



土体固结对筒型基础结构工作性能的影响

沈东¹, 姚文娟¹, 程泽坤², 刘逸敏¹, 洪一红¹

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 为了分析土体固结对筒型基础结构工作性状的影响, 使用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立筒型基础结构与土相互作用的三维弹性模型, 模拟在波浪荷载和结构自重作用下土体的固结过程。得到筒壁的土压力、筒底的竖向位移和基底水平切力在固结作用下的变化趋势, 重点分析固结对筒型基础结构稳定性的影响。结果表明, 固结使作用在结构上的力和结构产生的位移发生变化, 土体发生不均匀沉降, 抗倾覆稳定性降低为 0.625 倍, 抗滑动稳定性增大为 1.25 倍。

关键词: ABAQUS; 筒式基础结构; 固结; 稳定性

中图分类号: U 656.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0149-07

Influence of soil consolidation upon working performance of cylindrical bucket foundation structure

SHEN Dong¹, YAO Wen-juan¹, CHENG Ze-kun², LIU Yi-min¹, HONG Yi-hong¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To analyze the influence on the working performance of the cylindrical bucket foundation structure by the soil consolidation, we establish three-dimensional elastic-plastic structure-soil interaction finite element model by ABAQUS to simulate the soil consolidation process under the wave force and the structure deadweight, and obtain the variation trend under consolidation of the soil pressure on the cylinder wall, the vertical displacement on the bottom and the variation tendency of base shear stress. Analyzing the influence of consolidation for the stability of the cylindrical bucket foundation structure, we achieve results which show that the pressure on the structure and the displacement of the structure were changed under the soil consolidation, differential settlement of soil was occurred. The coefficient of overturn stability reduced to 0.625 times and the safety factor against sliding increased to 1.25 times.

Keywords: ABAQUS; cylindrical bucket foundation structure; consolidation; stability

随着人类活动范围的扩大, 码头、防波堤等水工结构的应用逐渐向深海地区迈进。深海地区波高浪大, 土质多为软土, 传统的重力式结构将不再适用。大圆筒结构由于其施工方便、无需抛石基床、可避免开挖地基、能够较好地适应深海地区恶劣环境等优点^[1], 在近些年得到了充分的发展与应用。筒型基础结构是在大直径圆筒薄壳^[2]基础上发展起来的适用于软土地基的一种新

型结构, 其下部是沉入式筒形基础, 上部是空心圆筒, 能够较好地发挥沉入式大圆筒结构利用土的嵌固作用维持其稳定性以及上部圆筒的消浪作用。

目前, 国内外已有许多学者对筒型基础结构进行了研究。采取的方法主要是模型试验^[3], 解析推导^[4]以及数值模拟^[5-7]。茅加峰等^[8]通过拟静力法分析了在水平力作用下, 箱筒型基础的沉降、

收稿日期: 2014-03-21

作者简介: 沈东 (1989—), 男, 硕士研究生, 从事筒型基础结构研究。

水平位移、倾斜和地基土体中孔隙水压力的反应；文靖斐等^[9]研究了单层及多层土对箱筒型基础极限承载力的影响，并探讨了结构形式、结构尺寸以及土体参数对极限承载力的影响；王元战等^[10]在有限元分析的基础上，建立了筒型基础防波堤基于重力式结构稳定性验算模式的稳定性简化分析方法。由于筒型基础结构安装过程中对土体的扰动，结构的自重以及作用在上部圆筒上波浪力的作用，土体缓慢地发生固结。国内外针对固结对此种结构的影响研究甚少，本文借助大型通用有限元软件 ABAQUS，建立考虑土体固结的筒型基础结构模型，分析土体固结对筒型基础结构工作性能的影响。

1 工程概况

本文的研究基于某实际工程的水文地质材料。由于该工程首层地基土为高含水量、高压缩性、高灵敏度的淤泥质土层，传统的混合堤已不能满足工程需要，因此在该工程中拟采用筒型基础结构。

1.1 结构形式

结构设计采用单个带顶板的基础筒体和两个圆形截面的上部挡浪结构组合而成，结构断面见图 1。基础筒体呈类椭圆形，筒体的长轴 30 m，短轴 20 m，高度 9.0 m，外墙壁厚 40 cm，筒内通过隔板划分 9 个隔舱，隔板的壁厚 30 cm，顶板厚 40 cm。两个上部圆形筒壁厚 35 cm，筒高 15.28 m。相邻两组筒型基础结构间的安装间距为 1.0 m。

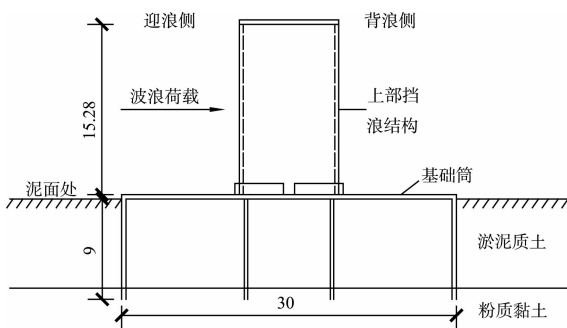


图 1 筒型基础结构断面

1.2 水文条件

筒型基础结构位置水深在 -5 m 左右，设计水

位为：设计高水位 5.41 m（高潮累计频率 10%），设计低水位 0.47 m（低潮累计频率 90%），极端高水位 6.56 m（50 a 一遇高水位），极端低水位 -0.68 m（50 a 一遇低潮位）。波浪要素见表 1。

表 1 波高和周期

设计水位	N		NE	
	$H_{1\%}/m$	T/s	$H_{1\%}/m$	T/s
设计高水位(5.41 m)	6.20	8.87	6.34	8.76
设计低水位(0.47 m)	3.57	8.87	3.57	8.76

1.3 地质条件

各土层土性指标见表 2。其中内摩擦角及粘聚力由固结快剪试验得到，压缩模量由无侧限压缩试验得到。

表 2 主要土性参数

土层	层厚/m	天然密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 C_u/kPa	压缩模量 E_s/MPa
淤泥质土	8.0	1.58	2.6	7	1.67
粉质黏土	4.3	1.93	11.3	39	5.08
黏土	3.5	1.79	6.2	18	2.50
粉土	11.2	1.98	17.7	32	7.90

2 有限元计算模型

2.1 几何模型及边界条件

有限元模型见图 2，取单组筒型基础结构用于有限元分析，为了减小边界条件的影响，计算域的宽度取基础筒短轴的 1.1 倍；沿荷载作用方向，计算域的长度取基础筒长轴的 7 倍；沿竖直方向，计算域的深度取基础筒埋深的 5 倍。计算域的边界条件为：地基左右边界施加平面对称的位移约束，前后两端边界约束水平和竖向的位移，底部为固定边界，地基表面设置为排水边界，孔压大小设置为 0。

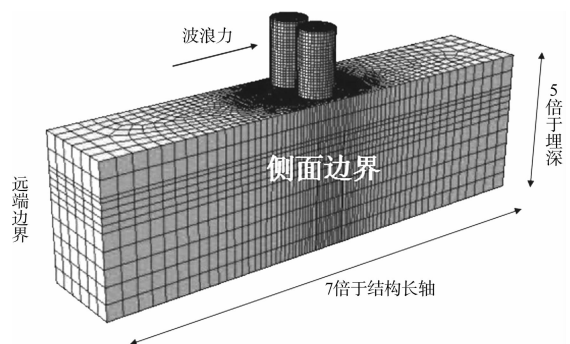


图 2 筒型基础结构有限元模型

筒型基础结构采用线弹性模型, 取钢筋混凝土材料参数。土体本构模型采用 ABAQUS 中的扩展 Drucker-Prager 模型。在建立的三维弹塑性分析模型中, 结构采用 8 节点减缩积分单元, 土体采用的单元需具备孔压自由度, 其单元类型标识符通常以字母 P 结尾表示孔压单元。

在结构与土体接触的地方设置接触对, 考虑到结构的弹性模量大于土体的弹性模量, 指定结构上的接触面为主接触面, 土体的接触面为从接触面。接触面的法向采用硬接触, 切向采用库伦摩擦模型。此外, 根据美国 API 规范^[11]规定, 软黏土与筒壁之间的切向摩阻力不大于黏土不排水剪切强度 C_u 。

2.2 初始地应力场模拟

按照经典土压力理论计算竖向和侧向应力, 将此应力场和重力荷载一起施加于模型中, 使土体处于一种有应力无位移的状态。经典土压力理论为:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n r_i h \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = K_0 \sigma_z \quad (2)$$

ABAQUS 中是通过 geostatic 分析步来建立受载前的初始平衡状态。

不同于非固结模型, 固结模型的初始应力值为有效应力, 这时, 需要分别平衡孔隙水压力和有效应力。考虑孔隙水压力时, 初始有效应力为:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_{zz} = \rho_d g (z - z^0) - \rho_w g S_r (1 - n_0) (z - z_w^0) & z \leq z_w^0 \\ \bar{\sigma}_{zz} = \rho_d g (z - z^0) & z_w^0 < z < z^0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: z_w^0 为渗透面的高度; z^0 为孔介质表面。

本文中模型的重力荷载采用 GRAV 分布荷载类型进行定义, ABAQUS 基于总孔压进行分析, 因此需要定义初始总孔压的分布, 初始总孔压可通过关键字 * Initial conditions, type = pore pressure 来定义。

3 ABAQUS 中的固结分析步

ABAQUS 提供了流体渗流分析类型, 使用流体渗透分析步中的瞬态分析可以求解孔压、沉降随时间的变化过程。本文中假设土粒和孔隙水是不可压缩的, 土的压缩完全由孔隙体积的减小引起; 在整个固结过程中, 土的渗透系数、压缩系数等均设为常数。

在模拟土体固结时, 若时间步长过小, 则会造成孔压的不正常波动, 造成模拟失真或收敛困难, ABAQUS 针对饱和渗流, 给出的初始稳定时间步长临界值为:

$$\Delta t > \frac{\rho_w g}{6Ek} (\Delta l)^2 \quad (4)$$

式中: k 是土的渗透系数; Δl 是典型的单元尺寸。

固结计算一般采用自动时间步长, 采用自动时间增量技术, 必须指定两个误差控制参数——增量步中允许的孔压变化最大值 UTOL 和允许最大的应变改变率 CETOL。为了减少计算时间, 设置孔压变化率小于指定值后终止。

4 结果分析

4.1 土压力沿基础筒高的分布

筒式基础防波堤的失稳形式为倾覆失稳^[6], 结构在倾覆过程中, 基础筒两侧的土压力有着不同的发展过程, 固结对两侧土压力所造成的影响相应地也不同, 为了研究固结对筒壁土压力的影响, 分别提取基础筒上不同节点处的土压力予以分析, 节点分布见图 3。

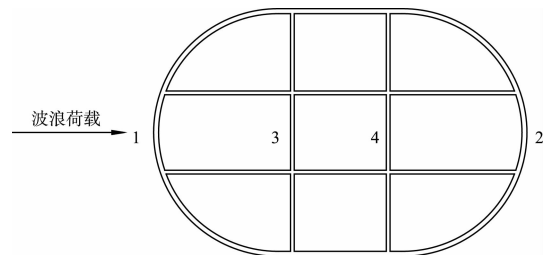


图 3 基础筒节点分布

节点 1、2 处固结前后土压力见图 4。

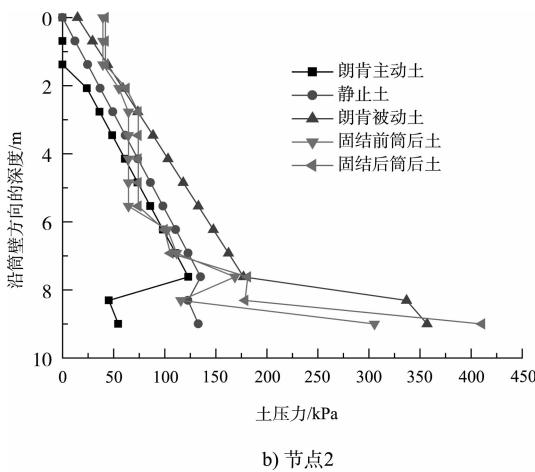
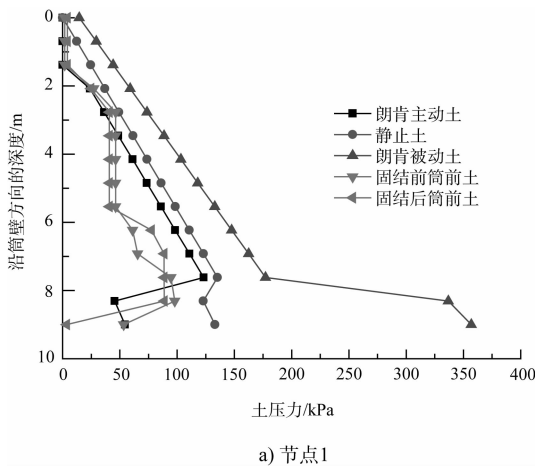


图4 节点1、2处土压力对比

图4a)为节点1处即迎浪侧土压力,其变化趋势趋近于主动土压力而数值上比主动土压力小,固结后节点1处土压力变化趋势和固结前趋势较为一致,从数值上看,固结后节点1处土压力要略小于固结前的土压力。图4b)为节点2处即背浪侧土压力,其变化趋势趋近于被动土压力,固结后节点2处土压力变化趋势与固结前类似,但是固结后土压力略大于固结前的土压力。筒式基础结构设计计算时,作用于筒式基础结构基础筒两侧的土压力可由朗肯主、被动土压力乘以一折减系数计算得到^[12]。土压力计算公式如下:

$$\sigma_{sa} = \eta_a (\rho g z K_a - 2c / \sqrt{K_a}) \quad (5)$$

$$\sigma_p = \eta_p (\rho g z K_p + 2c / \sqrt{K_p}) \quad (6)$$

式中: η_a 为主动土压力折减系数; η_p 为被动土压力折减系数。

固结的过程是土中孔隙水不断排出的过程,

孔隙水的排出导致土体的密度发生变化,而土压力系数的计算与土体的内摩擦角有关,结合固结后作用于结构上的主动土压力变小、被动土压力变大的结果,可以推断得知固结改变了土体的粘聚力和内摩擦角。设计过程中,为了考虑固结对于计算结果的影响,计算作用在筒壁上的土压力时,主动土压力折减系数应减小,被动土压力折减系数应增大。在本文算例情况下,建议在原有折减系数的数值上乘上固结修正系数,主动土压力修正系数为0.88,被动土压力为1.14。

节点3、4处固结前后土压力见图5。

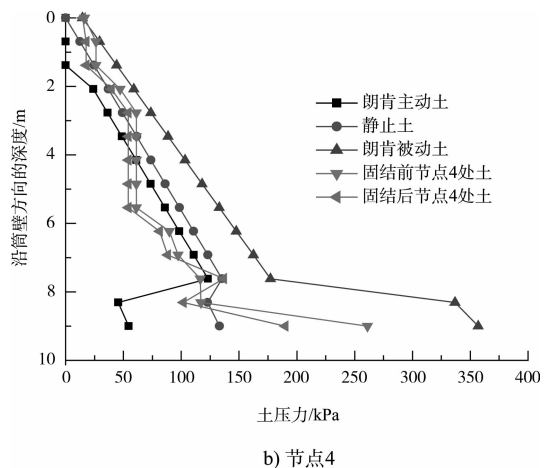
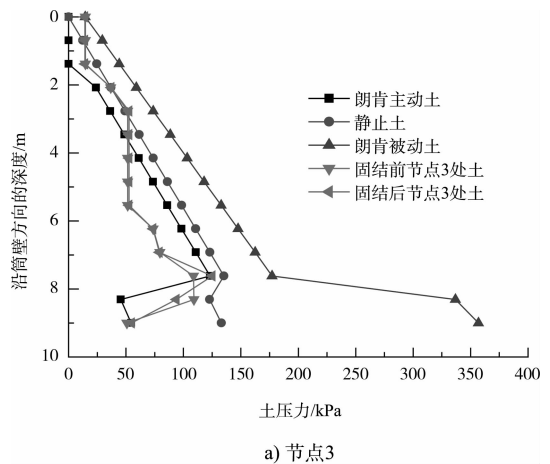


图5 节点3、4处土压力对比

图5a)中节点3处土压力沿筒壁深度的分布介于主动土压力和静止土压力之间,固结后土压力变化幅值较小。图5b)中,节点4处土压力沿筒壁深度的分布介于静止土压力与被动土压力之间,固结后土压力值变小,变化趋势与固结前一致。节点3和节点4位于基础筒内横肋上,从数

值上与迎浪侧的节点 1、背浪侧的节点 2 比较, 节点 3 处土压力大于节点 1 处, 节点 4 处土压力小于节点 2 处, 这是由于加设肋板导致仓内土体积较小, 仓内土压力没有充分发育, 仓内土压力接近静止土压力^[13]。同样位于基础筒内, 不同位置处肋板挤压土体的程度不同, 节点 3 处土压力比起节点 4 处土压力小, 接近于主动土压力, 而节点 3 处的筒仓面积大于节点 4 处的筒仓面积, 当筒仓面积增大时, 仓内筒壁土压力向主动或被动土压力转变。固结改变了仓内横肋上土压力的数值, 但是没有改变土压力的发展趋势。

4.2 筒式基础结构的位移分析

在筒底沿基础筒长轴方向取一路径, 有限元计算结果见图 6。

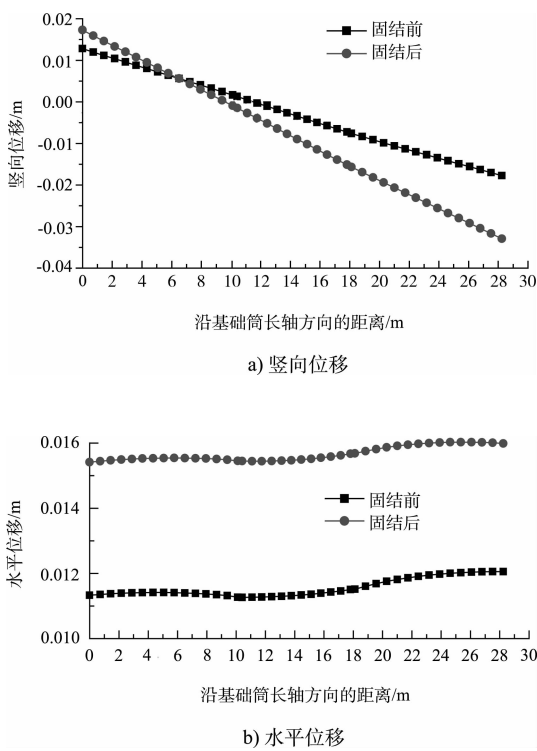


图 6 筒底沿基础筒长轴方向的位移

图 6a) 是基础筒竖向位移在固结前后的变化, 固结完成后, 迎浪侧竖向位移扩大至 1.35 倍, 背浪侧竖向位移扩大至 1.86 倍。背浪侧位移增加幅度明显大于迎浪侧。通过计算可知, 固结完成后, 筒式基础结构倾覆转角扩大至 1.64 倍。

图 6b) 是基础筒水平位移在固结前后的变化, 固结后水平位移变化趋势与固结前一致,

由于水平荷载的持续作用以及水平方向的渗流, 固结后水平位移增大 1.33 倍。以筒式基础结构变位超出容许值为判别结构的失稳标准^[5], 可见固结后结构的稳定性低于固结前结构的稳定性。

实际工程中筒式基础结构偏安全设计, 应该充分考虑到固结对结构的影响。以转角为控制值, 在本文算例情况下, 建议理论计算值乘以固结修正系数 1.6 后与允许值进行比较以验算结构是否失稳, 结构的稳定性降低至不考虑固结时结构稳定性的 0.625 倍。

4.3 基底反力及水平切力分析

筒式基础结构进行设计时应考虑结构的抗滑稳定性^[14]。基底反力及基底水平切力是减小结构竖向滑动和水平滑动的重要因素。

为分析固结前后结构所受基底反力和基底水平切力的变化, 沿基础筒长轴方向取一路径, 有限元计算结果见图 7。

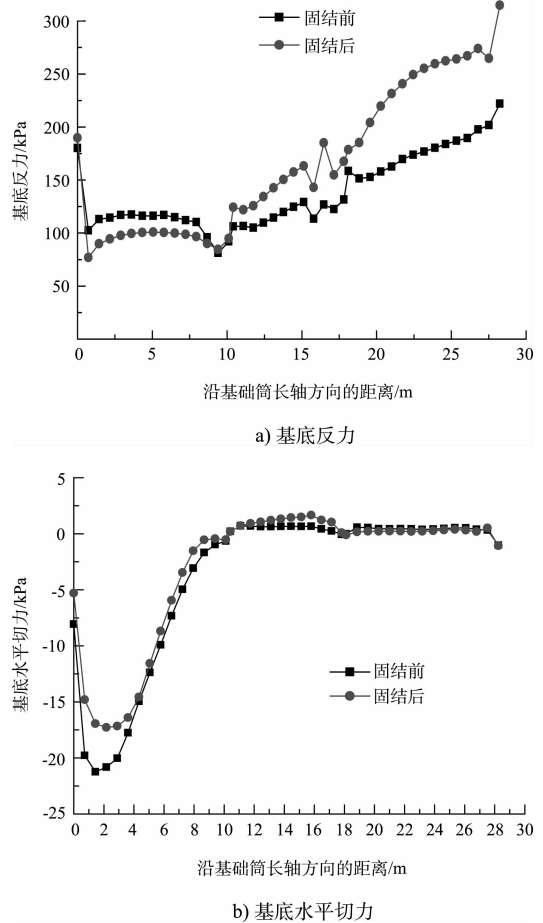


图 7 基底反力和水平切力沿基础筒长轴方向的变化

在迎浪侧,筒式基础向上转动,甚至有脱离土体的趋势,因此迎浪侧基底反力较小,且沿基础长轴方向变化幅度较小。在背浪侧,基础挤压土体,相互之间作用力逐渐增大。固结之后,迎浪侧基底反力较固结之前变小,背浪侧基底反力较固结之前变大。这是因为固结完成后,基础筒两侧的竖向位移发生变化,迎浪侧竖向位移向上发展且变化较小,背浪侧竖向位移向下发展且明显增大。这个变化使得迎浪侧与土体的相互作用变小,背浪侧与土体之间的相互挤压更为充分。

基底水平切力,固结前其极大值为 20 821 Pa,固结后极大值为 17 274 Pa,固结之后基底水平切力为固结前的 0.83 倍。水平切力是维持结构水平位移不会超过控制值的重要因素,固结之后水平切力变小,但是筒式基础结构抗滑安全系数还与作用在筒壁上的土压力相关,筒后被动土压力的增大加强了对水平滑动的控制,主动土压力的减小减弱了作用于水平方向的荷载,综合考虑基底水平切力及土压力的影响,固结后抗滑安全系数增大至 1.25 倍。

4.4 土体沉降分析

沿基础筒长轴方向在与其接触的土体上取一路径,分析其竖向位移的变化,结果见图 8。

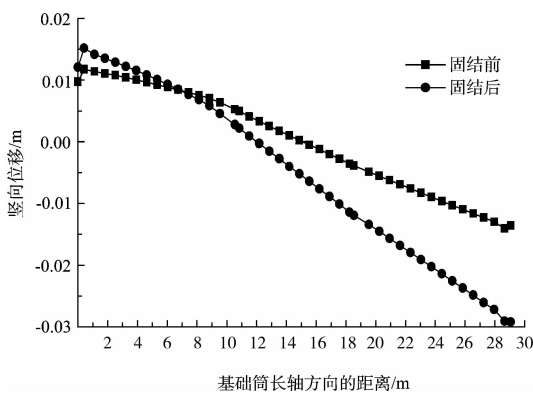


图 8 基础筒底部土体的竖向位移

从图 8 可以看出,与筒式基础底部接触的土体,固结前后都是迎浪侧土体略微隆起,背浪侧土体发生沉降。这是因为作用在筒式基础结构上

的波浪荷载在有限元模拟时简化成一水平力,而筒式基础结构的破坏模式为绕筒底某一点发生转动。迎浪侧筒壁向上转动,经过一段时间后甚至脱离筒底与之接触的土体;背浪侧筒壁向下转动,挤压土体。结合力的平衡可知,基础筒内土体受到指向迎浪侧的水平力,而筒壁阻挡了土体的水平移动,因此在转动点左侧,筒内土体有向上隆起的趋势,转动点右侧土体受到竖向荷载的挤压,向下沉降。在固结之后,这个现象更加明显,迎浪侧土体略微隆起,背浪侧的土体发生较大的沉降。由于结构所受荷载相对于结构并不是均匀对称分布,固结过程中结构的沉降发展不同。固结导致结构的不均匀沉降更加明显,使得结构的稳定性降低,迎浪侧土体向上运动 124%,背浪侧沉降 215%,不均匀沉降影响结构的倾覆稳定性,使结构转角扩大 1.77 倍。

5 结论

1) 结构设计过程中,基础筒壁所受土压力可以按照朗肯土压力理论乘以折减系数得到。迎浪侧趋近于主动土压力,背浪侧趋近于被动土压力。固结后,迎浪侧土压力变小,背浪侧土压力变大。固结改变了土体的性质,考虑固结进行土压力简化计算时,可将原折减系数乘以一个固结修正系数,主动土压力修正系数为 0.88,被动土压力修正系数为 1.14。

2) 固结过程中,结构的竖向位移、水平位移都略有增大。基于允许变位判别结构是否失稳,以转角为控制值,结构的抗倾覆稳定性降低至 0.625 倍。固结完成后基底水平切力比固结前降低至 0.83 倍,综合考虑土压力及基底水平切力的影响,抗倾覆稳定性增大至 1.25 倍。

3) 由于筒式基础结构的转动失稳这一破坏模式,以及荷载作用在结构的单侧,筒底土体所发生的沉降也是不均匀的。迎浪侧沉降变化较小,背浪侧土体沉降变大。不均匀沉降使结构转角扩大至 1.77 倍,土体固结使结构的稳定性降低。

参考文献:

- [1] 许哲, 张日向, 姜萌. 基于 ANSYS 下的大圆筒结构内填土压力数值分析[J]. 中国水运, 2010, 10(11): 230-231.
- [2] 张震宇, 姚文娟. 大圆筒薄壳结构的研究进展[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2004, 10(1): 82-90.
- [3] 蔡正银, 徐光明, 顾行文, 等. 波浪荷载作用下箱筒型基础防波堤性状试验研究[J]. 中国港湾建设, 2010(1): 90-94.
- [4] Wu Ke, Ma Mingyue, Li Shucui. Study on the failure envelope of suction bucket foundation under torsion shear load[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(2): 1780-1784.
- [5] Li Y, Yang S, Zou X. Advanced concept design and numerical study of suction bucket foundation in deep ocean[J]. Ocean Engineering, 2012, 54: 142-149.
- [6] 肖忠, 王元战, 及春宁, 等. 筒型基础防波堤稳定性有限元数值分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 119-125.
- [7] 王元战, 肖忠, 李元音, 等. 筒型基础防波堤土压力性状的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 622-627.
- [8] 茅加峰, 顾行文, 徐光明, 等. 波浪荷载对箱筒型基础防波堤作用的拟静力模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 105-109.
- [9] 文靖斐, 徐少鲲, 别社安. 箱筒型基础承载力研究[J]. 水运工程, 2011(6): 136-142.
- [10] 王元战, 肖忠, 迟丽华, 等. 筒型基础防波堤稳定性简化计算方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1367-1372.
- [11] API. Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms[S]. 1989.
- [12] 王广德, 李颖, 张凤珍, 等. 沉入黏土中的大圆筒筒内外土压力分布规律及计算方法[J]. 水道港口, 2002, 23(1): 16-21.
- [13] 林飘, 姚文娟, 张峻, 等. 筒式基础结构分仓形式对抗倾承载力的影响[J]. 中国港湾建设, 2013(6): 30-35.
- [14] 李伟, 别社安. 天津港箱筒形基础防波堤结构工程试验[C]//港口工程分会技术交流文集. 北京: 中国土木工程学会港口工程分会, 2005: 182-191.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 138 页)

4 结语

简述了结构优化算法的基本原理及复合形法优化算法的应用。对顺水流向变高程廊道这一特殊闸首结构做了参数化建模。选取 12 个闸首结构控制参数作为优化设计变量、混凝土方量作为优化目标函数对该形式闸首进行结构优化, 得到一较优体形, 比初设体形体积减小 7.109%, 优化效果较好, 可以为此类结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] 王明志. 2004 年: 我国水运经济半年运行与展望[J]. 港口经济, 2004(5): 33-35.
- [2] 吴澎, 宣国祥. 船闸设计的新进展[J]. 水利水电工程学报, 2009(4): 122-127.
- [3] 王鹏, 卜丁. 某船闸工程船闸闸室结构优化设计[J]. 水运工程, 2012(9): 142-144.
- [4] 苏超, 姜念堂, 王金玺. 有切角三角门船闸闸首结构优化设计[J]. 水运工程, 2013(5): 124-129.
- [5] 蔡新. 工程结构优化设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [6] 江爱川. 结构优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.
- [7] 许秋艳. 斜拉立体桁架结构优化设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [8] 陶全心, 李著璟. 结构优化设计方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985: 1-6.
- [9] 孙国正. 优化设计及应用[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2000: 11.
- [10] 黎展眉. 复形法在拱坝优化中的应用[J]. 贵州工学院学报: 自然科学版, 1992(1): 9-12.
- [11] 冯培恩, 姜方满. 结构 CAD 的参数化建模方法研究[J]. 机械设计, 1995, 12(9): 16-17.
- [12] 黄铖. 无人艇的有限元参数化建模与变截面优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [13] 张国栋, 顾克秋. 基于遗传算法和参数化建模的非线性结构优化[J]. 计算力学学报, 2003, 20(6): 764-768.
- [14] 聂耳清, 苏超. VB 与 TrueGRID 软件在船闸闸首三维有限元网格自动剖分中的应用[J]. 水运工程, 2009(10): 138-142.

(本文编辑 武亚庆)