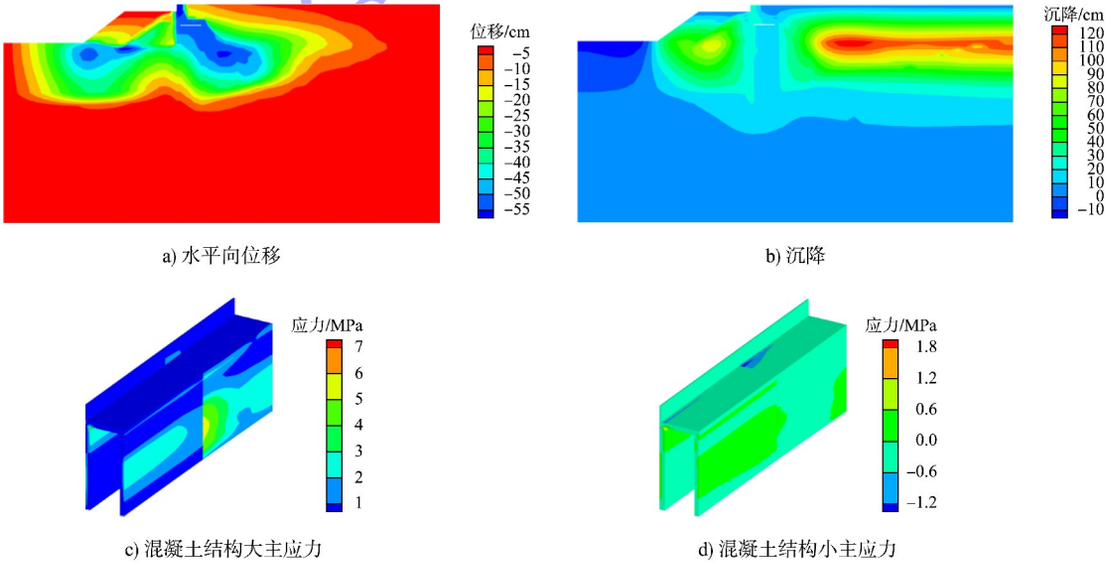
设计低水位虽未超过材料强度，但大变形可能影响长期稳定性，需要加强结构缝监测与加固。设计应考虑低水位工况的安全冗余，并通过调整抛石高程平衡不同水位的荷载效应。

2.3.3　设计荷载影响分析

设计荷载(作业区 20 kPa)对靠泊体结构的影响有限但可量化。设计荷载作用(20 kPa)下靠泊体典型剖面变形见图 4a)、b)，设计荷载使岛体指向岛外的侧向变形从 58.2 cm 增至 60.4 cm(增幅 3.8%)，沉降从 117.7 cm 增至 118.3 cm(增幅 0.5%)。表明当前设计荷载对结构的附加影响可控。

设计荷载作用(20 kPa)下靠泊体混凝土结构大主应力见图 4c)、d)。可以看出，混凝土结构的应力略有上升，大主应力从 7.50 MPa 增至 7.79 MPa，小主应力从 1.50 MPa 增至 1.54 MPa，但仍低于材料强度阈值。表明设计荷载虽加剧了结构受力，但未突破安全边界。

由此可见，设计荷载本身并非滑移主因，对结构响应的增幅远小于填筑和水位变化的影响，设计荷载下结构整体安全可靠。



a) 水平向位移　　b) 沉降

c) 混凝土结构大主应力　　d) 混凝土结构小主应力

图 4　设计荷载作用(20 kPa)下靠泊体典型剖面变形和应力云图

Fig. 4　Typical section deformation and stress cloud maps of berthing structure under design load (20 kPa)

2.4 多因素耦合作用分析

人工岛靠泊体滑移是地质条件、施工工况与环境荷载共同作用的复杂问题，具体耦合作用机制如下。

2.4.1 内在地质诱因

该岛东南侧厚层淤泥层的力学性质显著劣化，是导致滑移的主要地质诱因。该层以淤泥质粉质黏土为主，夹有粉土薄层，呈深灰色，处于过饱和、流塑状态；表层粉粒含量略高，其容许承载力在海域部分仅为 50 kPa，陆域部分稍高，约为 80 kPa，因此在填筑过程中难以有效分担上部荷载。快剪试验表明，其内摩擦角为 3.3°~12°，远低于下伏粉砂层(38.35°)，易形成贯通的塑性滑动面。

2.4.2 关键施工工况

施工过程中荷载的时空分布不均直接诱发了失稳。具体表现为：岛内回填砂迅速加载至 1.5 m 高程，而板桩前抛石初期滞后于-4.7 m 高程，形成了达 6.2 m 的显著填筑高差。这种“前轻后重”的不对称加载模式，导致对拉板桩体系承受了异常巨大的净主动土压力，同时被动区土体抗力未能同步形成，致使结构体系向海侧发生力学失衡，成为引发初始滑移的直接驱动力。

2.4.3 环境荷载因素

水位波动进一步削弱土体承载能力，是滑移发生的重要诱发与加剧因素。低水位工况时孔隙水压下降导致有效应力降低，安全系数降至 1.051(接近失稳临界)；极端低水位(-5.06 m)时，安全系数跌至 0.923，容易导致滑移。

3 处置措施

3.1 补抛反压技术

基于前述滑移机制分析，治理的核心在于解决“软弱地基承载力不足”与“施工引发的被动土压力缺失”这一根本矛盾。为此，采取抛石反压措施提高靠泊体整体稳定性。

拟采用的补抛方案见图 5，补抛反压技术通过在滑移区域施加反向荷载，平衡侧向土压力，从而提升结构稳定性。拟采用的补抛方案中，抛石反压平台高程 4.00 m，平台宽度 15 m，能够有效提高抗滑安全系数。

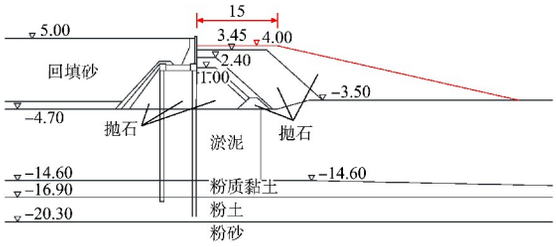


图 5 抛石反压方案(单位：m)

Fig. 5 Riprap back pressure scheme(unit：m)

采取补抛反压措施后，靠泊体整体稳定安全系数有所提高，设计低水位工况稳定安全系数达到 1.128，极端低水位工况稳定安全系数达到 1.050，各工况的稳定安全系数均符合 GB/T 51015—2014《海堤工程设计规范》[15]的要求，且有一定安全裕度。这验证了该措施通过“提高被动区承载力→恢复土压力平衡”的有效路径，成功抑制了滑移。

3.2 荷载控制与限载区隔离

在该岛靠泊体区域作业划定限载区，限制面荷载 10 kPa(普通区)，禁止重型设备靠近滑移敏感区。2022 年钻井期间，通过隔离振动源(如泥浆泵)，避免了邻近区域的荷载叠加效应，位移增速较 2011 年同类事件降低很多。

3.3 监测预警系统

针对该岛靠泊体滑移问题，监测系统需集成多维度数据，覆盖位移、荷载及环境参数。

在靠泊体及翼墙布置沉降、水平位移和墙体倾斜监测点，实时动态监测。预警系统应结合深层土体位移和探地雷达技术识别潜在滑动面，为工程安全运维提供及时、可靠的决策依据。

4 结论

1) 本文揭示了软弱地基上对拉板桩靠泊体滑移机制。表层淤泥质粉质黏土承载力偏低是滑移发生的地质基础；施工中岛内填筑与板桩前抛石存在显著填筑高差，导致被动土压力严重不足，是侧向变形发展的直接诱因；而水位下降进一步弱化土体强度，极端低水位下抗滑安全系数降至 0.923。

2) 本文验证了补抛反压措施对提升被动区承载力、恢复土压力平衡的有效性。实施抛石反压平台后，极端低水位工况抗滑安全系数由 0.923 提高至 1.050，满足 GB/T 51015—2014《海堤工程

设计规范》的稳定性要求。

3）施工顺序与水位耦合控制是防范类似工程滑移风险的关键。建议优化填筑与抛石的时空协调关系，并构建涵盖结构位移、应力与土体深层变形的实时监测预警系统，实现工程全生命周期动态安全运维。

4）本文所建模型未考虑地震、波浪循环荷载等动力作用，后续可结合动力本构模型与长期监测数据，进一步开展复杂海洋环境下人工岛结构时变可靠性与长期性能演化研究。

参考文献：

[1] SPANIER R, KUENZER C. Marine infrastructure detection with satellite data: a review [J]. Remote sensing, 2024, 16(10): 1675.

[2] LI P P, LI J P, LI L, et al. Overall structural degradation of a high-piled wharf under chloride invasion and the impact force of ship berthing [J]. Ocean engineering, 2024, 312: 119320.

[3] 祝阿龙, 侯禹辰, 罗风权, 等. 邻近既有桥梁的海域大面积筑岛填砂施工技术 [J]. 水运工程, 2023(12): 165-170, 197.
ZHU A L, HOU Y C, LUO F Q, et al. Construction technology of large-area island construction and sand filling in sea adjacent to existing bridges [J]. Port & waterway engineering, 2023(12): 165-170, 197.

[4] 吴喜德, 刘灵灵. 海上人工浮岛研究综述 [J]. 珠江水运, 2024(13): 126-128.
WU X D, LIU L L. Research review on offshore artificial floating islands [J]. Pearl River water transport, 2024(13): 126-128.

[5] 侯禹辰, 祝阿龙, 刘坤, 等. 海域人工岛深厚抛石层下的旋喷桩施工技术[J]. 水运工程, 2023(8): 213-218.
HOU Y C, ZHU A L, LIU K, et al. Construction technology of rotary jet piles under deep riprap layer of artificial island in sea area [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 213-218.

[6] 张聪伟. 曹妃甸近海人工岛海床边坡稳定性分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
ZHANG C W. Stability analysis of sea-bed slope around artificial island offshore Caofeidian [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.

[7] 赵伟龙. 土石围堰渗流稳定性分析及变形安全风险预警研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
ZHAO W L. Analysis of seepage stability and research on deformation safety risk warning for earth-rock cofferdam[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[8] 赵文. 考虑蠕变的人工岛护岸沉降预测[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHAO W. Settlement prediction of artificial island revetment considering creep [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[9] 李刚. 某大型海上人工岛地基沉降的试验与数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
LI G. Test and numerical simulation of foundation settlement of a large-scale offshore artificial island[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[10] YAN Y Y, DAI G L, CHEN Z W, et al. Experimental study of negative skin friction of pile group foundations for offshore wind turbines on artificial islands[J]. Journal of marine science and engineering, 2024, 12(8): 1386.

[11] 季宏, 张书红. 某大型滩海人工岛施工期监测技术[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(6): 74-78.
JI H, ZHANG S H. Monitoring technology for the construction period of a large-scale offshore artificial island [J]. Oil-gasfield surface engineering, 2018, 37(6): 74-78.

[12] BROWN S, WADEY M P, NICHOLLS R J, et al. Land raising as a solution to sea-level rise: an analysis of coastal flooding on an artificial island in the Maldives [J]. Journal of flood risk management, 2020, 13(S1): e12567.

[13] NESIC S, DONSKOY Y, ZOLOTUKHIN A. Evaluating stress analysis and failure criteria for offshore structures for pechora sea conditions [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2017, 276: 012032.

[14] KAVITHA P, SUNDARAVADIVELU R. Soil structure interaction analysis of a berthing structure under lateral loading-by numerical approach [C]//Proceedings of ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2017: V009T10A010.

[15] 海堤工程设计规范: GB/T 51015—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Code for design of sea dike project: GB/T 51015-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.

（本文编辑　王璁）