

文章编号: 1000-7598-(2005) 01-0041-05

软土地基条件下大型圆筒海岸结构稳定性计算方法

王元战, 华蕾娜, 祝振宇

(天津大学 建筑工程学院港口工程系, 天津 300072)

摘 要: 针对一工程发生破坏的实例, 对软土地基条件下大型圆筒海岸结构的设计与计算方法进行了比较分析, 并对波浪水流作用下软土特性参数的选取、泥面冲刷对结构稳定性的影响等进行了讨论。提出了反复荷载作用下软土的动力特性、水流作用下结构周围泥面的冲刷演变规律以及波浪作用下大型圆筒结构与软土的动力相互作用等, 这都是软土地基条件下大型圆筒海岸结构工程应用亟待解决的关键问题。

关 键 词: 软土地基; 波浪作用; 大型圆筒结构; 稳定性

中图分类号: U 656.31

文献标识码: A

Stability Calculation Methods of Large Cylinder Structure in Coastal Soft Clay Foundation

WANG Yuan-zhan, HUA Lei-na, ZHU Zhen-yu

(Dept. of Port & Coastal Eng., School of Civil Eng., Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: In the light of a failure project, the stability calculation methods for large cylinder structures in coastal soft clay foundation are compared, and the determination of design values of soft clay in the wave action and effects of foundation scour on the stability of large cylinder structures are discussed. It is shown that the stability calculation methods of the traditional gravity structures are unsuitable for (can not be used in) the stability analysis of the large cylinder structures in soft soil foundation. It is proposed that the dynamic behavior of soft clay in the action of circle load, the evolution of foundation in fluid scouring and dynamic interaction simulation of large cylinder structures and soft clay under the wave excitation should be the key problems to be solved in the practical application of large cylinder structures in coastal soft clay foundation.

Key words: soft clay foundation, wave action, large cylinder structure, stability

1 前 言

大型圆筒是一种可用于软土地基条件的新型港口与海岸工程结构, 已在多项大型建设项目中采用, 设计与施工积累了很多成功的经验, 但也出现了一些工程问题。国家某重大工程建设项目的大圆筒结构试验段, 在台风期间波浪水流作用下发生倾倒破坏, 使该种结构型式应用于软土地基和强风浪条件下的稳定性设计与计算方法, 成为值得进一步深入研究的问题。

目前, 大型圆筒结构稳定性计算方法主要有: 基于重力式结构稳定性验算方法^[1,2]、摩阻力方法^[1]、基于无锚板桩稳定性验算的方法^[3,4]、基于吸力式桶形基础水平承载力计算的方法^[5,6]和圆筒极限变位

控制方法^[2]等。各种计算方法的基本假设、分析思路、参数取值和计算结果等, 均存在较大差异。

本文以一实际工程发生的破坏为背景资料, 对软土地基条件下大型圆筒海岸结构设计 with 计算的各种方法进行了比较分析, 并对波浪水流作用下软土特性参数的选取、泥面冲刷对结构稳定性的影响等进行了讨论, 提出了软土地基条件下大型圆筒海岸结构工程应用亟待解决的关键问题。

2 大型圆筒结构稳定性计算方法

2.1 基于重力式结构稳定性验算的方法^[1]

采用传统重力式结构稳定性验算的思路, 计算模型如图 1 所示。波浪作用一侧土压力采用朗肯主

动土压力公式计算, 圆筒另一侧土压力计算采用以下方法: 泥面到 h_1 深度内, 按朗肯被动土压力公式计算; h_1 深度以下, 采用矩形分布, h_1 按文献[2]方法确定。由于圆筒无底, 只有部分筒内土体起抗倾作用, 取筒内土体重量的 70% 作为抗倾稳定的有效重量。由对圆筒前趾的抗倾力矩与倾覆力矩的比值, 可得抗倾覆稳定性安全系数为:

$$K_0 = \frac{GR + 0.7G_1R + M_{wv} + M_p + M_f}{M_{wh} + M_a} \quad (1)$$

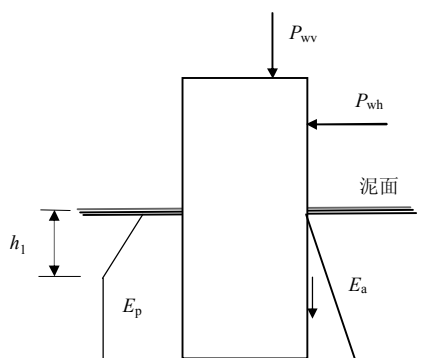


图 1 基于重力式结构稳定性分析模型
Fig. 1 Analytic model of gravity structure

式中 G 为圆筒结构重量; G_1 为圆筒内部土重量; R 为圆筒的半径; M_{wv} 为波浪垂直分量的抗倾力矩; M_p 为被动土压力的抗倾力矩; M_f 为筒壁竖向摩擦力的抗倾力矩; M_{wh} 为波浪力的倾覆力矩; M_a 为主动土压力的倾覆力矩。该方法的详细内容参见文献[1]。

2.2 摩阻力方法^[1]

摩阻力方法的计算模型与基于重力式结构稳定性验算方法相类似, 如图 2 所示。波浪作用一侧土压力采用朗肯主动土压力公式计算, 另一侧土压力计算采用以下方法: 泥面到 h_1 深度内, 按朗肯被动土压力公式计算; h_1 深度以下, 采用矩形分布, h_1 按文献[7]方法确定。该方法与方法 1 的主要区别在于: (1) 筒内土体对结构抗倾稳定性的作用不是按土体的有效重量考虑, 而是按土体对筒内壁的摩擦力考虑; (2) 假定筒体倾覆转动点不在前趾, 而是在筒底面的中点。由对圆筒底面中心的抗倾力矩与倾覆力矩的比值, 得抗倾覆稳定性安全系数为:

$$K_0 = \frac{M_{wv} + M_p + M_{af} + M_{pf} + M_i + M_{if} + M_e}{M_{wh} + M_a} \quad (2)$$

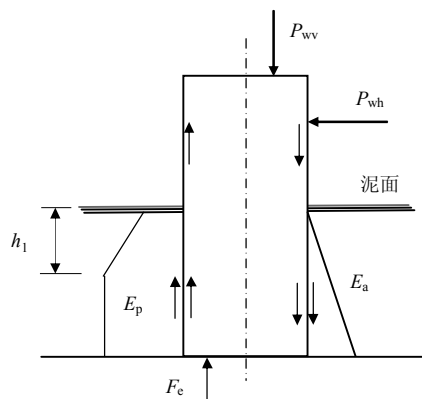


图 2 摩阻力方法分析模型
Fig.2 Analytic model of friction

式中 M_{af} 为主动土压力竖向摩擦力的抗倾力矩; M_{pf} 为被动土压力竖向摩擦力的抗倾力矩; M_i 为筒内填料对筒壁两侧土压力的差值产生的抗倾力矩; M_{if} 为筒内填料对筒壁竖向摩擦力的抗倾力矩; M_e 为圆筒底端土反力产生的抗倾力矩, 其它符号同前。摩阻力方法的详细内容参见文献[1]。

2.3 基于无锚板桩稳定性验算的方法^[3,4]

其基本思路是, 假设在外力作用下, 圆筒绕地表以下圆筒轴心上某一点 C 发生转动, 土体产生约束圆筒转动的作用力。大型圆筒结构与板桩结构计算模型的主要区别是: 由于圆筒直径很大, 除板桩计算模型考虑的土体水平抗力 p 和 R_c 外, 还考虑了筒内外土体对筒壁的竖向摩阻力 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 和土体作用于筒底的水平切力 T 以及筒底土反力 σ 对稳定性的作用, 如图 3 所示。计算中假设作用于筒体的土体水平抗力 p_y 和 R_c , 筒内、外土体对筒壁的竖向作用力 τ_1, τ_2, τ_3 和 τ_4 , 土体作用于筒底的水平切力 T 以及筒底土反力 σ , 均达到极限状态。

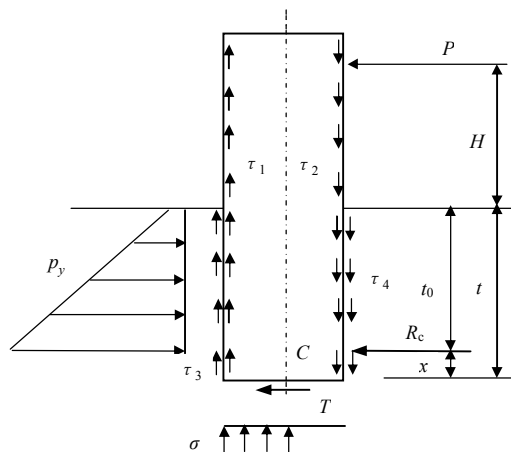


图 3 基于无锚板桩稳定性验算的分析模型
Fig.3 Analytic model of cantilever pile sheet

土体水平抗力 p_y 和 R_c 可采用郎肯被动土压力

与主动土压力的差值,也可采用美国 API^[5]建议的粘性土水平极限承载力公式

$$p_y = 3c_u + \gamma y + \frac{Jc_u}{D} y \quad (3)$$

式中 p_y 为粘性土的水平极限承载力; c_u 为粘性土不排水剪切强度; γ 为土的重度; J 为无量纲经验常数,在 0.25~0.5 之间取值; D 为筒径。但是, p_y 不大于 $9c_u$ 。

水平土抗力 R_c 可由下式计算

$$R_c = \int_{t_0}^t p_y(y) dy = \int_{t_0}^{t_0+x} p_y(y) dy \quad (4)$$

土体对筒底的水平切力可采用下式计算

$$T = \frac{1}{4} \pi D^2 c_u \quad (5)$$

对于粘性土,筒底土反力为

$$\sigma = 9c_u \quad (6)$$

筒内、外土体对筒壁的竖向作用力按摩擦力取值。

由力和力矩的平衡条件建立方程,求解方程可确定满足稳定性要求的圆筒入土深度。该方法的详细内容参见文献[4, 6]。

2.4 基于吸力式沉箱水平承载力计算的方法^[6, 7]

计算模型如图 4 所示,作用于圆筒上的力包括水平波浪力 F ,沿筒身分布的水平土反力 $P_{\max}$ 和筒底部的摩擦力 P_{end} 。对于粘性土地基,位于深度 z 处单位面积筒壁上的土体极限抗力用下式计算:

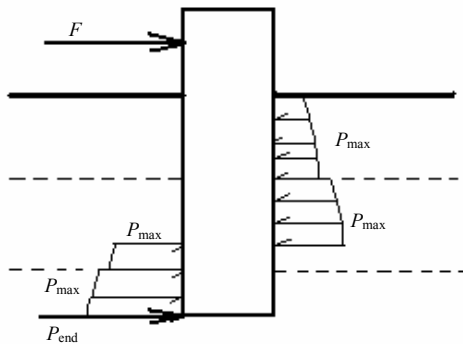


图 4 基于吸力式沉箱水平承载力的分析模型
Fig. Analytic model of suction caisson

$$P_{\max} = N_p c_u + \sigma_z \quad (7)$$

式中 σ_z 为作用点处的有效垂直土压力; N_p 为无量纲横向承载因数; c_u 为粘性土不排水剪切强度。

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,有如下经验关系

$$N_p = N_1 - N_2 \exp\left(-\frac{\xi z}{D}\right) \quad (8)$$

式中 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,按光滑桩考虑,根据塑性

极限分析,取 $N_1=9$, $N_2=7$, ξ 由下式计算:

$$\begin{aligned} \xi &= 0.25 + 0.05\lambda & \lambda < 6 \\ \xi &= 0.55 & \lambda \geq 6 \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\lambda = s_{u0} / s_{u1} D$

筒底部的摩擦力为:

$$P_{\text{end}} = c_u A_{\text{end}} \quad (10)$$

式中 A_{end} 为圆筒端部外径包围的圆的面积。

根据力和力矩平衡条件可求得筒体的极限承载力。

2.5 极限变位控制方法^[8]

极限变位控制方法是建立在土体-圆筒结构系统的离散数值模型的基础上。对于土体与圆筒的相互作用,借鉴了基床系数法和 m 法的物理概念,由离散弹簧来模拟,利用 ANSYS 软件提供的弹簧单元来实现这一计算模型。该方法的基本点是变位值的控制计算,变位值包括水平位移、垂直位移和转角位移。参照前苏联 1986 年出版的《有关大直径薄壳码头建筑物计算与设计的方法建议》,水平位移、垂直位移的控制值分别取为 10 cm 和 20 cm,转角位移的控制值取 0.3°。极限变位控制方法的详细内容参见文献[2]。

在采用上述极限变位控制方法判别结构稳定性的同时,还采用数值分析所得出的土抗力计算结果,通过常规重力式结构抗倾、抗滑模式进行稳定性验证。

3 工程实例分析

某一大型导堤工程采用了 4 个连续布置的大型圆筒结构作为试验段,结构设计断面如图 5 所示。在一次较大台风后,4 个圆筒全部发生倾覆破坏。

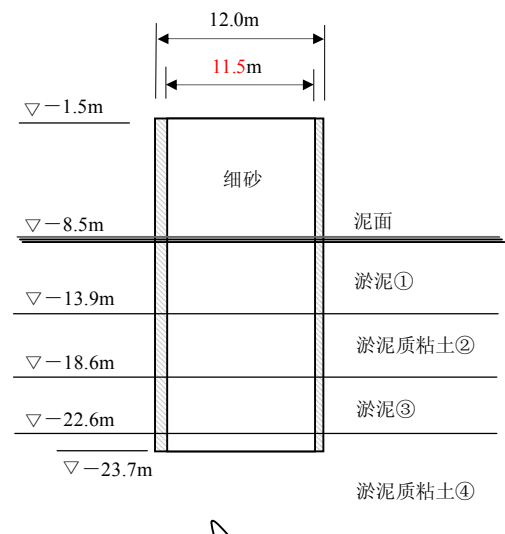


图 5 圆筒结构设计断面
Fig.5 Design section of cylinder structure

3.1 计算条件

计算波浪条件: 采用设计高水位和台风期间的波浪条件, 相应的波浪要素在表 1 中给出。

表 1 设计波浪要素

Tab.1 Design wave parameters

波浪条件	水位 /m	波高 /m	周期 /s
设计高水位	4.13	7.78	8.01
台风期间	3.10	7.37	7.40

土层参数: 地基各土层的物理力学性质指标在表 2 中给出。

表 2 地基土层相关物理力学性质指标

Tab.2 Relevant parameters of foundation soils

土层 编号	天然重度 γ /kN·m ³	不排水剪 c_u /kPa	固结快剪		快 剪	
			φ / (°)	c /kPa	φ / (°)	c /kPa
①	16.0	13.3	8.0	8.0	4.5	7.0
②	17.1	16.7	16.0	7.0	10.0	9.0
③	16.7	22.0	9.0	9.0	6.5	12.0
④	16.9	24.0	11.5	12.0	7.0	14.0

3.2 不同计算方法的比较

用前述不同方法, 对图 5 所示结构断面在设计波浪条件和台风期间波浪条件下的安全系数进行了计算。表 3 给出了计算结果。

表 3 不同方法计算的安全系数

Tab.3 Safety factors for different calculation methods

计算方法	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 5
安全系数					
设计高水位	1.26	0.70	0.76	0.62	1.90
台风期间	1.50	0.76	0.71	0.62	1.46

注: 表 3 给出的安全系数是在土性指标没有作动力折减情况下的计算结果。

由表 3 可见, 各种计算方法的计算结果存在较大差别。方法 1 和方法 5 的计算结果表明, 图 2 所示结构断面在设计波浪条件和台风期间波浪条件下是安全的; 而方法 2~4 的计算结果表明结构是不安全的。而实际工程状况是, 在台风期间波浪条件下, 圆筒发生了倾覆破坏, 表明依据方法 5 所作的圆筒结构原设计方案是不安全的。

此外, 虽然台风期间的波浪荷载略小于设计高水位时的荷载, 但方法 3 计算的台风期间的安全系数却小于设计高水位的安全系数。这是由于考虑到台风出现时圆筒沉入土中的时间较短 (约 3 个月), 方法 3 在台风期间稳定性验算时采用了土的快剪指标, 设计高水位稳定性验算时采用了土的固结快剪指标。

3.3 土体参数取值的影响

软土在反复荷载 (如波浪等) 作用下的土性指标会有一定程度的降低, 方法 1 和方法 2^[1]建议的土性指标动力折减系数为 0.8, 方法 3^[4]建议取 0.6, 方法 4^[6]建议取 0.7。

将原设计方案的筒底标高修改为负 31.7m, 即入土深度由原设计方案的 15.2m 增至 23.2m, 采用方法 3 计算了不同土性指标折减系数下结构的安全系数, 如表 4 所示。

表 4 不同土性指标折减系数下的安全系数

Tab.3 Safety factors for different soil parameters

折减系数	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
安全系数	0.65	0.73	0.86	0.98	1.10	1.30

由表 4 可见, 土性指标降低对结构稳定性有很大影响。

3.4 泥面冲刷的影响

圆筒倾覆破坏后进行了现场勘测, 圆筒所在区域泥面出现了局部冲刷, 平均冲刷深度约为 1.5 m。在此对修改后的结构方案 (筒底标高为负 31.7 m), 采用方法 3 计算了不同冲刷深度假设下结构的安全系数, 如表 5 所示。

表 5 不同冲刷深度下的安全系数

Tab.3 Safety factors for different scouring depths

冲刷深度/m	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
安全系数	1.30	1.18	1.14	1.09	1.05	0.97

由表 5 可见, 泥面冲刷对结构稳定性有较大影响。

4 结 语

该工程原结构断面采用方法 5 设计, 即通过控制结构极限变位的方法进行稳定性计算, 由此确定的筒底标高为负 23.7 m。在一次较大台风后, 4 个圆筒全部发生倾覆破坏, 表明原设计方案的结构断面是不稳定的。通过不同方法、不同土性指标折减系数和不同泥面冲刷深度假设下的计算, 得出以下几点结论:

(1) 采用方法 1 和方法 5, 即重力式结构稳定性验算方法和极限变位控制方法的验算结果表明, 原设计方案在设计高水位和台风期间波浪条件下, 均是稳定的。这显然与工程实际不符, 说明重力式结构稳定性验算方法和极限变位控制方法不适用于沉入软土中的大型圆筒结构的稳定性验算。其主要原因是, 重力式结构稳定性验算的假设破坏模式与

沉入软土中的大型圆筒结构的实际工作机理不符;关于极限变位控制方法,目前软土在反复荷载作用下的应力-应变本构关系模型尚不能准确确定,在此情况下,不可能计算出结构准确的变位,因而还不具备极限变位控制方法所需的基本条件。

(2)在反复荷载(如波浪等)作用下,软土的土性指标会有一定程度的降低。方法2~4注意到了这一点,在对该工程大型圆筒结构稳定性进行验算中,建议的土性指标动力折减系数分别为0.8、0.6和0.7。由实际计算结果可见,土性指标降低对结构的稳定性有很大影响。因此,关于软土在反复荷载作用下土性指标的变化和工程设计取值等,是有待深入研究的问题。

(3)在该工程原设计方案中,考虑到了泥面可能出现的冲刷问题,采用了砂肋软体排、护底砂袋、护底块石和护底栅栏板等措施。圆筒倾覆破坏后进行的现场勘测表明,圆筒所在区域泥面出现了平均冲刷深度约为1.5 m的局部冲刷。是圆筒倾覆后破坏了护底措施而导致泥面冲刷,还是冲刷后由于埋深不够而导致圆筒倾覆,还是一个不十分明确的问题。实际计算表明,泥面冲刷对结构稳定性有较大影响。关于水流作用下筒底周围泥面的冲刷演变机理及防止冲刷的有效措施,也是值得研究的问题。

(4)波浪是海岸工程的主要作用荷载之一,且是一动力作用。在较大波浪连续作用下,软土会进入塑性状态,产生累计变形,大型圆筒结构的破坏可能正是这种累计变形的结果。目前,大型圆筒结构的设计与计算均采用静力方法,不能模拟结构累计变形过程的性质。因此,在反复荷载作用下的软土动力本构关系模型,以及考虑软土塑性产生累计变形性质的大型圆筒结构动力计算方法,也是有待研究的课题。

参 考 文 献

- [4] 中交第一航务工程勘察设计院. 长江口深水航道治理工程大圆筒结构试验段工程“威马逊”台风后失稳的验算分析报告[R]. 上海: 长江口航道建设有限公司, 2002.
- [5] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [6] 中交第四航务工程勘察设计院. 长江口深水航道治理工程大圆筒结构试验段工程“威马逊”台风后失稳调查分析报告[R]. 上海: 长江口航道建设有限公司, 2002.
- [7] 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.
- [8] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning I, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms[M]. API Publishing Services: Washington, D. C, 2000.
- [9] 天津大学港口工程系. 长江口深水航道治理工程大圆筒结构试验段工程稳定性验算及失稳分析报告[R]. 上海: 长江口航道建设有限公司, 2002.
- [10] 吴梦喜, 王梅, 楼志刚. 吸力式沉箱的水平极限承载力计算[J]. 中国海洋平台, 2001, (4): 12—15.
- [11] 中国科学院力学研究所. 长江口深水航道治理工程大圆筒结构试验段工程大圆筒结构稳定性验算及分析报告[R]. 上海: 长江口航道建设有限公司, 2002.
- [4] 严春风, 刘东燕, 张建辉等. 1999. 岩土工程可靠度关于强度参数分布函数概型的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报. 18(1): 36—39.
- [5] 孙万禾, 黄传志, 叶国良等. 土的抗剪强度指标统计方法的分析[J]. 港口工程. 1996. (3): 5—16.
- [6] Gb50199-94. 水利水电工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [7] 高大钊, 魏道猷. 上海软土工程性质的概率统计特征[A]. 第四届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1986.
- [8] 范明桥. 粘性填筑土强度指标 ϕ 、 c 的概率特性[J]. 岩土工程学报. 2000. 19(4): 100—104.
- [9] 谭忠盛, 高波, 关宝树. 隧道围岩抗剪强度指标 c , $\tan\phi$ 的概率特征. 岩土工程学报. 1999, 21(6): 760—762.
- [10] 倪万魁, 韩启龙. 黄土土性参数的统计分析[J]. 工程地质学报. 2001, 9(1): 62—67.
- [11] Duncan J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4): 307—316.

上接第40页