

· 港 口 ·



深埋式薄壁圆筒结构 在滩海地基中的受力特性数值模拟

龙丽吉^{1,2}, 康海贵¹, 高鑫林³

- (1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
2. 重庆交通大学西南水运科学研究所, 国家内河航道整治工程技术中心, 重庆 400016;
3. 中交二航局第二工程有限公司, 重庆 400000)

摘要: 建立三维有限元模型, 分析深埋式薄壁圆筒结构在施工工况和使用工况下的结构变形位移、内力分布、基底应力分布、结构-土体间土压力分布, 并对比分析了有限元计算结果及规范法计算结果。结果表明, 有限元法计算出来的土压力中下段分布呈现“凸肚子”形状, 与结构实际受力状态更加接近, 有限元计算边界点沉降小于中心点沉降, 与分层总和法的计算结果基本一致。

关键词: 深埋式薄壁圆筒; 滩海地基; 三维数值分析; 对比分析; 受力特征

中图分类号: TU 33⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)12-0041-06

Numerical simulation of mechanical properties of embedded large-diameter cylinder structure in foreshore foundation

LONG Li-ji^{1,2}, KANG Hai-gui¹, GAO Xin-lin³

- (1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Southwestern Hydro Engineering Research Institute for Waterway,
- National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400016, China;
3. China Communications 2nd Navigational Bureau 2nd Engineering Co., Ltd, Chongqing 400000, China)

Abstract: A three-dimensional finite element is built to analyze the structure deformation performances, the internal force distribution, base stress distribution and earth pressure distribution between structure and soil. The finite calculation result and criterion calculation result are compared and analyzed. Results show that the finite calculation result of the earth pressure appears in the “convex curve”, which is closer to the actual conditions, and the boundary settlement is less than the center settlement which is the same as that by the layer-wise summation method.

Keywords: embedded large-diameter cylinder structure; foreshore foundation; 3D numerical simulation; comparative analysis; mechanical property

随着滩海石油开发逐渐向深海推进, 对于离岸较远的区域, 常常采用修筑人工岛 + 近海道路的模式来进行海上油气开发。然而滩海地区地质情况复杂, 多为软土地基, 传统的重力式结构对地基要求较高, 很难适用于滩海油气开发, 因此大直径薄壁圆筒结构应运而生。大圆筒是一种可

用于软土地基条件的新型近海工程结构, 已在多项大型建设项目中采用。大直径薄壁圆筒结构通常直径在 6 ~ 7 m, 包括基床式、沉入式。沉入式大直径圆筒结构, 主要靠自身重力及筒体与内、外土体的共同作用来抵抗外力。相比传统的重力式结构, 其具有以下几点优势: ①适用于淤泥质

海岸,可应用于除厚层淤泥和流塑性黏土外的任何地基上;②具有较好的受力条件。大直径圆筒结构的内部作用有填料贮仓压力,外部作用有土压力、波浪力等。对于圆柱壳结构来说,其内力特别是弯曲应力(环向或纵向)均较小,结构内部无需设置内隔墙,用钢量小,比扶壁式省 20%~30%。另外,这类结构直径大、稳定性好,对于抗震性能具有明显的优越性^[1-4]。

本研究以胜利陆岸油田为依托,通过有限元方法,综合考虑结构+地基的整体模型,分别研究了对深埋式薄壁圆筒结构在施工工况与建设完成正常使用工况下的结构受力特性。

1 工程概况

拟建人工岛地貌主要为海、陆相交替沉积的滨海水下三角洲,地势整体缓慢向海中倾斜。人工岛泥面下至 9 m 左右地层组成以淤泥质软土为主(1、3、5、7 层),间夹薄层粉土(2、4、6 层)。淤泥质软土压缩性强、强度低、排水性能差,属欠固结土,易引起岛体过大沉降,影响整体稳定性。采用重力式结构要进行大面积的地基处理,工程造价高,施工质量难以保证,由于墙后回填加载会导致墙两侧产生不均匀沉降,发生倾覆失稳。因此深埋式大直径薄壁结构进入视野。然而,对深埋式大直径薄壁圆筒结构的研究还较少,并不完整,因此需要对其在海洋环境条件下、软基地质条件下的受力特性进行研究。

2 深埋式薄壁圆筒结构研究现状

现今对滩海深埋式薄壁圆筒结构的海洋流体-结构-地基土体的三相耦合分析还很少,同时对于其动环境荷载作用下的动力响应研究很少,如波浪力、地震力及船舶撞击力等荷载对结构的作用效应。尤其是结构与地基土体之间的相互作用,以及结构和地基的承载能力和破坏形态至今无可靠理论。因此,极大地限制了深埋式薄壁沉井的推广应用。

周锡初等^[4-6]对大直径圆筒进行了多年研究,

以有限元(FEM)与边界元(BEM)的耦合数值求解模型。数值模型采用固定边界,对于地基较软的滩海应用有局限性,同时对于深埋式薄壁圆筒在横向荷载作用下的承载机理或力学模式很少探究。潘厚志等^[7-8]基于弹性地基法,采用三维弹簧单元模拟周围地基土对圆筒结构的相互作用。但弹簧单元局限于线性,因此很难有效地模拟深埋式薄壁圆筒结构的破坏机制。

本文以胜利油田为依托工程,采用薄壁圆筒+地基+后方回填的整体建模,考虑土体弹塑性的影响,分析了薄壁圆筒在施工工况、使用工况下结构的位移变形、筒内外土压力分布、地基应力的分布、结构应力分布规律,再与传统的规范中计算方法对比分析验证。

3 计算方法及工况

3.1 计算方法

深埋式大直径薄壁圆筒结构是一个空间圆柱型薄壳结构,并且与地基土共同作用,受到的荷载分布复杂多样。因此,无论是薄壳圆筒结构的强度计算,还是结构系统的整体变形以及地基土体应力状态,都难以用一般的常规方法来计算,因此本文采用三维有限元数值模拟方法。该方法已经成功应用在国内外码头建设及设计中:如天津港北堤加高段防波堤、广西防城港 3 万吨级深水码头、山东省岚山港防波堤等^[1]。数值模型考虑了土体材料的弹塑性、采用接触模拟结构-土体之间的相互作用力。

3.2 主要计算荷载

在薄壁圆筒结构的波浪力^[1]计算中,卡斯契克等提出了以波陡(H_0/L)为参数的薄壳圆筒结构波浪力计算的公式。当波峰行近时,薄壳圆筒迎波面上的波浪压力强度 $p_z(\theta)$ 计算公式为:

$$p_z(\theta) = p_z K_1 (1 + 0.42\theta^2 K_2) \quad (1)$$

式中: p_z 为直立平面墙上,在静水面以下深度 $Z(\text{m})$ 处的波浪压力强度(kPa); θ 为自薄壳圆筒中垂面起算的计算点角度(弧度); K_1 、 K_2 为与波陡(H_0/L)相关的波浪压力强度重分布系数(表 1)。

表 1 系数 K_1 、 K_2 取值

波陡 H_0/L	K_1	K_2
0.100	0.770	0.560
0.007	0.805	0.380
0.050	0.835	0.300
0.040	0.870	0.250
0.033	0.910	0.200

对于直径为 D 的薄壳圆筒结构, 在静水面以下深度 Z 处单位高度上的总波浪力为:

$$P_z = K_1(1 + 0.2K_2)p_zD \tag{2}$$

据计算, 在波陡为 0.033 ~ 0.1 时, 作用于薄壳圆筒结构上的波浪力将减少 5% ~ 15%。沿薄壳圆筒表面波浪力 P_z 和波浪压力强度 $P_z(\theta)$ 的分布见图 1。

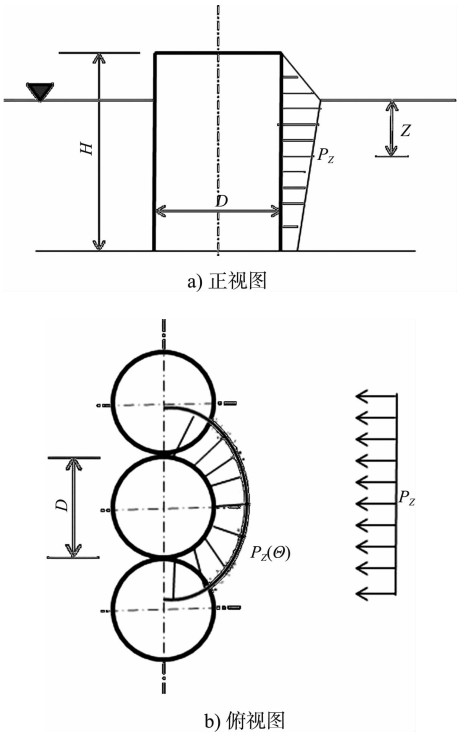


图 1 薄壳圆筒表面波压力强度 $P_z(\theta)$ 分布

3.3 计算工况

对于深埋式薄壁圆筒结构, 其结构安全包括了两个阶段的安全性需求: 一是施工阶段, 薄壁圆筒结构刚安装到位, 但后方的回填料还没有及时回填, 要验算孤立薄壁圆筒在波浪作用下的结构稳定性, 以保证结构在施工阶段的安全可靠; 二是薄壁圆筒后方人工岛填筑体回填完毕后, 正常工作状况下, 结构在波浪力、船舶靠泊力、系

缆力以及上部荷载作用下结构的安全可靠性。因此对于薄壁圆筒结构要考虑施工阶段结构的受力和使用阶段的受力。

本文的计算工况: 1) 工况 1: 波浪力作用下, 圆筒后未回填时的结构受力及变形; 2) 工况 2: 波浪力作用下, 圆筒后回填淤泥土 (直接吹填) 后的结构受力及整体变形。

4 计算模型

4.1 材料

埋入式薄壁圆筒上部高度为 7.5 m, 埋入地基深度为 12 m、直径为 6 m、壁厚为 0.6 m。模型中的土体分层: 第 1 层土为粉土, 层厚大约为 9 m, 土体参数采用加权平均法求得, 得到土体承载能力为 $f_{ak} = 0.09$ MPa; 第 2 层土层厚 4 m, 土体承载能力为 $f_{ak} = 0.15$ MPa; 第 3 层土层厚 10 m, 土体承载能力为 $f_{ak} = 0.20$ MPa。结构采用 C30 钢筋混凝土, 抗拉强度设计值为 1.43×10^6 N/m², 抗压强度设计值为 14.3×10^6 N/m²。

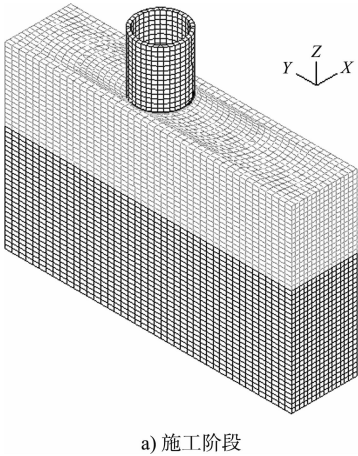
土体材料模型采用 Drucker-Prager 准则, 材料参数见表 2。

表 2 土体材料参数

土层	弹模/ MPa	密度/ (t·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	粘聚力/ kPa
1	5.5	1.96	23	8
2	7.0	1.97	24	8
3	4.0	2.03	13	13

4.2 结构模型

结构有限元模型见图 2。



a) 施工阶段

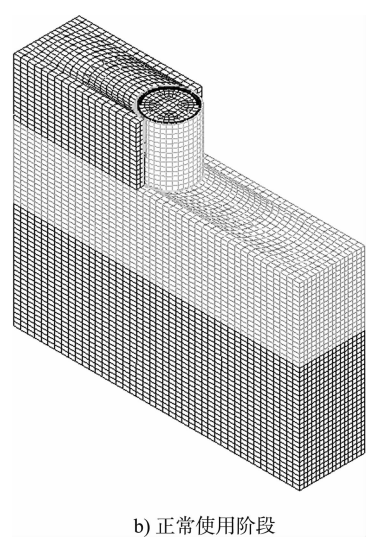


图 2 结构模型

地基土体、人工岛填筑材料及圆筒内的砂石回填料采用 Drucker-Prager 模型，钢筋混凝土圆筒采用线弹性模型。圆筒外壁与地基和回填土之间建立接触关系，圆筒内部与砂石填料同样建立接触关系。

4.3 初始地应力平衡

初始地应力是必须予以重视的问题。海洋地基在重力及水压力作用下，结构内部存在初始应力。地基土体在进行分析之前就存在了应力，即初始地应力。平衡初始地应力是为了真实模拟土体初始应力状态，模型在重力作用下只有自重应力场而没有位移。因此本文必须考虑地应力平衡，首先对地基施加重力，计算其初始地应力，在获得初始地应力的分布后，再在有限元模型中施加地应力值。

5 计算结果

5.1 薄壁圆筒位移变形

图 3、4 给出了薄壁圆筒结构分别在施工工况和正常使用工况下，薄壁圆筒及人工岛的整体变形情况。可见，在施工阶段，薄壁圆筒在受到波浪力作用后产生沿波浪方向的倾斜，此时筒顶的水平位移为 9.3 mm，垂直位移为 3.2 mm。说明在施工阶段的荷载作用下薄壁圆筒的相对位移很小，不会产生结构失稳。在使用阶段，薄壁圆筒结构的荷载主要是波浪力与船舶撞击力的组合，从图中可知薄壁圆筒结构在填土压力、波浪

力和撞击力组合的作用下向回填一侧倾斜，筒顶的最大水平位移为 6.4 mm，筒底最大水平位移为 -7.2 mm，筒体的最大垂直位移为 17 mm。根据极限变位控制法，同时参照 1986 年出版的《有关大直径薄壁壳码头建筑物计算与设计的方法建议》，水平位移、垂直位移控制值分别为 10、20 cm，转角位移控制为 0.3°，可见结构的整体稳定性满足要求。

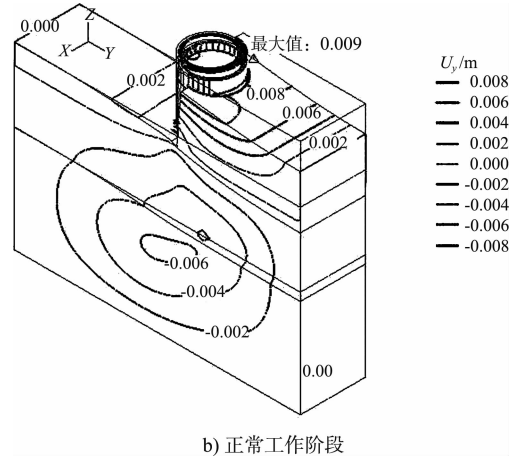
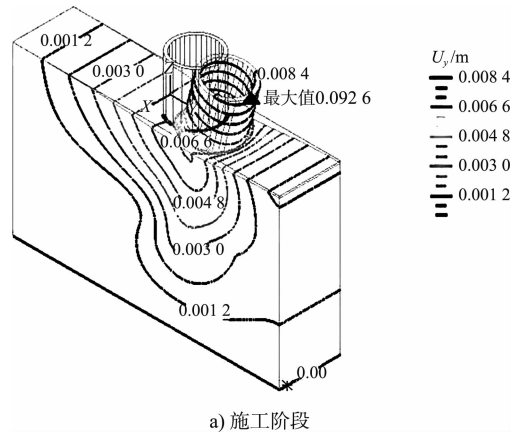
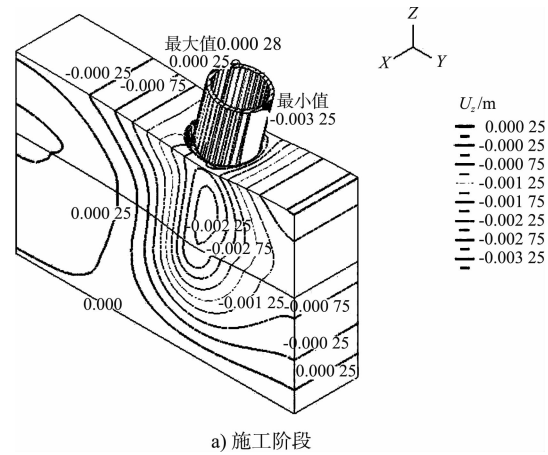


图 3 波浪力作用下水平位移等值线



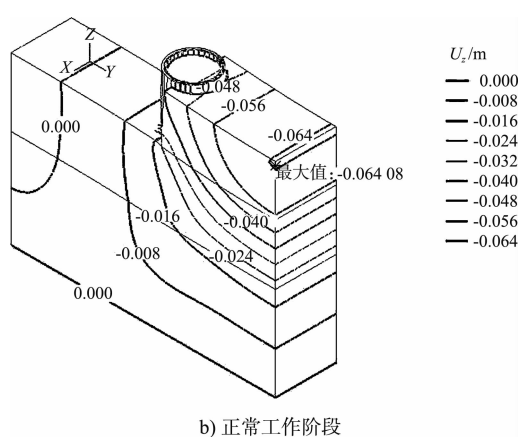


图 4 波浪力作用下垂直位移等值线

同时可以看到后方回填人工岛边界产生 64 mm 的沉降。筒体前后沉降值差异较大,是由于人工岛后方回填后,在填土垂直压力作用下,引起圆筒后软土地基的土体下沉,而圆筒前地基土没有沉降,进而在软基上产生差异沉降,导致后方土体由于差异沉降对筒体产生前推力,使薄壁筒体向后倾倒,当结构埋深不足以对变形土体产生足够的抵抗力时,结构就容易产生整体失稳。为此,应当把薄壁圆筒尽量埋置在土体中的持力层中,同时要满足埋深的要求,以增强薄壁圆筒自身的抗失稳能力。

5.2 薄壁圆筒与土体间的接触力

图 5 给出了表征圆筒、地基、回填土相互作用的接触力分布。从图 5 可以看到,在施工阶段,基底应力分布比较均匀,最大基底应力为 56 kPa;在使用阶段,在筒后土体与上部荷载共同作用下,筒底产生不均匀的地基应力,地基应力最大值分布在后侧为 118 kPa,最小值分布在两侧,为 83 kPa,均小于土体承载力 $f_{ak} = 0.15 \text{ MPa}$,并且地基应力分布较为均匀,满足地基承载力要求。

5.3 薄壁圆筒内力分布

图 6 给出了薄壁圆筒的结构应力云图。从图 6 可知,在施工阶段,薄壁圆筒仅考虑波浪作用,筒体产生的最大拉应力为 0.59 MPa,最大压应力为 0.86 MPa,满足材料抗拉、抗压承载力要求。在使用阶段,船舶停靠点附近的拉应力最大为 3.16 MPa,已经超过了混凝土的允许抗拉强度 1.27 MPa,因此船舶停靠处的局部应当加强设计。

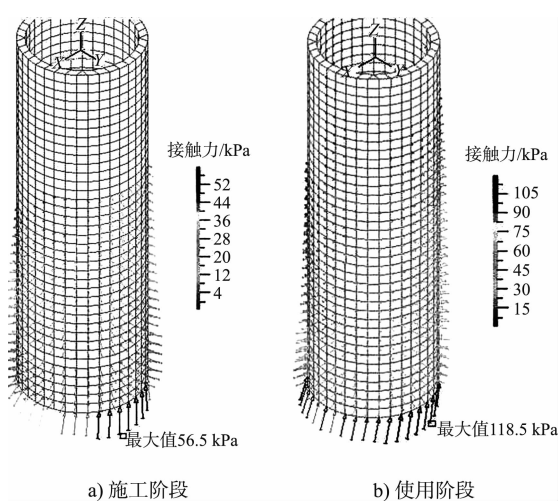


图 5 筒与土相互作用力

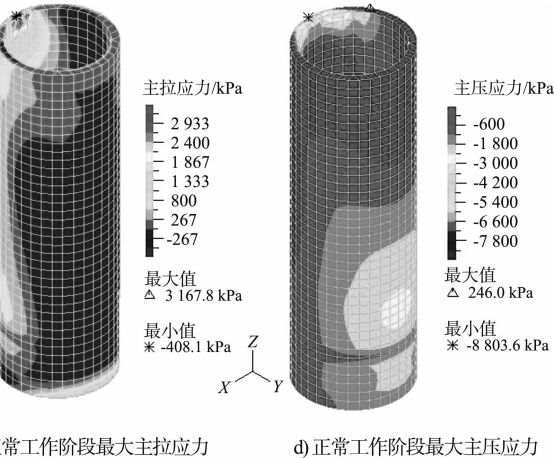
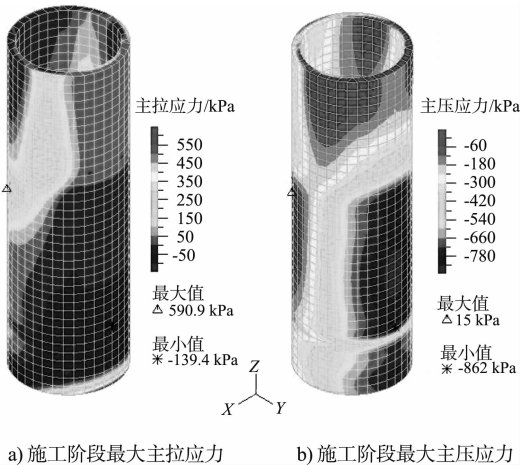


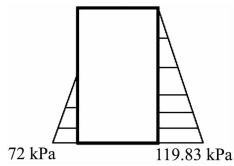
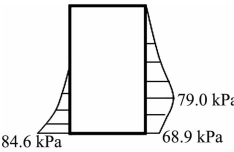
图 6 埋式薄壁圆筒结构应力云图

除去船舶停靠点外,筒体迎浪面的最大拉应力为 0.98 MPa、最大压应力为 8.8 MPa,满足混凝土的抗拉、抗压强度要求。因此对薄壁圆筒整体结构靠船构件部位需要加强结构,按受力配筋。

5.4 计算结果对比分析

本节主要对比分析了有限元法和库伦土压力法计算出来的墙后土压力值和分布规律，以及有限元法和分层总和法计算出来的人工岛沉降变形，来验证有限元计算结果的准确性。计算结果对比见表 3。

表 3 计算结果对比分析

对比项目	计算方法	结果
土压力值	库伦土压力法	
	有限元法	
基底应力	有限元法/kPa	118.12
回填区角点沉降	分层总和法/mm	636
	有限元法/mm	560
回填区中点沉降	分层总和法/mm	1 202
	有限元法/mm	1 100

从两种方法的土压力计算可以看到，传统库伦土压力法假定土压力呈线性分布，最大值为 119.80 kPa，有限元法计算出来的土压力中下段分布呈现“凸肚子”形状，最大值为 79.0 kPa。产生这种图形的原因很可能是圆筒后方回填料后，由于地基土的流塑性质，向薄壁圆筒方向挤压下段土，导致中间段出现“凸”型曲线。由此可见，采用三维有限元方法，可以考虑人工岛填筑形成后的地基变形对结构受力的影响、软弱土体流变性质对结构受力的影响，与传统方法相比更加准确地模拟结构和软土地基的相互作用。

从地基应力计算可以看到，有限元法可以非常清楚地模拟出结构基底应力的空间分布，从而为判断地基承载力提供更加准确的数据。

从沉降对比分析可以看到，分层总和法和有限元法的计算结果接近，可见有限元法计算精度满足工程要求。

6 结论

1) 给出了三维弹塑性薄壁圆筒建模要点、材

料的选取、接触关系的设定及初始地应力平衡、环境荷载的计算和施加等。

2) 通过建立三维有限元模型分析了某深埋式薄壁圆筒结构在施工工况和正常使用工况下的位移变形、结构内力及结构-土体之间的相互作用力。计算结果表明深埋式薄壁圆筒结构在滩海软土地基上有很好的应用前景。

3) 对比分析了土压力规范法计算结果与有限元的计算结果。通过对比分析可以看到，在土压力计算方面，传统库伦土压力法假定土压力呈线性分布，有限元法计算出来的土压力中下段分布呈现“凸肚子”，出现这种情况是因为三维有限元法能够考虑复杂的结构情况和地基情况，能够考虑土体流变特性对结构受力的影响。

4) 对比分析了地基沉降规范法计算结果与有限元计算结果。通过分析可得，两种方法的计算结果基本一致，同时有限元法能够更加精细地模拟出整个结构沉降空间分析。

参考文献：

[1] 交通部第三航务工程勘察设计院. 码头新型结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

[2] 王元战, 王海龙, 付瑞清. 沉入式大直径圆筒码头稳定性计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002: 24(4): 417-420.

[3] 王刚, 陈杨, 张建民. 大圆筒结构倾覆稳定性分析的有限元法[J]. 岩土力学, 2006: 27(2): 238-241.

[4] 王乐芹. 插入式大直径薄壁圆筒结构承载机理研究与优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2005.

[5] 周锡初, 钱荣, 孙克俐. 波浪荷载作用下深插式大直径圆柱壳结构的解析方法及实验[J]. 天津大学学报, 2005: 37(4): 283-287.

[6] 张伟, 周锡初, 刘海笑. 滩海桶形基础平台三维有限元静力分析[J]. 中国海洋平台, 2001(1): 9-14.

[7] 潘厚志, 孙克利, 周锡初, 等. 大直径圆柱壳结构与土体相互作用的一种耦合数值模拟方法[J]. 中国港湾建设, 2000(1): 26-30.

[8] 周锡初, 潘厚志. 基床系数法在深埋式大圆柱壳结构数值模拟中的应用与改进[J]. 水利学报, 2001(6): 62-66.

(本文编辑 武亚庆)