

# 软土地基中深埋式大圆筒结构的承载机制与稳定性分析方法<sup>\*</sup>

吴梦喜

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 深埋式大圆筒是一种新型的港口工程结构物, 对其承载机制和稳定性计算方法的研究有助于正确合理的设计应用。本文结合长江口航道导堤建筑物工程, 用有限元法分析了波浪荷载作用下软土地基中这种结构物的地基反力的分布特点, 并提出了一种基于极限分析法的稳定安全性简化分析方法。有限元分析表明简化方法采用的基本假定和力学机制是合理的, 其结果也有较好的近似性, 是一种快速高效的计算方法, 可用于初步设计中确定结构的主要断面尺寸。

**关键词** 极限平衡; 大圆筒; 软土; 稳定性; 有限元

## 1 前言

大圆筒是一种新颖的港工结构物, 连续排列可以形成带状结构物, 可作为码头的挡土墙、防波堤等, 在港口工程中有很大的应用潜力。按照埋置方式, 可分为基床式、浅埋式和深埋式三类<sup>[1]</sup>。在其结构内力与变形、稳定性分析方法、结构与土相互作用机理等方面, 已经进行了一些研究<sup>[1~4]</sup>, 推动了这种结构在港口工程中的应用。然而, 由于应用时间尚短, 大圆筒结构尤其是深埋式结构, 其受力机理和稳定性分析方法有待于进一步研究。

本文结合某河口航道治理导堤试验段软土地基中深埋式大圆筒在2002年7月初的威马逊台风期间倾覆的实例, 提出了一种软土地基中深埋式大圆筒承载力分析计算方法, 并采用ABAQUS有限元软件, 对单筒的受力变形进行了分析, 验证这种方法中的合理性。

## 2 受力机理与计算理论

作为导堤的深埋式大圆筒结构, 主要受到波浪荷载和水流荷载的作用, 在施加于其上部的水平和垂直荷载作用下, 结构将发生下沉、平移和转动。如图1所示, 在轴向垂直荷载作用下, 筒内外和端部土体将产生沿筒壁向上的摩擦力与垂直于筒底的端部反力。由于存在筒体的转动, 垂直反力会自动调整承担一部分弯矩。筒体的平移和转动推动泥面下一块楔形土体并从楔下犁过, 其水平反力分布如图2所示。

下面介绍极限承载力的计算方法。

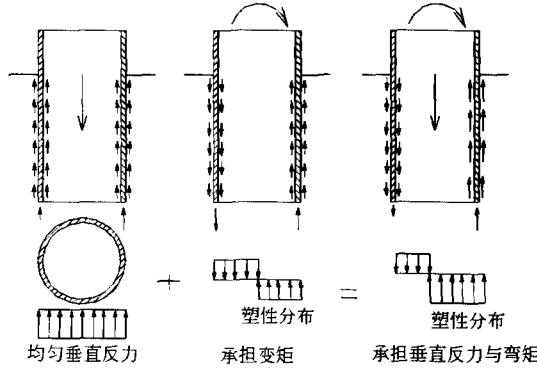


图1 垂直反力分布示意图

\* 基金: 科学院知识创新海洋领域重大项目 KJCX-SW-L03 资助。

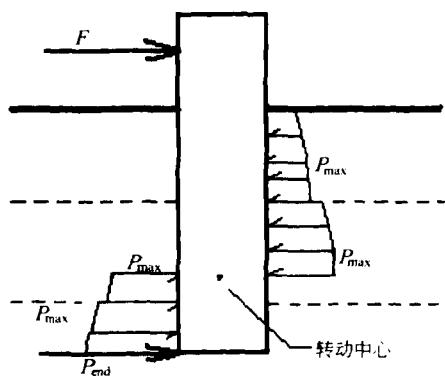


图 2 水平反力分布示意图

## 2.1 垂直承载力

对于软粘土地基，如果荷载为短期或瞬时荷载，在荷载作用期间土体来不及排水固结，土体的强度宜采用不排水抗剪强度，下文的分析均基于这种强度指标。

垂直承载力计算可采用 API $\alpha$  法<sup>[5]</sup>，垂直承载力  $Q_d$  为侧壁摩阻力  $Q_f$  与端阻力  $Q_p$  之和，即

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p \quad (1)$$

$$f = \alpha c_u \quad (2)$$

其中  $f$  为单位面积侧壁摩阻； $c_u$  为计算点的不排水抗剪强度； $A_s$  为筒体内外侧壁面积之和； $q$  为单位面积端部阻力； $A_p$  为筒体端部面积； $\alpha$  为无量纲因数，由（3）式确定，并满足  $\alpha \leq 1$  的条件。

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.5}, \psi \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.25}, \psi > 1.0$$

其中

$$\psi = c_u / p'_0, p'_0 \text{ 为计算点的有效上覆压力}$$

$$q = 9c_u \quad (4)$$

## 2.2 水平承载力

所采用的方法为塑性极限平衡分析法<sup>[6,8]</sup>。

如图 2 示，假定转动中心位于泥面下筒轴线上某一点，筒的水平反力由沿着筒身的水平反力和筒底部的摩擦力构成，根据力和力矩平衡可求得筒体的极限反力。

水平承载力计算的关键是确定单位面积上的极限水平反力。根据三维塑性极限分析的结果<sup>[6]</sup>，将问题简化为如图 2 所示的二维计算简图，按以下的方法计算单位面积的土反力。

对于粘性土地基，假定大圆筒受力后与土体有分离趋势的一侧在荷载作用下开裂，那么，位于深度  $z$  处单位面积筒上的土体极限抗力可用下式计算

$$P_{max} = N_p c_u + \sigma_z \quad (5)$$

其中  $\sigma_z$  为作用点处的有效垂直土压应力， $N_p$  为无量纲横向承载因数。

对于土层表面强度为  $s_{u0}$ ，沿深度强度线性增长率为  $s_{u1}$  的单层土剖面，有如下的经验关系

$$N_p = N_1 - N_2 \exp\left(-\frac{\xi z}{D}\right) \quad (6)$$

其中  $D$  为筒径； $z$  为计算点的埋深； $N_1$ 、 $N_2$  为与筒表面粗糙度有关的参数，本文考虑到筒体受循环波浪荷载的作用，按光滑桩计算，根据塑性极限分析，取  $N_1 = 9$ ， $N_2 = 7$ ； $\xi$  是  $\lambda$  ( $\lambda =$

$s_{u0}/(s_{u1}D)$ ) 的函数,

$$\left. \begin{array}{l} \xi = 0.25 + 0.05\lambda, \lambda < 6 \\ \xi = 0.55, \quad \lambda \geq 6 \end{array} \right\} \quad (7)$$

筒端部的水平反力由 (8) 式计算

$$P_{end} = c_u A_{end} \quad (8)$$

其中  $A_{end}$  为圆筒端部外径包围的圆的面积。

对于成层土, 可按以下办法近似处理。在计算第 1 层以下的土层的极限水平反力时, (6) 式中的埋深  $z$  的取值根据其上覆层的参数, 依照反力等值的原则折算等效上覆层厚度来修改该层的埋深  $z$  值。

### 2.3 垂直反力承担弯矩的计算

当垂直方向的极限承载力与荷载之比大于水平方向的这一比值时, 可通过垂直反力调整承担部分弯矩, 来模拟垂直反力和水平反力共同承担弯矩的力学机制, 最终使这两个比值相等, 这一比值就是总体的极限承载力安全系数。由于水平承载力和垂直承载力的计算均满足力和力矩的平衡条件, 通过垂直与水平反力分担力矩的改变, 可迭代求解得到最终的总体极限承载力安全系数。

粘性土地基中大圆筒向上运动可承受等值的反向侧壁摩擦力和端部阻力 (端部存在吸力)。由于筒体转动筒外侧壁开裂, 开裂部分的反向摩擦力为零, 因而, 在计算反向外侧壁摩擦力时, 其作用面积应乘以一个折减系数, 本文计算中取值为 0.2。连续排列的大圆筒, 还应该考虑群筒效应。

## 3 有限元计算分析

试验段筒的外径为 12.0 m, 泥面以上壁厚为 0.25 m, 泥面 2 m 以下壁厚为 0.21 m, 中间为过渡段, 筒体的水下自重为 2 764 kN, 筒体顶部胸墙水下自重为 2 822 kN。威马逊台风 1% 累积频率的波高为 7.39 m, 按我国交通部颁布的海港水文规范推算出作用在结构上的水平波浪力为 7 066.2 kN, 垂直波浪力为 3 561.3 kN, 泥面弯矩为 32 858 kN·m。

有限元计算采用 ABAQUS 软件。土体采用 TRESCA 理想弹塑性模型, 圆筒结构采用线弹性模型, 接触面采用摩擦接触模型处理, 采用大变形模式, 按静力问题计算。土体计算参数如表 1, 参考土的不排水抗剪强度和固结快剪内摩擦角并考虑到接触面处摩擦的减弱, 接触面摩擦系数选为 0.20。同时考虑接触面摩擦力最大不超过 25 kPa。

表 1 设计断面土层参数

土层深度	0 m~5.5 m	5.5 m~9.5 m	9.5 m~13.8 m	13.8 m~30 m
浮容重/kN·m <sup>-3</sup>	6.0	6.6	6.9	6.9
抗剪强度/kPa	10.7	17.0	23.3	23.3
泊松比 $\nu$	0.49	0.49	0.49	0.49
变形模量/MPa	1.5	1.5	1.5	1.5

图3为按威马逊的荷载比例加载的孤立单筒泥面水平荷载位移曲线，根据荷载位移曲线的趋势，估计极限水平承载力约大于6 000 kN。

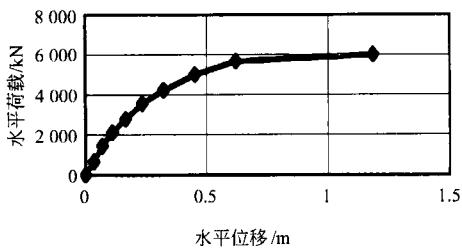


图3 威马逊工况孤立单筒泥面水平荷载位移曲线

图4、图5分别为水平荷载6 000 kN时水平、垂直位移等值线图，图中可见筒体发生倾覆转动，转动中心接近筒的底部，筒的一侧开裂。开裂一侧筒底及底部侧壁土体向上运动，另一侧表面土体隆起。

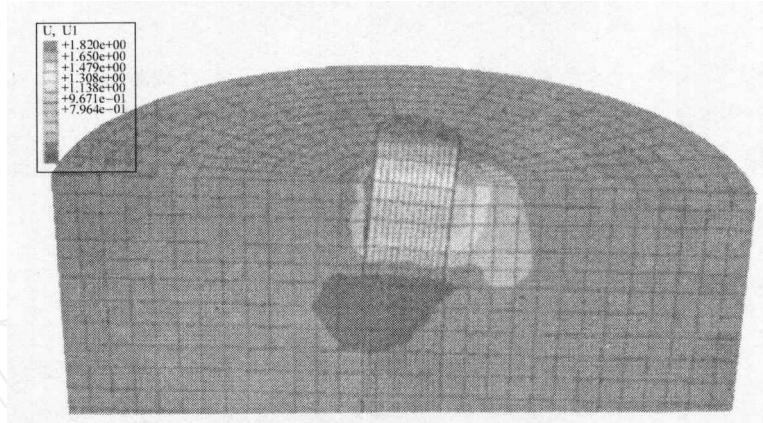


图4 水平荷载6 000 kN时水平位移等值线图

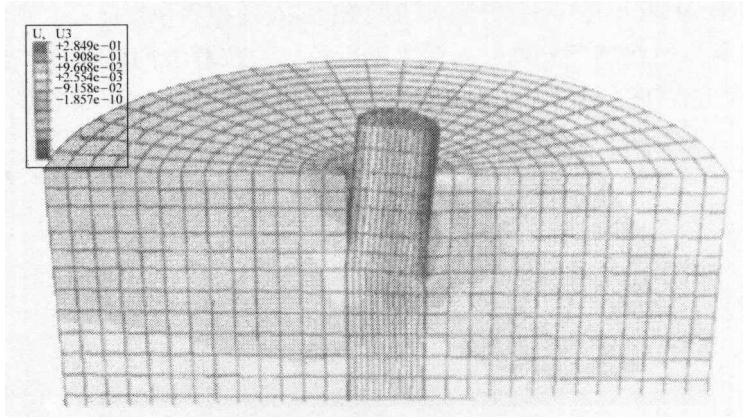


图5 水平荷载6 000 kN时垂直位移等值线图

图6为水平荷载4 200 kN时水平土反力沿筒深度的分布。水平反力是筒周正应力和剪应力在水平方向的投影之和。可以看出，筒身存在明显的反力作用方向转换点，筒体向土体运动的一侧产生比较大的反力合力。由于筒体为圆形，筒体与土的水平剪力与筒体的运动方向一致，因而筒体两侧的水平反力的合力的方向相同，这与板桩墙是不同的。总的水

平反力分布的规律与极限平衡法的计算模式一致。筒内土体由于受到筒体的约束，其总水平反力除底部有限深度以外，基本为零。筒底部由于端部转动的剪切作用，筒内土体一侧受到较大的剪切挤压作用，因而，其合力不为零。这包含在极限平衡法中端部极限剪切反力中。

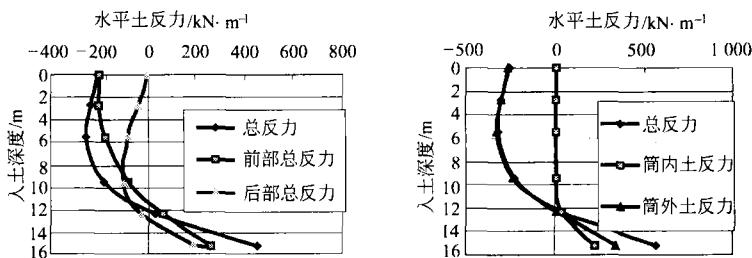


图 6 水平土反力沿筒深度的分布

图 7 为侧壁垂直摩阻力沿深度的分布。由于采用了摩擦接触的计算模式，摩阻力的大小与所受的接触面的正应力成正比。摩阻力的方向与筒壁相对土体运动的方向相反。从图中可以看出转动点上下外壁摩阻力的方向是相反的，这说明了本文采用的摩阻力反向调整承担弯矩的假定的合理性。

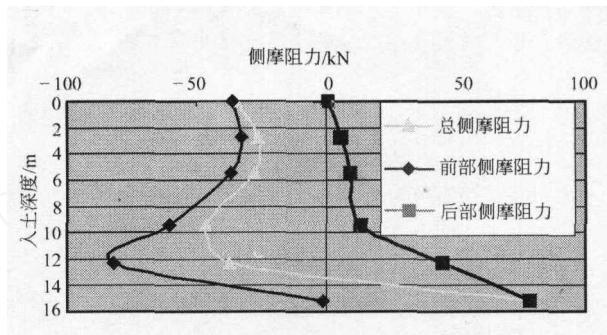


图 7 侧壁摩阻力沿筒身的分布

图 8 为筒体端部的垂直反力和筒底水平剪力的分布图。从图中可以看出，端部的一侧由于接触面张开，张开部位的垂直反力和水平剪力均为零。其他部分的垂直反力基本为线性分布，内外壁反力差别比较大的原因是由于内外壁部分接触的土体变形差别很大造成的，这与基础底部与土的刚性接触结果相符。这一部分土体的应变很大，有限元计算得出的局部应力可能不准确。端部垂直反力的分布也说明了垂直反力实际上承担了倾覆弯矩。端部外边缘的水平剪力基本达到极限值。

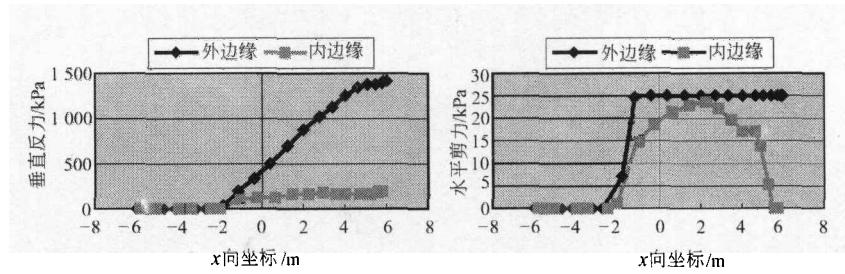


图 8 筒底部垂直反力与水平剪力分布

采用同样的强度参数，用本文的极限平衡法计算出的孤立单筒水平承载力在垂直反力调整承

扭弯矩前为3842 kN, 调整承担弯矩后为6112 kN, 极限承载力计算结果与有限元计算结果基本吻合。垂直反力调整前后的承载能力结果说明了垂直反力承担弯矩对水平承载能力的影响, 同时说明主要靠侧壁摩阻力承担垂直荷载的深埋式大圆筒结构, 削减垂直荷载能提高结构的整体承载力, 这与主要靠端部反力承担垂直荷载的基床式和浅埋式大圆筒结构不同。

## 4 结论

通过以上的分析, 可以得出如下的结论:

本文提出的深埋式大圆筒结构的极限承载力计算方法, 所采用的基本假定和破坏机制得到了有限元计算结果的验证, 采用垂直反力和水平反力共同承担弯矩的计算办法是合理的, 其计算结果有比较好的近似性。

值得说明的是, 波浪循环动态作用对地基土体有软化和强度衰化作用, 影响结果的承载能力, 本文没有涉及这一问题。

本文的有限元计算与结果整理工作, 由王梅副研究员完成, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 周锡初, 王辉, 韩桂军. 大直径薄壳圆筒结构的设计与计算. 港工技术, 1995, 2, 22~30
- [2] 刘建起. 沉入式大直径圆筒结构变形计算的试验研究. 岩土工程学报, 1994, 16 (2): 64~72
- [3] 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. 岩土工程学报, 2002, 24 (4): 417~420
- [4] 王广德, 李颖, 张凤珍等. 沉入粘土中的大圆筒筒内外土压力分布规律及计算方法. 水道港口, 2002, 23 (1): 16~21
- [5] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 2A - LRFD First Edition, 1993
- [6] Murff, JD, and Hamilton, JM. P-Ultimate for Undrained Analysis of Laterally Loaded Piles. ASCE *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119 (1): 91~107
- [7] Murff, JD, Aubeny, CP and Moon SK. Lateral Undrained Resistance of Suction Caisson Anchors. *International of Offshore and Polar Engineering*, 2001, 11 (3): 211~219
- [8] 吴梦喜, 王梅, 楼志刚. 吸力式沉箱的水平极限承载力计算. 中国海洋平台, 2001, (4): 12~15
- [9] Allersma, HGB, Brinkgreve, RBJ, Simon, T and Kirstein, AA. Centrifuge and Numerical Modelling of Horizontally Loaded Suction Piles. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2000, 10 (3): 222~228