超厚软土地质下不同插入比钢圆筒结构稳定性研究

曹晓航[1,2,3,4]，赵栋辉[1,2,3,4]，王雪奎[1,2,3,4]

（1. 中交天津港湾工程研究院有限公司，天津 300222；2. 天津市港口岩土工程技术重点实验室，天津 300222；
3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室，天津 300222；4. 中交第一航务工程局有限公司，天津 300461）

摘要：作为一种新型结构，插入式大直径钢圆筒在国内的应用仍处于起步阶段，亟需对大直径钢圆筒基础在超厚软土地基下的适用性及稳定性进行深入研究。采用数值模拟计算方法开展钢圆筒结构在不同水深条件下、不同入土深度、不同地质条件下稳定性研究。结果表明：当转动中心深度小于埋深时，大直径钢圆筒的力学机制主要表现为转动倾覆，此为深插式结构，当转动中心深度大于埋深时，大直径钢圆筒的力学机制包括了转动倾覆及水平滑移，此为浅插式结构；钢圆筒破坏模式与尺寸、埋深、荷载大小以及土性参数等均有关；在超厚软土地质条件下，钢圆筒结构仍可适用，钢圆筒 S/H（S 为钢圆筒的筒顶水平位移，H 为泥面以上筒身高度）为 1.5% 时荷载值随着插入比、土体黏聚力、土体内摩擦角、回填深度的增加而增大，随着荷载高度的增加而减小。

关键词：钢圆筒；超厚软土；数值模拟；稳定性；插入比

中图分类号：U656.3；TU432　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0204-07

Stability of steel cylinders with different insertion ratios in super-thick soft soil geology

CAO Xiaohang[1,2,3,4], ZHAO Donghui[1,2,3,4], WANG Xuekui[1,2,3,4]

(1. CCCC-Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China;
3. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Communications, Tianjin 300222, China;
4. CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: As a new type of structure, the application of insertable large-diameter steel cylinders in China is still in its infancy, and there is an urgent need to conduct in-depth research on the applicability and stability of large-diameter steel cylinder foundations under super-thick soft soil foundations. We carry out the stability research of steel cylindrical structures under different water depth conditions, different penetration depths and different geological conditions by numerical simulation calculation methods. The results show that when the depth of the rotation center is less than the burial depth, the mechanical mechanism of the large-diameter steel cylinder is mainly manifested as rotational overturning, which is a deep-insertion structure. When the depth of the rotation center is greater than the burial depth, the mechanical mechanism of the large-diameter steel cylinder includes rotational overturning and horizontal sliding, which is a shallow-insertion structure. The failure mode of steel cylinders is related to dimensions, burial depth, load magnitude, and soil parameters, etc. Under the condition of super-thick soft soil geology, the steel cylinder structure can still be applied. When the S/H (S is the horizontal displacement of the top of steel cylinder, and H is the height of the cylinder body above the mud surface) of the steel cylinder is 1.5%, the load value increases with the increase of the insertion ratio, the cohesion of the soil, the internal friction angle of the soil, and the backfill depth, and decreases with the increase of the load height.

Keywords: steel cylinder; super-thick soft soil; numerical simulation; stability; insertion ratio

收稿日期：2025-11-06　　**录用日期：**2025-12-03

作者简介：曹晓航(1994—)，男，硕士，工程师，从事海洋结构物与土的相互作用等方面的研究工作。

水运工程

插入式钢圆筒结构与经典的水工结构相比具有不可替代的优势，钢圆筒结构主要靠前后土体的嵌固作用维持其稳定性，即满足一定的入土深度就能达到稳定。其无需抛石基床，可避免地基开挖，同时工程造价低且施工方便，近年来通过港珠澳大桥、深中通道等大型项目的成功应用，钢圆筒结构对于深水条件下的软土地基具有显著优势[1-3]。

在相关研究方面，周红星等[4]通过工程实测资料分析大直径钢圆筒变形特性，结果表明其变形特性近似于重力式结构；秦崇仁等[5]通过室内试验提出插入式大圆筒在砂质海床上的临界稳定状态的判别方法及判断指标；宋波等[6]通过研究发现增大埋深可以增强钢圆筒结构的稳定性；徐光明等[7]通过土工离心试验，分析结构不同参数对大圆筒基础极限承载力和稳定性的影响；刘文彬等[8]、王雪奎等[9]通过土工离心模型试验对钢圆筒结构进行了破坏模式和稳定性等方面的分析。

作为一种新型结构，插入式钢圆筒在国内的应用仍处于起步阶段，钢圆筒结构形式和荷载条件的复杂性造成了其理论研究仍有较大滞后，对于钢圆筒结构在深厚软土地基的稳定机理和破坏模式仍需要深入研究。

本文采用数值模拟计算方法开展钢圆筒结构稳定性研究工作，分析其在不同水深条件下、不同入土深度，不同地质条件下的破坏状态，对钢圆筒结构的应用范围进行拓展，明确其在超厚软土即无持力层地基中的适用性，为工程中进一步选择提供技术参考。

1　数值模拟模型建立

本文采用 ABAQUS 软件建立土体及钢圆筒数值模型并进行相应数值模拟计算。本文有限元模型中土体均采用 Mohr-Coulomb 本构模型，钢圆筒选用线弹性本构模型。钢圆筒直径取 30 m，高度取 30 m，筒壁厚 0.016 m，模型土体范围宽度取 200 m，深度取 60 m，采用 C3D8R 单元对有限元模型进行网格划分，在土体周边对水平方向进行位移约束，在土体底部对 x、y、z 方向进行位移约束。模型见图 1。为明确钢圆筒在超厚软土即无持力层地基中的适用性，土质均采用淤泥土参数，模型参数取值见表 1。

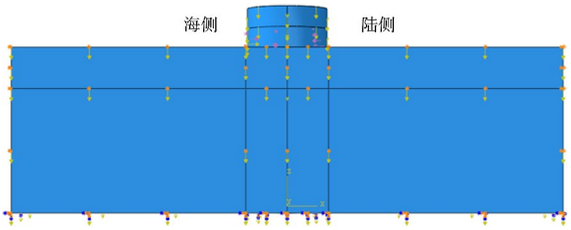


图 1　土体及钢圆筒模型

Fig. 1　Model of steel cylinder and soil

表 1　模型参数

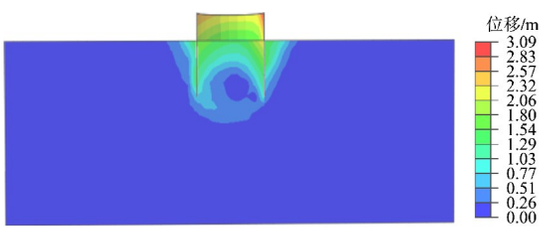
Tab. 1　Model parameters

模型	γ/(kN·m^{-3})	ν	φ/(°)	c/kPa	E/MPa
土	16.5	0.4	2	8	8
钢圆筒	78.5	0.3	–	–	210 000

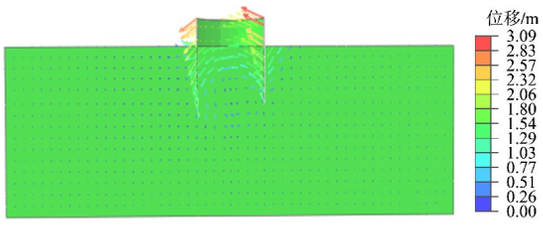
注：γ 为重力密度；ν 为泊松比；φ 为内摩擦角；c 为黏聚力；E 为弹性模量。

2　不同插入比计算结果

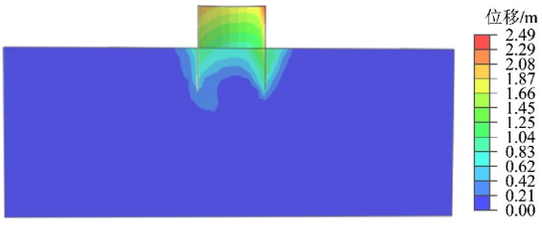
本文计算中插入比(入土筒体深度与泥面以上筒体高度之比)取 1∶0.5、1∶1、1∶3、1∶5、1∶7，钢圆筒模型高度 30 m，入土深度分别为 20、15、7.5、5、3.75 m。波浪荷载作用点为泥面以上 7.5 m 处，不同插入比工况下的计算结果见图 2，不同插入比工况下 S/H(S 为钢圆筒的筒顶水平位移，H 为泥面以上筒身高度)与波浪荷载 F 的关系曲线见图 3。



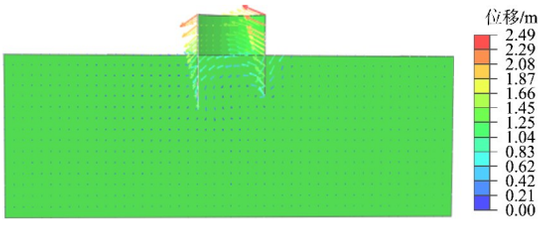
a) 插入比1∶0.5工况位移云图



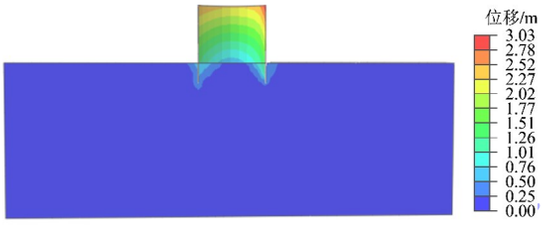
b) 插入比1∶0.5工况位移矢量图



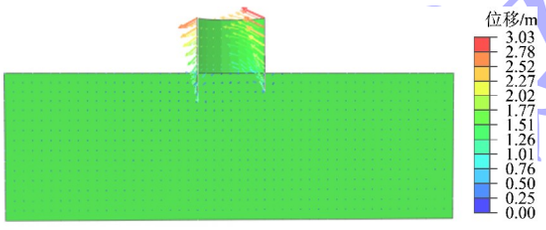
c) 插入比1∶1工况位移云图



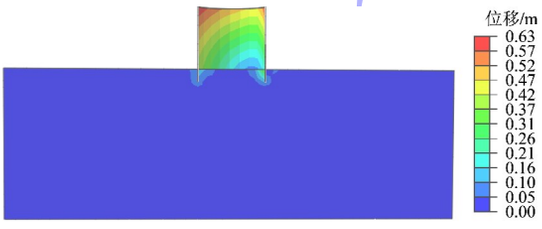
d) 插入比1∶1工况位移矢量图



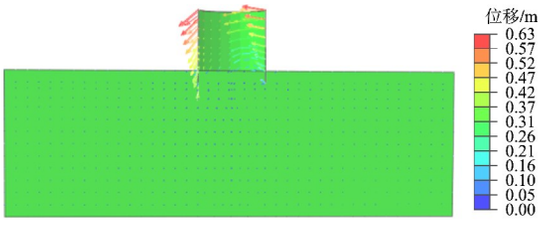
e) 插入比1∶3工况位移云图



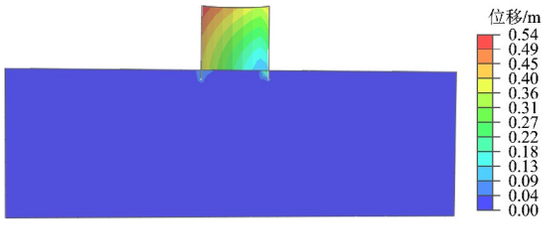
f) 插入比1∶3工况位移矢量图



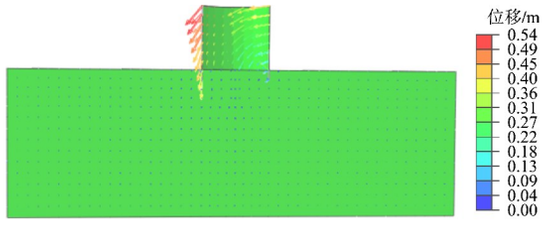
g) 插入比1∶5工况位移云图



h) 插入比1∶5工况位移矢量图



i) 插入比1∶7工况位移云图



j) 插入比1∶7工况位移矢量图

图 2　不同插入比工况下计算云图

Fig. 2　Calculation cloud maps under different insertion ratio conditions

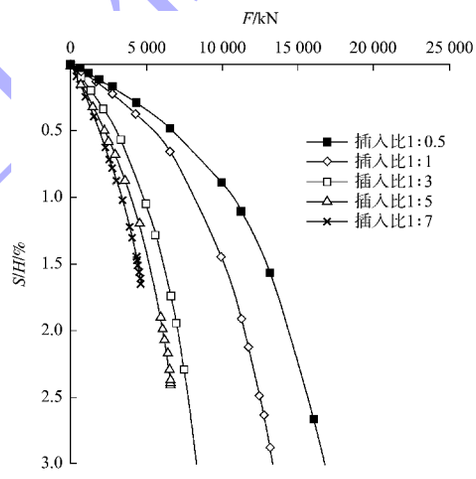


图 3　不同插入比工况的 *S/H-F* 关系曲线

Fig. 3　*S/H-F* relationship curves under different insertion ratio conditions

由计算结果可知，筒顶水平位移随波浪荷载的增加而增大，在波压力的作用下，筒顶位移先缓慢增长，后迅速增长。根据 JTS 167-13—2019《插入式钢圆筒结构设计与施工规范》[10]，*S/H* 应小于 1.5%。因此，取 *S/H* = 1.5 时的荷载进行比较。

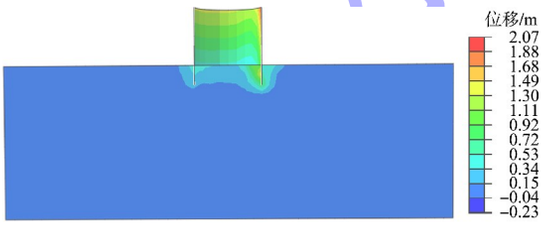
钢圆筒 *S/H* 为 1.5%时荷载随着插入比的增加而增大。插入比 1∶0.5 时，*S/H* 取 1.5%对应荷载值为 12 882 kN；插入比 1∶1 时，*S/H* 取 1.5%对应荷载值为 10 098 kN；插入比 1∶3 时，*S/H* 取 1.5%

对应荷载值为 6 072 kN；插入比 1∶5 时，*S*/*H* 取 1.5%对应荷载值为 5 131 kN；插入比 1∶7 时，*S*/*H* 取 1.5%对应荷载值为 4 466 kN。即 *S*/*H*=1.5%时荷载随着插入比的增加而增大，与离心机试验结论保持一致[11]。

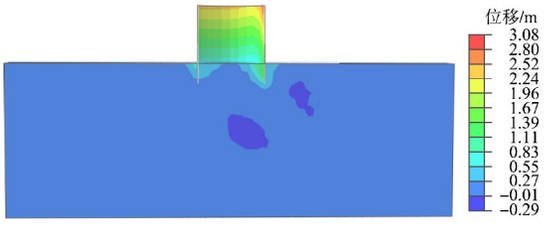
同时从位移云图可以看出，当插入比大于或等于 1∶1 时，钢圆筒结构转动中心位于钢圆筒内部，此时钢圆筒结构表现为深插式，大直径钢圆筒的力学机制主要表现为转动倾覆，稳定性分析包括自身重力(包括筒内填料)、筒壁外侧土抗力以及筒壁摩阻力以及转动中心深度以下的土体抗力。当插入比小于 1∶1 时，钢圆筒结构转动中心位于钢圆筒外部，此时钢圆筒结构表现为浅插式，大直径钢圆筒的力学机制包括了转动倾覆及水平滑移，稳定性分析包括自身重力(包括筒内填料)、筒壁摩阻力、土抗力以及基底摩阻力。

3　不同水深的计算结果

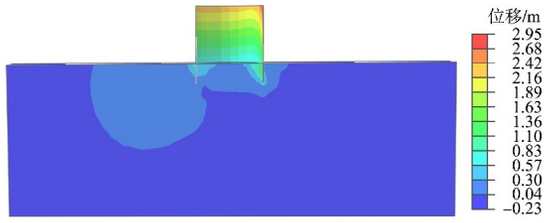
设置不同荷载作用点的高度模拟不同水深的波浪荷载，保持钢圆筒和地基其他物理参数不变，分别建立荷载作用点距离泥面高度(水深) H_P 为 1.875、3.75、5.625、7.5 m 的计算模型。不同水深工况下的计算结果见图 4，不同水深工况下 *S*/*H* 与 *F* 的关系曲线见图 5。



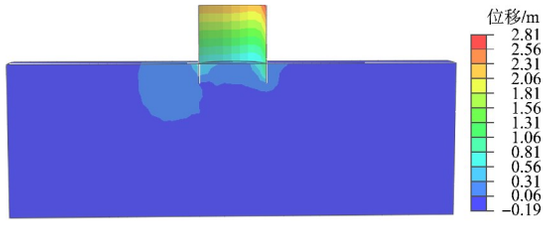
a) H_P=1.875 m



b) H_P=3.750 m



c) H_P=2.625 m



d) H_P=7.500 m

图 4　不同水深工况位移云图

Fig. 4　Displacement cloud maps under different height water depth conditions

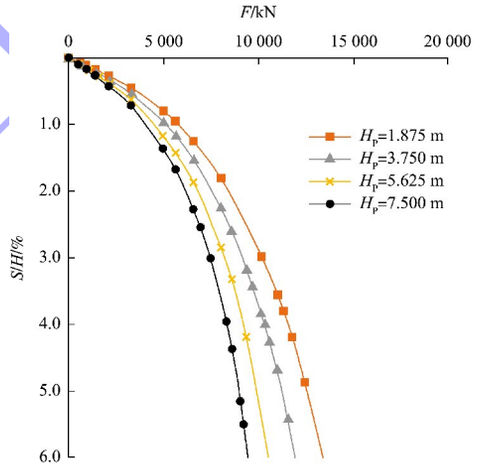


图 5　不同荷载作用点高度工况 *S*/*H*-*F* 关系曲线

Fig. 5　*S*/*H* - *F* relationship curves under different height of load point conditions

由计算结果可以看出，钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载随着荷载高度的增加而减小，近似呈线性关系。H_P=1.875 m 工况下 *S*/*H* 取 1.5%对应荷载值为 7 224 kN；H_P=3.75 m 工况下 *S*/*H* 取 1.5%对应荷载值为 6 515 kN；H_P=5.625 m 工况下 *S*/*H* 取 1.5%对应荷载值为 5 826 kN；H_P=7.5 m 工况下 *S*/*H* 取 1.5%对应荷载值为 5 270 kN。

4　不同地质工况的计算结果

保持钢圆筒和地基其他物理参数不变，改变土体的黏聚力及内摩擦角值，不同土体参数工况下的计算结果见图 6，不同水深工况下 *S*/*H* 与 *F* 的关系曲线见图 7。

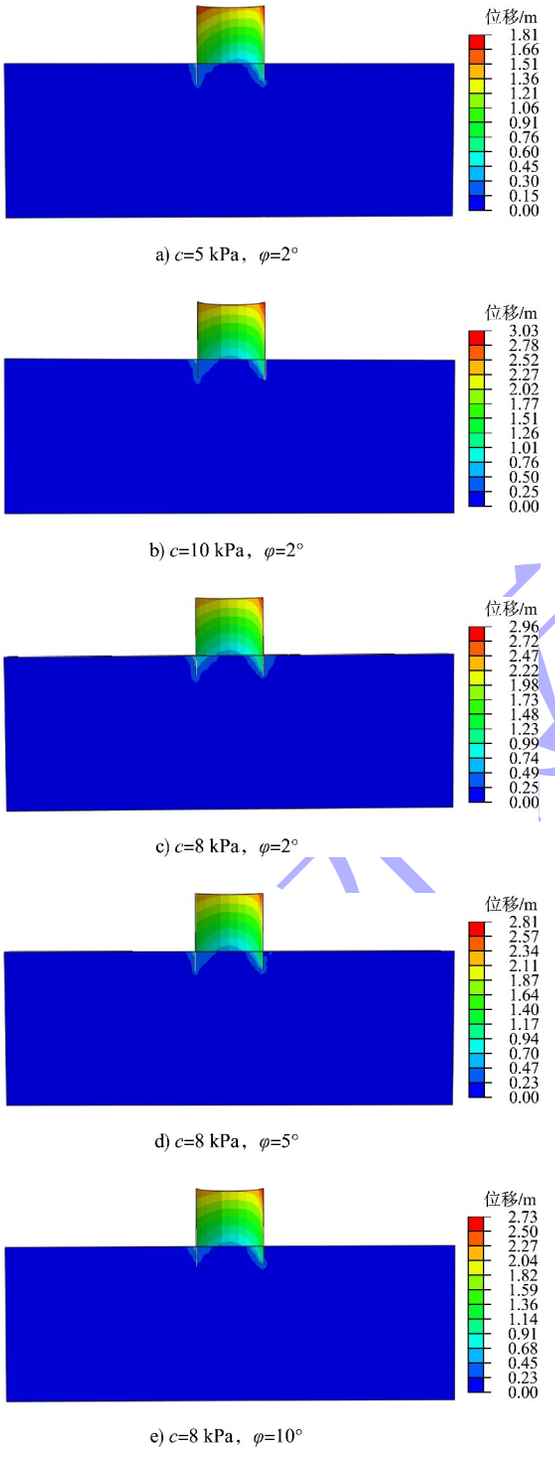


图 6　不同地质工况水平位移云图

Fig. 6　Cloud maps for horizontal displacement under different geological working conditions

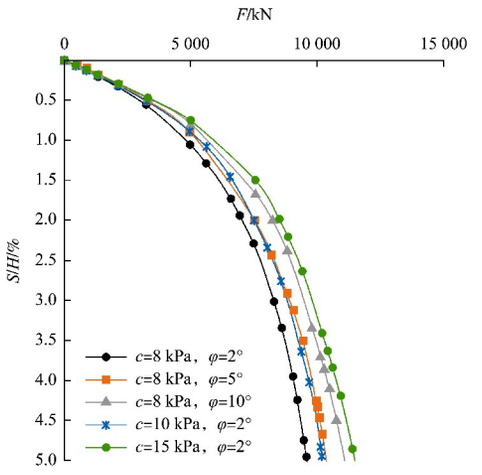


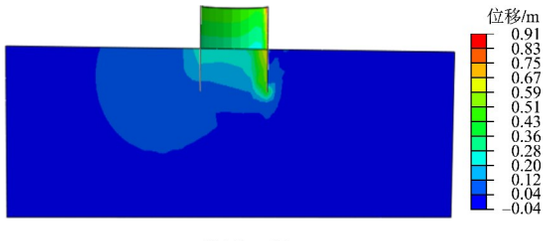
图 7　不同地质工况 *S*/*H*-*F* 关系曲线

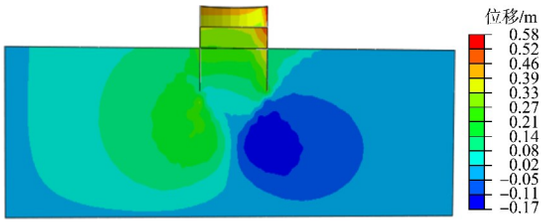
Fig. 7　*S*/*H*-*F* relationship diagram under different geological working conditions

从计算结果可知，筒体最大水平位移均发生在筒顶处，地质参数改变并没有改变钢圆筒破坏模式。*c* = 8 kPa、*φ* = 2°工况下钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载为 6 071 kN；*c* = 8 kPa、*φ* = 5°工况下钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载为 6 368 kN；*c* = 8 kPa、*φ* = 10°工况下钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载为 7 065 kN；*c* = 10 kPa、*φ* = 2°工况下钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载为 6 642 kN；*c* = 15 kPa、*φ* = 2°工况下钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载为 7 530 kN。可以看出，钢圆筒 *S*/*H* 为 1.5%时荷载随着土体黏聚力的增加而增大，随着土体内摩擦角的增加而增大。

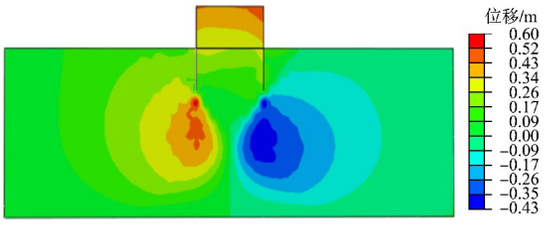
5　不同回填深度的计算结果

为探究不同回填深度对钢圆筒结构稳定性的影响，保持钢圆筒和地基其他物理参数不变，改变筒内回填深度值。不同回填深度工况下的计算结果见图 8，不同回填深度工况下 *S*/*H* 与 *F* 的关系曲线见图 9。





b) 1/2回填工况



c) 完全回填工况

图 8　不同回填深度工况水平位移云图

Fig. 8　Horizontal displacement cloud maps under different backfill depth conditions

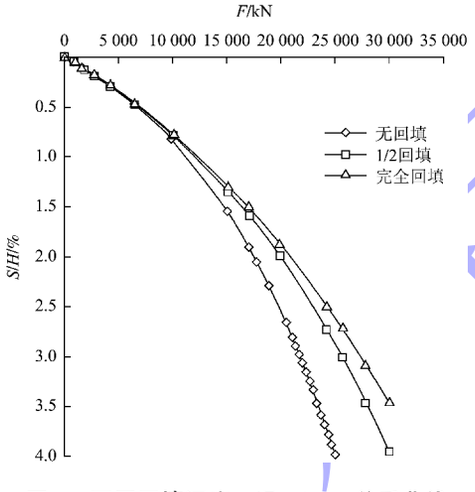


图 9　不同回填深度工况 *S/H-F* 关系曲线

Fig. 9　*S/H-F* relationship curves under different backfill depth conditions

由计算结果可知，无回填工况下，*S/H* 为 1.5%时荷载为 14 694 kN；1/2 回填工况下，*S/H* 为 1.5%时荷载为 16 405 kN；完全回填工况下，*S/H* 为 1.5%时荷载为 16 969 kN。可以看出，*S/H* 为 1.5%时的波浪荷载随着回填深度的增加而增大。

6　结语

1）当转动中心深度小于埋深时，大直径钢圆筒的力学机制主要表现为转动倾覆，此为深插式结构。当转动中心深度大于埋深时，大直径钢圆筒的力学机制包括了转动倾覆及水平滑移，此为浅插式结构。

2）钢圆筒破坏模式与尺寸、埋深、荷载大小以及土性参数等均有关，在本文计算工况下，当插入比大于或等于 1∶1 时，钢圆筒结构转动中心位于钢圆筒内部，此时钢圆筒结构表现为深插式，当插入比小于 1∶1 时，钢圆筒结构转动中心位于钢圆筒外部，此时钢圆筒结构表现为浅插式。

3）在超厚软土地质条件下，钢圆筒结构仍可适用，钢圆筒 *S/H* 为 1.5%时荷载值随着插入比的增加而增大，钢圆筒 *S/H* 为 1.5%时荷载值随着荷载高度的增加而减小，钢圆筒 *S/H* 为 1.5%时荷载值随着土体黏聚力的增加而增大，随着土体内摩擦角的增加而增大，钢圆筒 *S/H* 为 1.5%时的荷载值随着回填深度的增加而增大。

参考文献：

[1] 孔令磊, 孙竹, 杨润来, 等. 港珠澳大桥西人工岛钢圆筒及岛内回填砂成岛技术[J]. 水运工程, 2019(S1): 62-66, 76.
KONG L L, SUN Z, YANG R L, et al. Technology of island formation by steel cylinder and backfill sand in west artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge[J]. Port & waterway engineering, 2019(S1): 62-66, 76.

[2] 王婷婷, 卢永昌, 彭志豪. 深厚软土地基上插入式钢圆筒的结构稳定性[J]. 水运工程, 2019(9): 294-299.
WANG T T, LU Y C, PENG Z H. Stability of inserted steel cylinder structure on deep soft foundation[J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 294-299.

[3] 刘健, 夏丰勇, 唐一夫. 深中通道西人工岛总体设计及大直径钢圆筒快速成岛技术[J]. 水运工程, 2021(6): 13-19.
LIU J, XIA F Y, TANG Y F. Overall design of western artificial island of Shenzhen-Zhongshan link and rapid island-formation technology by large-diameter steel cylinder[J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 13-19.

[4] 周红星, 董志良, 陈平山. 大直径钢圆筒变形特性分

析[J]. 水运工程, 2015(3): 21-27.
ZHOU H X, DONG Z L, CHEN P S. Deformation characteristics of large-diameter steel cylinders[J]. Port & waterway engineering, 2015(3): 21-27.

[5] 秦崇仁, 韩涛, 李世森, 等. 砂质底床上沉入式大直径圆筒结构施工期稳定性的实验研究[J]. 中国港湾建设, 2001(3): 7-12.
QIN C R, HAN T, LI S S, et al. Experimental study on stability of sunken large diameter cylindrical structure on sandy seabed during construction period [J] China harbour engineering, 2001(3): 7-12.

[6] 宋波, 张辉, 冯国俊, 等. 不同埋深比对钢圆筒防波堤结构抗震稳定性影响研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(S1): 457-464.
SONG B, ZHANG H, FENG G J, et al. Study on influence of different buried depth of steel cylindrical breakwater on seismic stability of structure[J]. Journal of building structures, 2017, 38(S1): 457-464.

[7] 徐光明, 章为民, 赖忠中. 沉入式大圆筒结构码头工作机理离心模型试验研究[J]. 海洋工程, 2001, 19(1): 38-44.
XU G M, ZHANG W M, LAI Z Z. Centrifuge modeling of quay walls composed of large-diameter cylinders embedded below mud line[J]. Ocean engineering, 2001, 19(1): 38-44.

[8] 刘文彬, 王雪奎, 洪兆徽. 波浪荷载作用下插入式钢圆筒稳定性的离心模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(6): 31-36.
LIU W B, WANG X K, HONG Z H. Centrifuge model test on the stability of plug-in steel cylinder under the action of wave load [J]. China harbour engineering, 2022, 42(6): 31-36.

[9] 王雪奎, 胡建军, 程明. 大直径钢圆筒结构稳定性离心模型试验研究[J]. 水运工程, 2024(4): 168-172.
WANG X K, HU J J, CHENG M. Centrifugal model test on stability of large diameter steel cylinder structure[J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 168-172.

[10] 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.

[11] 王雪奎, 曹晓航. 插入比对钢圆筒结构稳定性影响的离心模型试验研究[J]. 水运工程, 2025(11): 7-12.
WANG X K, CAO X H. Centrifuge model test on influence of insertion ratio on stability of steel cylinder structure[J]. Port & waterway engineering, 2025(11): 7-12.

(本文编辑 王璁)

(上接第 149 页)

[11] 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Technical standard for monitoring of building excavation engineering: GB 50497-2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

[12] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86-94.
SONG G, SONG E X. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(5): 86-94.

[13] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification[M]// Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 years of PLAXIS International. London: Routledge, 2019: 281-296.

[14] 万智. 深基坑双排桩支护结构体系受力分析与计算[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
WAN Z. Analysis and calculation of the forces of retaining structure with double-row piles of deep foundation pit[D]. Changsha: Hunan University, 2001.

[15] 史海莹. 双排桩支护结构性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
SHI H Y. Study on the behavior of double-row piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

(本文编辑 赵娟)