· 地基与基础 ·

深层复合地基中桶土破坏界面及稳定性提升分析*

刘丽斌[1]，张　曦[2]，谢锦波[1,2]，李　森[1,2]，李业勋[1,2]，马开方[1]
（1. 中交第三航务工程局有限公司，上海 200032；2. 中国交通建设集团有限公司工程结构重点实验室，上海 200032）

摘要：针对深层复合地基中桶式基础与土体界面存在多组软弱破坏面、破坏机理不明确及失稳模式复杂的问题，采用有限元强度折减法，结合现场实测数据与土工原位试验结果对数值模型进行验证，并系统分析了砂桩面积置换率、下桶贯入深度及下桶分仓设置等参数对基础稳定性的影响。计算结果表明：下桶底部破坏面形态并非如规范假定的水平滑动面，而是向桶仓内部侵入的曲面；下桶底部进入砂桩复合地基的深度对整体稳定性具有显著影响，当其贯入深度达 1 m 时，安全系数较未贯入工况提升约 1 倍，此时稳定性达到最优；砂桩置换率的增加可提高安全系数，但超过 35%后增幅趋于平缓，表明 35%为最优置换率；分仓宽度的减小有助于提升稳定性，当宽度降至 13.3 m 时安全系数增长减缓，10.0 m 为最优分仓设置。该研究揭示了桶式基础曲面破坏机制，并为关键参数优化提供了理论依据。

关键词：复合地基；桶式基础；稳定性；桶土破坏界面；砂桩置换率；分仓设置
中图分类号：U652.2；TU476　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0173-08

Analysis of bucket-soil failure interface and stability improvement in deep composite foundation

LIU Libin[1], ZHANG Xi[2], XIE Jinbo[1,2], LI Sen[1,2], LI Yexun[1,2], MA Kaifang[1]
(1. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China;
2. CCCC Key Laboratory of Engineering Structures, Shanghai 200032, China)

Abstract: To address the problems of multiple weak failure surfaces, unclear failure mechanisms and complex instability modes existing at the interface between bucket foundations and soil in deep composite foundations, the finite element strength reduction method is adopted. The numerical model is validated by field measured data and geotechnical in-situ test results, and the effects of parameters such as the area replacement ratio of sand columns, the penetration depth of the lower bucket and the compartment arrangement of the lower bucket on foundation stability are systematically analyzed. The calculation results indicate that the failure surface at the bottom of the lower bucket is not a horizontal sliding surface as assumed in the specification, but a curved surface intruding into the bucket compartments. The depth of the lower bucket penetrating into the sand column composite foundation has a significant impact on the overall stability, when the penetration depth reaches 1 m, the safety factor is increased by about 1 time compared with the non-penetration condition, and the stability reaches the optimal level at this time. The increase in the sand column replacement ratio can improve the safety factor, but the growth rate tends to flatten out when it exceeds 35%, indicating that 35% is the optimal replacement ratio. Reducing the compartment width is conducive to improving stability. When the width decreases to 13.3 m, the growth of the safety factor slows down, and 10.0 m is the optimal compartment setting. This study reveals the curved failure mechanism of the bucket foundation and provides a theoretical basis for the optimization of key parameters.

Keywords: composite foundation; bucket foundation; stability; bucket-soil failure surface; sand column replacement ratio; compartment setting

收稿日期：2025-11-07　　**录用日期：**2025-12-08
***基金项目：**国家重点研发计划项目(2024YFB02605900)
作者简介：刘丽斌(1993—)，男，硕士，工程师，研究方向为水运工程、地基处理、基坑等施工技术。

水运工程

桶式基础作为一种新型的海洋平台结构基础形式，其外形上多为底端开口、顶端封闭的倒扣大直径圆桶[1-2]。桶式基础结构是近 10 a 针对外海软土地提出的大型水工新结构，具有承载力强、稳定性好等优点。近年来，随着港口工程向淤泥质岸线拓展，桶式基础等新型结构由海洋石油平台工程引入水运工程领域，国内外学者已对其开展了大量研究。陈海峰等[3]利用土工离心模型试验等研究手段，解决桶式基础防波堤结构建设的主要关键技术问题，从中得出合理的设计参数，为新型桶式基础防波堤结构的设计和优化提供技术依据；韩迅等[4]针对回填荷载作用下桶式基础护岸应力、土压力和位移变化，采用自主开发三维有限元软件 Geo-Marine 建立桶式基础护岸三维有限元模型，研究了桶式基础护岸结构与地基的相互作用机制；李武等[5]采用物理模型试验和数值软件分析研究手段，探讨桶式基础结构防波堤稳定性规律，分析原型结构稳定性规律，为桶形基础结构防波堤设计、优化与完善提供参考；谢锦波[6]提出在深厚软基条件下，格型大圆筒失稳时地基土的破坏面可能位于圆筒内部，并采用数值方法进行了破坏分析；姚祎雯[7]针对工程地质条件差、工期紧等复杂条件下防波堤结构设计选型问题，采用理论分析及数值计算方法，从结构受力特点、施工难易程度、工期及造价等多方面对地基处理和结构进行比选分析。

随着桶式基础结构应用范围不断扩大，适应淤泥层厚度从十几米向几十米发展，新的组合形式也应运而生，如复合地基与桶式基础结构组合。该组合形式桶体还不成熟，深层复合地基桶式基础的桶土界面存在多组软弱破坏面，其破坏机理不明确、失稳模式复杂。目前，对于深埋式桶式基础的失稳机理的认识尚不够深入，实际工程设计中主要还是将基于重力式基础的极限平衡稳定性验算方法套用到桶式基础上。现有规范 JTS 167-13—2019《插入式钢圆筒结构设计与施工规范》[8]与 JTS/T 167-16—2020《水运工程桶式基础结构设计与施工规程》[9]中对于桶式基础结构稳定性计算均为基于静力平衡的极限平衡稳定性验算方法。为了掌握复合地基桶式基础承载机理与稳定性分析方法，还需持续展开深入研究。

本文研究通过原位试验获取深层砂桩复合地基及桶内土体参数，开展深层砂桩复合地基强度特性分析；针对深层复合地基桶式基础桶土界面存在多组软弱破坏面，破坏机理不明确，失稳模式复杂等问题，开展砂桩面积置换率、下桶贯入深度等不同工况下的有限元敏感性计算分析；基于深层复合地基上桶式基础稳定性分析结果，提出可提高稳定性的改进方向，以期为未来桶式基础工程设计与施工提供参考。

1 工程概况

案例工程位于长江口与杭州湾交界处崎岖列岛海区小洋山北侧，地理位置坐标概位 30°38′N，122°05′E，北向距长江口灯船约 70 km，西南向距宁波北仑港约 90 km，东经黄泽洋直通外海，与国际远洋航线相距约 104 km，陆路通过东海大桥与上海芦潮港连接。该工程工作船码头结构总长 622.7 m，码头面高程 6.7 m，前沿设计泥面高程 −6.6 m。

1.1 结构形式

该工程工作船码头采用桶式基础结构，共有 30 组桶式基础，相邻桶体间距 0.9～1.0 m，每组结构单元由 1 个基础桶体和上部沉箱组成，下桶为椭圆形，GZC-1～GZC-14 主尺度为 36.6 m×20 m×10 m（长×宽×高），GZC-15～GZC-20 主尺度为 40 m×20 m×12 m，GZC-21～GZC-30 主尺度为 40 m×20 m×14 m。桶壁厚 400 mm，下桶顶盖板厚 500 mm，桶内通过隔板划分为若干隔仓，隔板厚 300 mm，上部沉箱顶高程为 3.0 m。GZC-15 回填侧素混凝土厚 530 mm，GZC-16～GZC-20 回填侧素混凝土厚 560 mm，GZC-21～GZC-30 回填侧素混凝土厚 580 mm。此次计算选取 GZC-21～GZC-30 主尺度为 40 m×20 m×14 m 断面，见图 1。下桶底部和侧面土体采用砂桩加固处理，地基处理总宽度 56.6～60.0 m，置换率为 35%。

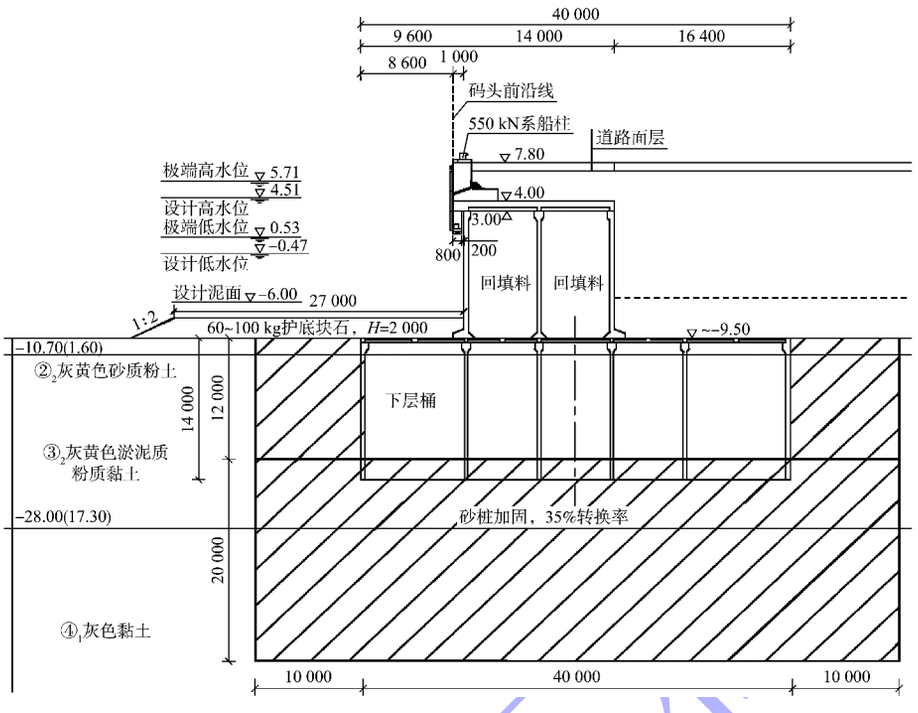


图 1　桶式基础结构典型断面(高程：m；尺寸：mm)

Fig. 1　Typical cross-section of bucket foundation structure(elevation:m; dimension:mm)

1.2　土层参数

根据地勘报告，天然各土层物理力学参数见表 1。工程区域大地构造上属华南褶皱系的浙东南褶皱带，为丽水—宁波隆起中的新昌—定海—花鸟断窿东北边缘的向北延伸入海部分。基底为前古生代变质岩系，上覆燕山早期花岗岩和上侏罗纪陆相火山岩系。在港湾岬角发育厚度不等的第四纪松散堆积层，其地层层序和组成与长江三角洲平原区相仿。

表 1　天然土层物理力学参数

Tab. 1　Physical and mechanical parameters of natural soil layers

土层名称	γ/(kN·m^{-3})	$E_{s0.1\text{-}0.2}$/MPa	c'/kPa	φ'/(°)	C_u/kPa
③$_2$ 淤泥质粉质黏土夹砂	17.6	3.3	11.0	18.0	15.0
③$_{2a}$ 粉质黏土夹砂	18.1	3.5	12.0	17.0	15.3
③$_{2c}$ 粗砾砂	21.4	12.9	–	–	–
④$_1$ 粉质黏土	17.7	3.1	17.0	17.3	21.0
④$_{1a}$ 粉质黏土	18.1	3.3	22.7	17.0	21.0
④$_{1c}$ 粗砾砂	18.1	12.4	–	–	–
④$_2$ 粉质黏土	18.5	3.8	19.0	23.0	–

注：γ 为重力密度；$E_{s0.1\text{-}0.2}$ 为压缩模量(0.1~0.2 MPa 段)；c'为有效黏聚力；φ'为有效内摩擦角；C_u 为不排水黏聚力。

2　模型与参数

2.1　有限元模型

采用岩土专用计算软件 PLAXIS，构建有限元模型，见图 2，模型长 200 m、宽 50 m，桶式基础结构采用板单元模拟，水位按不利工况，取设计低水位。为达到更好的模拟效果，将板单元附近以及上部回填土进行网格加密，共 689 个单元，6 208 个节点。模型边界条件方面，X 向两侧边界(X-Min、X-Max)为法向约束；底部边界(Y-Min)为全固定约束；顶部边界(Y-Max)为自由边界。

计算工况依次为 1)初始地应力、2)打砂桩、3)桶体安装、4)桶内回填、5)陆侧回填至 4 m、6)陆侧回填至设计高程。桶体结构为板单元，材料类型为弹性体，重力密度为 25 kN/m^3，轴向刚度为 20×10^6 kN/m，弯曲刚度为 340×10^6 kN·m^2/m。整个计算模型土体本构为摩尔库仑，界面强度折减因子 R 取 0.7。

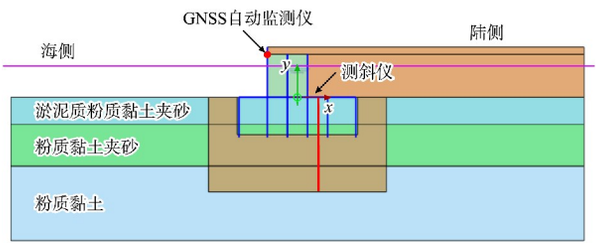


图 2　有限元模型

Fig. 2　Finite element model

2.2　复合地基参数

砂桩复合地基的强度指标可采用综合物理力学性能指标法，其内摩擦角和黏聚力可按下列公式计算。

$$\mathrm{tg}\phi_{SP}=m\mu_P\mathrm{tg}\phi_P+(1-m\mu_P)\mathrm{tg}\phi_S \tag{1}$$

其中：

$$\mu_P=\frac{n}{1+(n-1)m} \tag{2}$$

式中：ϕ_{SP} 为复合土层内摩擦角标准值；m 为面积置换率；μ_P 为应力集中系数；ϕ_P 为桩体材料内摩擦角标准值；ϕ_S 为桩间土内摩擦角标准值；n 为桩土应力比。

$$C_{SP}=(1-m)C_S \tag{3}$$

式中：C_{SP} 为复合土层黏聚力标准值；C_S 为桩间土黏聚力标准值。

$$E_{sp,i}=[1+m(n-1)]E_{s,i} \tag{4}$$

式中：$E_{sp,i}$ 为第 i 层桩体的压缩模量；$E_{s,i}$ 为第 i 层桩间土的压缩模量，一般取天然地基压缩模量。

根据上述复合地基参数计算方法和计算模型断面土层情况，计算得到各土层砂桩复合地基等效参数，见表 2。其中，砂桩置换率为 35%，桩土应力比为 3，桩体摩擦角为 33°，黏聚力为 0°，压缩模量为 30 MPa。

表 2　复合地基参数

Tab. 2　Parameters of composite foundation

土层名称	γ/(kN·m^{-3})	$E_{s0.1\text{-}0.2}$/MPa	c'/kPa	φ'/(°)
③$_2$ 淤泥质粉质黏土夹砂	17.6	12.65	7.15	27.7
③$_{2a}$ 粉质黏土夹砂	18.1	12.78	7.80	27.4
④$_1$ 粉质黏土	17.7	12.52	11.05	27.5

2.3　模型验证

该工程监测内容包括深层土体水平位移监测、桶顶部水位位移和竖向位移监测，监测点位及仪器布置见图 2。监测点位埋设在桶式结构东西两侧，采用 L 形棱镜+膨胀螺丝，与桶壁顶部形成硬连接。工作基点埋设在桶式结构混凝土上，采用 2.3 m×1.2 m×1.2 m 混凝土结构，上部加砌 0.5 m×0.5 m×0.5 m 方墩，加装全球导航卫星系统(global navigation satellite system，GNSS)自动化监测不锈钢强制对中架，监测点位布设在桶式基础顶端，采用棱镜连接杆与桶壁顶部形成硬连接。变形监测数据采集采用 GNSS 自动化监测数据+徕卡 TS60 超高精度全站仪进行同步测量。各阶段桶式基础顶部海侧沉降及水平位移计算值及监测数据对比见图 3、4。

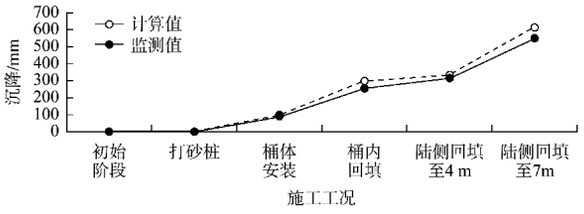


图 3　海侧沉降对比

Fig. 3　Comparison of seaward settlement

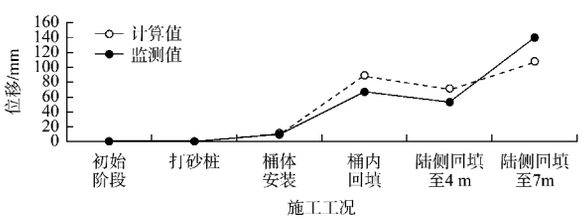


图 4　水平位移对比

Fig. 4　Comparison of horizontal displacement

置换率为 35%、下桶进入砂桩 1 m 时，数值计算结果显示海测沉降为 615 mm，桶顶部向海测水平位移为 108 mm，结构整体向陆侧偏转角

度为 0. 29°，滑动形式以水平滑动为主，监测数据与计算数据反应整体变形趋势基本一致。在海侧沉降方面，各阶段有限元计算值与现场监测值的变化趋势基本吻合。陆侧回填过程中，受偏心压载作用，桶式基础向陆侧发生顺时针偏转，沉降量相较于前一阶段有所减小；随着堆载持续，沉降量逐步增大。在水平位移方面，除桶内回填阶段存在一定偏差外，整体位移趋势与计算结果基本一致，监测数据与有限元值总体接近。对比结果表明，所用有限元方法能够合理反映桶式基础在施工过程中的力学响应和变化趋势。

3　桶土破坏界面及稳定性分析

目前，常用的土体界面稳定性分析方法主要包括极限平衡法、极限分析法和数值分析法[10-12]。此次稳定性分析基本思路是采用 Mohr-Coloumb 弹塑性本构模型对土体进行弹塑性有限元数值计算，不断增加强度折减系数直至土体失稳，将土体失稳时的强度折减系数视为整体基础的稳定性安全系数。在 PLAXIS 中设置控制强度折减的增量因子为 0. 1，最大计算步骤为 100 步，进行不同工况下的安全性计算，通过破坏时的增量位移分析桶土界面的破坏机理。

3. 1　砂桩置换率

工程现场实际砂桩置换率为 35%，为了分析不同置换率下对整体桶式基础稳定性的影响，设计 4 种工况进行对比分析，置换率分别为 25%、35%、45%、55%，设计复合地基参数见表 3。置换率 25%、35% 时，桩土应力比取 3. 0，置换率 45%时，桩土应力比取 2. 5，置换率 55%时，桩土应力比取 2. 0，其他参数根据 2. 2 节中参数计算方法计算得到。

不同置换率下的破坏面与安全系数 K 见图 5，从结果分析看，整体安全系数随置换率的增加而增大，但是安全系数增量不明显，置换率从 25% 增加至 55%时，安全系数从 1. 95 增大至 2. 15，仅增加 0. 2。从破坏面形状看，不同置换率工况下破坏面形状基本一致，右下桶破坏面局部向上侵入，呈圆弧状；下桶底部整体斜向下发展，整体呈大圆弧状；陆侧因主动土压力的增大，桶上部土体与远侧土体发生拉裂破坏。

表 3　不同置换率下复合地基参数

Tab. 3　Composite foundation parameters under different replacement ratios

置换率/%	桩土应力比	E_s/MPa	c'/kPa	φ'/(°)
25	3. 0	10. 13	9. 0	25. 50
35	3. 0	12. 78	7. 8	27. 38
45	2. 5	15. 43	6. 6	28. 20
55	2. 0	19. 73	5. 4	28. 80

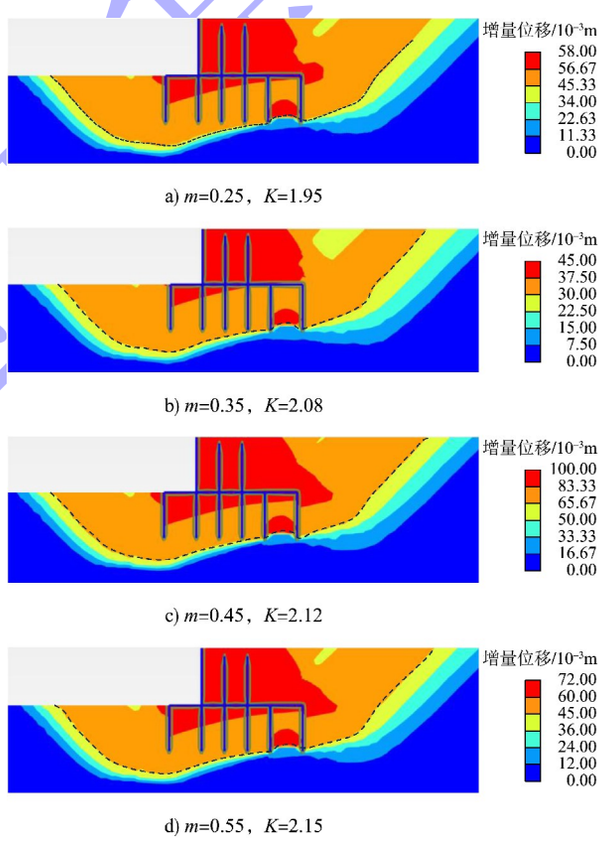


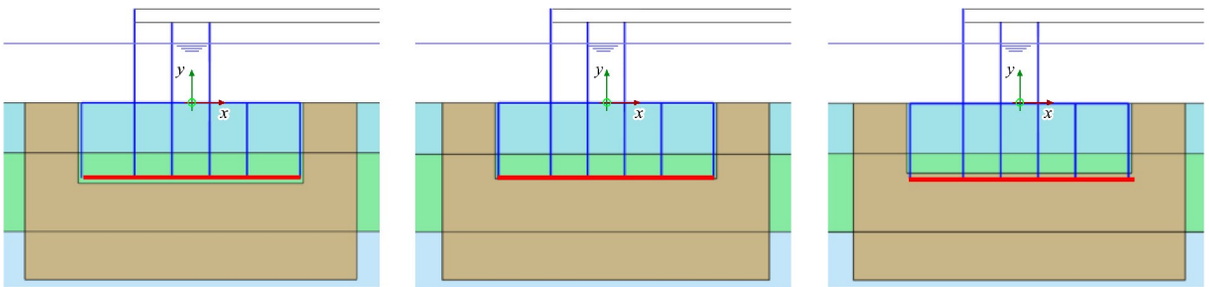
图 5　不同置换率下的破坏面与安全系数

Fig. 5　Failure surfaces and safety factors under different replacement ratios

3. 2　下桶进入砂桩深度

工程下桶体结构进入砂桩的设计深度为 1 m，但实际施工过程中，大部分实际进入深度未达到该设计值，桶体结构进入砂桩 1 m 时，下沉阻力很大，下沉困难，故仅考虑±2 m 范围内的桶体进

入砂桩深度分析。基于此，本次稳定性分析仅考虑±2 m 范围内的桶体进入砂桩深度工况。计算工况的进入深度分别为−2、−1、0、1、2 m，负值表示下桶底部未进入砂桩复合地基。桶体结构下部进入砂桩深度见图 6。

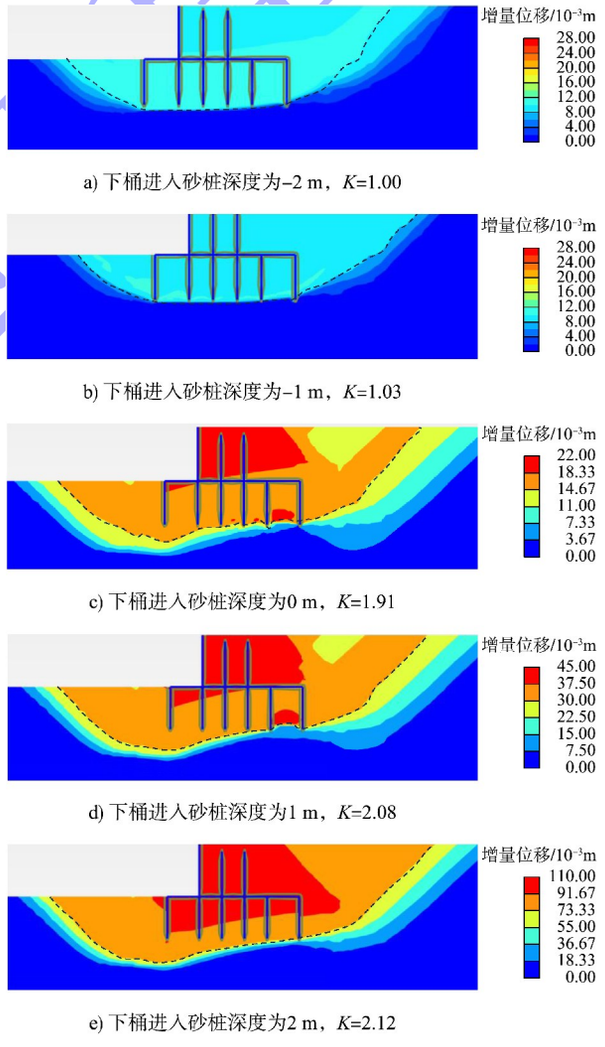


a) 贯入−1 m　　b) 贯入0 m　　c) 贯入1 m

图 6　桶体结构下部进入砂桩深度

Fig. 6　Penetration depth of lower bucket structure into sand column

桶体结构不同进入深度下，陆侧回填至设计高程时，破坏面情况与安全系数见图 7。整体上，安全系数随着下桶进入砂桩深度的增加而不断增加，下桶进入砂桩 1 与 2 m 的安全系数差异不大；下桶与砂桩脱离时，安全系数显著下降，说明下桶是否进入砂桩复合地基对整体安全系数影响非常大。桶结构进入深度为−2、−1 m 时，下桶底部与砂桩复合脱离，破坏面呈水平状，两侧破坏面近似呈弧状，强度折减法整体安全系数分别为 1.03 和 1.00，整体安全系数偏低，与规范公式法计算安全系数接近。当桶结构进入深度为 0、1 m 时，下桶右侧底部破坏面呈向隔仓内部侵入状，1 m 时的破坏面较 0 m 破坏面整体下移。由于桶结构整体向海侧移动，上部土体与远侧土体发生拉裂破坏。此处，0 m 工况下，受桶结构自重与桶内回填土的重力作用，下桶底部贯入砂桩内部，整体破坏面情况与 1 m 工况类似，而在−2、−1 m 工况下，自重和桶内回填土的荷载尚未使下桶贯入砂桩内，下桶底部与砂桩脱离。当桶结构进入深度为 2 m 时，安全系数进一步增大，但增幅有限，整体破坏面进一步向下发展。



a) 下桶进入砂桩深度为−2 m，K=1.00

b) 下桶进入砂桩深度为−1 m，K=1.03

c) 下桶进入砂桩深度为0 m，K=1.91

d) 下桶进入砂桩深度为1 m，K=2.08

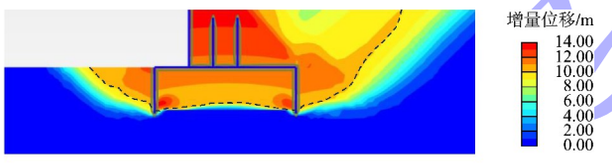
e) 下桶进入砂桩深度为2 m，K=2.12

图 7　不同进入深度下的破坏面与安全系数

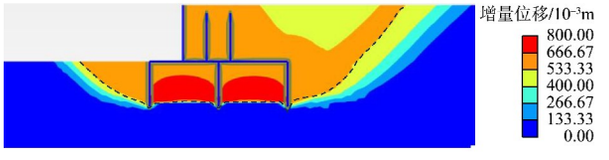
Fig. 7　Failure surfaces and safety factors under different penetration depths

3.3　分仓设置

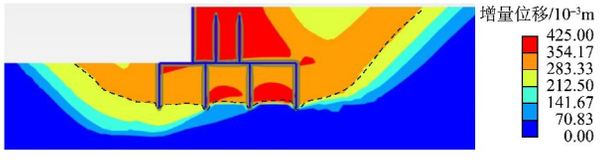
按对称分布原则，设计了 1～5 仓共 5 种工况，对应分仓宽度 S 分别为 40.0、20.0、13.3、10.0 及 8.0 m。不同隔仓数下的破坏形态与安全系数见图 8。当为 1 仓（S=40.0 m）时，破坏面整体呈向上凸起的圆弧状，安全系数为 1.5；增至 2 仓（S=20.0 m）时，破坏面表现为两个向上侵入的圆弧状，安全系数提升至 1.79，增幅为 19.33%；随着仓数继续增加至 3～5 仓（S=13.3、10.0、8.0 m），整体安全系数进一步增大，较 S=40.0 m 工况分别提高 32%、38% 和 41%，且各隔仓内破坏面仍保持向上凸起的圆弧状，但安全系数的增幅逐渐减小。结合现场施工反馈，分仓结构过多会导致下沉困难、工期延长和成本增加。因此，在确保桶体结构强度满足要求的前提下，建议优先采用 3 仓（S=13.3 m）或 4 仓（S=10.0 m）布置，该方案可在基本维持整体安全系数的同时，有效降低下沉阻力，从而提升施工效率并节约工程成本。



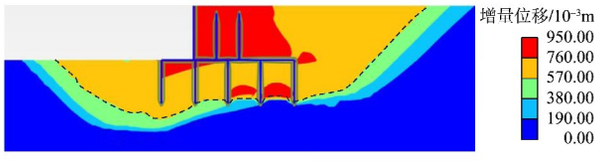
a) S=40.0 m，K=1.50



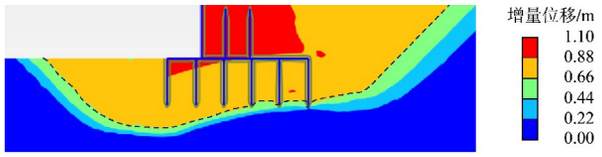
b) S=40.0 m，K=1.79



c) S=13.3 m，K=1.98



d) S=10.0 m，K=2.07



e) S=8.0 m，K=2.12

图 8　不同分仓下的破坏面与安全系数

Fig. 8　Failure surfaces and safety factors under different compartment configurations

4　结论

1）基于强度折减法研究桶土界面破坏机理发现，陆侧回填阶段，桶结构整体向海侧水平位移不断增加，下桶土界面剪切力也不断增加，下桶土破坏面会向隔仓内部侵入；下桶底部破坏面向海测斜向下发展，整体破坏面形态呈大圆弧状。

2）下桶底部进入砂桩复合地基的深度对整体安全系数影响显著。当下桶与砂桩复合地基未接触时，安全系数仅为 1.0 左右；而当其进入砂桩复合地基后，安全系数可提升至 2.0 左右。但随着进入深度的增加对安全系数的提升效果显著下降，因而需选择最优的进入砂桩复合地基深度，对于本文工程，最优值为 1 m 左右。

3）在复合地基置换率方面，安全系数与置换率呈正相关关系，置换率提高可相应提升整体安全系数，但其提升的边际效益随置换率增大而显著递减。综合考虑安全性能与工程经济性，对本文工程而言，最优置换率约为 35%。

4）当分仓数量增至 3～5 仓、相应分仓宽度分别为 13.3、10.0 与 8.0 m 时，安全系数虽继续提升，但其增幅呈现明显趋缓态势。其中，4 隔仓与 5 隔仓方案的安全系数增长率低于 0.05%，反映出进一步减小分仓宽度带来的边际安全效益已不显著。综合考虑安全性与工程经济性，在该工程条件下，推荐采用 4 隔仓、分仓宽度 10.0 m 作为最优分仓布置方案。

参考文献：

[1] 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.

[2] 范旭征博, 李武. 回填荷载作用下桶式基础结构护岸稳定性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(9): 54-61.
FAN X Z B, LI W. Experimental study on the stability of bucket foundation revetment under backfill loads [J]. China harbour engineering, 2025, 45(9): 54-61.

[3] 陈海峰, 李武. 桶式防波堤离心模型试验[J]. 水运工程, 2016(3): 57-61.
CHEN H F, LI W. Centrifugal model test of bucket-based breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2016(3): 57-61.

[4] 韩迅, 王墨璠, 武颖利. 回填荷载下桶式基础护岸变形与稳定数值分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 88-91.
HAN X, WANG M F, WU Y L. Numerical analysis of deformation and stability of bucket foundation revetment under backfill loads[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2): 88-91.

[5] 李武, 马哲超. 桶式基础结构沉放稳定性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(5): 25-28.
LI W, MA Z C. Experimental study on sinking stability of bucket based structure[J]. China harbour engineering, 2020, 40(5): 25-28.

[6] 谢锦波. 格型板桩圆筒内部土体破坏面的稳定性分析[J]. 水运工程, 2022(6): 190-194.
XIE J B. Stability analysis of rupture surface of soil inside sheet pile cellular [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 190-194.

[7] 姚祎雯, 陈丽琴. 复杂条件下防波堤结构设计方案比选[J]. 水运工程, 2024(8): 192-197.
YAO Y W, CHEN L Q. Comparison and selection of breakwater structure design schemes in complex conditions[J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 192-197.

[8] 插入式钢圆筒结构设计与施工规范: JTS 167-13—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Design and construction code of embedded steel plate cylinder structure: JTS 167-13-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

[9] 水运工程桶式基础结构设计与施工规程: JTS/T 167-16—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
Design and construction specification for bucket-base structures of port and waterway engineering: JTS/T 167-16-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.

[10] 刘丽斌. 上海深层黏土的物理性质、超固结特性及本构模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
LIU L B. Physical properties, over-consolidation and constitutive modeling of Shanghai deep clays [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[11] 王华宁, 魏奕淼, 宋飞, 等. 考虑非均质特性的黄土边坡稳定性分析[J/OL]. 工程力学, 2025-06-30. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250630.1135.008.
WANG H N, WEI Y M, SONG F, et al. Stability analysis of loess slope considering heterogeneous characteristics [J/OL]. Engineering mechanics, 2025-06-30. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250630.1135.008.

[12] 罗显枫. 基于强度折减法的边坡可靠度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
LUO X F. Research on slope reliability based on the strength reduction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

（本文编辑 王传瑜）

水运工程