



基于 Plaxis 3D 混凝土薄壁大圆筒结构 稳定性分析

宋育霖¹, 李 挺²

(1. 中交天津港湾工程设计院有限公司, 天津 300457; 2. 中交一航局第一工程有限公司, 天津 300456)

摘要: 以广东某拟建外海大圆筒工程为实例, 针对二维理论进行结构设计存在位移偏小的问题, 利用 Plaxis 3D 软件建立钢筋混凝土结构与土体的整体空间三维模型, 三维实体有限元模拟中采用 HSS 模型模拟地基土和筒内回填散料, 计算不同工况下圆筒本身的变位和土体产生的位移, 得出深埋式大圆筒结构的运动趋势, 以及筒内回填土强度、筒壁壁厚以及入土深度对结构稳定性的影响。结果表明, 筒内土体与圆筒结构的运动基本一致, 没有形成充分发展的主被动区域, 为施工回填最小高度提供针对性建议; 壁厚对结构稳定性影响较小, 筒内回填土强度和入土深度对结构稳定性影响较大, 但达到一定限值后稳定性结果增长趋势渐缓至趋于稳定。

关键词: 有限元模型; 钢筋混凝土薄壁大圆筒; 结构变位; 稳定性

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0182-06

Stability analysis of large concrete thin-walled cylinder structure based on Plaxis 3D

SONG Yulin¹, LI Ting²

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China;

2. No. 1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: Taking the proposed offshore large cylinder project in Guangdong as an example, in view of the problem of too small displacement in the structural design based on two-dimensional theory, we use Plaxis 3D software to build a three-dimensional model of the overall space between the reinforced concrete structure and the soil, and use the HSS model in the three-dimensional finite element simulation to simulate the foundation soil and the backfill material inside the cylinder. Then we calculate the displacement of the cylinder itself and the displacement generated by the soil under different working conditions, and obtain the motion trend of the deep buried large cylinder structure, and the influence of the strength of backfill soil inside the cylinder, the thickness of the cylinder wall, and the depth of penetration on structural stability. The results show that the motion of the soil inside the cylinder and the cylindrical structure is basically the same, and there is no fully developed active and passive area. Targeted suggestions are provided for the minimum height of construction backfill. The wall thickness has a relatively small impact on structural stability, while the strength of backfill soil inside the cylinder and the depth of penetration has a significant impact on structural stability. However, after reaching a certain limit, the growth trend of stability results gradually slows down and tends to stabilize.

Keywords: finite element model; large reinforced concrete thin-walled cylinder; structural displacement; stability

收稿日期: 2024-01-22

作者简介: 宋育霖 (1991—), 女, 工程师, 从事港口结构设计。

我国近年来在外海引入并推广插入式圆筒这一新型港口海洋结构形式, 其结构简单, 无盖、无底、无隔墙、直径大, 目前多由钢筋混凝土或钢质材料制成。大直径圆筒结构依据维持稳定性的工作原理分为重力式结构和插入式结构。对于插入式圆筒结构, 如果软弱土层厚度不深, 圆筒可穿过软土层使筒底到达坚硬土层, 当筒体发生转动时, 筒底前端附近存在可靠的支撑点, 重心仍然可对此支撑点取稳定力矩, 结构重力仍将是维持结构稳定性的重要因素, 这种插入式大圆筒结构可归为重力式圆筒结构^[1]; 当软土层较厚时, 插入式大圆筒结构埋入较深且底部结构并没有达到坚硬土层时, 筒底前趾不存在确定的支撑点, 重心无法稳定力矩, 大圆筒结构稳定性主要靠前后土体的嵌固作用维持, 则必须满足一定的入土深度才能达到稳定^[2-3], 此时深埋式大圆筒结构的力学特征与工作机理既不属于重力式也不同于桩基, 而是更接近于大直径圆筒刚性桩墙式结构类型。

对于圆筒结构设计, 已有一些相关的研究。唐云等^[4]采用钢圆筒施工工法^[5]和 OCDI^[6]的二维计算理论进行结构设计, 二维计算中对于土体刚度采用二维弹簧模拟, 无法考虑三维整体刚度变化, 其位移计算结果严重偏小, 而三维计算的结构位移值更为可信和接近实际。徐雪松等^[7]基于有限元软件 Plaxis 3D 建立空间有限元模型模拟钢圆筒围护结构的施工过程, 采用线弹性模型模拟大圆筒结构, 采用硬化土(hardening soil, HS)模型定义土体的本构关系, 并在圆筒与筒内土、筒外土之间均加入界面单元模拟接触的实际性质。彭志豪等^[8]通过理论计算和有限元软件结构分析对比, 得出在工程设计中可以采用库拉依宁法计算筒内土压力。这些成果可以为钢圆筒壁水平张力计算提供依据, 从而合理确定钢圆筒壁厚度。对于插入软土厚度介于两者之间的混凝土薄壁大圆

筒结构, 采用插入式结构计算方法, 考虑圆筒结构受力情况复杂。本文利用 Plaxis 3D 建立整个薄壁大圆筒结构三维有限元模型, 将圆筒-地基-筒内外填料作为一个整体结构系统考虑, 建立圆筒有限元模型, 计算圆筒本身在施工期和使用期本身的变位, 并探讨回填料强度、壁厚以及入土深度对结构稳定性的影响。

1 工程概况

工程位于广东西部沿海, 拟在深远海区域进行大规模海洋牧场建设。由于海上风浪较大, 须在高密度聚乙烯(HDPE)网箱外建设深远海安全防护基础工程。工程防护结构采用直径 30 m 的混凝土圆筒结构形式, 圆筒间净距 4 m。圆筒周边的护底顶高程为-20 m。

基槽开挖后抛填 3 m 厚的中粗砂层后吊运安装混凝土圆筒, 圆筒直径 30 m、壁厚 0.4 m。圆筒安装完毕后回填中粗砂并振冲密实。圆筒内顶部回填碎石垫层和素混凝土垫层后安装顶部消浪挡墙, 挡墙顶高程为 18.0 m。

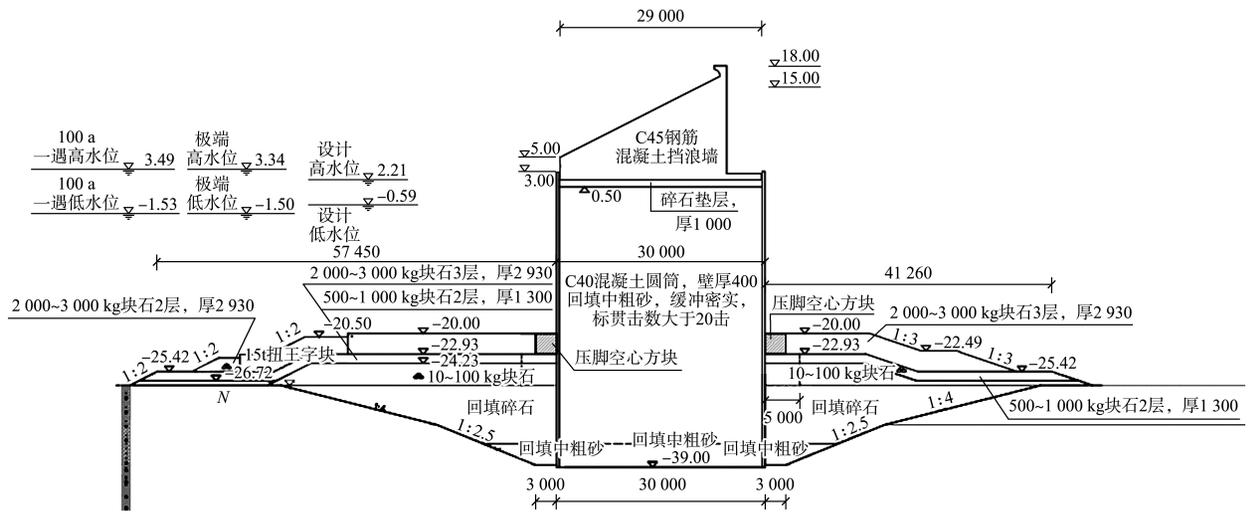
圆筒外侧基槽内回填碎石和 10~100 kg 块石, 回填高程均为-24.23 m, 其上抛填 500~1 000 kg 块石垫层至-22.93 m。圆筒海侧顶面采用 2 000~3 000 kg 块石护面, 外肩采用 15 t 扭王字块护面, 并采用 2 000~3 000 kg 块石护脚。圆筒陆侧采用 2 000~3 000 kg 块石护面。典型断面见图 1。施工期、使用期圆筒外海波浪要素见表 1、2。

表 1 E 向 5 a 一遇波浪+极端高潮位组合

重现期/ a	$H_{1\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	平均波高 H_m/m	$T_{13\%}/$ s	谱峰周期 T_p/s	周期 T/s	波长 L/m
5	9.69	6.64	4.37	9.80	10.30	8.50	110.10

表 2 阳江外海 30 m 水深附近各向波要素+极端高潮位组合

重现期/ a	波向	$H_{1\%}/$ m	$H_{4\%}/$ m	$H_{5\%}/$ m	$H_{13\%}/$ m	平均 周期 T_m/s	平均 波长 L_m/m
100	E-ESE	14.68	12.72	12.36	10.60	13.0	207



注: N 为标贯击数。

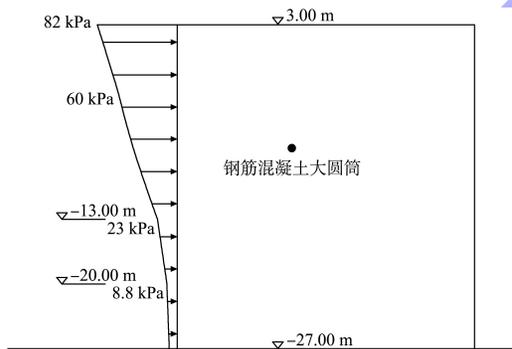
图 1 典型结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

计算考虑 5~10 a 一遇的潮位和波浪组合为施工工况, 根据 JTS 167-13—2019《插入式钢圆筒结构设计及施工规范》^[9] (简称“规范”) 采用平面 100 a 一遇的潮位和波浪组合为极端工况。波浪荷载见图 2。

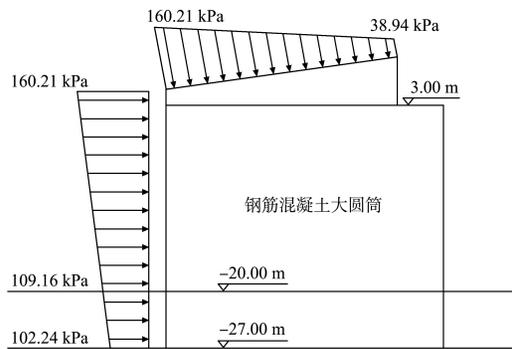
2 模型建立

2.1 模型尺寸及边界

为了便于建模, 考虑土体和结构单元的对称性, 建立 1/2 模型; 经过多次试算, 当计算模型达到一定范围时, 边界约束条件的影响可以忽略, 从而确定计算模型长 400 m、宽 150 m、深 100 m, 圆筒半径 15 m、深度 27 m。模型的位移边界条件为: 底面约束 3 个方向位移, 侧面约束 4 个方向位移, 顶面自由; 排水边界条件为: 顶面和对称面为排水边界, 底面及 3 个侧面均为不排水边界。圆筒结构采用板单元模拟, 模型网格生成 11.582 6 万个单元, 16.586 8 万个节点。有限元模型见图 3。



a) 5a一遇



b) 100 a一遇

图 2 5 a 一遇与 100 a 一遇工况下波压力

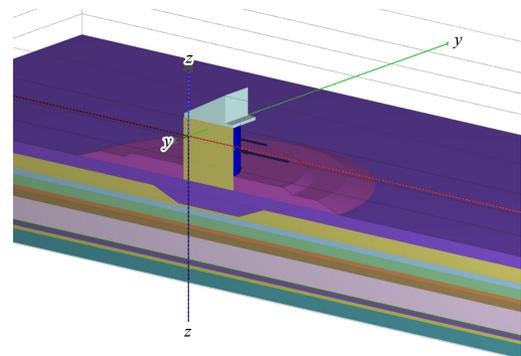


图 3 有限元模型

2.2 土体本构模型及参数

为了较好地反映实际土体情况, 土体采用小应变硬化土 (hardening soil with small strain stiffness, HSS) 模型。HSS 模型是基于 HS 模型而建立, 同时具备 HS 模型的优点: 其采用合理的双刚度, 即加/卸载模量分别定义, 且考虑土体模量随应力增加而增大的特性。塑性部分采用非相关联流动法则和各向同性的硬化准则, 可较好地描述曲线形

式的应力-应变关系和土体的剪胀性。对于有大开挖卸载施工步的有限元数值模拟, HS 模型的加卸载模量分别定义, 基本能够反映此应力路径的影响, 考虑圆筒结构规范允许的变形量很小, 周围土体通常处于小应变状态, 并在此基础上补充初始小应变模量 G 和剪切应变水平以描述小应变刚度行为^[10]。计算土体参数见表 3。

表 3 土体参数

土层	深度/ m	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	压缩 指数 C_c	回弹再压缩 指数 C_s	次固结 指数 C_α	孔隙比 e	有效黏聚力 c'/kPa	有效内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	压缩模量 E_s/MPa
①淤泥	0~6	1.60	0.7	0.10	0.013	2.0	0.5	15.0	-
② ₁ 淤泥质土	5~11	1.60	0.8	0.05	0.020	1.9	0.5	22.0	-
② ₂ 中砂	11~26.2	1.75	-	-	-	-	0.5	17.4	15
③ ₁ 粗砂	26.2~68	1.80	-	-	-	-	0	26.0	18
④ ₁ 强风化泥质砂岩	68~82	1.95	-	-	-	-	0	30.0	50
挡墙块石	-	2.65	-	-	-	-	0	40.0	25

2.3 结构单元模型

为了能充分发挥有限元分析的优点, 符合实际地模拟圆筒-土接触界面地性质, 土体采用实体单元模拟, 圆筒结构采用板单元模拟, 并在圆筒与筒内土、筒外土之间均加入界面单元模拟接触的实际性质。接触面单元通过特定的数值模拟, 模拟不同材料之间的相互滑移、脱离等力学现象。接触强度可以通过下式表示:

$$\tan\varphi_{\text{interface}} = R_{\text{inter}} \tan\varphi_{\text{soil}} \quad (1)$$

$$c_{\text{interface}} = R_{\text{inter}} c_{\text{soil}} \quad (2)$$

式中: $\varphi_{\text{interface}}$ 和 $c_{\text{interface}}$ 为接触面单元的内摩擦角和黏聚力, φ_{soil} 和 c_{soil} 为土体的内摩擦角和黏聚力, R_{inter} 为用于接触面强度的折减参数。 $R_{\text{inter}} = 1$ 表明土体与圆筒结构间无相对位移, $R_{\text{inter}} < 1$ 表明土体与圆筒结构间因为接触面强度差异导致相对位移。对于结构与土之间的界面, 按照一般的工程经验, 取同深度土层材料强度的 2/3 作为接触面单元的强度。考虑挡浪墙不与圆筒结构单元连接, 仅传递重力和波浪力, 因此采用实体单元模拟。

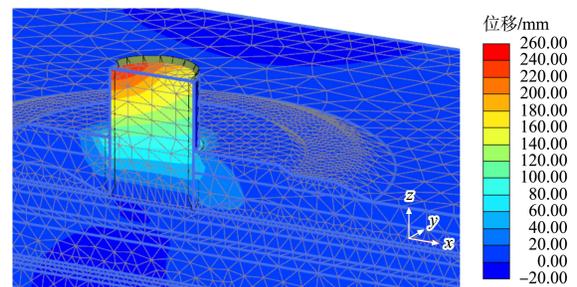
2.4 分析工况及加载施工步骤

主要施工工序为: 土体开挖至 -29.0 m → 混凝土圆筒安放 → 混凝土圆筒内、筒外同步回填 → 混凝土圆筒外回填护面 → 混凝土圆筒内土体振冲密实 → 混凝土圆筒上盖浇筑混凝土 → 挡浪构件安装。

3 计算结果分析

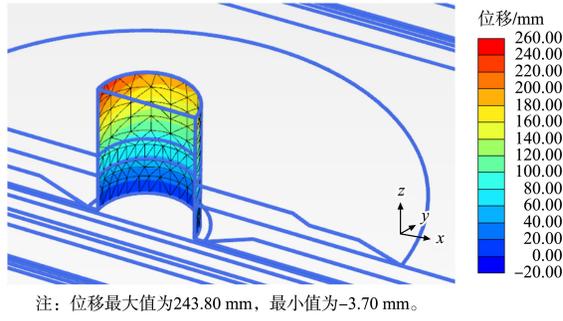
3.1 圆筒及土体位移对比

根据规范的第 5.3.7 条, 结构计算变位应小于 1.5% H (H 为泥面以上高度), 分别考虑 5 a 一遇 (施工期) 和 100 a 一遇 (运营期) 的波浪作用, 土体位移和圆筒结构位移见图 4、5。



注: 位移最大值为 246.40 mm, 最小值为 -4.30 mm。

a) 土体



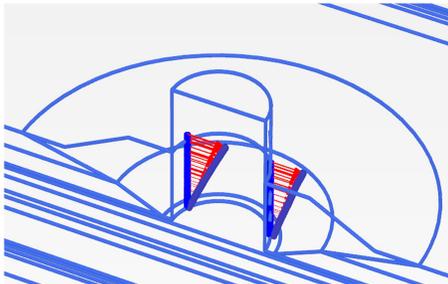
注：位移最大值为243.80 mm，最小值为-3.70 mm。

b) 筒体



注：位移最大值为172.10 mm，最小值为2.03 mm。

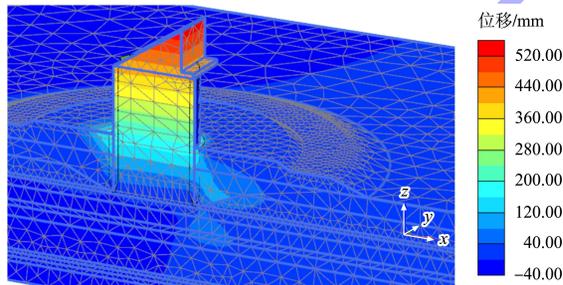
c) 筒体埋入土体部分



注：位移最大值为123.80 mm，最小值为3.39 mm。

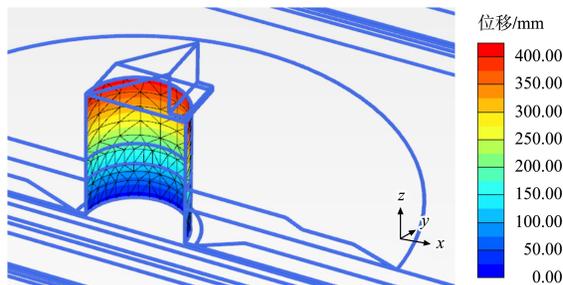
c) 筒体埋入土体部分

图4 5 a 一遇工况位移云图



注：位移最大值为547.00 mm，最小值为-29.07 mm。

a) 土体



注：位移最大值为424.40 mm，最小值为3.27 mm。

b) 筒体

图5 100 a 一遇工况位移云图

插入式大直径圆筒破坏主要有剪切变形、筒体胀裂、滑移、倾覆、沉陷等5种形式。位移云图显示，筒顶位移大于筒底位移，破坏趋势呈现倾覆形式。5 a 一遇波浪作用下土体最大位移 246.40 mm，而圆筒最大位移为 243.80 mm，埋入土体部分最大位移为 123.80 mm，土体位移和圆筒位移变位较为一致，埋入土体部分位移较小的原因是安放筒外护面块体和块石垫层安放与筒内土体回填同步施工起到较大的反压作用，筒体结构相对稳定；100 a 一遇波浪作用下土体最大位移 547.00 mm，而圆筒最大位移为 424.4 mm，埋入土体部分最大位移为 172.10 mm，主要是挡浪墙在极端波浪荷载作用下位移较大，圆筒整体稳定性较好。根据规范的第 5.3.7 条，结构计算变位应小于 1.5% H (H 为泥面以上高度)，结构变位满足规范要求。通过施工期计算可知，圆筒在回填到筒顶高度后可抵抗 5~10 a 一遇的风浪，施工期间需保证筒内外同时回填，无需在大浪季来临前保证挡浪墙封顶施工。

3.2 结构因素影响

除了分析施工期和运营期对结构的影响外，还考虑了影响结构稳定性的 3 种因素，即圆筒入土深度、圆筒壁厚以及回填料强度。工况 1 为单圆筒入土深度 L 与直径 D 的比值在 0.25~3.50 的情况下，计算单圆筒失稳的安全系数；工况 2 为

考虑圆筒壁厚 t 在 200~500 mm 变化下, 计算单圆筒的位移及安全系数; 工况 3 为圆筒内部回填散料体内摩擦角 φ 在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 变化下, 计算单圆筒的位移及安全系数。

各工况结果分析主要考虑水平向位移 U_x 和强度折减法的强度折减系数 M_{sf} , 其原理是在进行有限元弹塑性计算时, 首先对于某一假定的强度折减系数 F_s , 将土的强度参数 c 、 $\tan\varphi$ 同时进行折减, 通过逐级加载的弹塑性有限元数值计算确定地基土内的应力场、应变场或位移场, 并且对应力、应变或位移的某些分布特征以及有限元计算过程中的某些数学特征进行分析, 根据一定的失稳判据确定地基土达到极限平衡状态, 则与此相对应的强度折减系数就是总体安全系数 M_{sf} 。

位移及稳定性对比结果见表 4。可以看出, 工况 1 单圆筒的稳定性随着入土深度的增大而增加; 单圆筒的位移随着入土深度的增加而减小, 但是当单圆筒入土达到一定深度后, 其位移基本保持不变。工况 2 圆筒壁厚的改变对稳定性影响不大, 当薄壁圆筒壁厚满足自身稳定以及振动下沉时的强度要求后, 当壁厚逐步增大时, 单圆筒的稳定性并无明显变化。工况 3 单圆筒的稳定性与回填料内摩擦角有关, 内摩擦角越大相应的安全系数加大, 水平向位移待回填料强度满足抗剪切变形后, 其减小的幅度随着回填料抗剪强度的增加趋于稳定。

表 4 位移及稳定性对比

工况	L/D	壁厚 t/mm	内摩擦角/ $(^\circ)$	水平向位移 U_x/mm	安全系数 F_s
1	0.25	-	-	824.4	1.493
	0.50	-	-	364.2	2.077
	1.00	-	-	346.9	2.729
	1.50	-	-	227.2	3.308
	2.00	-	-	227.2	4.660
2	-	200	-	446.4	1.890
	-	300	-	453.6	1.924
	-	400	-	453.6	1.924
	-	500	-	453.6	1.924
3	-	-	10	619.2	1.343
	-	-	20	521.6	1.640
	-	-	30	480.4	1.781
	-	-	40	453.6	1.924
	-	-	50	444.4	2.119

4 结论

1) 采用深埋式钢筋混凝土大圆筒结构作为外海防护结构, 满足施工期和使用期结构稳定性的要求, 其结构形式简单、受力合理, 在适应复杂的地质条件和水深浪大的外海恶劣环境的同时施工速度较快, 其结构设计方法日益成熟, 推荐采用三维软件建立圆筒-地基-筒内外填料整体结构模型。

2) 在筒内回填料其他力学指标相同情况下, 单圆筒的稳定性与回填料内摩擦角的大小正相关, 但水平向位移值待回填料抗剪强度满足一定要求后趋于稳定, 在实际工程中无需对筒内土体材料要求过高, 回填料填筑完成后须采取一定的地基处理措施以提高回填料抗剪强度, 保证圆筒结构的稳定。

3) 当其他条件相同时, 圆筒壁厚的改变对稳定性影响不大, 当圆筒壁厚满足自身稳定以及振动下沉时的强度要求后, 当壁厚逐步增大时, 单圆筒的稳定性并无明显变化。

4) 当其他条件相同时, 单圆筒的稳定性随着入土深度的增大而增加; 单圆筒的位移随着入土深度的增加而减小, 但是当单圆筒入土到一定深度后, 其位移基本保持不变。

5) 上述结论对工程建设在方案研究设计阶段考虑应用插入式钢筋混凝土薄壁圆筒结构时起到了有效的指导作用, 验证了深插式圆筒结构在横向水平荷载作用下的受力模式具有桩基结构兼重力式结构的特征。

参考文献:

- [1] 王元战, 王文良. 大圆筒结构计算及工程应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [2] 王玉红, 李颖. 软粘土中插入式大圆筒稳定性计算方法研究[J]. 港工技术, 2015, 52(4): 30-34, 67.
- [3] 肖忠, 王元战. 主、副隔舱式大圆筒人工岛围堰的稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(3): 63-69.
- [4] 唐云, 李洋, 樊亮亮. 香港机场第三跑道填海工程插入式钢圆筒结构设计[J]. 水运工程, 2020(9): 180-185.
- [5] 日本插入式钢圆筒协会. 插入式大圆筒施工工法[M]. 东京: 日本插入式钢圆筒协会, 2009.