

文章编号:1672-3031(2017)04-0303-05

深大坑中坑基坑围护结构离心模型试验研究

李波¹, 王志鹏², 龚壁卫¹, 黄鹄², 胡勇³

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;

2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518000;

3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 圆形地下连续墙作为一种受力合理的围护结构, 由于空间“拱效应”的存在, 作用在拱圈上的土压力主要在地下连续墙内自身平衡, 地下连续墙的水平位移相对较小。基于某深大圆形基坑工程实际, 采用离心模拟技术研究基坑开挖过程中基坑围护结构的水平位移和弯矩分布规律。分析表明, 基坑地下连续墙最大水平位移为 11.6 mm, 位于上部基坑的中下部, 并且随着开挖深度增大, 墙体位移逐渐增大且最大位移点不断下移。研究成果可为圆形基坑开挖和支护过程中围护结构的变形规律分析提供参考。

关键词: 坑中坑; 离心模型试验; 拱效应; 变形

中图分类号: TU472

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.04.010

1 研究背景

随着国内城市建设规模的逐渐增大, 城市综合体、轨道交通以及城市地下综合管廊等大量涌现, 涉及到的基坑工程逐步呈现“大、深、紧、近”的特点^[1], 因此对基坑开挖围护结构变形提出了更高的要求, 且相关基坑支护技术规范规定对于深度超过 25 m 的基坑工程需要进行专题研究和论证。圆形基坑由于作用在其上的土压力能够自身平衡, 具有明显的拱效应, 将围护结构外侧的土压力转化为环向压力^[2], 能更好地发挥混凝土材料的抗压性能, 因此圆形深基坑围护结构得到广泛应用。

已有研究主要从现场监测、数值和理论分析以及模型试验等对基坑空间效应进行分析^[3-8]。翟杰群等^[9]采用考虑圆拱效应的平面弹性地基梁法和三维弹性地基板法, 对上海中心深大圆形基坑进行了计算分析, 计算得到的变形与内力结果与工程实测均较为一致, 表明圆形基坑设计分析必须考虑其空间效应。崔剑峰等^[10]针对圆形地下连续墙基坑开挖受力过程复杂且采用有限元通用程序计算效率低的问题, 基于轴对称柱壳的三维弹性力学基本方程, 结合边界条件, 建立了圆形地下连续墙的里兹解法。路德春等^[11]基于土的应力路径本构模型, 对有限元软件进行了二次开发, 进行了开挖条件下轴对称小直径圆形基坑的三维有限元分析, 研究了中主应力形成的土压力拱作用规律。王旭军^[12]基于上海中心大厦裙房逆作基坑工程, 采用二维简化模型对裙房各边中心部位基坑变形进行了计算分析, 比较计算值和实测值之间的关系, 分析了裙房基坑中间部位的围护墙体变形特点。元翔等^[13]采用离心模型试验对比研究了不同工况条件下围护结构的变形规律, 既能反应软土地区基坑的时空效应, 并可验证理论分析的有效性。离心模型试验由于能还原原型应力场、位移变形等, 所以越来越成为岩土工程重要的试验手段, 但由于受限于模型箱的尺寸和边界效应影响, 一般采用平面应变模型模拟基坑工程, 而对于圆形基坑围护结构如果采用平面应变模型则不能真实模拟“拱效应”。本文基于某深大圆形基坑的工程实际, 采用离心模拟技术, 基坑外侧地基采用等效替代材料, 既模拟地基侧向土压力作用同时消除模型箱边界效应, 以期真实反映深大圆形基坑开挖过程中围护结构的变形规律。

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308067); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017012/YT); 科技公益性应用研究项目(2016GY19)

作者简介: 李波(1982-), 男, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程和离心模型试验技术研究。

E-mail: libo_auliso@126.com

2 深大坑中坑基坑离心模型设计

2.1 原型条件及其概化 某深大圆形泵站深基坑直径 154.0 m，开挖深度 58.0 m，采用坑中坑结构，基坑使用双排桩进行支护，直径 1.2 m，前排桩间距 1.5 m，后排桩间距 3.0 m，下部围护结构嵌入弱风化下带 4.0 m。基坑采用两道环形内支撑。原型基坑典型断面与地层结构如图 1 所示。典型地层基本参数如表 1。

该工程地层条件复杂，施工步骤繁多，操作要求严格，离心模型作为缩尺模型，不可能完全模拟现场的地质情况以及所有的施工步骤，因此需要对原形条件进行概化。(1)土层概化。模拟压缩模量与土体强度，选取典型的具有代表性的土层进行试验。(2)围护结构概化。原形条件下上部基坑与下部基坑的支护方式都为双排桩支护，但是在离心模型试验中模拟如此多数量的双排桩是非常不方便的，并且不容易控制，由于基坑围护结构在开挖过程中主要作为抗弯结构工作，因此在离心模型中按等效抗弯刚度相似将双排桩等效成地下连续墙来模拟。(3)支撑概化。支撑在基坑工程中的作用主要是承受压力荷载，因此对于钢筋混凝土支撑应该采用抗压刚度相似的原则选用模型材料尺寸。(4)基坑开挖深度概化，原型中上部基坑深度范围为 29 ~ 37 m，下部基坑深度范围为 12.5 ~ 19 m，选最不利情况进行研究，确定上部基坑的模拟深度为 37 m、下部基坑的模拟深度为 19 m。

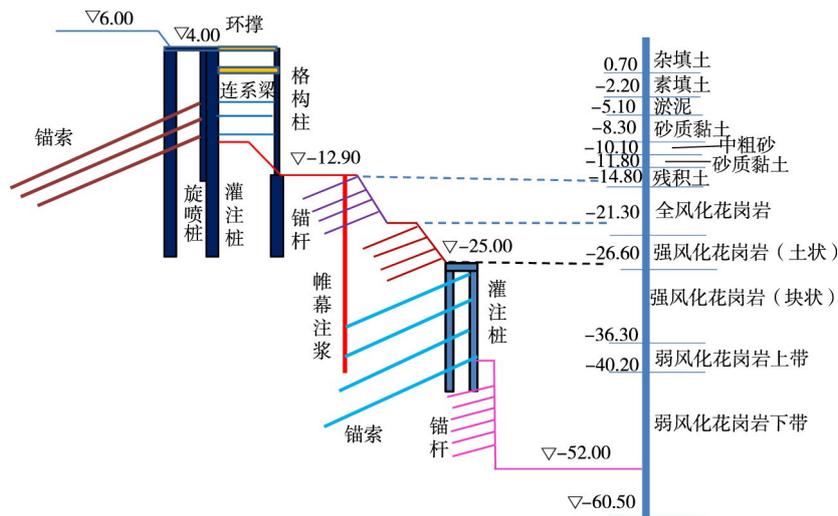


图 1 原型基坑典型断面与地层结构 (单位: m)

表 1 典型地层基本参数

岩土类别	天然密度 ρ $/(g/cm^3)$	压缩模量 E/MPa	弹性模量 E/MPa	剪切强度(快剪)		泊松比	分布层位/m
				摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	凝聚力 c/kPa		
填土	1.86	3.4	10.5	12.0	15.0	0.2	-1.0~6.0
淤泥	1.72	2.2	7	3.0	6.0	0.4	-7.0~-1.0
砂质黏土	1.90	6.0	18	15	25	0.3	-10.8~-7.0
中粗砂	1.94	10.0	30	25	0	0.3	-12.9~-10.5
残积土	1.87	7.0	21	17.0	20.0	0.3	-25.0~-12.9
全风化岩	1.94	10.0	30	22.3	23.9	0.3	-27.0~-25.0
强风化岩	2.10		48	23.0	26	0.2	-33.7~-27.0
弱风化岩(上带)	2.30		150	40	100	0.2	-36.0~-33.7
弱风化岩(下带)	2.50		800	55	200	0.15	-60.0~-36.0
微风化	2.63		2000	55	300	0.15	-60.0以下

2.2 试验方案 图 2 为深大圆形基坑离心模型侧视图和俯视图。本次试验设定加速度为 190g，圆形

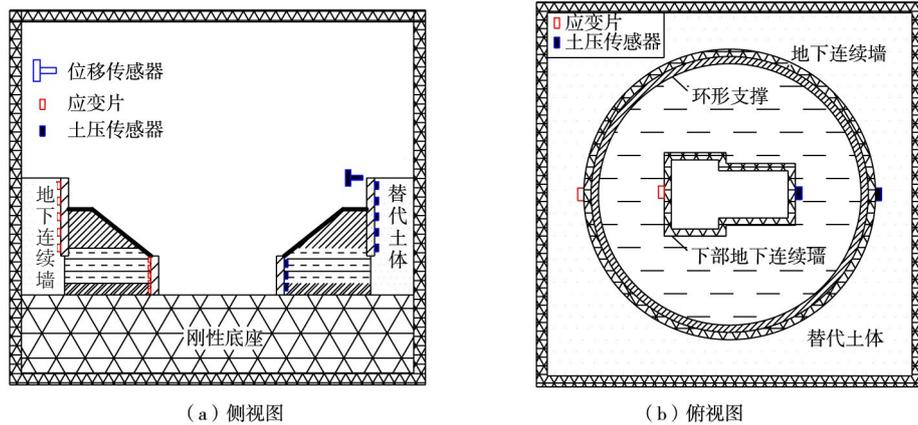


图2 深大圆形基坑离心模型

基坑直径 80 cm(转化为原型为 152 m)，上部基坑深度为 19.5 cm(转化为原型为 37 m)，下部基坑深度为 10 cm(转化为原型为 19 m)。模型箱坑内原地层概化土，模型箱长 100 cm×宽 100 cm×高 100 cm。采用停机开挖的方式^[5]。试验共模拟 5 个工况：地基固结、开挖加第一道支撑、开挖加第二道支撑、放坡开挖、开挖下部基坑。模型制作过程中，基坑内外都采用土层模拟。当模型制作完成后，基坑外侧地基采用替代材料代替，本次试验采用氯化钙溶液置于柔性橡皮囊中。

本次试验在长江科学院大型土工离心机 CKY-200 上进行，该离心机最大容量 200 g·t，最大离心加速度为 200 g，有效半径 3.7 m，模型箱采用 100 cm×100 cm×100 cm。

2.3 模型材料 本次试验共涉及地层和围护结构两类材料。

(1) 基坑内部地层模拟。概化为 4 层，主要考虑压缩模量和强度相似，分别采用中砂、粉质黏土、粗砂和岩石相似材料进行模拟。粉质黏土，最优含水率 24%，最大干密度 1.5 g/cm³，液塑 56%，塑限 22%，压缩模量 4.5 MPa，黏聚力 23 kPa，内摩擦角 30°，模型制样时采用 0.93 压实度。砂土，包括中砂和粗砂，砂土的最大和最小干密度分别为 1.56 和 1.17 g/cm³，中砂直剪强度为内聚力 5.3 kPa，内摩擦角为 32°；粗砂直剪强度为内聚力 3.3 kPa，内摩擦角为 34°。岩石材料，原型中岩石涉及弱风化花岗岩上带和下带，抗压强度分别为 18.5 和 67.7 MPa，多组试验对比，通过调整水泥、石膏、重晶石配比，得到两种岩石模型材料，模型材料 I 的容重约为 2.62 g/cm³，抗压强度为 17.8 MPa；模型材料 II 的容重约为 2.68 g/cm³，抗压强度为 56.5 MPa。

(2) 围护结构模拟。原型泵站基坑支护结构为钢筋混凝土双排桩，弹性模量为 35 GPa。离心模型比尺为 190，模型采用抗弯刚度相似准则，用地下连续墙模拟双排桩支护，地下连续墙采用铝合金材料，弹性模量为 70 GPa，厚度为 2 cm。原型支撑为钢筋混凝土材料，弹性模量为 35 GPa，离心模型比尺为 190，根据抗压刚度相似准则采用铝合金环形支撑来模拟，弹性模量为 70 GPa，共两道内支撑。地下连续墙与支撑如图 3 所示。

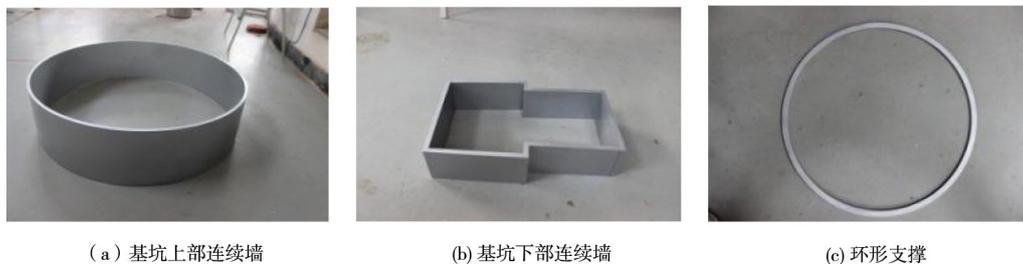


图3 泵站基坑地下连续墙及支撑

2.4 试验主要步骤

试验采用停机开挖的方式。(1)离心机共运行 5 次，地基固结，将装备好的模型装上离心机后，逐级提升加速度，分别在 30g、60g、90g、120g 和 150g 稳定运行 10 min，最后在 190g 稳定运行 20 min，待地基和地下连续墙变形稳定后停机；(2)离心机运行 4 次，对基坑内部土层

的开挖并设置支护，每次运行的加速度最大均为 $190g$ 。试验主要步骤如 4 所示。

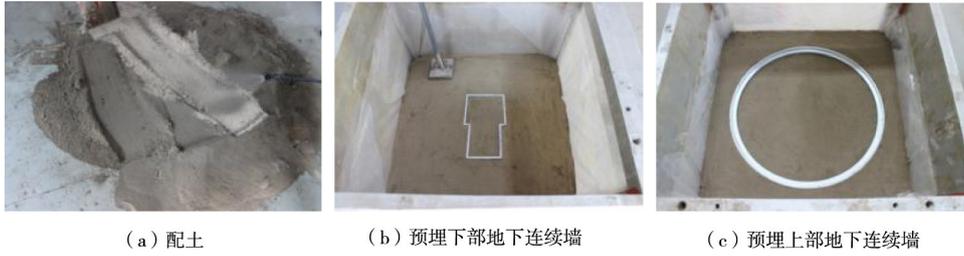


图 4 试验主要步骤

3 试验结果及分析

试验过程中在地下连续墙侧面粘贴应变片进行测量，可反应不同工况条件下地下连续墙的水平位移和弯矩，将模型测量值通过离心试验的比尺换算转化为原型，得到基坑地下连续墙的水平位移和弯矩，分别如图 5 和 6 所示。

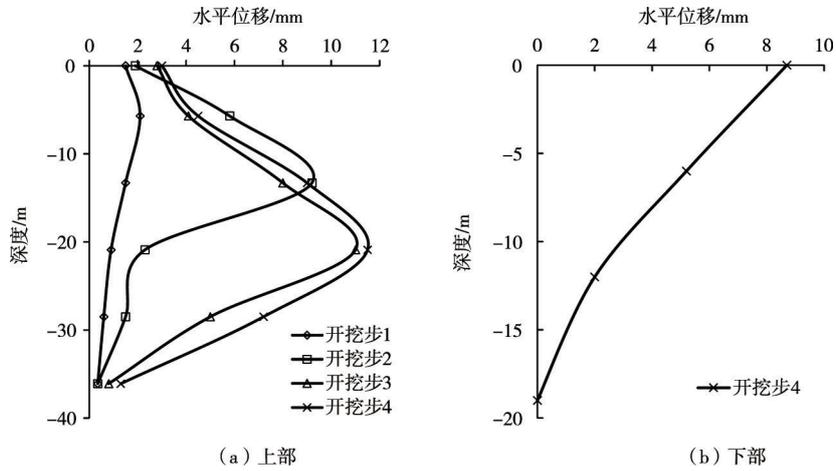


图 5 基坑地下连续墙水平位移

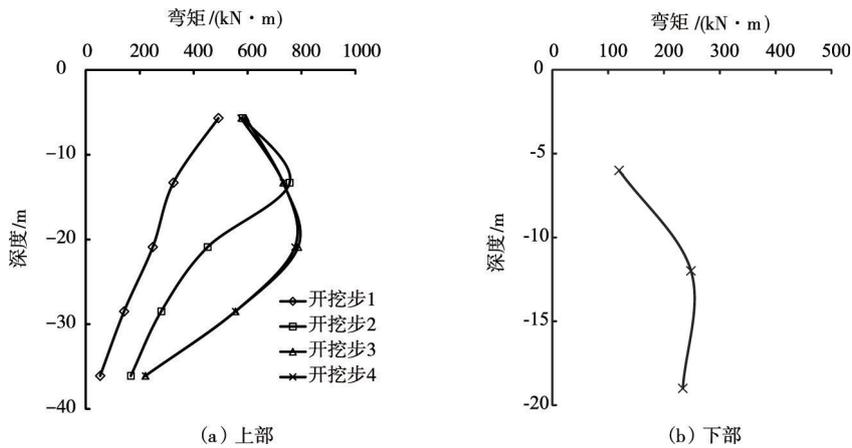


图 6 基坑地下连续墙弯矩分布

3.1 地下连续墙水平位移 图 5 所示为基坑上部连续墙水平位移与下部连续墙水平位移。由于只有开挖步 4 才涉及到下部基坑的开挖，所以对于下部地下连续墙变形有影响的只有开挖步 4。从图 5 可以看出：(1) 随开挖深度的加深，地下连续墙水平位移最大值变大，最大值点逐渐下移，基坑的最大水平位移值约为 11.6 mm 。(2) 基坑顶部由于具有环形支护结构，因此在整个开挖过程中，顶部的

变形都非常小。(3)地下连续墙体的水平位移与基坑的半径、连续墙厚度等密切相关。一般来说,基坑半径越大,地下连续墙厚度越小,基坑的水平位移越大,这是因为基坑半径越大,基坑的“拱效应”就越小。(4)下部基坑的开挖对上部基坑的影响很小,并且下部地下连续墙底部嵌入弱风化岩下带,水平位移形式为悬臂式变形,顶部最大,底部几乎为零。

3.2 地下连续墙弯矩 试验中在地下连续墙外侧沿深度方向粘贴应变片,通过应变-弯矩公式可以得到基坑开挖过程中地下连续墙的弯矩变化规律,如图6所示。由于只有开挖步4才涉及到下部基坑的开挖,所以对于下部地下连续墙弯矩有影响的只有开挖步4。从图6可以看出:(1)上部基坑的弯矩趋势基本与水平位移趋势相同,最大值位于开挖面附近,最大值约为750 kN·m。(2)下部基坑的开挖几乎对上部基坑的弯矩没有影响。(3)下部基坑的变形形式为悬臂式变形,因此靠近墙底处的弯矩最大,约为230 kN·m。

4 结论

本文基于某深大圆形基坑的工程实际,采用三维模型研究基坑开挖过程中围护结构的变形和弯矩。考虑到模型箱尺寸的限制以及边界效应影响,本文采用等效替代材料模拟基坑外侧地层,既模拟地基地侧向土压力作用同时又消除模型箱的边界效应。试验表明基坑围护结构的最大水平位移为11.6 mm,并且随着开挖的进行,墙体位移逐渐增大且最大位移点不断下移。本次试验可为圆形基坑三维离心模型的研究提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 王卫东,吴江斌,黄绍铭.上海地区建筑基坑工程的新进展与特点[J].地下空间与工程学报,2005,1(4):547-553.
- [2] 刘念武,龚晓南,俞峰,等.内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析[J].岩土力学,2014,38(8):2293-2298,2306.
- [3] 木林隆,黄茂松.基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J].岩土工程学报,2013,35(5):820-827.
- [4] 邵羽,江杰,陈俊羽,等.基于HSS模型与MCC模型的深基坑降水开挖变形分析[J].水利学报,2015,46(增1):231-235.
- [5] 马险峰,张海华,朱卫杰,等.软土地区超深基坑变形特性离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(9):1371-1377.
- [6] 李广信,刘早云,温庆博.渗透对基坑水土压力的影响[J].水利学报,2002(5):75-80.
- [7] 梁发云,褚峰,宋著,等.紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J].岩土力学,2012,33(3):657-664.
- [8] 刘润,严驰,徐余,等.粘性土基坑开挖的模型实验研究[J].水利学报,1999(12):59-63,77.
- [9] 翟杰群,谢小林,贾坚.“上海中心”深大圆形基坑的设计计算方法研究[J].岩土工程学报,2010,32(增刊1):392-396.
- [10] 崔剑峰,胡建华,贺耀北.基于里兹法的圆形地下连续墙受力分析[J].中国公路学报,2017,30(1):48-55.
- [11] 路德春,曹胜涛,杜修力,等.平面应变条件下的土拱效应[J].岩土工程学报,2011,33(增刊1):454-458.
- [12] 王旭军.上海中心大厦裙房深大基坑工程围护墙变形分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):421-431.
- [13] 元翔,孙玉永,宫全美,等.世博轴深大基坑逆作法施工变形控制研究[J].岩土工程学报,2009,31(7):1127-1132.

(下转第313页)

The soil-water characteristics and the fractal feature of a typical loess in Xinjiang

ZHOU Yuefeng, GONG Biwei, ZHOU Wuhua, LIU Jun

(Yangze River Scientific Research Institute, Key Laboratory of Geotechnical Mechanics
and Engineering of MWR, Wuhan 430010, China)

Abstract: In this research, laboratory tests were performed using an infilled loess material from a channel slope in Xinjiang, to investigate the soil-water characteristics of the material which are affected by the degree of compaction and the stress level. In this article, the classical van Genuchten's equation was used firstly on the test results to obtain best-fitted curves. And then the fractal theory was adopted to conduct comparison between the SWCCs. Some conclusions are drawn below: (1) With the increase of the degree of compaction or the increase of the axis stress, the SWCC could move downward to some extent. (2) In contrast to the distributions of pores, the SWCCs of the material shows obvious fractal characteristics. (3) The curves of the SWCC from fractal fitting are parallel at different stress levels but the same degree of compaction. Adopting the fractal method suggested in this article, the SWCC could be predicted from a known curve.

Keywords: loess; unsaturated soil; infilled material; SWCC; fractal

(责任编辑: 杨 虹)

(上接第 307 页)

Centrifugal model test study on foundation pit retaining structure in large and deep pit

LI Bo¹, WANG Zhipeng², GONG Biwei¹, HUANG Hu², HU Yong³

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,
Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2. CSCEC AECOM CONSULTANTS CO., LTD., Shenzhen 518000, China;
3. The Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, the circular wall is used as a reasonable envelope structure. Due to the existence of the space "arch effect", the earth pressure acting on the arch ring is mainly balanced in the wall and the wall. The retaining structure is mainly subjected to the ring axial force, which can give full play to the characteristics of high compressive strength of concrete, so round the lateral displacement of the wall is relatively small. Based on the actual construction of a deep circular foundation pit, the distribution of earth pressure in foundation pit excavation and the horizontal displacement and bending moment distribution of ground and wall are studied by centrifugal simulation. The maximum horizontal displacement of the foundation wall is 23.6mm, which is located in the middle and lower part of the upper foundation pit, and with the excavation depth increasing, the wall displacement gradually increases and the maximum displacement point. The active earth pressure of the circular foundation pit is smaller than that of the flattened earth pressure, and it is nonlinear. The effect of the arching effect is obvious. With the excavation depth increasing, the depth and radius ratio of the excavation depth The pressure distribution has a significant effect. The research results provide a reference for the study of the distribution model of earth pressure and the analysis of deformation law.

Keywords: pit in pit; centrifugal model test; arch effect; earth pressure; displacement

(责任编辑: 王冰伟)