

文章编号:1001-7372(2002)04-0049-04

水平荷载作用下桶形基础性状的数值分析

施晓春^{1,3}, 龚晓南², 徐日庆²

(1. 宁波高等专科学校 建工系, 浙江 宁波 315016; 2. 浙江大学 土木工程系, 浙江 杭州 310027;

3. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:通过三维有限元的数值分析方法, 建立桶形基础三维有限元模型, 并与试验结果比较, 验证了三维有限元程序功能的可靠性。通过三维有限元的数值模拟, 研究了在水平荷载作用下不同土体特性对桶体变位、桶体外侧土压力分布规律的影响。

关键词:桶形基础; 三维有限元; 土压力; 接触面模型; 弹塑性模型

中图分类号:U443.1 **文献标识码:**A

Numerical analysis of properties of bucket foundation under horizontal forces

SHI Xiao-chun^{1,3}, GONG Xiao-nan², XU Ri-qing²

(1. Department of Civil Engineering, Ningbo College, Ningbo 315016, China;

2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Department of Underground Architecture and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the paper, three-dimension (3D) finite element model of bucket foundation is established by 3D finite element method and its reliability is validated by the comparison with the test results. The influence of different soil characteristics on bucket displacements, distributions of earth pressure along outside of bucket under horizontal forces is studied by 3D-FEM numerical simulation.

Key words: bucket foundation; 3D finite element method; earth pressure; contact constitutive model; elastic-plastic constitutive model

0 引言

桶形基础产生于20世纪90年代的挪威, 由挪威国家石油公司研制成功, 并开始应用于工程实践。桶形基础是一种带裙的圆板基础, 由于其具有减少工程量、节省投资、缩短施工时间、可重复使用等优点, 在某些领域正在逐步替代桩基和重力式基础^[1]。桶形基础的应用为中国在渤海湾软粘土地区的道路交通和海洋平台建设提供了一条新路。目前对桶形基础在粘性土中的性状研究几乎是空白。因此, 对桶形基础桶体结构的变形机理及其与土体相互作用的研究, 完善其设计和计算方法具有重要的理论意义

和工程实践价值, 可为中国海洋平台和道路交通建设中桶形基础的应用提供理论依据和技术支持。

1 桶形基础的有限元模型

根据桶形基础结构的对称性, 取半个桶体及周围的土体来分析。该模型根据结构的材料和受力特性可分为三个区域, 分别为钢制桶体、桶土接触区域和计算土域, 如图1所示。这三个区域受力时所引起的受力变形特征各不相同, 因此, 根据其不同的受力变形特征采用不同的计

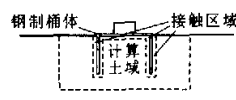


图1 结构与土体的计算域分布

收稿日期: 2002-02-25

作者简介: 施晓春(1973-), 男, 浙江嵊州人, 宁波高等专科学校讲师, 工学博士后。

算模型。对于钢制的桶体结构,由于在使用和施工过程中大多处于弹性范围内,故采用弹性本构模型。位于桶土接触区域内的土体可能因承受较大的作用力而发生拉裂或剪切破坏,采用以殷宗泽(1992)提出的刚塑性有厚度单元模型为基础同时考虑接触面材料参数非线性的接触面模型^[12],其应力应变增量关系见式(1)~(3)。计算土域内的土体本构模型采用杜拉克-普拉格(DRUCKER PRAGER)弹塑性模型,其屈服准则见式(4)~(6)。

计算中主要采用三维八结点的块体等参单元和总应力法进行分析研究。在文献[3]的基础上,编制数据后处理程序,可利用美国 ALGOR 公司的有限元软件 ALGOR93 程序系统中的 SVIEWH 后处理程序来绘制单元网格图、变形图、应力分布图。

$$\{\Delta \varepsilon\} = \{\Delta \varepsilon\}' + \{\Delta \varepsilon\}'' = ([C] + [C]')\{\Delta \sigma\} = [C]\{\Delta \sigma\} \quad (1)$$

$$\{\Delta \varepsilon\}' = \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x' \\ \Delta \varepsilon_y' \\ \Delta \varepsilon_z' \\ \Delta \gamma_{xy}' \\ \Delta \gamma_{yz}' \\ \Delta \gamma_{zx}' \end{Bmatrix} = [C] \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [C]'\{\Delta \sigma\} \quad (2)$$

$$\{\Delta \varepsilon\}'' = \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x'' \\ \Delta \varepsilon_y'' \\ \Delta \varepsilon_z'' \\ \Delta \gamma_{xy}'' \\ \Delta \gamma_{yz}'' \\ \Delta \gamma_{zx}'' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{E''} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G''} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G''} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \sigma_z \\ \Delta \tau_{xy} \\ \Delta \tau_{yz} \\ \Delta \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [C]''\{\Delta \sigma\} \quad (3)$$

$$F(\sigma_{ij}) = -\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (5)$$

$$k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \quad (6)$$

2 计算程序验证

对文献[4]中的滩海模型试验进行模拟,试验模型桶高为 0.5 m,桶径为 0.5 m,场地土的特性参数分别为 $\rho = 17.6 \text{ kN/m}^3$, $c = 3.75 \text{ kN/m}^2$, $\Phi = 10.0^\circ$ 。计算时所用单元为空间八结点等参元,在桶内外以及桶底与土体的接触面上均设置接触面单元,有限元网格见图 2。桶体采用弹性模型,弹性模量 $E_{\text{steel}} = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.25$;土体采用杜拉克-普拉格弹塑性模型,弹性模量 $E_{\text{soil}} = 1.1$

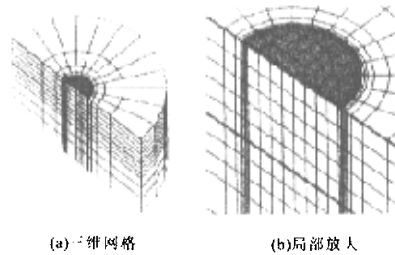


图 2 有限元网格

$\times 10^8 \text{ kN/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.40$ 。自重荷载分五级加载,外加水平荷载每级加载增量为 0.2 kN。试验中,最大的水平加载量为 2.1 kN。图 3、4 分别为在自重荷载和水平荷载作用下的变形图,前者放大了 300 倍,后者放大了 70 倍。在水平荷载轴线上,数值分析与试验所得的桶外前后侧土压力随桶深分布曲线如图 5、6 所示,两者具有较好的一致性,证明程序功能可靠。

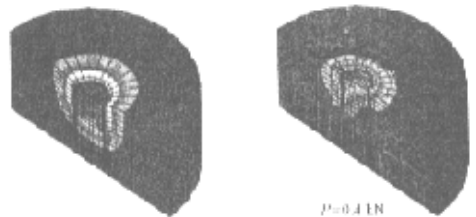


图 3 自重作用下的变形

图 4 水平荷载作用下的变形

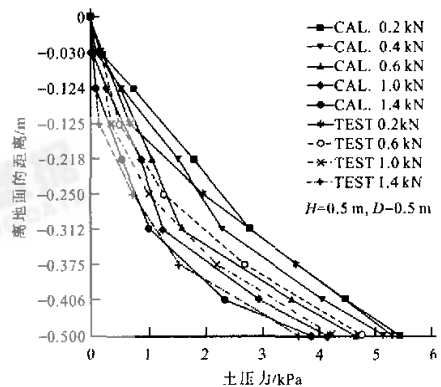


图 5 桶外后侧的主动土压力分布

3 计算结果分析

计算中所用桶体尺寸采用中国石油天然气总公司工程技术研究院和大港油田集团勘察设计院结合总公司的重点课题先行研制用于浅水域勘察的工程地质平台。它的直径为 4 m,桶深为 3 m,桶壁厚度为 0.01 m,桶体材料均采用钢材。如果桶体的外径为 D 、桶深为 h ,则桶体外侧的计算土域和桶底

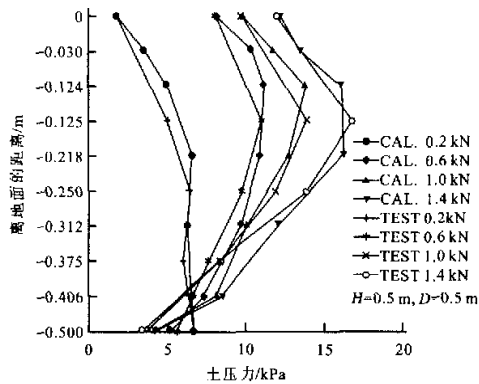


图6 桶外前侧的被动土压力分布

以下的土域均取为 $D/2$ 和 h 中较大者的3倍。计算模型的单元网格见图7,共有3922个结点,3256个单元,其中桶体结构单元202个,桶体结构与内侧、外侧和底面土体之间的接触单元283个,桶体结构内外侧和底面的土体单元3054个。

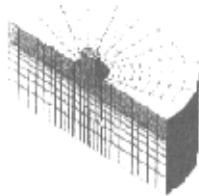


图7 三维网格

3.1 桶土相对刚度的影响

计算分四种工况,计算参数见表1。图8、9分别为桶外前侧和桶外后侧的土压力分布情况。从土压力计算结果看,随相对刚度变化的土压力分布规律大体相似,相对刚度越大,土压力值越小,即土体较软时,土压力较小,土体较硬时,土压力较大。显然,这与在变形相同时弹性模量大的物体内部应力大的规律一致。桶外后侧地表面出现局部适量的拉应力,这表明桶体后侧出现了裂缝。表2为各工况的桶体变位值,各数值考虑了重力的影响。

表1 计算参数

计算工况	1	2	3	4
$F_x/\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	1.0×10^3	5.0×10^3	1.0×10^4	5.0×10^4
E_s/E_c	210 000	42 000	21 000	4 200

注: $E_c = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, $\mu_c = 0.25$, $\mu_s = 0.40$, $c = 3.75 \text{ kPa}$, $\varphi = 10^\circ$, $D = 4 \text{ m}$, $H = 3 \text{ m}$,自重分5级逐级加载为初始应力场,水平荷载 $F = 150 \text{ kN}$,分10次加载。

表2 桶体变位的比较

计算工况	1	2	3	4
倾斜率/%	44	9.8	4.9	0.95
桶体水平位移/mm				
桶顶	12.6	2.72	1.38	0.27
桶底	0.65	0.22	0.1	0.015

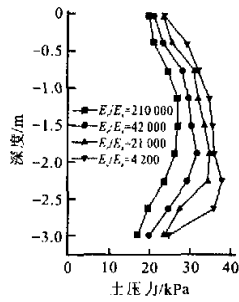


图8 桶外前侧土压力比较
(桶土相对刚度不同)

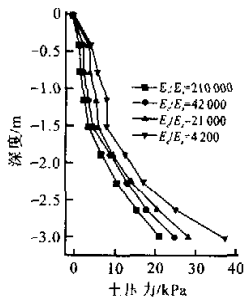


图9 桶外后侧土压力比较
(桶土相对刚度不同)

根据表2,桶土的相对刚度越小,即土体较硬的情况下,桶体在水平荷载作用下产生的倾斜率越小。在水平荷载作用下,桶体在地表发生的水平位移量约为桶底产生水平位移量的几十倍,桶体绕接近于桶底的某一点为中心做刚体转动。桶外前侧的地表土体受桶体挤压,部分土体向上运动,导致这部分土体产生的被动土压力减小,出现地表处土压力随深度渐增的现象。然而桶外前侧的底部发生向后侧的水平位移,使其附近的土体填充其留下的空隙,导致此处产生的土压力减小。这说明土压力分布与桶体的运动形式是密切相关的,不同的运动形式将会导致不同的土压力分布。这一结论与文献[5]中试验得到的规律相同。

3.2 土体性质的影响

对于土体性质的影响,主要考虑了土体粘聚力和摩擦角这两个因素。计算中所用的计算参数见表3、4。图10、11分别为粘聚力变化时桶外前侧和桶外后侧的土压力分布情况,图12、13分别为摩擦角变化时桶外前侧和桶外后侧的土压力分布情况。对于桶外后侧,出现主动土压力,随着粘聚力和摩擦角的增大而减小,并且在地表部分出现局部拉应力。桶外前侧上部区域出现被动土压力,随着粘

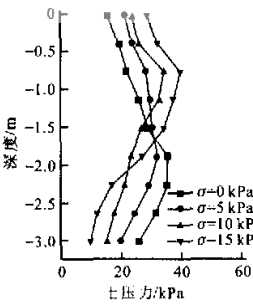


图10 桶外前侧土压力比较
(土粘聚力不同)

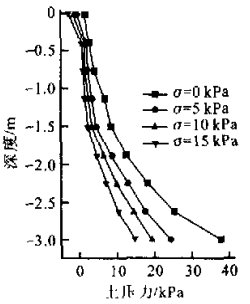


图11 桶外后侧土压力比较
(土粘聚力不同)

表3 计算参数

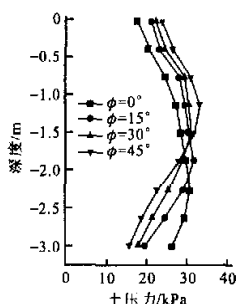
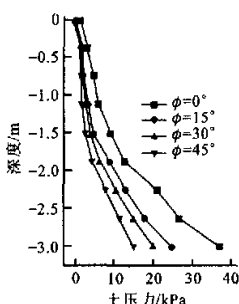
计算工况	1	2	3	4
$\varphi/^\circ$	0	15	30	45

注: $E_s = 2.1 \times 10^8$, $\mu_s = 0.25$, $E_c = 5.0 \times 10^3$ kN/m², $\mu_c = 0.4$, $c = 3.75$ kPa, $D = 4$ m, $H = 3$ m, 自重分5级逐级加载为初始应力场, 水平荷载 $F = 150$ kN, 分10次加载。

表4 计算参数

计算工况	1	2	3	4
C/kPa	0	5	10	15

注: $E_s = 2.1 \times 10^8$ kN/m², $\mu_s = 0.25$, $\mu_c = 0.4$, $E_c = 5.0 \times 10^3$ kN/m², $\varphi = 10^\circ$, $D = 4$ m, $H = 3$ m, 自重分5级逐级加载为初始应力场, 水平荷载 $F = 150$ kN, 分10次加载。

图12 桶外前侧土压力比较
(土内摩擦角不同)图13 桶外后侧土压力比较
(土内摩擦角不同)

聚力和内摩擦角的增大而增大。

4 结 语

建立桶形基础三维有限元模型,并与试验结果比较,表明可以用该三维有限元模型来研究桶形基础结构与土的相互作用问题。通过三维有限元的数值模拟,研究了在水平荷载作用下不同土体特性对桶体变位、桶体外侧土压力分布规律的影响,得到的初步结论为:①桶土相对刚度、土体的粘聚力和内摩擦角对土压力分布均有影响,其影响的程度和规律各不相同;②在水平荷载作用下,桶体外侧土压力的变化规律与桶体变位有关。各种土压力分布呈非线性分布,在设计中完全采用被动土压力和主动土压力来估算有其局限性,不是很合适。

参考文献:

- [1] 施晓春,徐日庆,龚晓南,等.桶形基础的发展概况[J]. 土木工程学报,2000,33(4):68—76.
- [2] 陈福权,刘毓斌.土工有限元分析前后处理的一种可视化方法[J]. 岩土力学,2000,21(2):33—35.
- [3] 殷宗泽,朱 泓,许国华.土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报,1992,16(3):14—22.
- [4] 施晓春.水平荷载作用下桶形基础的性状[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- [5] 施晓春,徐日庆,龚晓南,等.桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(6):723—726.

(上接第13页)

明,对于山区河道河弯凹岸沿河路基的冲刷防护,护坦是一种安全可行的防护型式。护坦不仅可单独用于护坡、挡土墙的基脚防护,还可应用于丁坝坝头、导流堤以及丁坝之间边坡的防护。

对沿河弯(圆心角小于90°)凹岸路基进行护坦防护设计时可以按下列步骤进行:

(1)护坦防护上下游的起、终点与沿凹岸冲刷深槽是相对应的,而沿凹岸深槽的冲刷深度和范围则与弯道环流的形成、发展、衰减有关。根据理论分析可知,对一般的河弯,弯顶附近处环流已发展得相当充分,水流出弯后进入直道,环流强度逐渐衰减。根据试验观测,凹岸冲沟的起点一般在弯顶附近,终点在弯道出口下游直道约2B的位置,与理论分析中根据环流强度变化确定的范围基本相符。所以,护坦的防护起点可确定在凹岸弯顶上游0.5~1.0B处,防护终点在凹岸弯道出口下游的1.5~2.0B处,这样处理应该是偏安全的。

(2)护坦顶面的埋置深度应低于平均河床面高

程,即 $h_H > 0$,一般设在床面以下0.2~0.225 h_s 为宜, $h_s = h_{\max} - h$, h_{\max} 可按式(1)计算。

(3)护坦宽度 b_H 的取值采用反算法,先根据实际情况(施工条件、施工方法、材料类型、河道情况等)确定护坦垂裙的埋置深度 h_{SH} ,将 h_{SH} 和 h_s 代入式(5)、(6),计算出护坦宽度 b_H 。若发现计算的护坦宽度 b_H 过大(如超过河宽的10%),护坦工程量过大,可采用护坦与其它防护型式配合使用。

参考文献:

- [1] 田伟平.弯道环流与沿河路基冲刷试验研究[J]. 重庆交通学院学报,2002,23(3):94—97.
- [2] 张义青.河弯冲刷与护坦基脚减冲的研究[J]. 西安公路交通大学学报,1998,18(3):42—44.
- [3] 赵殿英,田伟平.桥墩局部冲刷的护坦减冲防护[J]. 西安公路交通大学学报,1998,18(4):161—163.
- [4] 陕西省公路局,西安公路交通大学.山区公路路基排水和水毁防治技术研究[R]. 西安:陕西省交通厅,1996.
- [5] 陕西省公路局.驳岸护坦基脚及墙面陡度减冲作用试验报告[R]. 西安:陕西省公路局,1991.