

DOI: 10.11779/CJGE2024S10038

# 盾构机始发井深基坑力学和变形特性离心模型试验研究

孙 慧<sup>1</sup>, 李 波<sup>1</sup>, 王志鹏<sup>2</sup>, 王 帅<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 为探究盾构机始发井深基坑开挖过程中周边土体的应力、变形和土压力分布规律, 通过对工程原型进行概化, 在典型土层条件下, 采用停机-开挖-支护的模拟方式开展了方形基坑和圆形基坑两种方案共 2 组离心模型试验, 从地连墙的弯矩和其后土体的水平位移、基坑外侧土压力分布以及地表沉降等角度, 对比分析了两种盾构机始发井深基坑开挖过程的工程特性。结果表明: 地面沉降随基坑开挖深度增大逐渐增加, 形成沉降槽状; 地连墙土压力变化呈非线性, 随着基坑开挖不断深入的, 离地表较近处的土压力逐渐变大, 而深处的土压力则逐渐减小; 在第 5 步开挖时 2 组模型地下连续墙水平位移均达到最大值, 圆形基坑是方形基坑的 1.4 倍, 同时地连墙的弯矩也达到最大值, 圆形基坑比方形基坑小 320 kN·m。研究成果可为深埋隧道深基坑的优化设计和开挖提供指导。

**关键词:** 盾构机始发井; 深基坑; 支护结构; 离心模型; 变形; 弯矩; 土压力

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0244-05

作者简介: 孙 慧(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: sunhui\_hust@126.com。

## Centrifugal model tests on characteristics of deep foundation pits in starting well of shield tunneling machine

SUN Hui<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, WANG Zhipeng<sup>2</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. China Municipal Engineering Northwest Design and Research Institute Co., Ltd. Shenzhen Branch, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In order to explore the stress, deformation and soil pressure distribution of the surrounding soils during the excavation process of deep foundation pits in starting well of the shield tunneling machine, two sets of centrifugal model tests are conducted using the simulation method of shutdown excavation support under typical soil conditions, including square foundation pit and circular foundation pit, by generalizing the engineering prototype. The bending moment of the diaphragm wall and the horizontal displacement of the subsequent soil are analyzed. A comparative analysis is conducted on the engineering characteristics of two types of shield tunneling machines during the excavation process of the deep foundation pits, including the distribution of soil pressure on the outer side of the foundation pit and surface settlement. The results show that the ground settlement gradually increases with the increase of the excavation depth of the foundation pit, forming a settlement trough shape. The variation of soil pressure on the diaphragm wall is non-linear. As the excavation of the foundation pit deepens, the soil pressure near the surface gradually increases, while the soil pressure at the deeper depth gradually decreases. In the fifth step of excavation, the horizontal displacements of the underground continuous walls in both models reach their maximum values. The circular foundation pit is 1.4 times that of the square foundation pit, and the bending moment of the underground continuous wall also reaches its maximum value. The circular foundation pit is 320 kN·m smaller than the square foundation pit. The research results can provide guidance for the optimization design and excavation of deeply buried tunnels and deep foundation pits.

**Key words:** starting well of shield tunneling machine; deep foundation pit; support structure; centrifuge model; deformation; bending moment; soil pressure

## 0 引言

随着城市化建设的推进, 地铁建设变的越来越广泛, 盾构机始发井深基坑开挖工程也越来越多。盾构

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208329); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目资助项目(YJJH-ZT-ZX-20230118528, YJJH-ZT-ZX 20191031216); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023327/YT)  
收稿日期: 2024-04-29

机施工前需要在始发井中组装, 深基坑开挖对其支护结构和周边土体的变形和力学特性产生影响, 研究盾构机始发井深基坑开挖工程特性对地铁隧道开挖建设具有重要意义。

目前, 盾构机始发井深基坑开挖技术处于快速发展过程中, 相关研究还处在探索阶段。当前的研究主要集中在以下 3 个方面: ①采用三维数值方法对深基坑开挖过程中的小应变等力学特性进行计算分析<sup>[1-4]</sup>; ②盾构隧道深基坑开挖对周边土体和建筑物的稳定性、应力以及变形等影响<sup>[5-8]</sup>; ③地铁盾构隧道深基坑开挖方案的比选分析<sup>[9]</sup>。很少涉及关于盾构机始发井深基坑开挖的分析研究, 而始发井基坑开挖建设对整个工程的顺利开展起着至关重要的作用。

鉴于离心模型试验在解决岩土工程问题中具有独特的优势, 采用离心试验模拟深基坑开挖过程成为一种有效的分析手段<sup>[10]</sup>。本文依托深圳某地铁工程, 通过土工离心模型试验, 研究了方形竖井和圆形竖井基坑两种方案在开挖过程中对支护结构和周边土体产生的力学特性以及变形情况, 为工程的设计和施工提供参考。

## 1 盾构机始发井基坑模型设计

### 1.1 某工程盾构机始发井基坑概况

盾构机始发井的尺寸受到多种因素影响, 主要包括: 可用的施工场地大小、盾构机始发所需的附属部件的相关尺寸和布置、拼装盾构机所需要的空间、运输材料及废土渣的设备的尺寸、盾构机掘进时所需要的尺寸等。图 1 所示为某工程盾构机附属部件的布置和具体尺寸情况。由于本工程主隧道的外径为 7.8 m, 假设盾构机可以在始发井井底组装, 长方形盾构机始发井的最小尺寸为 25 m (长) × 16 m (宽)。在满足盾构机最小尺寸的条件下, 可采用两种设计方案, 一种为方形竖井基坑, 另一种为圆形竖井基坑。

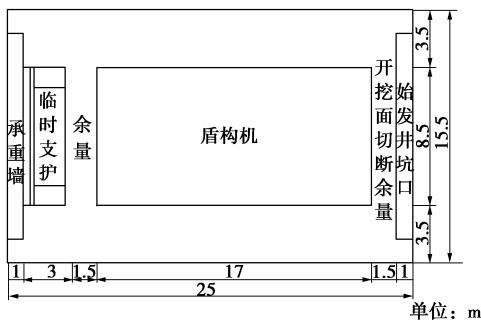


图 1 盾构机始发井布置图

Fig. 1 Layout of shield machine starting well

### 1.2 始发井场地地层情况

根据现场勘测资料表明, 盾构机始发井场地地层

自上至下为: 第一层为素填土, 厚度 4.77 m; 第二层为填石, 厚度 1.08 m; 第三层为淤泥, 厚度 3.60 m; 第四层为淤泥夹中粗砂, 厚度 1.02 m; 第四层为中粗砂, 厚度 3.68 m; 第五层为残积土, 厚度 26.09 m; 第六层为强风化混合花岗岩 (土状), 厚度 5.33 m; 第七层为强风化混合花岗岩 (块状), 厚度 2.84 m; 第八层为弱风化混合花岗岩上带, 厚度 1.92 m; 第九层为弱风化混合花岗岩下带, 厚度 13.83 m。

## 2 离心模型试验方案

### 2.1 离心机试验设备

盾构机始发井模型试验在长江科学院大型土工离心机上开展。CKY-200 土工离心机悬臂梁吊篮最大加速度可达到 200g, 离心机悬臂梁有效半径为 3.7 m, 模型箱尺寸为 100 cm(长) × 100 cm(宽) × 100 cm(高)。

### 2.2 模型试验方案设计

结合原型尺寸等因素拟定离心试验旋转加速度为 100g, 共进行 2 组盾构机始发井基坑开挖离心模型试验。由于现场土层很复杂, 为了突出现场开挖存在的主要问题和离心模型试验的可行性, 经过分析比选将土层概化为 4 层, 从上到下依次为中砂、粉质黏土、粗砂和基岩 (一种岩石相似材料) 进行模拟。其中, 方形盾构机始发井基坑为 31 cm (长) × 27 cm (宽) × 52 cm (高), 考虑原型加固方式、抗压刚度 EA 相似准则和模型箱尺寸等因素, 离心模型试验将地连墙和内衬概化为一整体, 沿地连墙高度从上到下依次分为 5 层, 每层分布 8 根斜撑加固, 斜撑又分为长支撑和短支撑, 地连墙厚度为 15.3 mm, 如图 2 (a) 所示。采用铝合金材料模拟圆形盾构机始发井基坑连续墙, 圆形连续墙内径为 31 cm, 墙厚为 15.3 mm, 高度为 52 mm, 如图 2 (b) 所示。

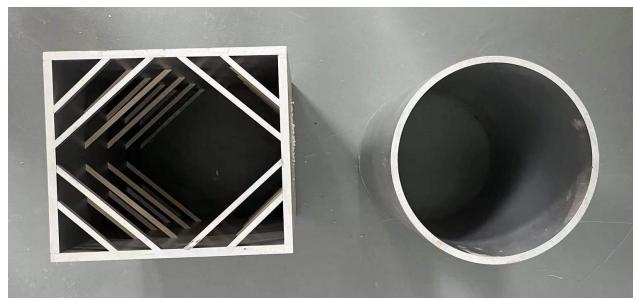


图 2 盾构机始发井地连墙模型

Fig. 2 Model of ground wall connection for shield machine starting well

### 2.3 监测传感器布设

方形和圆形始发井基坑试验监测系统如下: 分别采用 4 个激光位移传感器监测不同开挖步对应的地表沉降和方形井地连墙的侧向墙体的水平位移, 在地连

墙一侧沿高度均布 6 个土压力盒测量不同开挖步对应的土压力, 在地连墙另一侧沿高度均布 8 个应变片用于监测结构内力。另外, 在方形井地连墙不同高度第 1 层、第 2 层和第 3 层的长短支撑分别布置 2 个应变片, 共计 6 个应变片, 如图 3 所示, 其中, 图 3 (a) 为方形井, 图 3 (b) 为圆形井。

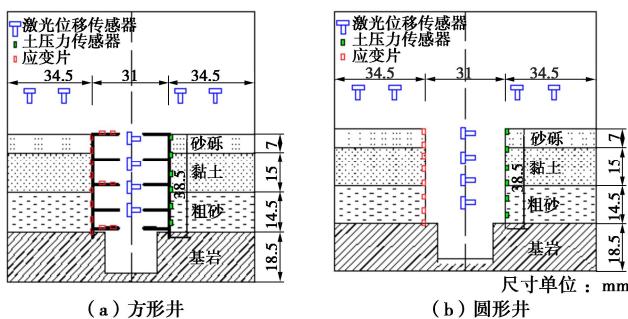


图 3 始发井基坑传感器布置

Fig. 3 Layout of sensors for the starting well foundation pit

#### 2.4 试验过程

根据试验设计方案, 开挖试验过程中基坑底部没有底板结构, 模拟的是最不利情况。本次离心模型具体试验步骤如下:

(1) 模拟地基固结。在模型箱中按照设计尺寸制备地基, 然后开始转动离心机, 分五级逐级提升离心加速度, 分别为 20g、40g、60g、80g 以及 100g, 每级稳定 8 min 后, 再继续加载下一级, 直至 100g 稳定运行 20 min 后再停机, 完成地基固结, 并以采集固结试验的测试数据作为初值;

(2) 模拟地基开挖过程。对 4 层概化地层进行 5 次开挖, 每次开挖设置支护后, 运行离心机加速度至 100g, 维持稳定运行 20 min 后停机, 同时采集监测系统的数据;

(3) 模拟基岩开挖。模型箱中开挖预定深度基岩后, 开始运转离心机至 100g, 继续运行 20 min 后停机, 同时采集记录数据, 完成试验。

### 3 试验结果分析

试验开挖整个过程分为 6 步, 每开挖 1 步读取试验数据一次, 同时完成相应支撑设置, 旋转离心机达到预定加速度直至稳定后再采集数据。试验数据均为离心机转到 100g 稳定后模型内布置的监测设备得到, 然后按照相应的相似比换算到工程原型进行受力和变形分析。为了得出现场最危险情况参数指标, 本次离心模型试验模拟的是最不利工况。

#### 3.1 地连墙水平位移

图 4 为 2 组基坑模型不同开挖步时地连墙水平位移。从图中可以看出, 整体上, 2 组模型均随始发井

基坑开挖深度的加深, 方形和圆形连续墙侧向墙体的水平变形呈现明显的非线性, 均为先增大后减小, 且接近地表处的变形在起始阶段增长较快, 达到最大值后逐渐减小, 由于埋深较大, 变形减小的速率相对较缓慢, 变形最大值点随着开挖深度的增加逐渐下移, 开挖到第 4 步后最大值点向下移动的深度较小, 变化趋势逐渐收敛, 趋于稳定; 在第 5 步开挖时方形井和圆形井 2 组模型的地连墙水平变形均达到最大值, 方形基坑水平位移到 8.7 mm, 圆形基坑水平位移到 12.3 mm, 比方形基坑变形大 29.3%; 第 6 步基岩开挖时最大水平位移变化较小, 基本处于稳定状态。

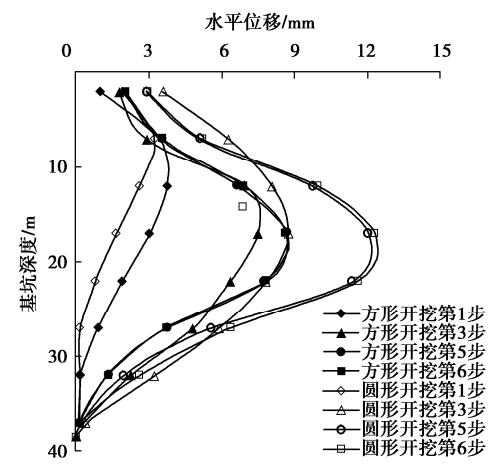


图 4 方形和圆形基坑不同开挖步时地连墙水平位移

Fig. 4 Horizontal displacements of diaphragm walls during different excavation steps for square and circular foundation pits

#### 3.2 地表沉降

图 5 为 2 组基坑模型不同开挖步时基坑地表沉降。由图 5 可知: 开挖初期地表沉降速率较大, 开挖中期沉降速率趋于稳定, 地面沉降也随基坑开挖逐渐增大, 地表沉降在开挖阶段形成沉降槽形状。方形基坑地表沉降最大值达到 7.2 mm, 圆形基坑地表沉降最大值达到 8.6 mm, 位置均发生在距离基坑侧约 12 m 处。

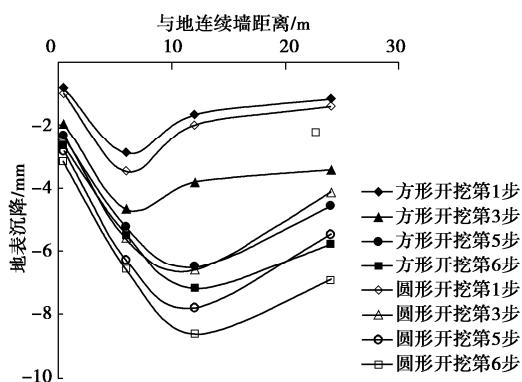


图 5 方形和圆形基坑不同开挖步基坑地表沉降

Fig. 5 Surface settlements of square and circular foundation pits at different excavation steps

### 3.3 土压力

图 6 为方形和圆形井 2 组基坑开挖时地连墙外侧土压力变化的曲线。从图 6 中可以看出, 地连墙墙背侧土压力表现为非线性变化, 同一开挖步, 方形井和圆形井地连墙墙背土压力的变化规律较相近, 且随着开挖步的增加, 土压力由正值向负值变化点对应的基坑深度逐渐下降, 表明在每一步开挖过程中, 地连墙墙背土压力既有主动土压力, 也有被动土压力, 墙体一部分挤压土体, 一部分与墙背土体脱离; 方形井和圆形井均在第 3 步开挖后受到最大正土压力, 在第 6 步开挖后受到最大负土压力, 无论正负最大土压力值, 圆形始发井侧边土体中土压力要小于方形井。

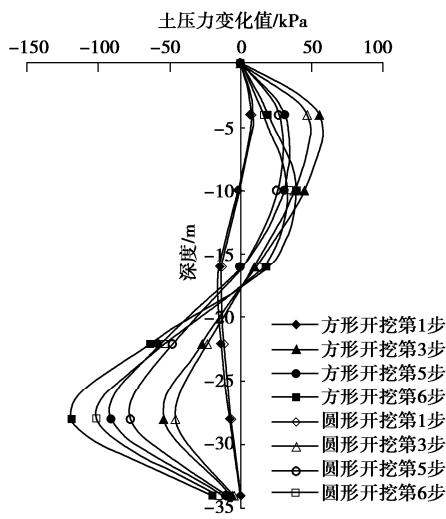


图 6 方形和圆形基坑开挖时外侧土压力随开挖深度变化曲线

Fig. 6 Curves of variation of external soil pressure with excavation depth during excavation of square and circular foundation pits

### 3.4 地连墙弯矩

图 7 为方形井和圆形井 2 组基坑模型地连墙弯矩与基坑深度变化的关系曲线。从图 7 中可以看出, 第 1 步开挖后, 方形井和圆形井地连墙墙体受到弯矩较小, 挠曲方向变化频繁; 第 3 步开挖后, 无论方形井还是圆形井基坑地连墙墙体均受到较大弯矩, 与第一步相比, 弯矩值增长了很多, 开挖后期, 弯矩值增长逐渐变慢, 说明随着开挖加深, 弯矩值逐渐增大, 但逐渐收敛, 趋于稳定; 方形基坑地连墙在开挖第 5 步时地连墙最大正弯矩约为 3543 kN·m, 圆形基坑地连墙弯矩在开挖第 6 步时地连墙最大正弯矩约为 3863 kN·m, 比方形井基坑多 320 kN·m。

## 4 结 论

盾构机始发井基坑开挖的工程特性与基坑设计形状有关, 通过离心模型试验研究了方形基坑和圆形基坑开挖引起的地表沉降、水平位移、弯矩和土压力的

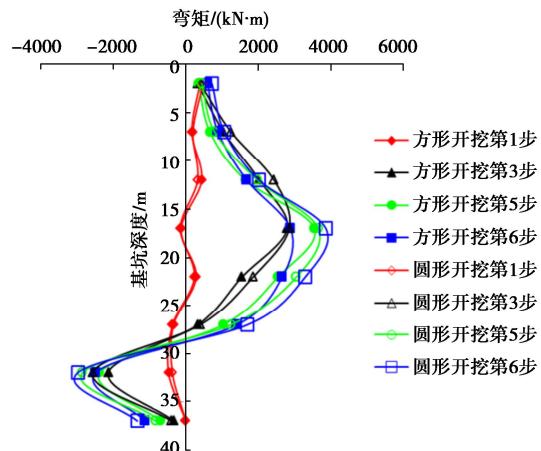


图 7 方形和圆形基坑开挖时地连墙弯矩随开挖深度变化曲线

Fig. 7 Curves of bending moment of diaphragm wall during excavation of square and circular foundation pits as a function of excavation depth

变化情况, 可以得出以下 3 点结论。

(1) 随着开挖的深度增加, 地表沉降也逐渐增大, 在第 5 步开挖时 2 组模型地下连续墙水平位移均达到最大值, 圆形基坑是方形基坑的 1.4 倍, 地连墙的弯矩也达到最大值, 方形基坑比圆形基坑小 320 kN·m。

(2) 地面沉降随基坑开挖深度增大逐渐增加, 形成沉降槽状。地连墙土压力值变化呈非线性, 方形井和圆形井地连墙墙背土压力的变化规律较相近, 开挖初期, 土压力值变化很小, 随着基坑开挖的开展, 地连墙墙背土压力值在基坑埋深较低时, 土压力逐渐变大, 在埋深较大时土压力则逐渐减小。

(3) 在地铁隧道施工时, 需要考虑盾构机始发井拼装空间的大小, 还要考虑不同形状基坑开挖引起的力学和变形特性差异, 合理设计基坑开挖的形状也至关重要。试验结果表明边界为圆弧形基坑开挖时地连墙水平位移和地表沉降较大, 而其内部受力较小, 这是因为圆形基坑能自身平衡作用在其上的力, 具有明显的拱效应, 因此在实际工程中可以结合方形和圆形基坑的优势将其设计为大于 4 条边的等边多边形。

### 参考文献:

- [1] 褚 峰, 李永盛, 梁发云, 等. 土体小应变条件下紧邻地铁枢纽的超深基坑变形特性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3184-3192. (CHU Feng, LI Yongsheng, LIANG Fayun, et al. Numerical analysis on deformation of deep excavation adjacent to metro considering small-strain stiffness of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3184-3192. (in Chinese))
- [2] 汪中卫. 考虑时间与小应变的地铁深基坑变形及土压力的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004. (WANG Zhongwei.

- Research on Deformation and Soil Pressure of Subway Deep Foundation Pits Considering Time and Small Strain[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese))
- [3] BENZ T, VERMEER P A, SCHWAB R. A small-strain overlay model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, **33**(1): 25-44.
- [4] BENZ T. Small-Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences[D]. Stuttgart: Stuttgart University, 2007.
- [5] 宋玉芹, 林永亮. 大直径盾构隧道近距离穿越桩基的方案比选[J]. 中外公路, 2020(6): 231-236. (SONG Yuqin, LIN Yongliang. Scheme comparison of large diameter shield tunnel going through pile foundation[J]. Journal of Chinese & Foreign Highway, 2020(6): 231-236. (in Chinese))
- [6] 李进军, 王卫东. 紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和实践[J]. 铁道工程学报, 2011, **28**(11): 104-111. (LI Jinjun, WANG Weidong. Design and construction of deep excavation engineering adjacent to the subway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, **28**(11): 104-111. (in Chinese))
- [7] 戴志仁, 王俊, 胡瑞青, 等. 城市轨道交通大直径盾构隧道若干关键技术[J]. 铁道工程学报, 2021, **38**(6): 75-81. (DAI Zhiren, WANG Jun, HU Ruiqing. Key technologies for the application of large diameter shield tunnel in urban railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, **38**(6): 75-81. (in Chinese))
- [8] 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. (MA Xianfeng, ZHANG Haihua, ZHU Weijie, et al. Centrifuge model tests on deformation of ultra-deep foundation pits in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1371-1377. (in Chinese))
- [9] 杨龙才, 周顺华. 南京某地铁深基坑围护结构方案的比选研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(3): 453-458. (YANG Longcai, ZHOU Shunhua. Comparison and selection of enclosure structure schemes of certain metro deep foundation pit in Nanjing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(3): 453-458. (in Chinese))
- [10] 梁发云, 褚峰, 宋著, 等. 深基坑变形特性的离心模型试验、数值计算与现场实测对比分析[J]. 长江科学院院报, 2012, **29**(1): 74-78. (LIANG Fayun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Comparison of deformation behavior of deep excavation among centrifuge model test, numerical analysis and in-situ monitoring[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, **29**(1): 74-78. (in Chinese))

(编校: 孙振远)