

· 港 口 ·



大圆筒防波堤水平和竖向荷载 共同作用下承载力数值模拟*

崔衍强¹, 王 歆², 张 干¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456;
2. 天津振津工程集团有限公司, 天津 300222)

摘要: 大圆筒防波堤服役过程中受到水平荷载和竖向荷载的复合作用, 并且不同的大圆筒结构因为直径及入土深度的不同, 对水平荷载和竖向荷载复合作用的承载力也不同。采用 Swipe 加载模式, 基于位移加载控制模式数值模拟了不同入土深度与直径比的薄壁大圆筒结构的承载力。计算结果表明: 随着入土深度的增加, 水平方向承载力线性增大, 竖向承载力先期增速较大, 后趋于稳定; 当入土深度较小时, 大圆筒薄壁结构两侧地基出现塑性贯通区, 当入土深度较大时, 两侧的塑性贯通区变为一侧出现; 地基破坏时的水平和竖向荷载共同作用下承载力包络线呈外凸的椭圆形, 随着大圆筒结构入土深度的增加, 椭圆的半径增大; 归一化的极限承载力变化趋势相同, 得到偏于安全的承载力破坏包络线方程。

关键词: 薄壁大圆筒结构; 水平荷载; 竖向荷载; 承载力; 破坏包络面

中图分类号: TU 33⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)11-0033-05

Numerical simulation for capability of large-cylinder breakwater under co-action of vertical and horizontal loadings

CUI Yan-qiang¹, WANG Xin², ZHANG Gan¹

(1. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Safety of Ministry of Communication, Tianjin Research Institute Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. Tianjin Zhenjin Engineering (Group) Company, Tianjin 300222, China)

Abstract: The large cylinder breakwater is subjected to horizontal loadings, vertical loadings or the combination of those loadings generally. The type of the structure and the penetration depth can influence the bearing capability of large cylinders when subjected to the combination of horizontal and vertical loadings. The swipe loading model with displacement loading control method is adopted to calculate the bearing capability of large cylinders in different ratios of penetration depth to its diameter. According to the results of numerical stimulation, the bearing capability in horizontal direction increases dramatically in a linear relationship. However, the bearing capability in vertical direction, though in the beginning, increases, then tends to become stable in the following situations. Furthermore, the plastic penetration area appears in the soil on both sides of the large cylinders when the penetration depth to the soil is in a lower level, while it changes to appear on one side of the large cylinders along with the increasing of the ratio of penetration depth to the diameter. In the end, the failure envelope of large cylinders subjected to the combination of horizontal and vertical loadings turns out to be convex ellipse, the radius of which increases when the penetration depth getting larger. Besides, the normalized failure envelope can be expressed in the exponential form of V/V_{ult} and H/H_{ult} .

Keywords: thin-wall large cylinder structure; horizontal loading; vertical loading; bearing capability; failure envelope

收稿日期: 2015-04-10
*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51409134), 西部交通建设科技项目计划项目 (2014328224040)
作者简介: 崔衍强 (1988—), 男, 硕士, 实习研究员, 从事港口工程新结构设计计算方法研究。

大直径薄壁圆筒结构是一种新型港口水工建筑物结构, 造价低、工期短, 适用于软土地基和恶劣的水文地质条件, 具有广阔的应用前景。随着海洋资源的地位日益重要, 开发和利用海洋资源的趋势已经成为各国的重要战略。薄壁大圆筒结构可以直接插入软土地基中, 避免地基大体积开挖或采用特殊的地基加固处理, 而且能充分发挥地基对结构的稳定作用, 在圆筒沉设完毕后结构自身即可满足稳定的要求, 因此大圆筒在特定条件下造价和工期比其他传统结构具有明显优势。近年来, 薄壁大圆筒结构广泛应用于防波堤工程, 但是, 大圆筒防波堤受力情况复杂, 目前尚无广泛认可的理论体系和计算方法, 设计方法尚不完善。

大圆筒防波堤服役过程中受到的荷载作用复杂, 可以认为其同时受到水平荷载、竖向荷载和弯矩的作用, 所以确定大圆筒结构和地基系统在复合荷载作用下的承载力对保证大圆筒结构和地基系统承载能力的安全性和可靠性十分必要。本文通过大型通用有限元软件 Abaqus, 采用位移加载控制的方法模拟分析了薄壁大圆筒防波堤和地基系统在水平荷载和竖向荷载作用下的破坏机理和承载力, 并给出了水平和竖向荷载作用下的无量纲标准化的极限荷载包络线, 得到了归一化的承载力方程。

1 分析方法与计算模型

对于竖向荷载、水平荷载和弯矩等多种荷载复合作用下, 结构和地基承载系统的承载力问题一直是工程设计所关注的问题。桶型基础或裙板式基础广泛用于海洋石油开采领域, Bransby 等^[1]、Gourvenec^[2]、Yun 等^[3]通过数值模拟的方式, 采用位移控制加载法研究了复合荷载作用下桶式(裙板式)基础的极限承载力, 并得到破坏荷载的包络线。大直径圆筒结构作为一种依靠自身重力与筒壁和土体摩擦力共同作用的挡土结构、防波堤结构或码头结构, 与海洋工程中传统的桶式(裙板式)基础不同, 所以采用位移控制加载法,

通过特定的加载模式来研究大直径薄壁圆筒结构在水平荷载和竖向荷载共同作用下的承载力。

1.1 位移控制加载法

有限元荷载控制法和位移控制法是早期非线性分析常用的参数控制方法^[4]。荷载控制法虽然原理清晰、操作方便, 但在处理非线性问题时, 尤其是推求结构极限承载力时, 临近极限情况易发生不稳定或是不收敛的情况, 从而无法得到结构真实的极限承载力。但是, 位移控制法可以有效跟踪结构从最初的加载状态直至极限破坏的整个过程, 以明确结构受力全过程的变形情况^[5]。若结构在变形过程中没有快速跳回现象, 则有限元位移控制法是最稳定的求解方法^[6]。位移增量控制法是通过引入给定作用节点的位移增量来反求荷载增量和其他位置节点位移增量^[7]。

1.2 水平和竖向承载力分析方法

对于水平荷载和竖向荷载复合作用的模拟, 在有限元中可以采用特定的加载模式来实现, 从而推求结构和地基在水平荷载和竖向荷载复合作用下的承载力, 常用的复合加载方式为 Swipe 加载。

Swipe 加载方式最早由 Tan^[8]提出并应用于离心机模型试验中^[9], 加载过程包括两个步骤。为了得到 i 方向(水平方向)和 j 方向(竖直方向)荷载复合作用下的承载力, 从而求得 ij 平面上的破坏包络线, 可以先沿着 j 方向从 0 开始施加位移荷载 u_j , 直到荷载不随所施加的位移荷载变化而变化; 再保持 j 方向上位移不变, 而沿着 i 方向施加位移 u_i , 直到 i 方向上的荷载不随着位移的增加而变化。这时第 2 步中所形成的加载轨迹可以近似作为 ij 荷载平面上的承载力包络线。这种分析方式广泛用于地基承载力分析计算当中。

2 大圆筒及地基稳定性分析模型

大直径薄壁圆筒结构是由一系列的薄壁圆筒结构排列在一起, 形成空间特性极强的连续墙面来承受荷载作用。典型大直径薄壁圆筒结构平面布置见图 1, 有限元模型见图 2。为了便于分析计算, 根据结构本身和所受荷载的空间对称性, 取

垂直于墙方向半个圆筒和前后一定范围的土体为数值计算的分析对象(图 3)。为了消除土体边界效应的影响,土体计算域在垂直墙面方向,向前后两侧各取 5 倍大圆筒直径,土体在深度方向圆筒以下取 3 倍圆筒直径作为入土深度。

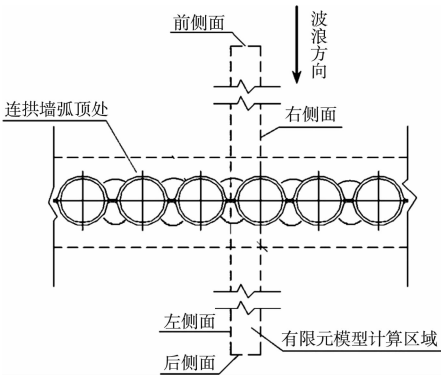


图 1 大圆筒防波堤平面布置

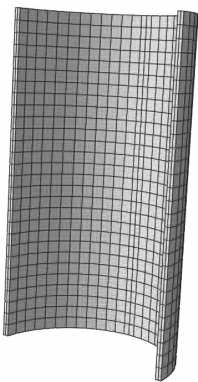


图 2 $L/D = 1$ 时薄壁大圆筒结构有限元模型

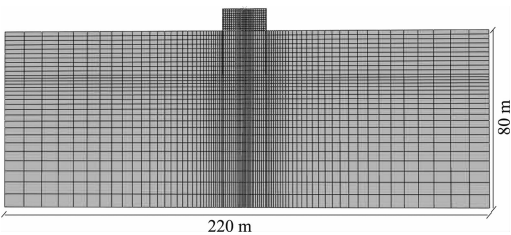


图 3 $L/D = 1$ 时有限元计算区域

数值模拟时,薄壁大圆筒结构和土体均采用三维 8 节点等参缩减单元。薄壁大圆筒的强度和刚度远大于土体的强度和刚度,整个承载系统的位移和失稳模式主要取决于土体的变形和承载能力,所以在有限元分析时近似认为大圆筒结构为刚体,对大圆筒结构的有限元模型施加刚体约束,土体采用 $D-P$ 模型,土体按均质软黏土考虑。依

据某实际工程,土体粘聚力 $C = 8 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 12^\circ$,按式(1)将其换算为 $D-P$ 模型所需计算参数,参照某实际工程,同时为了更好地模拟土体与大圆筒结构的相互作用,在结构和土体接触区域设置主从接触面,以考虑外荷载作用下结构与周围土体间的粘结、滑移、脱离现象。根据 API 规范^[10],黏性土对筒壁单位面积的摩擦力不大于黏性土不排水剪切强度。

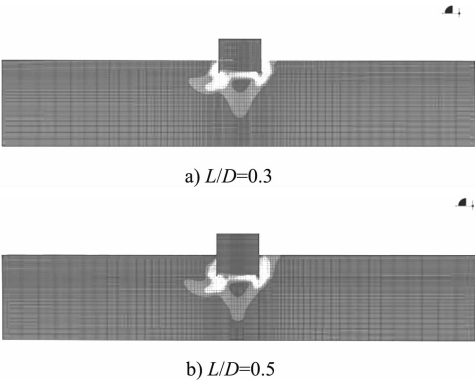
$$\begin{cases} \tan\beta = \frac{6\sin\phi}{3 - \sin\phi} \\ \sigma_c^0 = 2c \cdot \frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi} \end{cases} \quad (1)$$

参考某工程实例,薄壁大圆筒直径 D 为 20 m,壁厚为 20 mm,其入土深度 L 取值按 L/D 选取,分别为 $L/D = 0.3、0.5、0.7、1.0、1.2、1.3、1.5$ 。为了将水平荷载和竖向荷载施加在结构的转动中心,首先对结构施加一定的弯矩,并限制其相关的转动自由度,求得相关反力,从而确定转动中心的位置。

3 大圆筒水平和竖向荷载共同作用下承载力分析

3.1 土体破坏模式

图 4 为圆筒结构和地基土体在水平荷载和竖向荷载复合作用下土体极限状态下的塑性应变分布情况。可见,当 L/D 小于 0.5 时,在水平荷载和竖向荷载复合作用下位于薄壁大圆筒两侧的土体出现了塑性贯通区,随着 L/D 数值的增大,由两侧土体出现塑性贯通区变为一侧土体出现塑性贯通区,由此可知,随着筒体入土深度的增加,薄壁大圆筒结构的水平和竖向荷载共同作用下承载力显著提高。



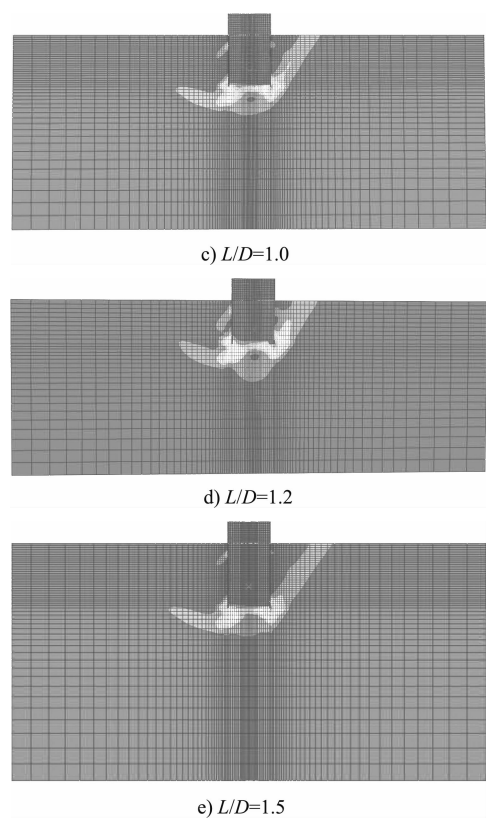


图 4 地基土体达到极限状态的塑性应变

图 5 为薄壁大圆筒按指定加载模式下土体的失稳模式，可见，被动土压力一侧土体受挤压作用发生隆起，而主动土压力一侧的土体则发生下陷，产生较大塑性位移。

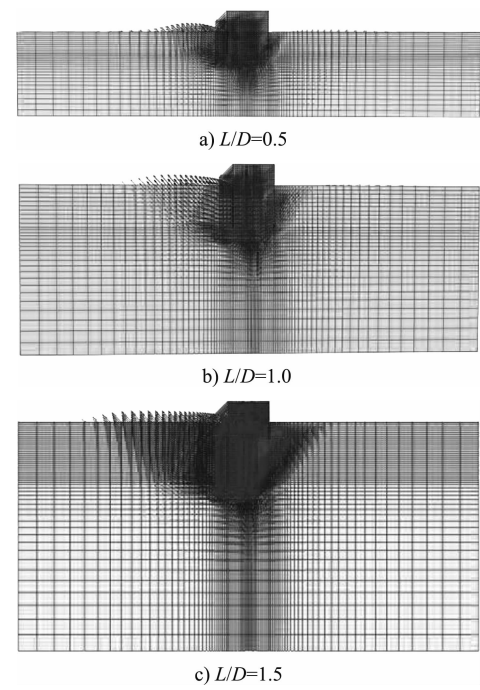


图 5 薄壁大圆筒结构失稳模式

3.2 水平和竖向荷载作用下破坏包络线

通过 Swipe 加载模式进行加载，得到的竖向承载力和水平向承载力以及位移进行无量纲化处理。竖向极限承载力及水平极限承载力见图 6。由图 6 可知，竖向极限承载力和水平极限承载力都随着 L/D 的增加而增加，但是竖向极限承载力增加到一定程度便不再增加，而水平承载力则基本上线性增加。由此可见，增加薄壁大圆筒结构入土深度可有效提高结构抵御水平荷载的能力。

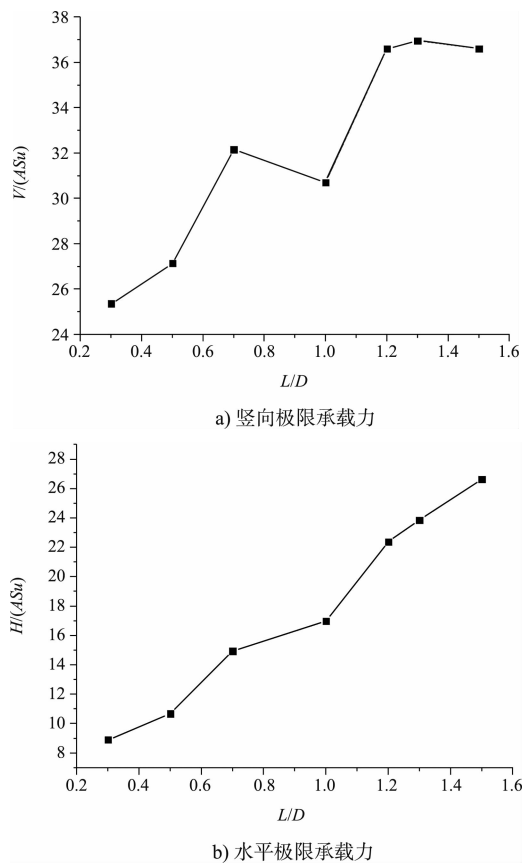


图 6 极限承载力与 L/D 的关系

图 7 为水平荷载与竖向荷载复合作用下大直径薄壁圆筒结构的破坏包络线。可见，其在竖向荷载和水平荷载复合作用下的破坏时，极限承载力包络线呈外凸状。随着 L/D 数值的增大，结构的承载力同样增大。在工程计算过程中保证结构所受到的水平荷载和竖向荷载在图 7 的外凸的包络线之内，则可认为结构是安全的。当 L/D 较大时，竖向极限荷载增速降低，因为 L 较高时，竖向荷载较大，应力水平较高，土体易出现塑性应变，土体易达到极限状态，所以竖向极限荷载增速降低。

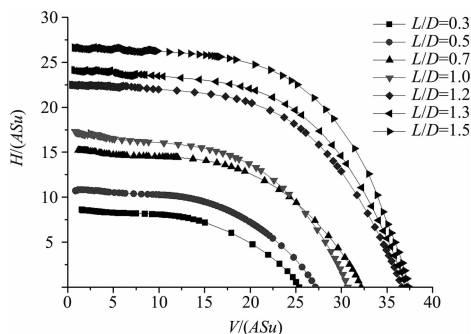


图 7 无量纲承载力包络线

对水平荷载和竖向荷载复合作用下承载力包络线进行归一化处理, x 轴为 V/V_{ult} , y 轴为 H/H_{ult} , 其中 V_{ult} 和 H_{ult} 是竖向荷载和水平荷载极限承载力。归一化的承载力包络线见图 8, 偏于安全将图 8 中的承载力包络线由式(2)表示。式(2)所示曲线位于不同 L/D 工况包络线的下方, 证明式(2)是偏于安全的承载力包络线。并且由于公式(2)中的曲线是经过归一化处理的, 也就是说曲线上的点的数值是相对于竖向荷载或水平荷载单独作用时的相对无量纲值, 所以当地基不同时, 虽然竖向荷载和水平荷载单独作用极限值将不同, 但是竖向荷载和水平荷载组合作用极限值归一化的值将不变, 曲线的趋势也不变。

$$f = \left(\frac{V}{V_{ult}} \right)^{2.5} + \left(\frac{H}{H_{ult}} \right)^{1.5} - 1 \quad (2)$$

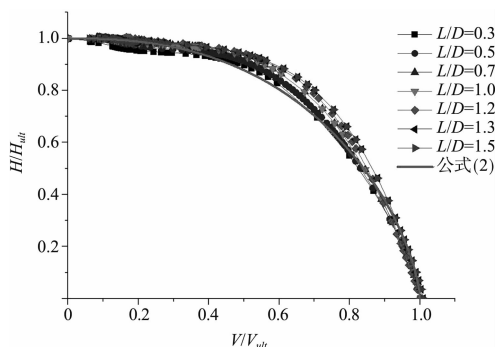


图 8 归一化的承载力包络线

4 结语

将 Swipe 加载模式与薄壁大圆筒极限承载力有限元分析方法相结合, 建立了复合加载模式下软黏土地基大直径薄壁圆筒结构承载力分析方法, 并求得其水平和竖向承载力包络线, 可得如下结论:

1) 大圆筒防波堤在竖向和水平荷载共同作用下, 当 L/D 数值较小时, 筒体两侧土体出现塑性贯通区而发生破坏, 当 L/D 数值较大时, 主动土

压力一侧土体出现较大塑性变形, 被动土压力土体变形较小。

2) 水平荷载和竖向荷载复合作用下, 地基竖向承载力随着 L/D 的增大而增加, 水平承载力随着 L/D 的增大而线性增大, 可见增加入土深度可以有效加大土体对水平荷载的抗力。

3) 得到竖向荷载和水平荷载复合作用下土体承载力包络线, 包络线呈外凸状, 承载力包络线幅值随着 L/D 的增大而增大, 承载力包络线表征一系列极限破坏情况的竖向和水平向承载力力组合值, 当结构受到的荷载位于包络线内部, 可以认为结构是安全的。

4) 归一化的承载力包络线同样呈外凸状, 且不同的 L/D 工况呈现出相同的趋势, 采用偏于安全的式(2)来表示承载力的变化趋势。

参考文献:

- [1] Bransby M F, Randolph M F. Combined loading of skirted foundations[J]. Geotechnique, 1998, 48(5): 637-655.
- [2] Gourvenec S. Effect of embedment on the undrained capacity of shallow foundations under general loadin[J]. Geotechnique, 2008, 58(3): 177-185.
- [3] Yun G, Bransby M F. The horizontal-moment capacity of embedded foundations in undrained soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(5): 409-424.
- [4] 杜修力, 曹惠, 金浏. 力-变位关系全过程模拟的有限元位移控制新方法[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 1-6.
- [5] 焦俊婷, 林铁红. 位移控制法在钢筋混凝土非线性分析中的应用[J]. 嘉应大学学报, 2003, 21(3): 91-93.
- [6] 郑宏, 李焯芬, 谭国焕, 等. 有限元分析的位移控制法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 81-85.
- [7] 徐爱敏, 陈衡治, 谢旭. 结构极限承载力计算方法及其收敛性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 65-70.
- [8] Tan F S. Centrifuge and theoretical modeling of conical footings on sand[D]. London: Cambridge University, 1990.
- [9] Govoni L, Gourvebec S, Gottardi G. A centrifuge study on the effect of embedment on the drained response of shallow foundations under combined loading [J]. Geotechnique, 2011, 61(12): 1 055-1 068.
- [10] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms[R]. Washington DC: API Publishing Services, 2000.