

大直径圆筒码头结构土压力性状模型试验

Analysis of the model test of cylindrical wharf structure with large diameter

陈福全^{1,2}, 龚晓南³, 竺存宏⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 福建建筑高等专科学校, 福建 福州 350007; 3. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 4. 交通部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 详细说明了大直径圆筒码头结构的模型试验布置、量测和试验方法。通过室内模型试验, 研究大直径圆筒码头结构在不同的筒高、筒高与筒径之比、埋深与筒高之比、基床垫层等条件下, 圆筒内外侧土压力、筒体基底反力的分布规律。

关键词: 大直径圆筒结构; 码头结构; 土压力; 模型试验

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)01-0072-04

作者简介: 陈福全(1971-), 男, 福建漳平人, 2000年毕业于浙江大学, 获工学博士学位。现为同济大学地下建筑与工程系在站博士后。

CHEN Fu-quan^{1,2}, GONG Xiao-nan³, ZHU Chun-hong⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fujian College of Architecture and Civil Engineering, Fuzhou 350007, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 4. Tianjin Institute of Water Port Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Taking into account the different conditions such as cylinder diameter, the ratio of cylinder height to diameter, the ratio of cylinder diameter to embedded depth, and different foundation, a series of model tests are carried out to study the behaviour of foundation pressure and the earth pressure distributions along the inside and outside of cylindrical wharf structure with large diameter. Firstly, the test model and test method are presented in detail. And then earth pressure distributions along the different sides of cylinder and foundation pressure are expounded.

Key words: cylindrical structure with large diameter; wharf structure; earth pressure; model test

1 引言*

大直径圆筒码头结构(以下简称大圆筒结构)是一种新型的码头结构, 类似于圆形沉箱结构, 无底、无隔墙, 可以直接建在基床上或硬基础上, 能适应水深浪大的恶劣环境; 采用大直径圆筒结构在软土地基上建造深水码头, 具有结构简单、用料量少、结构受力条件好、施工速度快、造价低、耐久性好的优点。我国在20世纪80年代开始对大圆筒结构进行了一些工程实践, 如天津港防波堤和护岸试验工程、珠海九州港、防城港8号泊位等十余个工程都采用了此码头型式^[1]。但因其与土体相互作用复杂^[2], 未能得到广泛应用。

支挡结构所关心的问题为结构和地基的变形和稳定, 大圆筒结构既要起支挡作用也要起承载作用。目前, 尤其是深埋入式的大圆筒码头结构的工作特性尚缺乏深入的研究, 特别是筒内外侧土压力分布规律和大小及筒底反力的性状, 相应的设计计算方法还十分不成熟。

我国不少学者进行了圆筒结构室内模型试验^[3], 但不同的是, 本文进行的是室内大型的模型试验, 通过试验, 研究了作用在圆筒上的内外侧压力分布规律、筒体基底反力分布情况, 以及它们随结构的变形性状变化而变化的情形。

2 模型试验描述

2.1 试验模型

试验在一试验池中进行, 池长6.0 m, 宽2.5 m, 高3.5 m。圆筒模型有两种, 一是外径为1.2 m、内径为1.1 m, 二是外径为1.6 m、内径为1.5 m, 两者高均为2.4 m, 由两层钢板加肋焊接而成, 其后在筒内外壁抹上环氧砂浆, 使筒壁与填料之间的摩擦系数与工程上使用的大圆筒相似。试验的目的主要是研究筒内前后侧侧压力、筒体基底反力的分布规律, 所以不按实际工程的模型比尺进行试验。为了消除试验池边界条件的影响, 试验量测的圆筒模型两侧各并列一半个圆筒, 如图1所示。填土主要采用海滨细砂, 容重 $\gamma = 16.8 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 基床垫层材料分海滨细砂和粗砂两种, 厚度约为0.5 m。

2.2 试验仪器及试验过程

在圆筒模型体的底面布置了十二个压力传感器, 每个间隔为 30° , 以量测试验过程中圆筒基底反力值, 见图2。圆筒半侧内外分别设置10个断面, 每个断面间隔 20° , 按序编号, 每个断面沿筒高度方向均布置了一定数量的压力传感器, 如图3所示。

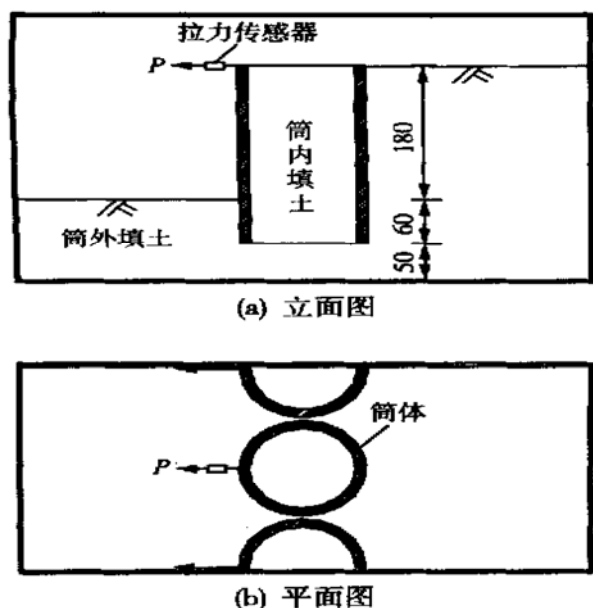


图1 试验模型示意图1

Fig. 1 Layout of the test model

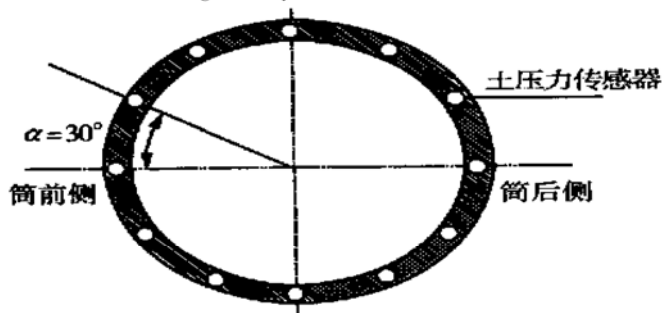


图2 筒底面上的压力传感器布置

Fig. 2 Collocation of pressure gauge under the cylinder

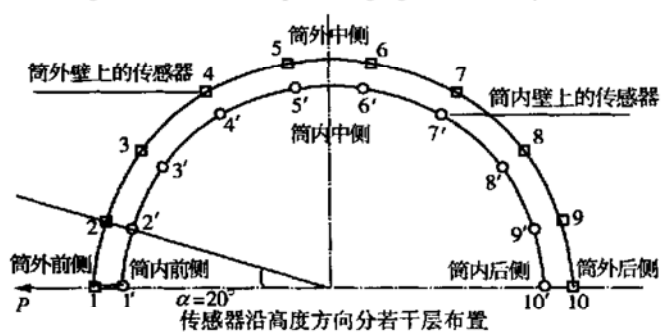


图3 筒内外侧沿切向压力盒布置图

Fig. 3 Collocation of pressure gauge along the side of cylinder

除了在筒后填土平面上施加均布超载外, 对大圆筒施加的倾覆力矩主要是通过筒顶加水平力来实现的, 如前述, 为了模拟大圆筒实际工作的边界条件, 试验采用三个筒, 中间筒为试验筒。相邻的大圆筒处于相同的工作条件下, 会有相同的工作性状, 故用钢套将三个筒顶连成一体, 用反力架、千斤顶、滑轮及钢丝绳组成的加力系统对大圆筒施加水平力, 并用拉力传感器测出加在试验筒顶的水平力。此外在试验筒的筒

顶及筒外壁布置了位移传感器, 以检测大圆筒在倾覆过程中的竖向和水平的位移。使用日本产的采集速度快、精度高的TDS-601数据采集仪进行试验数据采集。

试验时先整平筒底基床, 将所有压力传感器压力值调零, 再平稳地吊入模型圆筒。尔后先对筒内进行填土至设计高度, 再对前后侧同时进行填砂到预定的高度之后, 施加水平向拉力, 每填一定厚的砂, 每加一级水平荷载(一般为0.5 kN), 均记录下各种传感器的试验值。

当测得的筒体后趾的基底应力大致为零时, 就认为结构是处于失稳的状态; 当结构明显失稳时即大幅度地卸去水平向荷载, 之后停止试验, 卸去填土, 吊出圆筒, 再平整基床, 准备下一次的试验。

3 试验结果与分析

3.1 筒内侧土压力

现有不少圆筒内侧土压力的建议计算公式, 虽然这些方法都是建立在理论或试验研究的基础上得到的, 但它们均忽略了筒内外土体的非均质、可压缩的工程性质。当前实际应用中较多的是Janssen筒仓侧压力计算方法^[4], 它是法国工程师Janssen J. C. 在1895年为确定谷仓内某一深度上竖向和水平向的填料压力而推导出的公式, 可以较好地反映被筒壁与筒底限制的内壁土压力分布规律, 但试验结果表明其对大圆筒的计算结果有一定的偏差, 特别是筒体底部, 该公式假定筒内填料相对于筒内侧壁向下移动, 但大圆筒结构是无底的, 在垂直向与水平荷载作用下, 刚性的无底圆筒结构将挤入基床, 在筒体下部产生很大的反力, 会急剧增大筒内填土的竖向压力, 相对于筒壁, 摩阻力方向向上, 有利于结构抗倾稳定, 但Janssen公式并不能反映此情形。

图4为各级水平荷载作用下的筒内土压力分布曲线, 总的趋势是筒内前侧土压力随水平荷载加大而减小, 而筒内后侧土压力呈相反趋势。在静止状态, 土压力均随筒深而变大, 但在约1/3筒高处, 却变小, 原因是筒体在自重作用下有挤入基床的趋势, 减小了土压力。随着荷载加大, 前侧土压力在约1/3筒高处急剧变小, 而后侧土压力则急剧变大。

图5为基床垫层材料与筒外径不同的筒内土压力比较。基础为细砂的土压力较粗砂基础的土压力大, 原因是筒土相互作用的结果, 当基床密实度高, 相同条件下筒内土压力较大, 这与文献[5]的结论相一致。在相同的条件下, 筒径大的筒内土压力大, 而且随筒深变化幅度较大, 但筒径小的土压力在筒底部变化较复杂。

通过试验还发现, 筒后填土面上超载大小和筒外填土高度对筒内土压力影响不明显。

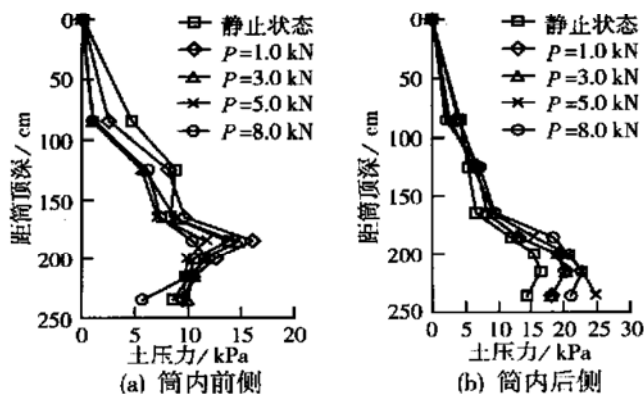
图4 筒内土压力随水平荷载 P 变化

Fig. 4 Variation of earth pressure distribution with increase of horizontal load

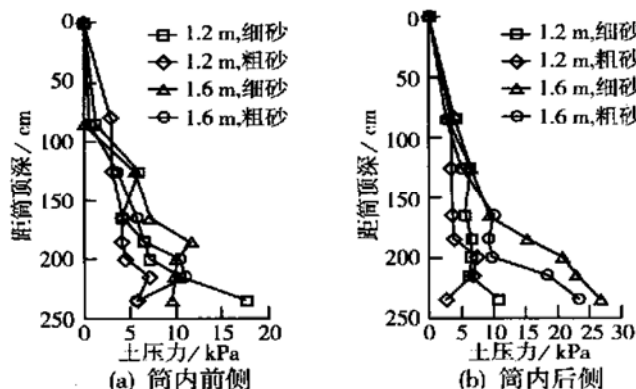
图5 垫层材料和筒径不同的土压力比较 ($P = 5 \text{ kN}$)

Fig. 5 Earth pressure distribution with different foundation material and cylinder diameter

3.2 筒外前侧土压力

圆筒外前后(背)侧土压力分布规律较为简单,在工程当中通常是将筒前土压力和筒后土压力分别建议为二维的被动土压力和主动土压力,而不考虑侧表面为曲面。但工程实际上的大圆筒前后填土在两个相邻的圆筒体之间会形成一个拱形的楔体。

图6(a)为筒外前侧土压力沿深度的分布曲线,为抛物线型分布,数值较大,外荷载影响明显,随水平荷载的加大,土压力增大明显,特别是中部,更接近于被动极限状态。但筒外断面3和断面4(位置见图2)的土压力是随深度平缓地增大,尤其是后者更接近于直线分布,如图6(b)。相邻圆筒间填土形成的楔体支撑了一部分外荷载,但随着水平荷载增大,楔体所承担的荷载份额愈来愈小。

基础垫层为细砂的筒前侧土压力较大,特别在下半部分,在各级水平荷载作用下都是如此。不同圆筒半径,土压力的分布规律及大小都是有显著的差别,特别是下部,土压力大小变化趋势相反,在水平荷载变化幅度相同的情况下,筒径小的土压力变化大,原因是筒径大的结构抗倾与稳定性好,筒体间形成的楔体也较

大,所能承受的外荷载更大。

筒外填土高度不同的筒外前侧土压力分布规律相似,受外荷载影响都比较大,同一水平荷载,若筒前填土高,即筒体结构埋入深度大,则土压力也大,沉入深度略有增加,就能显著地提高筒体结构的抗倾覆能力。

图7为随筒后侧竖向均布超载变化的筒外前侧土压力曲线,为直线型分布,且随竖向荷载的增大而增大。

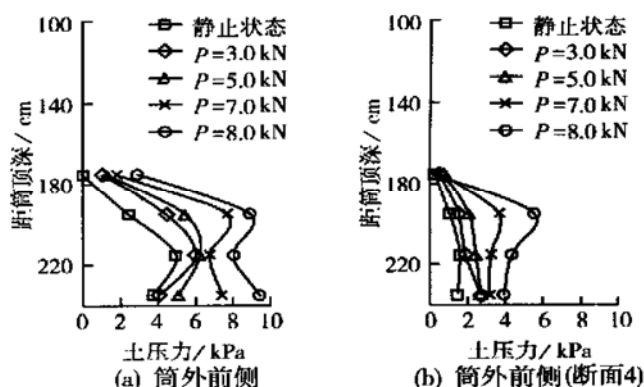


图6 随水平荷载变化的筒外前侧土压力

Fig. 6 Earth pressure distribution on the front side

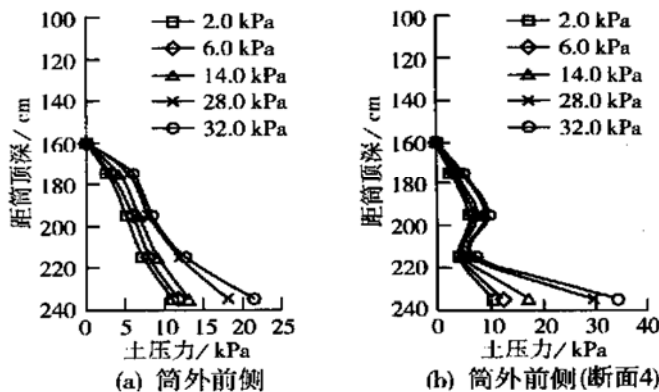


图7 不同超载下筒前侧土压力分布

Fig. 7 Earth pressure distribution under different surcharge

3.3 筒外后侧土压力

筒体后侧土压力是随筒后侧竖向均布荷载的增大而增大,但总的来说增大幅度小,随着水平荷载的加大而缓慢变小,逐渐向主动土压力的极限状态发展,但对于深埋式圆筒结构在约 $1/3$ 筒高以下部分的土压力却是明显增大,如图8(a)所示。因为水平拉力使筒体向前倾,筒体后侧底部向被动极限状态发展。图8(b)为垫层材料不同的土压力变化比较。

筒体埋深不同或后侧填土高度不同情况下的各断面的土压力分布都非常一致,都是沿深度缓慢变大,在约 $1/3$ 填土高处迅速增大。

3.4 筒体基底反力

基床垫层的材料和密实度对筒体基底反力大小和分布规律影响很大。如果垫层密实度高,则基底反力沿筒体截面轴线按直线型分布,如图9。

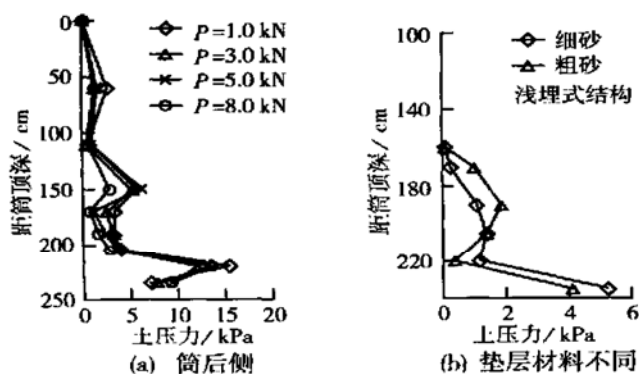


图8 筒外后侧土压力分布

Fig. 8 Earth pressure distribution on the back side

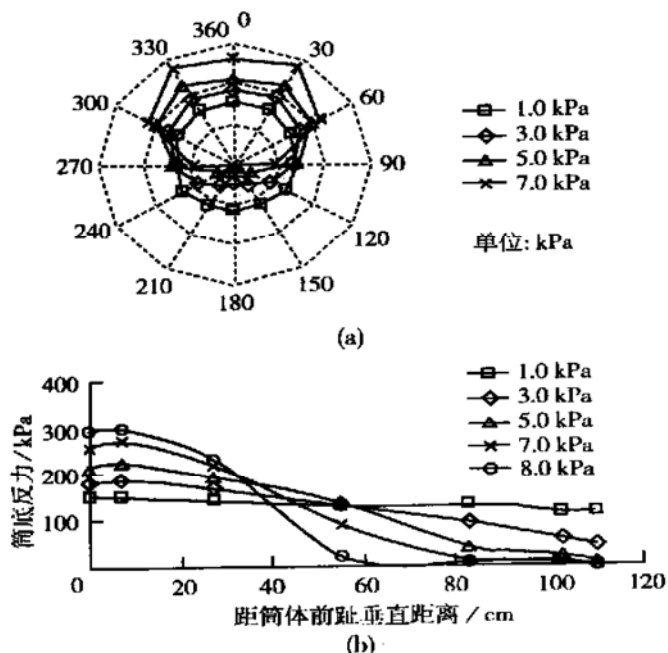


图9 筒底反力图

Fig. 9 Foundation pressure distribution

在未受非轴对称外荷载时的反力大体是均匀分布的。在试验中,随着水平向拉力的施加,筒体前趾附近的反力逐渐增大,而在后趾处则减小,直至为零,即处于倾覆临界状态。再进一步施加荷载,筒前趾的反力却小于前趾两侧相邻点的反力,很明显,筒前趾附近基础土体都已发生塑性变形,事实上,由于基础的可压缩,试验中随着外荷载的施加,筒体倾斜转动的平衡点并非如现有计算方法所认为的是筒前趾。

图9(b)为沿码头轴线上测点距筒前趾垂直距离与筒底反力的关系图,从图中可以看出,尽管与直线分布有一定的差别,若基床密实,在工程初步设计当中,用偏心受压力公式计算筒底反力是可以的^[7,8]。但筒底持力层为软土地基或地基有软弱夹层土时,则应慎重对待。

4 结 语

众所周知,土压力大小与支挡结构变位大小有关,

但本文试验是以水平拉力的加载来控制试验过程,所以未能归纳各种土压力与结构变位的关系。限于篇幅,笔者将另撰文说明各种土压力的建议计算方法。本文主要阐述大圆筒结构的试验方法,分析各种土压力分布规律,初步地,可归纳如下几点:

(1) 筒内土压力随筒深逐渐增大。在竖向和水平向荷载作用下,随着刚性的钢筋混凝土结构即筒体刃脚刺入基床,基床土体挤入筒体内,形成一个向上的拱形,使筒内底部的土压力大小急剧变化。

(2) 筒内土压力大小,特别是底部,受持力层密实度的影响很大,基床愈密实,筒内土压力分布愈接近 Jassen 土压力理论。

(3) 埋入式圆筒码头结构的筒体前侧土压力主要按抛物线分布,受筒体水平向变形的影响比较大。相邻筒体间形成的拱形楔体有利于筒体支挡外荷载,但随着外荷载加大,这种作用会减弱。

(4) 筒后侧土压力可按直线型分布规律的主动土压力来估算,且受外荷载变化影响不大,随深度变化缓慢,但当筒体的 H/H_0 (筒高与埋深之比) 较大时,筒后侧下半部的土压力会急剧增大,由主动状态向被动状态发展。

(5) 筒体埋深略有增加,能较显著地提高结构的抗倾覆能力;在持力层基础承载力较好的情形下,筒底反力可按偏心受压公式估算,但对于软土地基,特别是软弱夹层时,设计时应当进行抗滑稳定性计算分析。

参考文献:

- [1] 竺存宏, 邓冰, 田双珠. 沉入式大圆筒在深水码头结构中的应用研究有关问题探讨[J]. 水道港口, 1997, (12): 1-7.
- [2] 竺存宏, 邓冰, 朱崇诚, 陈福全. 大直径圆筒抗倾计算模式的探讨[J]. 水道港口, 1998, (4): 14-21.
- [3] 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, 3(4): 83-90.
- [4] 列瓦切夫 C H. 薄壳在水工建筑中的应用[M]. 赵 诩, 向可钦, 王德林译. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [5] Jassen H A. Versuche uber Getreidedruck in silozellen Zeitschrift des[J]. Vereines Deutcher Ingenieure, 1895, 39(35): 1045-1049.
- [6] 陈福全, 龚晓南, 竺存宏, 邓冰. 非沉入式圆筒结构与筒内填料相互作用的数值模拟[J]. 港工技术, 1999, (4): 17-20.
- [7] 陈福全. 大直径圆筒码头结构与土的相互作用性状[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [8] 万国才. 大圆筒码头设计简介[J]. 港工技术, 1999, (1): 17-21.