

沉入式大直径圆筒码头稳定性计算方法研究

Method of stability analysis of embedded large-diameter cylinder quay

王元战¹, 王海龙¹, 付瑞清²

(1. 天津大学建工学院 港口工程系, 天津 300072; 2. 天津港工程监理咨询有限公司, 天津 300456)

摘要: 以工程应用为原则, 研究沉入式大直径圆筒码头的分类及相应的设计理论与计算方法。根据大直径圆筒码头的工作原理, 提出了大直径圆筒桩墙式码头的新概念, 以及将沉入式大直径圆筒码头划分为大直径圆筒重力式码头和大直径圆筒桩墙式码头两种结构类型。建立了大直径圆筒桩墙式码头的稳定性计算方法。对于大直径圆筒重力式码头的稳定性验算, 建议采用重力式码头的计算思路, 但要合理考虑筒内外土体对结构稳定性的作用。通过数值计算, 研究了结构特征参数对大直径圆筒桩墙式码头稳定性的影响。

关键词: 沉入式大直径圆筒; 结构类型; 桩墙式码头; 稳定性

中图分类号: U 656

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0417-04

作者简介: 王元战(1958-), 男, 河北献县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土与结构相互作用、结构振动及控制理论和方法等方面的研究工作。

WANG Yuan-zhan¹, WANG Hai-long¹, FU Rui-qing²

(1. Dept. of Port and Coastal Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Port Engineering Supervisory & Consultant Co., Tianjin 300456, China)

Abstract: The idea that the embedded large-diameter cylinder quay can be divided into two types: the gravity type and the pile wall type, is presented in this paper. The method of the stability analysis is developed for the large-diameter cylinder quay of the pile wall type and the method of the stability analysis for the large-diameter cylinder quay of the gravity type is also proposed. The effect of the significant parameters on the stability of the large-diameter cylinder quay of the piled wall type is investigated through numerical calculation.

Key words: embedded large-diameter cylinder; structure type; pile wall type quay; stability analysis

1 前言*

大直径圆筒码头是由无底大直径钢筋混凝土圆筒薄壳连续排列构成的码头建筑物。对于大直径圆筒薄壳的受力状态、工作机理以及设计与计算方法等, 国内外均开展了一些研究工作。通过现场观测、室内模型试验、理论分析和数值模拟, 得出了许多有用的结论, 为这种新型结构的应用与发展提供了一定的理论基础和 design 方法。

在实验研究方面, 文献[1, 2]进行了大直径圆筒结构筒内外土压力及其分布、基床应力及其分布、结构滑动和倾覆稳定性等实验研究工作; 在设计 with 计算方法方面, 文献[3, 4, 5]分别给出了大直径圆筒结构稳定性和变位计算方法; 在数值计算方法方面, 文献[6, 7]建立了对大直径连续圆筒结构与软土相互作用分析的壳体单元—接触面单元—非线性土体单元的耦合数值模型, 首次将接触面单元用于大直径连续圆柱壳与软土相互作用分析, 可合理模拟筒壁与土体接触面处的滑动和开裂, 并可考虑土体的非线性弹性特性。

上述研究工作使人们对大直径圆筒结构的工作机理、土压力特性、内力特性和稳定性等有了更为深入的

了解, 并提出了不少设计理论和计算方法, 但是还有很多问题有待于深入研究探讨。从对大直径圆筒结构的分类方面, 有些研究者将基床式和沉入式大直径圆筒码头一律归类为重力式结构, 并将其分为基床式、浅埋式和深埋式, 其稳定性验算也基本沿用重力式码头的计算思路^[8]。而有些研究者认为, 沉入式大直径圆筒码头不应归类为重力式结构, 而是一种全新种类的结构型式, 不能沿用重力式码头的计算思路^[9]。在工程实践中, 沉入式大直径圆筒码头也出现了筒体发生较大位移等一系列问题。因此, 关于沉入式大直径圆筒码头的工作机理及其设计与计算方法, 特别是稳定性计算方法, 是有待深入研究的问题。

本文以实际工程设计应用为原则, 提出了将大直径圆筒结构分为大直径圆筒重力式结构和大直径圆筒桩墙式结构的新的分类方法, 并建立了大直径圆筒桩墙式码头的稳定性设计与计算方法。通过数值计算, 研究了结构特征参数对大直径圆筒桩墙式码头稳定性的影响。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59679003); 天津市自然科学基金资助课题(973606311)

收稿日期: 2001-10-08

2 大直径圆筒码头的分类

大直径圆筒码头的分类,主要应依据维持其稳定性的工作原理来划分。重力式结构主要是靠自身重量来维持其稳定性,在抗倾稳定性计算中在筒底前端附近应有一明确的支承点,以使重心可对其产生稳定力矩。如基床式大直径圆筒结构应属重力式结构。对于沉入式大直径圆筒结构,如果软土层厚度不是很深,圆筒可穿过软土层使筒底到达坚硬土层,那么当筒体发生转动时,筒底前端附近将存在一个明确的支承点,重心仍然可对此支承点产生稳定力矩,结构重力仍将是维持结构稳定性的重要因素,此时沉入式大直径圆筒结构可划归为重力式结构类型。但是,如果软土层厚度较深,筒底没有到达坚硬土层,筒底前端附近不存在一个明确的支承点,重心没有取稳定力矩的明确对象,结构稳定性验算主要靠土的嵌固作用来维持,即沉入式大直径圆筒码头必须满足入土深度要求,其稳定性验算应采用板桩码头的计算思路。在这种情况下,沉入式大直径圆筒码头应划归大直径圆筒桩墙式结构类型。

综上所述,大直径圆筒结构可划分为“大直径圆筒重力式码头”和“大直径圆筒桩墙式码头”两种结构类型。对于大直径圆筒重力式码头,其稳定性验算基本可依照空心方块重力式码头的计算思路;对于大直径圆筒桩墙式码头,其稳定性验算基本可依照板桩码头的计算思路,但由于圆筒的直径很大,还应合理考虑筒内外土体对筒壁的竖向摩擦力、土体对筒底的竖向反力和水平切力对稳定性的作用。

3 大直径圆筒桩墙式码头分析模型

假设圆筒发生图 1(a) 所示的变位,根据 Blum 在板桩码头稳定性计算中建议的土压力分布图式,作用在圆筒上的土压力可采用图 1(b) 所示计算模型。由于大直径圆筒结构的特点(圆筒结构直径很大),该模型与板桩码头计算模型的区别是考虑了土体作用于筒底的水平切力 T ,筒底土反力 σ (图中未标出筒底土反力 σ),以及筒内、外土体对筒壁的竖向摩擦力 F (图中未标出摩擦力 F)。

为使分析简单明了,假设土体为均质软粘土。作用在筒体上的力采用以下公式计算。筒后主动土压力:

$$p_{aa} = \alpha D (qK_a - 2c \sqrt{K_a}) \quad (1)$$

$$p_{ac} = \alpha D [qK_a + \gamma(H_0 + t - x)K_a - 2c \sqrt{K_a}] \quad (2)$$

筒前被动土压力:

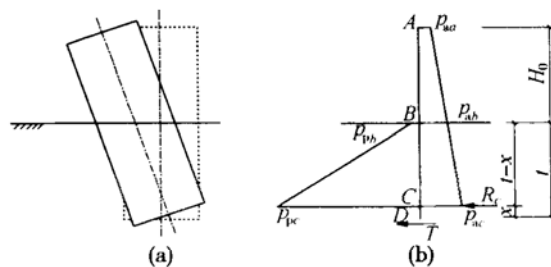


图 1 大直径圆筒码头稳定性分析模型

Fig. 1 Model for stability analysis of large-diameter cylinder quay

$$p_{pb} = 2\alpha Dc \sqrt{K_p} \quad (3)$$

$$p_{pc} = \alpha D [\gamma(t-x)K_p + 2c \sqrt{K_p}] \quad (4)$$

式中 α 为连续圆筒墙背土压力折减系数, D 为筒体外径, q 为码头面超载, γ 为土的容重, c 为土的粘聚力, K_a 为主动土压力系数, K_p 为被动土压力系数。

筒内土体对单位宽度筒壁的竖向摩擦力为

$$\tau_1 = f(H_0 + t) \quad (5)$$

筒外墙后土体对单位宽度筒壁的竖向摩擦力为

$$\tau_2 = f(H_0 + t) \quad (6)$$

筒外墙前土体对单位宽度筒壁的竖向摩擦力为

$$\tau_3 = ft \quad (7)$$

式中, f 为软粘土对筒壁单位面积的摩擦力。根据美国 API 规范^[10], 软粘土对筒壁单位面积的摩擦力 f 不大于粘土不排水剪切强度 c_u , 最大可取为粘土不排水剪切强度 c_u 。

土体对筒底的水平切力可采用下式计算:

$$T = \frac{1}{4} \pi D^2 c_u \quad (8)$$

根据美国 API 规范, 软粘土最大端阻应力(筒底土反力)为

$$\sigma = 9c_u \quad (9)$$

4 大直径圆筒桩墙式码头稳定性分析方法

大直径圆筒桩墙式码头的稳定性主要依靠土体的嵌固作用来维持,即应满足入土深度要求。为确定大直径圆筒桩墙式码头的入土深度,对筒后被动土压力合力 R_c 作用点 C 列力矩平衡方程:

$$\sum P_a l_a - \sum P_p l_p - \sum M_1 - \sum M_2 - \sum M_3 - M_T - M_D = 0 \quad (10)$$

式(10)中, $\sum P_a$ 为筒后土体主动土压力合力, l_a 为 $\sum P_a$ 作用点距 C 点的距离; $\sum P_p$ 为筒前土体被动土压力合力, l_p 为 $\sum P_p$ 作用点距 C 点的距离。 $\sum M_1$

为筒内土体摩擦力产生的力矩, 有 $\sum M_1 = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{4} D_0^2 \tau_1 \cos \theta d\theta = D_0^2 \tau_1 = f(H_0 + t) D_0^2$, 其中 D_0 为圆筒

内径, θ 为圆筒断面内中心角。 $\sum M_2$ 为筒后土体摩擦力产生的力矩, 有 $\sum M_2 = D \tau_2 \cdot \beta D = \beta D^2 f(H_0 + t)$ 。其中 βD 为假想作用平面到圆筒轴心距离。大直径圆筒码头稳定性计算中, 为简化计算, 可用一假想平面代替实际圆形曲面。根据理论和实验研究成果, 可取距圆筒轴心距离为 βD 的面为假想平面, $\beta = 0.4$ 。

$\sum M_3$ 为筒前土体摩擦力产生的力矩, 有 $\sum M_3 = D \tau_3 \cdot \beta D = \beta D^2 f t$ 。

M_T 为筒底切力 T 产生的力矩, 有 $M_T = x T = \frac{1}{4} \pi D^2 c_u x$ 。

M_D 为筒底土反力 σ 产生的力矩, 有 $M_D = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{\frac{D_0}{2}}^{\frac{D}{2}} \sigma^2 \cos \theta dr d\theta = \frac{1}{12} (D^3 - D_0^3) \sigma = \frac{9}{12} (D^3 - D_0^3) c_u$ 。

将以上各式代入方程式(10), 并引入以下无量纲参数:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_f &= \frac{a}{\beta D}, \lambda_c = \frac{c}{\beta D}, \lambda_f = \frac{f}{\beta D}, \lambda_{cu} = \frac{c_u}{\beta D}, \\ \lambda_D &= \frac{D_0}{D}, \lambda_H = \frac{H_0}{D}, \lambda_t = \frac{t}{D}, \lambda_x = \frac{x}{D} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

得 $\frac{1}{6} \alpha K_a (\lambda_H + \lambda_t - \lambda_x)^3 + \alpha (\frac{1}{2} K_a \lambda_f - \sqrt{K_a} \lambda_c) (\lambda_H + \lambda_t - \lambda_x)^2 - \frac{1}{6} \alpha K_v (\lambda_t - \lambda_x)^3 - \alpha \sqrt{K_v} \lambda_c (\lambda_t - \lambda_x)^2 - \lambda_f \lambda_D^2 (\lambda_H + \lambda_t) - \beta \lambda_f (\lambda_H + 2 \lambda_t) - \frac{1}{4} \pi \lambda_{cu} \lambda_x - \frac{9}{12} \lambda_{cu} (1 - \lambda_D^3) = 0$ (12)

式中 无量纲参数 $\lambda_f, \lambda_c, \lambda_f, \lambda_{cu}, \lambda_D, \lambda_H, \lambda_t, \lambda_x$ 可表征沉入式大直径圆筒码头的主要特性, 其中入土深度参数 λ 和 λ_x 为待求未知量。

方程式(12)包含的两个未知量 λ 和 λ_x , 可采用以下方法求解:

(1) 求 λ_0 : 假设 $\lambda_x = 0$, 求解方程式(12), 得 λ , 令 $\lambda_0 = \lambda$ 。

(2) 求 λ_0 : $\lambda_0 = \frac{x}{D} = \frac{R_c / \beta D^3}{2 \alpha [K_p (\lambda_H + \lambda_0) - K_a \lambda_0]}$, 其中, $\frac{R_c}{\beta D^3} = \frac{\sum P_v}{\beta D^3} - \frac{\sum P_a}{\beta D^3} - \frac{T}{\beta D^3}$ 。

(3) 令 $\lambda_x = \lambda_0$, 由方程式(12)求解 λ 。若 $|\lambda - (\lambda_0 + \lambda_x)| < \varepsilon$, ε 为给定的精度要求, 则停止计算; 否则, 继续下一步。

(4) 令 $\lambda_0 = \lambda - \lambda_x$, 转第(2)步。

5 结构特性研究

沉入式大直径圆筒码头的结构特征参数包括: 码头面超载参数 λ_f 、圆筒内外径之比参数 λ_D 、软土特性参数 λ_c 和 λ_{cu} 、软土与筒壁摩擦力参数 λ_f 、码头高度参数 λ_H 、以及入土深度参数 λ 等。计算中 λ_f 取为 0.5; λ_D 一般在 0.95 左右; λ_c 和 λ_{cu} 一般在 0.05~0.10 范围; λ_f 的最小可能值为 0.0, 最大一般不超过 0.06; λ_H 取为自由变量; λ 为待求的满足稳定性要求的入土深度参数。

图2给出了 $\lambda_c = \lambda_{cu} = 0.05$ 时, 在不同 λ_f 下, 入土深度参数 λ 随码头高度参数 λ_H 的变化曲线; 图3给出了 $\lambda_c = \lambda_{cu} = 0.075$ 时, 在不同 λ_f 下, 入土深度参数 λ 随码头高度参数 λ_H 的变化曲线; 图4给出了 $\lambda_c = \lambda_{cu} = 0.10$ 时, 在不同 λ_f 下, 入土深度参数 λ 随码头高度参数 λ_H 的变化曲线。各图中的第四条曲线(L4)为不考虑筒壁摩擦($\lambda_f = 0.0$)、地基反力 σ 和筒底切力 T ($\lambda_{cu} = 0.0$) 时, 即按传统的确定板桩码头入土深度方法时的计算结果。

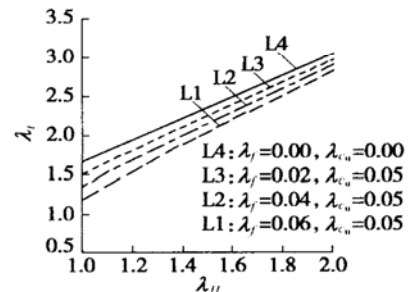


图2 所需沉入土中深度参数 λ ($\lambda_c = 0.05$)

Fig. 2 The parameter λ versus λ_H in case $\lambda_c = 0.05$

6 结 语

沉入式大直径圆筒码头应分为两种结构类型: 大直径圆筒重力式码头和大直径圆筒桩墙式码头。

(1) 对于软土层厚度不很深, 筒底可到达坚硬土层的沉入式大直径圆筒码头, 基本上可按重力式码头的计算思路进行稳定性验算, 但要合理考虑筒内外土体对稳定性的作用。

(2) 对于软土层厚度很深, 筒底不能到达坚硬土层的沉入式大直径圆筒码头, 可按本文给出的方法确定筒体沉入深度。在这种情况下, 沉入式大直径圆筒码头应划归大直径圆筒桩墙式码头结构类型。

(3) 在大直径圆筒码头设计中, 建议首先按大直径圆筒桩墙式结构确定其入土深度; 如果坚硬土层的深

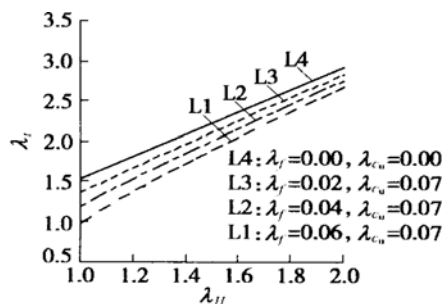


图3 所需沉入土中深度参数 λ_i ($\lambda_c = 0.075$)

Fig. 3 The parameter λ_i versus λ_H in case $\lambda_c = 0.075$

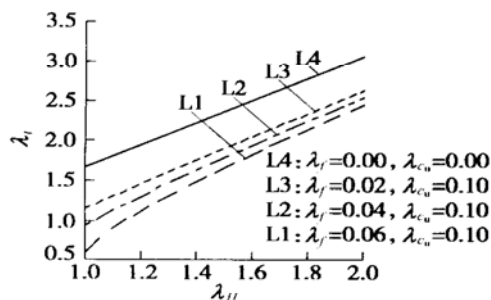


图4 所需沉入土中深度参数 λ_i ($\lambda_c = 0.10$)

Fig. 4 The parameter λ_i versus λ_H in case $\lambda_c = 0.10$

度大于所需入土深度,则属于桩墙式结构,此时确定的入土深度即可作为设计依据;如果坚硬土层的深度小于桩墙式结构所需的入土深度,则应再按大直径圆筒重力式码头的计算方法进行稳定性验算。

参考文献:

- [1] 天津大学港工结构实验室. 大直径圆筒码头模型试验研究 [R]. 天津: 天津大学水资源与港湾工程系, 1991.
- [2] 周在中, 等. 大直径圆筒挡墙模型实验与计算方法的研究 [J]. 岩土工程师, 1991, 3(4): 7-14.
- [3] 刘建起. 沉入式大直径圆筒结构变形计算的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 64-72.
- [4] 周锡仍, 等. 大直径薄壳圆筒结构的设计与计算 [J]. 港工技术, 1995, (2, 3): 22-30.
- [5] 王元战, 等. 沉入式大圆筒结构变位计算方法研究 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 41-46.
- [6] 王玉红. 连续圆筒与土相互作用分析的耦合有限元模型及系统参数辨识的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1998.
- [7] 孟庆文, 王元战. 大直径圆筒结构与土相互作用的接触面单元—弹性非线性单元耦合分析 [J]. 中国港湾建设, 1999, (2): 1-5.
- [8] 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.
- [9] 交通部天津水运工程科学研究所. 大圆筒几何尺度(筒径与筒高)对其工作状态及破坏模式影响的试验研究: 国家“九五”攻关项目大圆筒模型试验研究专题报告附件二 [R]. 天津, 2000.
- [10] American Petroleum Institute (API). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms [R]. American Petroleum Institute Production Department, Washington D C, 1996.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》是关于土力学和岩石力学理论和实践的学术性科技期刊, 创刊于 1979 年, 由我国水利、土木、力学、建筑、水电和振动 6 个全国性学会联合主办, 主编沈珠江院士。主要刊登岩土工程领域中的新理论、新技术、新方法、新仪器和新材料等, 报道重大的岩土工程实录、先进的岩土工程科研成果和岩土工程相关的信息动态。主要栏目有黄文熙讲座、论文、短文、工程实录、展望 21 世纪岩土力学、焦点论坛和学术讨论等。

《岩土工程学报》是我国建筑和水利两个学科的中文核心期刊, 分别于 1999 年和 2001 年获“自然科学基金性、高科技学术期刊经费”资助, 先后被美国工程索引 Page One (Ei Page One)、Current Awareness Service、中国学术期刊文摘、中国科学引文数据库、中国科技论文与引文数据库、中国期刊网等 10 家国内外评价与检索系统收录, 并获得中国科协、水利部和江苏省

优秀期刊荣誉称号。

《岩土工程学报》适合于土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质领域中从事岩土工程专业的科研、设计、施工和监理人员和大专院校师生。

《岩土工程学报》为国内外公开发行人, 双月刊, 大 16 开本, 双栏排版, 120 页, 单月 30 日出版, 每期定价 10 元, 全年定价 60 元。国际标准刊号 ISSN1000-4548, 国内统一刊号 CN32-1124/TU, 国内邮发代号 28-62, 国外发行代号 BM520, 广告许可证号: 江苏省工商行政管理局许可证 3200004020630。

热烈欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。本刊联系方式: 编辑部地址: 南京市虎踞关 34 号 (210024); 电话: 025-5829553, 5829556; E-mail: ge@njhri.edu.cn; 传真: 025-5829555; Web Site: <http://www.cegejournal.com>。