

文章编号:1671-8879(2015)01-0091-07

负压贯入式多仓筒式结构施工阶段沉降

张效忠^{1,2}, 姚文娟², 程泽坤³, 李 武³

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 2. 衢州学院 建筑工程学院, 浙江 衢州 324000;
3. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘 要:针对多仓筒式结构施工阶段沉降控制较难的问题,对多仓筒式结构施工沉降阶段仓内外的土体压力对筒式结构沉降的影响进行理论分析。将筒式结构沉降分为仓内土体沉降和结构下部地基沉降两部分,并针对这两部分沉降分别建立了对应的理论计算模型:一个是仓内土体压力计算模型,应用该模型分析了多仓筒式结构施工阶段仓内土体压力的分布以及仓内土体的沉降;另一个是叠加链杆法地基沉降模型,应用该模型对不均匀受力地基沉降进行计算分析。研究表明:多仓筒式结构的沉降与仓内外土体压力的分布状况关系密切;在同一荷载工况下,理论模型的计算结果与数值模拟、模型试验结果比较吻合,证明所建立的多仓筒式结构沉降计算模型具有较高的计算精度,可以用来精确计算多仓筒式结构的沉降计算。研究结果为多仓筒式结构施工阶段的沉降控制提供了理论基础,并为多仓筒式结构的设计和施工提供了理论参考。

关键词:土木工程;多仓筒式结构;施工阶段;计算模型;沉降分析

中图分类号: TU48

文献标志码: A

Settlement analysis of multi-barrel structure warehouse using penetration of negative pressure method in construction stage

ZHANG Xiao-zhong^{1,2}, YAO Wen-juan², CHENG Ze-kun³, LI Wu³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. School of Architectural Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, Zhejiang, China; 3. CCCC Third Harbor Consultants Co Ltd, Shanghai 200032, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficult control of multi-position cylinder's settlement in construction stage, this paper analyzed theoretically the pressure of soil inside and outside positions to find out its affection to the settlement of multi-position cylinder in construction stage. The settlement of soil in construction stage was divided into two parts. One was the settlement of soil in cabins, and the other was the foundation settlement. Two theoretical models for the two parts of settlement were established. One is a computational model of the soil pressure in the cabins of the structure, which was used to analyze the settlement and pressure distribution of the soil in the cabins; the other is a non-uniform foundational settlement model of the multi-position cylinder by using improved superimposed bar method, which was used to analyzed uneven settlement of foundation. The calculated results of the models show that the settlement of soil was closely

收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11072143);浙江省教育厅基金项目(Y201223039);浙江省住房和城乡建设厅建设科研和推广项目(2013ZJ141)

作者简介:张效忠(1978-),男,山东菏泽人,衢州学院讲师,上海大学工学博士,E-mail:zhangxiaozhong@126.com。

related to the distribution of soil pressure inside and outside of positions. In the same load conditions, the calculation results of theoretical models were identical to the results of numerical calculation and experimental data. The models established in this paper were verified to be correct and have higher accuracy. The models can be used for calculating the settlement of multi-position cylinder. The research results in this paper provided theoretical reference for settlement control and the design of multi-position structure. 2 tabs, 11 figs, 16 refs.

Key words: civil engineering; multi-position cylinder; construction stage; computing model; settlement analysis

0 引言

负压贯入式多仓筒式结构是一种近年发展起来的适合深海建筑的新型港工结构,可直接插入地基土不需软基处理,在淤泥质软土地基上应用具有不可替代的优势。多仓筒式结构可以看做是一种特殊的薄壁结构,这种结构在施工阶段下沉时和土体相互作用,而在使用阶段又和仓内土体一起成为地下构筑物的地下基础组成部分。从结构制造到施工,再到竣工投入使用的不同阶段,多仓筒式结构仓内外土体的受力和沉降情况都在不断变化。在施工阶段该结构的沉降控制成为施工的难点和关键,所以,多仓筒式结构的沉降计算应按从施工到使用的各阶段分别依序进行,以保证结构能满足强度、刚度和稳定性的要求。尤其是多仓筒式结构施工阶段受力复杂,基底受力不均匀,需要深入的研究仓内土体的受力情况和结构沉降计算的新方法。

国内外不少学者对单圆筒结构沉降进行了研究,提出了不同的计算方法。周在中等根据土的内摩擦角将筒内土压力分为 3 个区进行计算^[1-3];刘建起等在模型试验的基础上将筒内填料从上到下分成 3 个区进行计算,并给出了分区高度的经验公式,从水平和竖直作用荷载下分析了筒内土体的压力^[4-6];列瓦切夫等应用主动土压力和仓储压力杨森公式对筒内填料压力进行了近似计算^[7-8];竺存宏将地基土作为无底筒内、外土压力的传力介质建立了填料压力的计算模型,并根据试验数据给出了压力计算的公式^[9]。以上学者在划分区域时仅考虑了土体的内外摩擦角和筒径,但是实际因素还应包括盖板顶端作用荷载、土体重度和压缩性、地基变形系数和地基反力等。在确定土压力方法时,主要依靠试验提出经验公式,缺乏必要的理论依据。姚文娟等对大圆筒结构的基底土体建立弹塑性力学模型进行了研究,从理论上对筒底的土体进行了详细的理论分析^[10-14];王元战等给出了大圆筒结构竖向荷载下

填料压力计算解析解,但是只把筒内填料分为主动区和被动区 2 个区进行计算^[15-16]。

多仓筒式结构是一种稳定性能优于单筒结构的新型结构,由模型试验结果显示^[6],施工阶段在竖向荷载作用下该结构仓内的土压力分为主动区、过渡区和被动区 3 个区。为了精确计算多仓筒式结构的沉降,本文以试验结果为基础,建立了多仓筒式结构在施工阶段的三区仓内土压力计算模型,应用本模型对仓内土体的沉降进行计算分析。同时,建立了多仓筒式结构非均匀受力地基叠加链杆法地基沉降模型,对不均匀受力地基沉降进行计算分析。最后通过对某工况下多仓筒式结构的沉降计算验证计算模型的正确性。

1 施工阶段仓内土压力计算模型

多仓筒式结构见下页图 1,图 1(a)平面图中分了 9 个仓。受力模型图见下页图 2, P 为外加施工荷载,在圆筒周围均匀安装了 12 组土压力传感器,2 个传感器的圆周角 $\alpha=30^\circ$ 。施工阶段桶体所受荷载为竖直荷载,如下页图 3 所示的多仓筒式结构防浪堤的底部结构内土体在竖直荷载作用下的计算模型,筒内土体划分为主动区、过渡区和被动区 3 个区,主动区的高度为 h_0 ,过渡区的高度为 h_1-h_0 ,被动区的高度为 $H-h_1$ 。主动区从 $y=0$ 到 $y=h_0$,本区域仓内土体相对于桶壁向下运动;被动区从 $y=h_1$ 到 $y=H$,本区域仓内土体相对于桶壁向上运动。在 $h_0\leq y\leq h_1$ 的过渡区内,仓内土体和桶壁不发生相对运动。

假设底部桶体高为 H ,桶内土体的内截面面积为 F ,桶壁的截面积为 F' ,仓内土体和桶壁接触的周长为 u ,桶内土体的重度为 γ ,桶壁的重度为 γ' ,土体的压缩模量为 E_s ,由于底部大圆桶上有一盖板,故假设盖板及以上的重力均匀作用在内填料和大圆桶壁上,均布荷载为 q ,作用于填料内的地基反力为 σ ,桶壁下的地基反力为 σ' ,桶壁的侧压力系数取 K ,桶壁与土体的摩擦因数取 f ,

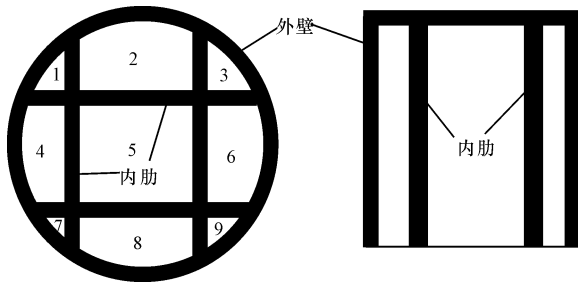


图 1 多仓筒式结构

Fig. 1 Multi-position cylinder structure

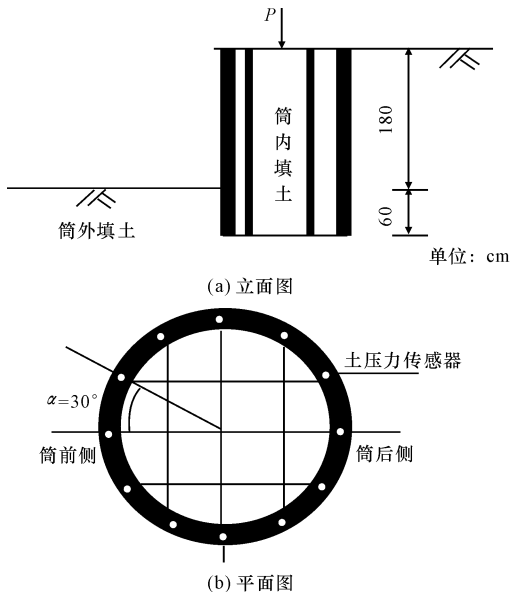


图 2 试验模型

Fig. 2 Experimental model

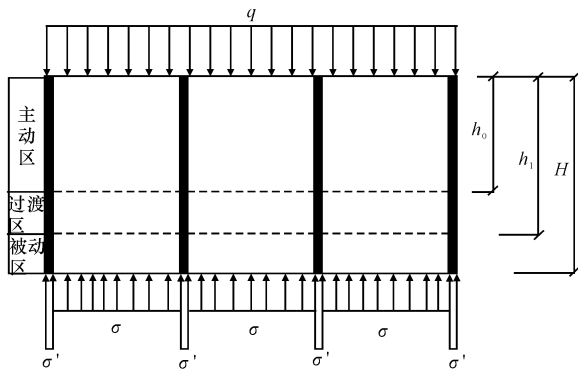


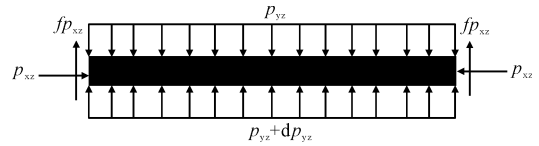
图 3 施工阶段仓内土体压力计算模型

Fig. 3 Calculation models of soil in cabin for construction stage

圆桶底部地基变形系数为 k_s 。在桶内任意 y 处取一微分薄单元,如图 4~图 5、下页图 6 所示,微分单元应满足以下假定^[7]:

(1)在竖向荷载作用下,仓内土体微分薄单元截面保持水平;

(2)在任意深度的微分单元上的竖向压力在截面上均匀分布。

图 4 主动区土压力计算微分单元($y \leq h_0$)Fig. 4 Differential calculation unit for soil pressure of active area ($y \leq h_0$)

1.1 主动区仓内土压力

在主动区仓内土体微分单元的受力如图 4 所示,作用其上的力有:单元顶面的垂直压力 p_{yz} ,底面的垂直反力 $p_{yz} + dp_{yz}$,筒壁对填料的摩擦力 $p_{xz} f = K f p_{yz}$,其中 p_{xz} 为水平土压力微分单元的自重 γ 。由力的平衡得

$$\frac{dp_{yz}}{dy} = \gamma - K F \frac{u}{F} p_{yz} \quad (1)$$

式(1)满足边界条件: $y = 0, p_{yz} = q$,解微分方程得

$$p_{yz} = \frac{\gamma F}{u K f} (1 - e^{-\frac{u K f}{F} y}) + q e^{-\frac{u K f}{F} y} \quad (2)$$

筒壁的摩擦力为

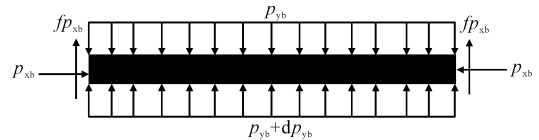
$$f p_{xz} = \frac{\gamma F}{u} (1 - e^{-\frac{u K f}{F} y}) + K f q e^{-\frac{u K f}{F} y} \quad (3)$$

式中:侧压力系数 $K = 1 - \sin(\varphi)$, φ 为内摩擦角;填料和筒壁间的摩擦因数 $f = \tan(\delta)$; δ 为填料和舱壁之间的内摩擦角标准值,取 $\delta = \frac{2}{3} \varphi$

1.2 被动区仓内土压力

被动区仓内土体的受力如图 5 所示,计算和主动区一样,平衡方程为

$$\frac{dp_{yb}}{dy} = \gamma + K f \frac{u}{F} p_{yb} \quad (4)$$

图 5 被动区土压力计算微分单元($y \geq h_1$)Fig. 5 Differential calculation unit for soil pressure of passive area ($y \geq h_1$)

式(4)满足边界条件: $y = H$,水平土压力 $p_{yb} = \sigma$,解微分方程得

$$p_{yb} = -\frac{\gamma F}{u K f} (1 - e^{-\frac{u K f}{F} (H-y)}) + \sigma e^{-\frac{u K f}{F} (H-y)} \quad (5)$$

筒壁的摩擦力为

$$f p_{xb} = -\frac{\gamma F}{u} (1 - e^{-\frac{u K f}{F} (H-y)}) + K f \sigma e^{-\frac{u K f}{F} (H-y)} \quad (6)$$

1.3 过渡区仓内土压力

过渡区的仓内土体受力如图 6 所示,其中 p_{yg} 为

竖向压力, p_{yg} 为水平土压力。计算和主动区一样, 平衡方程为

$$\frac{dp_{yg}}{dy} = \gamma \quad (7)$$

积分得

$$p_{yg} = \gamma y + A \quad (8)$$

式中: A 为常数。

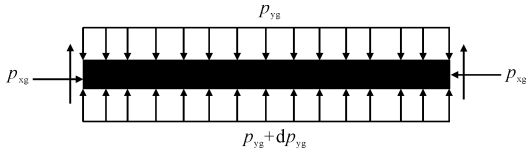


图 6 过渡区土压力计算微分单元 ($h_0 \leq y \leq h_1$)

Fig. 6 Differential calculation unit for soil pressure of transition area ($h_0 \leq y \leq h_1$)

1.4 三区界面的确定

在主动区和过渡区交界面上有 $p_{yz} = p_{yg}$, 由式(2)和式(8)可得

$$\frac{\gamma F}{uKf} (1 - e^{-\frac{uKf}{F}h_0}) + qe^{-\frac{uKf}{F}h_0} = \gamma h_0 + A \quad (9)$$

在被动区和过渡区交界面上有 $p_{yb} = p_{yg}$, 由式(5)和式(8)可得

$$-\frac{\gamma F}{uKf} (1 - e^{-\frac{uKf}{F}(H-h_1)}) + \sigma e^{-\frac{uKf}{F}(H-h_1)} = \gamma h_1 + A \quad (10)$$

式(10)、式(9)合并整理可得

$$-\frac{2\gamma F}{uKf} + (\frac{\gamma F}{uKf} + \sigma) e^{-\frac{uKf}{F}(H-h_1)} + (\frac{\gamma F}{uKf} - q) e^{-\frac{uKf}{F}h_0} - \gamma(h_1 - h_0) = 0 \quad (11)$$

由土体在竖直方向的力平衡可得

$$F\sigma - Fq + \int_0^{h_0} p_{x1} f u dy - \int_{h_1}^H p_{x2} f u dy - \gamma HF = 0 \quad (12)$$

式中: γ 为取有效重度。

把式(3)和式(6)带入式(12)整理得

$$-\frac{2\gamma F^2}{uKf} + \gamma F(h_0 - h_1) + (\frac{\gamma F^2}{uKf} - Fq) e^{-\frac{uKf}{F}h_0} + (\frac{\gamma F^2}{uKf} + F\sigma) e^{-\frac{uKf}{F}(H-h_1)} = 0 \quad (13)$$

联立式(11)和式(13)可解得 h_0 和 h_1 。

1.5 地基反力的确定

由于筒底为软土, 根据文克尔地基模型仓内土体底部和筒壁底部的地基沉降 S, S' 分别为

$$S = \frac{\sigma}{k_s} \quad (14)$$

$$S' = \frac{\sigma'}{k_s} \quad (15)$$

根据变形协调条件, 被动区的压缩量应为筒壁底部地基沉降和仓内土体底部地基沉降之差。即

$$\Delta = S' - S = \frac{\sigma'}{k_s} - \frac{\sigma}{k_s} \quad (16)$$

把仓内土体和圆筒看做一个整体, 由力的平衡条件得

$$\sigma' = q + \gamma' H + \frac{F}{F'} (q + \gamma H) - \frac{F}{F'} \sigma \quad (17)$$

由式(16)和式(17)得

$$\sigma = q + \frac{H}{F + F'} (F' \gamma' + F \gamma) - \frac{F'}{F + F'} k_s \Delta \quad (18)$$

被动区的压缩量可以由土力学公式进行计算

$$\Delta = \frac{1}{E_s} \int_{h_1}^H p_{yb}(y) dy = \frac{1}{E_s} \left[\frac{F}{uKf} (\frac{\gamma F}{uKf} + \sigma) (1 - e^{-\frac{uKf}{F}(H-h_1)}) - \frac{\gamma F}{uKf} (H - h_1) \right] \quad (19)$$

由式(11)、式(13)、式(18)、式(19)可以计算出仓内土地基反力和筒壁的地基反力。

2 叠加链杆法地基沉降模型

由广义的胡克定律可知, 地基受荷后在其内任一点的微分土体竖向应变分量为

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_0} - \frac{\mu_0}{E_0} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (20)$$

式(20)可以改写为

$$\epsilon_z = (1 + \mu_0) \frac{\sigma_z}{E_0} - \frac{\mu_0}{E_0} \Theta \quad (21)$$

式中: ϵ_z 为土体竖向应变分量; σ_z 为土体竖向法向应力分量; σ_x, σ_y 均为土体水平法向应力分量; Θ 为土体三向法向应力分量之和, $\Theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$; E_0, μ_0 分别为地基土变形模量和泊松比。

假设多仓筒式结构宽度为 b , 长度为无限长的条形结构, 如图 7 所示。把结构在长度方向上划分等长度为 c 的链杆, 在任意一点 k 下的沉降可由改进的链杆法进行计算。在计算 k 点沉降时考虑 $i = k$ 和 $i \neq k$ 这 2 种情况。

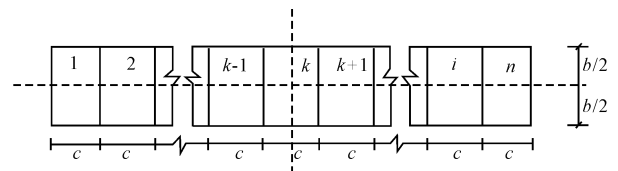


图 7 链杆法计算模型

Fig. 7 Computation model of superimposed bar method

(1) 当 $i = k$ 时

设 $\eta_{bk,j}$ 表示地基在矩形均布荷载 $1/bc$ 作用下, 在其承载面积中心点下第 j 层土的压缩量(见下页图 8), 则对式(21)积分, 就得到

$$\eta_{kk,j} = \int_{z_{j-1}}^{z_j} \frac{1}{E_0} [(1+\mu_0)\sigma_z - \mu_0\Theta] dz \quad (22)$$

同时,地基在矩形均布荷载 $1/bc$ 作用下,在其承载面积中心点下任一深度处

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{n}{m\sqrt{1+m^2+n^2}}\right) + \frac{mn(1+m^2+n^2)}{(m^2+n^2)(1+m^2)\sqrt{1+m^2+n^2}} \right] \frac{1}{bc} \quad (23)$$

$$\Theta = \frac{4}{\pi} (1+\mu_0) \left[\arctan\left(\frac{n}{m\sqrt{1+m^2+n^2}}\right) \right] \frac{1}{bc} \quad (24)$$

式中: m 为所考虑点深度与承载面积短边之比; n 为承载面积长边与短边之比; $1/bc$ 为作用于矩形面积 bc 上的均布荷载。

将式(23)和式(24)代入式(22),经计算整理后,得第 j 层的压缩系数

$$\eta_{kk,j} = \frac{1}{c} \frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{E_{0j}} \quad b \leq c \quad (25)$$

$$\eta_{kk,j} = \frac{1}{b} \frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{E_{0j}} \quad b > c \quad (26)$$

式中: E_{0j} 为第 j 层土的变形模量; Ω_j 为第 j 层土的量纲一变量, $\Omega_j = f_1(n, m_j, \mu_{0j})$, 其值可查表获得, 其中, 当 $b \leq c$ 时, $n = \frac{c}{b}$, $m_j = \frac{2z_j}{b}$; 当 $b > c$ 时, $n = \frac{b}{c}$, $m_j = \frac{2z_j}{c}$; μ_{0j} 为第 j 层土泊松比。

将压缩层范围内各层土的压缩量总和起来, 可得到 $i=k$ 时地基沉降系数的计算公式

$$\eta_{kk} = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{\lambda} \frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{E_{0j}} \quad b \leq c \quad (27)$$

$$\eta_{kk} = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^{\lambda} \frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{E_{0j}} \quad b > c \quad (28)$$

式中: λ 为压缩层范围内压缩性质不同的土层数目。

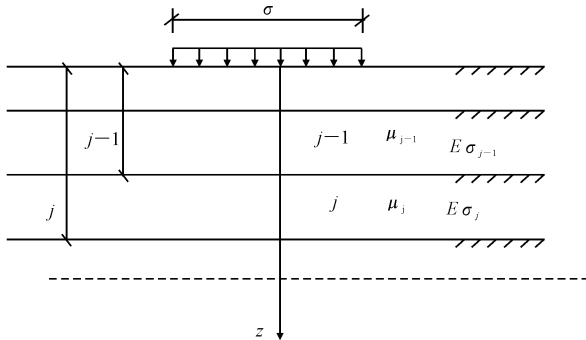


图 8 第 j 层土压缩计算模型

Fig. 8 Compression computational model of j -layer soil

(2) 当 $i \neq k$ 时

根据式(21)和叠加原理, 可得 $i \neq k$ 时地基沉降系数计算公式(地基比较宽时), 计算示意图见图 7 和图 8 所示。

$$\eta_{ki} = \frac{1}{bc} \sum_{j=1}^{\lambda} \frac{F_j - F_{j-1}}{E_{0j}} \quad (29)$$

式中: $F_j = a_1\Omega_{1j} - a_2\Omega_{2j}$; $a_1 = [(|k-i|) + 0.5]c$; $a_2 = [(|k-i|) - 0.5]c$; $\Omega_{1j} = f_1(n_1, m_{1j}, \mu_{0j})$; $\Omega_{2j} = f_2(n_2, m_{2j}, \mu_{0j})$, 可以查表获得。

其中

$$n_1 = \frac{b}{2a_1}, m_{1j} = \frac{z_j}{a_1}; n_2 = \frac{b}{2a_2}, m_{2j} = \frac{z_j}{a_2}$$

这样, 根据式(27)~式(29)就可以计算出任意一点 k 下的沉降。

3 沉降计算

地基的沉降包括两部分, 一部分是大圆筒内部填料的压缩值 S_1 , 另一部分是大圆筒基底的地基沉降 S_2 。压缩值 S_1 采用施工阶段仓内土压力计算模型, 地基沉降 S_2 采用叠加链杆法地基沉降模型。计算流程如图 9 所示。

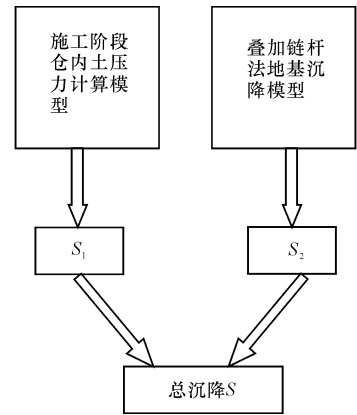


图 9 沉降计算流程

Fig. 9 Settlement calculation

3.1 压缩值 S_1 计算

压缩计算厚度采用仓内土体被动区厚度, 各层的应力计算采用施工阶段仓内土压力计算模型。

压缩量可以应用分层总和法压缩公式进行计算

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_i}{E_{si}} h_i \quad (30)$$

式中: $\bar{\sigma}_i$ 为第 i 层土层中的平均应力; h_i 为第 i 层土的厚度; E_{si} 为第 i 层土的压缩模量。

3.2 地基沉降 S_2 计算

计算深度 Z_n 采用规范中的公式进行计算

$$Z_n = b[2.5 - 0.4 \ln(b)] \quad (31)$$

式中: b 为基底宽度(m)。

地基沉降采用叠加链杆法地基沉降模型进行计算

$$S_2 = S_i = \sum \eta_{ij} \sigma_z b \quad (32)$$

式中: S_i 为 i 点处的沉降; $\sum \eta_{ij}$ 为 i 点沉降系数

之和。
总沉降为

$$S=S_1+S_2 \tag{33}$$

4 计算验证

4.1 计算工况

根据相关的设计资料,拟定了以下工况进行计算分析:下桶全部沉入泥中,泥面高程 $\nabla 0$,筒底高程 $\nabla -2.4$ 。筒前是极端高水位: $\nabla 6.46\text{ m}$ 。桶的结构为钢筋混凝土结构。波浪荷载如表 1 所示。表 1 中 $H_1\%$ 为浪高, T 为波浪周期。计算过程中参数取值如下:筒底的截面面积 $A=514\text{ m}^2$,底部大圆筒的截面积 $F'=61.04\text{ m}^2$,仓内土体的截面积 $F=452.9\text{ m}^2$,底部大圆筒高度 $H=9.18\text{ m}$,大圆筒底部土体的地基变形系数 $k_s=1.5\times 10^4\text{ kN/m}^3$,压缩模量 $E_s=1.67\text{ MPa}$,土体重度 $\gamma=15.8\text{ kN/m}^3$,筒壁的重度 $\gamma'=15.8\text{ kN/m}^3$ 。

表 1 某工况下设计波浪荷载

| Tab. 1 A designed wave load under certaion working conditions | | | | |
|---|------------|--------------|------|----|
| 设计水位/m | $H_1\%$ /m | T/s | 波长/m | 方向 |
| 极端高水位 6.46 | 6.62 | 8.66 | 84.1 | 东南 |
| 极端低水位 -0.58 | 2.72 | 8.66 | 57.0 | 东南 |

4.2 沉降计算

在本工况下最终沉降采用本文计算方法、数值计算方法以及经验公式分别进行计算,计算结果和试验数据进行比较。其中数值计算应用有限元计算软件 ABAQUS 有限元软件为平台,建立多仓筒式结构的三维弹塑性有限元数值模型在本文工况下进行了数值模拟计算。经验公式采用文献[9]中的计算经验公式进行计算。试验数据采用文献[6]中实测数据。具体的计算和比较结果见表 2、图 10。

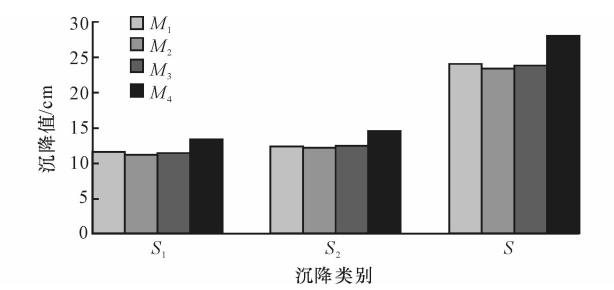


图 10 多仓筒式结构沉降

Fig. 10 Multi-position cylinder settlement

注: S_1 -仓内土体沉降; S_2 -地基沉降; S -总沉降; M_1 -本文计算方法; M_2 -数值计算; M_3 -模型试验; M_4 -经验公式。

由图 10 可知,本文采用的计算方法和数值计算方法以及模型试验结果比较吻合,证明本文所用方法的正确性。经验公式比其他计算方法的沉降计算值

表 2 结构沉降计算结果

Tab. 2 Structure settlement calculation results

| 类别 | 本文计算方法 | 数值计算 | 模型试验 | 经验公式 |
|------------|--------|------|------|------|
| 仓内土体沉降值/cm | 11.7 | 11.3 | 11.5 | 13.4 |
| 基底土体沉降值/cm | 12.4 | 12.3 | 12.5 | 14.5 |
| 总沉降/cm | 24.1 | 23.6 | 24.0 | 27.9 |

都偏大很多,说明单筒结构的沉降计算经验公式不适合多仓筒式结构的沉降计算,也说明多仓筒式结构比单筒结构具有很大的优势。从图 10 还可以看出,不论哪种计算方法,大圆筒内部填料的压缩值 S_1 和大圆筒基底的地基沉降 S_2 相差不是很大,说明在计算地基沉降过程中,仓内土体压缩值不能忽略。

4.3 沉降过程分析

施工过程中随着荷载(P)的增加,多仓筒式结构的沉降(S)变化趋势如图 11 所示。由 P - S 曲线可知,多仓筒式结构的沉降随着荷载的增加而增加,在荷载达到 1 450 kN 时基本达到最大值。不同的计算方法比较可知,本文计算方法和数值模拟计算方法以及结构试验的结果比较吻合,证明本文所采用计算方法的正确性。经验公式计算方法和其他计算方法相比计算结果偏大,说明经验公式不适合多仓筒式结构的沉降计算。特别是在小荷载作用下(0~400 kN),变化趋势都不相同,更说明了多仓筒式结构和单一的大圆筒结构相比具有很大的优越性。

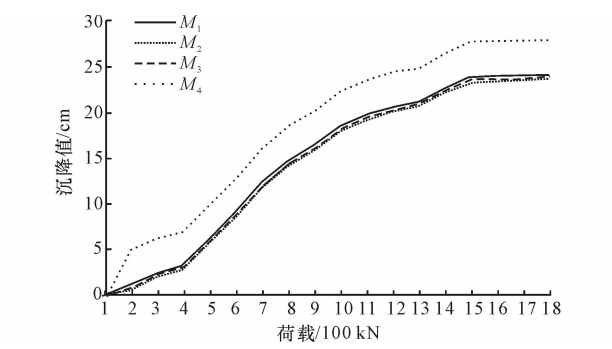


图 11 不同计算方法的荷载-沉降曲线

Fig. 11 Load-settlement curve of different calculation methods

5 结 语

(1)本文建立的多仓筒式结构仓内土体压力计算模型具有较高的计算精度,可以应用本模型对结构仓内土体压力进行计算分析,并能精确计算出结构仓内土体的沉降计算。

(2)本文建立的多仓筒式结构非均匀受力地基叠加链杆法地基沉降模型具有较高的计算精度,能够适应多仓结构的沉降计算。

(3)多仓筒式结构比单筒结构具有较好的工作

性,具有沉降量小的优势,更适宜于在软土区应用和推广。

(4)本文通过理论计算和模型试验对负压贯入式多仓筒式结构的沉降计算模型进行了系统的分析,建立了负压贯入式多仓筒式结构施工阶段沉降的分析模型。接下来主要把该计算模型应用到实际工程中,通过实际工程对比来修正模型参数,进而达到在实际工程中加以应用的目的。

参考文献:

References:

- [1] 周在中,陈宝珠,刘建起.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(4):83-90.
ZHOU Zai-zhong, CHEN Bao-zhu, LIU Jian-qi. The research of model experiment and calculating method for retaining wall of large-diameter-open tubes [J]. Geotechnical Engineer, 1991(4):83-90. (in Chinese)
- [2] 周锡初,王 晖,韩桂军.大直径薄壳圆筒结构的设计与计算[J].港工技术,1995(2):22-30.
ZHOU Xi-reng, WANG Hui, HAN Gui-jun. Design and calculation of the large-diameter cylinder shell structure[J]. Port Engineering Technology, 1995(2): 22-30. (in Chinese)
- [3] 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.
CCCC Third Harbor Consultants Co Ltd. New pier structure [M]. Beijing:China Communications Press, 1999. (in Chinese)
- [4] 刘建起.无底圆筒结构内填料压力和沉降计算[J].港工技术,1999(4):11-16.
LIU Jian-qi. Calculation of settlement and filler pressure on open cylinder[J]. Port Engineering Technoligy, 1999(4):11-16. (in Chinese)
- [5] 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.
LIU Jian-qi. Deformation of large-diameter cylindrical buried structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994,16(2):64-72. (in Chinese).
- [6] 陈福全,龚晓南,竺存宏.大直径圆筒码头结构土压力性状模型试验[J].岩土工程学报,2002,24(1):72-75.
CHEN Fu-quan, GONG Xiao-nan, ZHU Cun-hong. Analysis of the model test of cylindrical wharf structure with large diameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(1):72-75. (in Chinese)
- [7] C·H·列瓦切夫.薄壳在水工建筑中的应用[M].赵 诒,向可钦,译.北京:人民交通出版社,1982.
Leavachif C H. Application of thin shell in hydraulic constructions[M]. Translated by ZHAO Xu, XIANG Ke-qin. Beijing: China Communications Press, 1982. (in Chinese)
- [8] 陈万佳.水工港口建筑物[M].北京:人民交通出版社,1989.
CHEN Wan-jia. Port engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese)
- [9] 竺存宏.沉入式大圆筒筒内填料静止压力计算方法研究[J].港工技术,2002(3):39-43.
ZHU Cun-hong. Research on computation of the static filler pressure inside buried large-diameter cylinder [J]. Port Engineering Technology, 2002(3):39-43. (in Chinese)
- [10] 姚文娟,熊 胜,陈景林,等.沉入式大直径圆筒结构的动力塑性变位研究[J].水运工程,2009(11):11-17.
YAO Wen-juan, XIONG Sheng, CHEN Jing-lin. Study on dynamic plastic displacement to large-diameter cylindrical structure[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(11):11-17. (in Chinese)
- [11] 林 飘,姚文娟,张 俊,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):30-35,52.
LIN Piao, YAO Wen-juan, ZHANG Jun, et al. Effect of different forms of cylindrical bucket foundation structure upon anti-overturning ability of cylindrical bucket foundation structure[J]. China Harbour Engineering, 2013(6):30-35,52. (in Chinese)
- [12] Yao W J, Liu Y M, Chen J. Characteristics of negative skin friction for super long piles under surcharge loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2012,12(2):90-97.
- [13] 宋少沪,马 兰,姚文娟.基于变位方法的无底大圆筒结构稳定性研究[J].中国港湾建设,2010(2):25-29.
SONG Shao-hu, MA Lan, YAO Wen-juan. Stability study on large diameter cylindrical structure based on displacement method[J]. China Harbour Engineering, 2010(2):25-29. (in Chinese)
- [14] Zhang X Z, Yao W J. Calculation models of soil pressure in opened bottom elliptical barrel structure[J]. Indian Geotechnical Journal, 2014,44(3):249-259.
- [15] 王元战,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.
WANG Yuan-zhan, FU Rui-qing. Method of stability analysis of embedded large diameter cylinder quay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4):417-420. (in Chinese)
- [16] 王元战.大圆筒结构计算及工程应用[M].北京:人民交通出版社,2008.
WANG Yuan-zhan. Large-diameter cylindrical structure calculation and applications in engineering[M]. Beijing:China Communications Press, 2008. (in Chinese)