

DOI: 10.11779/CJGE20241006

# 单侧有限土体非对称基坑受力变形机理试验研究

林钊睿<sup>1</sup>, 蒋亚龙<sup>1,2</sup>, 徐长节<sup>\*1,2</sup>, 方 煦<sup>1,2</sup>, 范晓真<sup>3</sup>, 丁海滨<sup>1</sup>, 石钰锋<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;  
3. 浙大城市学院工程学院, 浙江 杭州 310015)

**摘要:** 内撑式基坑紧邻建构筑物时, 坑外将形成有限土体区, 进而造成基坑两侧土体非对称的工况。采用室内模型试验, 分析了单侧有限土体非对称基坑的变形与承载情况, 并探究了由非对称工况引发的支护结构整体推回位移作用机理。试验表明: 非对称基坑变形包含由开挖引起和支护结构整体推回位移两部分。由于两侧非对称引发的支护结构整体推回位移将导致土体半无限侧变形增大, 主动区土压力减小, 并约束有限侧的支护桩变形。在基坑两侧非对称程度较大的工况下, 过大的推回位移将使有限土体侧出现朝向坑外的变形, 支护桩受力变形情况将发生显著变化。在非对称程度较小的工况下, 有限侧主动区土压力出现形态与大小的变化, 非对称程度较小的工况则仅出现大小的改变。因此, 当基坑出现单侧有限土体非对称工况时, 应充分考虑推回位移的影响, 从而得到更合理的基坑支护设计与施工方案。

**关键词:** 非对称基坑; 有限土体; 模型试验; 推回位移; 受力与变形

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)11-2386-11

作者简介: 林钊睿(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事土压力理论与基坑工程等方面的研究工作。E-mail: 1006161072@qq.com。

## Experimental study on force and deformation mechanism of asymmetric foundation pit with one-sided finite soils

LIN Zhaorui<sup>1</sup>, JIANG Yalong<sup>1,2</sup>, XU Changjie<sup>1,2</sup>, FANG Tao<sup>1,2</sup>, FAN Xiaozhen<sup>3</sup>, DING Haibin<sup>1</sup>, SHI Yufeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Railway Infrastructure Performance Monitoring and Assurance, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** In the case of an internally supported pit adjacent to structures, an area of limited soil will be formed outside the pit, which will result in an asymmetric soil condition on both sides of the pit. Indoor model tests are used to analyse the main deformation and bearing capacity of the unilateral asymmetric pit with finite soils, and to investigate the mechanism of the overall push-back displacement of the supporting structure triggered by the asymmetric working condition. The test shows that the deformation of the asymmetric pit consists of two parts: that caused by excavation and that caused by the overall push-back displacement of the supporting structure. The overall pushback displacement of the support structure caused by asymmetry on both sides will lead to the increase of deformation on the semi-infinite side of the soil body, the decrease of soil pressure in the active zone, and the constraint of deformation of the support piles on the finite side. In the case of a large degree of asymmetry between the two sides of the pit, the excessive pushback displacement will cause the deformation of the finite side of the soil body towards the outside of the pit, and the deformation of the supporting piles will change significantly. In the case of a large degree of asymmetry, the soil pressure in the active zone of the finite side appears to change in shape and magnitude, and in the case of a smaller degree of asymmetry, only a change in magnitude occurs. Therefore, when the asymmetric condition of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3009400); 国家自然科学基金重点项目(52238009); 国家自然科学基金面上项目(42377169); 国家自然科学基金地区项目(52168048, 42267022); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2024-B198)This work was supported by National Key R&D Program of China (Grant No.2023YFC3009400), Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No.52238009), General Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42377169), Regional Programs of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52168048, 42267022) and Special Funding Program for Graduate Student Innovation in Jiangxi Province (No. YC2024-B198).

收稿日期(Received): 2024-10-11 修回日期(Revised): 2024-12-12 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

\*通信作者(E-mail: xucj@zju.edu.cn)

unilateral finite soil body occurs in the foundation pit, the influence of pushback displacement should be fully considered, so as to obtain a more reasonable design and construction scheme of foundation pit support.

**Key words:** asymmetric foundation pit; finite soil; modelling test; push-back displacement; force and deformation

## 0 引言

随着中国城市化进程不断推进, 新建工程项目常坐落于建构建筑物密集区域。作为主体建筑建设开始前的临时性工程, 城市地区基坑工程需要面临复杂的周边环境, 可能造成基坑两侧支护结构非对称的工况。根据非对称工况的成因, 可以将非对称基坑划分为 3 类, 分别是: 荷载非对称、开挖非对称、土体非对称。非对称工况存在于内撑式支护体系时, 可能造成基坑两侧支护受力变形相互影响。

作为最常见的基坑支护体系之一, 内撑式支护因其变形控制效果好、受力合理而在城市基坑中得到了广泛的应用。在基坑两侧非对称的工况下, 由于内支撑的影响, 支护结构变形与受力情况可能与对称工况存在较大差异。常见的基坑支护结构设计方法, 如等值梁法、竖向弹性地基梁法等<sup>[1]</sup>, 均对基坑剖面取最不利工况进行单边设计, 无法全面考虑内撑式支护结构两侧的相互影响。已有学者针对这一问题展开研究, 通过对经典计算方法进行修正, 将基坑两侧的相互影响纳入设计考量中。例如, 徐长节等<sup>[2]</sup>基于共同变形理论修正了等值梁法, 使其适用于非对称开挖基坑的设计计算; 范晓真等<sup>[3-4]</sup>将非极限土压力理论纳入非对称开挖基坑的变形计算中, 提出了非对称开挖基坑的变形控制设计方法。金亚兵等<sup>[5]</sup>提出非对称荷载土压力比的概念, 建立土压力比与非对称基坑位移模式、不动点调整系数之间的相关关系; 阮升等<sup>[6]</sup>进一步将支护结构的整体位移纳入非对称荷载作用的基坑不动点调整系数与支撑支点水平刚度系数的计算中。这些工作有力地推进了非对称基坑领域的研究, 但由于非对称基坑工作机理尚不清晰, 理论研究往往存在较多假设, 难以完全体现非对称基坑两侧的相互作用。

案例研究是明确非对称基坑受力变形特性的重要手段, 可以为理论方法的准确性提供有效的验证, 并为设计施工提供有力的依据。Xu 等<sup>[7-8]</sup>、林刚等<sup>[9]</sup>、姚爱军等<sup>[10]</sup>基于工程现场的实际情况, 开展了现场监测或数值模拟研究, 为非对称基坑的研究工作提供了可靠的数据。石钰锋等<sup>[11]</sup>、张学民等<sup>[12]</sup>、Ou 等<sup>[13]</sup>都基于深圳地铁民治站基坑工程展开研究, 分别探究了铁路路基、列车动载等不同因素引起的非对称工况对支护结构受力变形的影响。这些工作细致且全面, 涵盖了该基坑的诸多重要影响因素, 也反映出实际工程中非对称基坑受到多种因素的共同作用。现场案例的复杂性, 不利于研究者理清单一影响因素的作用效果

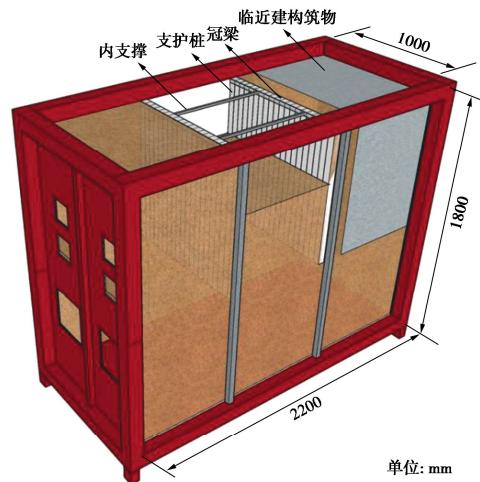
与机理。为此, Fan 等<sup>[14]</sup>、葛帆等<sup>[15]</sup>提取了非对称基坑研究中的单一影响因素, 通过室内模型试验, 探究了非对称开挖和非对称荷载作用下基坑的受力变形机理。

当前, 由临近地下结构引起的单侧有限土体非对称基坑, 已经在诸多案例研究中得到报道<sup>[16-17]</sup>。然而, 这类非对称基坑因其有限土体区复杂的受力情况, 目前暂未见有学者展开机理性的研究。因此, 针对现有研究的局限性, 本文对单侧有限土体的非对称基坑工况展开室内模型试验研究, 探究了在单侧有限土体工况下非对称基坑支护桩的受力变形机理。研究结果可以为后续的工程实践与理论方法开发提供有效的参考。

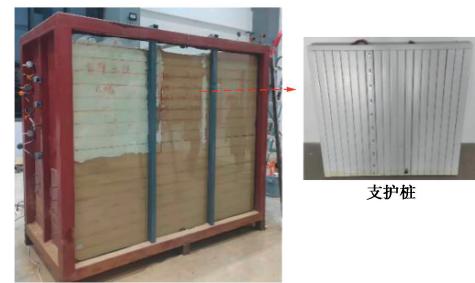
## 1 模型试验设计

### 1.1 试验模型箱

本文开展单侧有限土体非对称基坑模型试验, 采用装土区域尺寸为 2200 mm×1000 mm×1800 mm (长×宽×高) 的无盖长方形钢制模型箱, 如图 1 所示。模型箱宽度方向为高强度钢板, 设置一道钢管加固箱体, 钢板上开设有多个卸砂方孔, 用于试验结束后卸除试验用砂。模型箱长度方向为透明钢化玻璃观察窗, 设置两道高强度钢管加固箱体, 限制箱体侧向变形。



(a) 模型箱示意图



(b) 模型箱侧视图

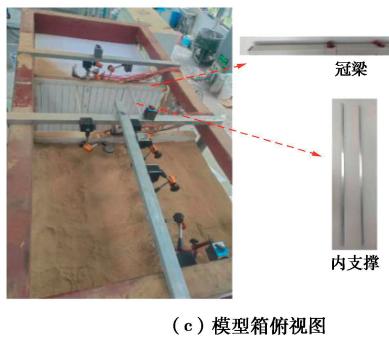


图 1 模型箱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model box

## 1.2 土体参数

本次试验土样采用过 5 mm 筛的干细砂，平均粒径  $d_{50}$  为 0.39 mm，不均匀系数  $C_u$  为 3.75，重度  $\gamma$  为 18.5 kN/m。B  $d_{50}$  约为 128，大于文献[18]推荐的临界值，可以忽略土体的尺寸效应。试验土样采用砂雨法分层填筑，重复试验显示同组试验的桩体应变相差 5% 以内，试验土体密实度控制良好。土体填筑完成后，取样开展土工试验，得到干细砂物理参数。具体参数如表 1。由于本试验目的在于定性揭露非对称工况下基坑支护结构的受力变形规律，而非对实际工程进行定量反推预测，为简化试验步骤，不对土体进行缩尺设计<sup>[19]</sup>。

表 1 土体参数

Table 1 Soil parameters

指标	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /°	含水率 $w$ /%	孔隙比 $e$
数值	0.60	28.60	3.28	0.68

## 1.3 基坑模型与支护材料参数

本试验中原型工程基坑深为 10 m，宽为 12 m，采用支护桩-内支撑支护方式。支护桩为桩径 1000 mm 的钢筋混凝土结构，嵌固深度为 8 m；内撑采用截面尺寸为 0.8 m×0.8 m 的钢筋混凝土支撑。试验主要控制基坑支护结构尺寸与刚度满足相似比。根据模型试验条件与工况需要，取相似比例为 1:20。

### (1) 支护桩

根据现有模型试验经验<sup>[20]</sup>，支护桩材料采用硬质 PVC 材料的空心矩形管，支护桩按照抗弯刚度等效相似原则设计，支护桩截面计算公式如下：

$$\frac{E_p I_p}{1 - \nu_p^2} = (n)^5 \frac{E_m I_m}{1 - \nu_m^2} \quad (1)$$

式中： $E$  为弹性模量； $I$  为截面惯性矩； $\nu$  为泊松比；下标  $p$  表示原型值；下标  $m$  表示模型值， $n$  为相似比（1:20）。实际支护桩桩径 1000 mm，钢筋混凝土弹性模量为 35 GPa，泊松比约为 0.2。本试验中 PVC 材料弹性模量为 3 GPa，泊松比约为 0.4，代入式（1），

可以选取模型支护桩截面尺寸为 50 mm×50 mm×2 mm（长×宽×壁厚），有效桩长为 0.9 m。

### (2) 冠梁

冠梁材料采用硬质 PVC 材料的空心矩形槽，冠梁按照抗弯刚度等效相似原则，依据式（1）进行设计。实际冠梁截面尺寸为 0.8 m×0.8 m，钢筋混凝土弹性模量为 35 GPa，泊松比约为 0.2。本试验中 PVC 材料弹性模量为 3 GPa，泊松比约为 0.4，代入式（1），可以选取模型冠梁截面尺寸为 56 mm×25 mm×3 mm（长×宽×壁厚）。

### (3) 内支撑

根据现有模型试验经验<sup>[21]</sup>，内支撑材料采用空心薄壁铝合金方管进行模拟，支护桩按照抗压刚度等效相似原则设计，内支撑截面计算公式如下：

$$E_p A_p = (n)^3 E_m A_m \quad (2)$$

式中： $A$  为内支撑截面积。实际内支撑尺寸为 0.8 m×0.8 m，钢筋混凝土弹性模量为 35 GPa，铝合金材料弹性模量为 7 GPa，代入式（2），可以选取模型支护桩截面尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm（长×宽×壁厚），内支撑长度为 0.7 m。

## 1.4 临近建构筑物模型材料参数

本试验主要目的是明确单侧有限土体对内撑式深基坑支护结构受力变形的作用效果与机理，因此需要排除临近建构筑物超载的影响。

为此，本试验采用了高密度的硬质 PVC 板对临近建构筑物进行模拟，所采用的 PVC 材料密度约为 1.85 g/cm<sup>3</sup>，与试验所用的干细砂密度接近，可以近似忽略临近结构模型造成的超载影响。PVC 板材截面尺寸为 1000 mm×900 mm（长×宽），在安装至指定位置后，建构筑物底面埋深与支护桩桩底埋深一致。这保证了试验中支护桩外产生的潜在滑裂面可以通过建构筑物侧壁，形成有限土体区的工作效果。

针对实际工程中由于临近建构筑物引发的单侧有限土体非对称与非对称荷载共同作用的深基坑，可以依据本文与文献[15]提供的研究结果进行综合研判。

## 1.5 试验工况及步骤

如表 2 所示，本试验共设置 6 组工况，工况 1 为无临近建构筑物的对照组，工况 2~6 为存在临近建构筑物的试验工况。以工况 2 为例，试验步骤如下：

### (1) 试验准备工作

根据试验方案，布设土压力盒监测桩和应变监测桩，并将支护桩、冠梁连结固定，形成完整的支护构件。砂土采用人工砂雨法进行填筑，控制砂土落距与落砂速度，每层填筑 100 mm 直至达设计高度，填砂过程中逐层压实，严格控制压实效果。当砂土填筑至

90 cm 时, 将支护桩和临近建筑物安装至设计指定位置, 并在支护桩两侧填充填缝发泡胶, 避免两侧缝隙漏砂。继续在支护桩两侧同步填砂直至地表高度, 随后安装百分表并将监测桩导线与应力应变采集仪连接。

### (2) 基坑开挖试验

按照分层开挖的方式进行基坑的开挖工作, 首先开挖 20 cm, 并架设第一道内支撑, 随后按 10 cm 每层逐层开挖直到预设深度, 施工步如表 3 所示。每步土方开挖完成后, 等待监测仪器与系统读数稳定后, 记录百分表读数与读数时间, 再进行下一步开挖工作。

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	模型工况	原型工况
1	无临近建构筑物	无临近建构筑物
2	$d=10 \text{ cm}$	$d=2 \text{ m}$
3	$d=20 \text{ cm}$	$d=4 \text{ m}$
4	$d=30 \text{ cm}$	$d=6 \text{ m}$
5	$d=40 \text{ cm}$	$d=8 \text{ m}$
6	$d=50 \text{ cm}$	$d=10 \text{ m}$

表 3 试验施工步

Table 3 Test construction steps

施工步	施工情况
1	开挖至 20 cm 并架设支撑
2	开挖至 30 cm
3	开挖至 40 cm
4	开挖至 50 cm

### 1.6 监测点位布置

在基坑两侧支护桩上分别设置应变监测桩和土压力监测桩。应变片沿深度方向粘贴于监测桩内侧中线, 可以根据应变片监测数据与文献[19, 21]提供的挠度计算公式确定桩身变形情况。土压力监测桩设置 DMTY 型土压力盒 (直径 12 mm, 厚度 4.2 mm, 量程 30 kPa), 土压力盒粘贴在桩外侧中轴线处, 沿深度方向排布。下文将近似采用监测桩测得的应变和土压力情况, 对支护桩整体的受力变形情况进行分析。

在坑外地表中线处, 沿长度方向布置百分表来测量基坑开挖引起的地表沉降。由于工况 2、3 有限土体侧土体宽度窄, 仅在坑边、土体中间、临近建筑物边缘布置百分表。监测仪器的具体布置情况见图 2。

## 2 支护桩监测结果分析

### 2.1 支护桩侧移形态与分布规律

图 3 展示了各工况下支护桩水平侧移情况。在施工步 1 中, 基坑内支撑未架设, 支护桩呈现出“悬臂型”变位形态; 施工步 2~4 中, 基坑内支撑已经架设, 支护桩在两侧均呈现出“鼓肚型”变位形态。这表明

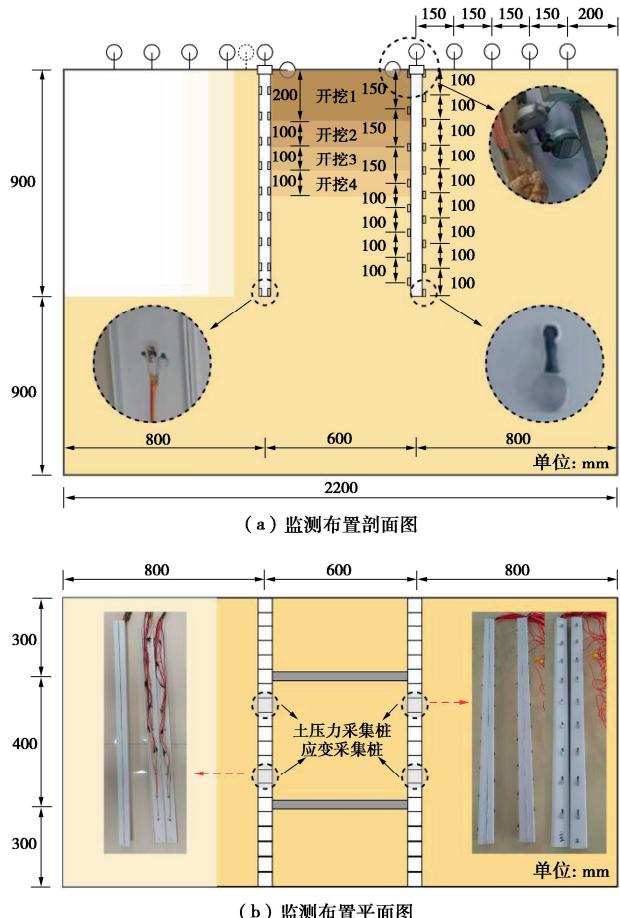


图 2 监测布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monitoring arrangement

非对称基坑支护桩变形形态, 与对称基坑<sup>[1]</sup>基本一致。

在土体半无限侧, 工况 2~6 中内支撑架设后支护桩桩顶仍监测到位移增大的现象。同时, 与工况 1 相比, 工况 2~6 的桩身整体变形均出现显著增长, 内支撑所提供的轴向力减小是这一变形情况的诱因。这说明在非对称工况下, 内支撑将产生朝向有限土体侧的平动, 削弱了内支撑对半无限空间一侧支护桩的变形限制, 导致该侧桩身变形增大。在有限土体侧, 随着开挖深度的增加, 工况 2、3 中支护桩桩顶出现了朝向坑外的变形, 与文献[11]监测到的现象一致。工况 4~6 随着开挖的进行, 桩顶呈现位移减小的趋势, 但未出现朝向坑外的变形。这表明了非对称工况中内支撑将进一步限制有限土体侧的支护桩变形, 这种限制作用受到非对称程度的影响。当非对称程度过大时, 支护结构可能出现朝向坑外的变形, 这将导致传统基坑设计中的坑外主动区出现被动状态的土压力, 可能引起受力与变形上的突变。综合考虑基坑两侧的变形情况可以发现, 非对称工况以内支撑为媒介传递基坑两侧支护的变形, 两侧支护桩与内支撑均出现了朝向有限土体侧的整体变形, 即“推回位移”现象<sup>[4]</sup>。

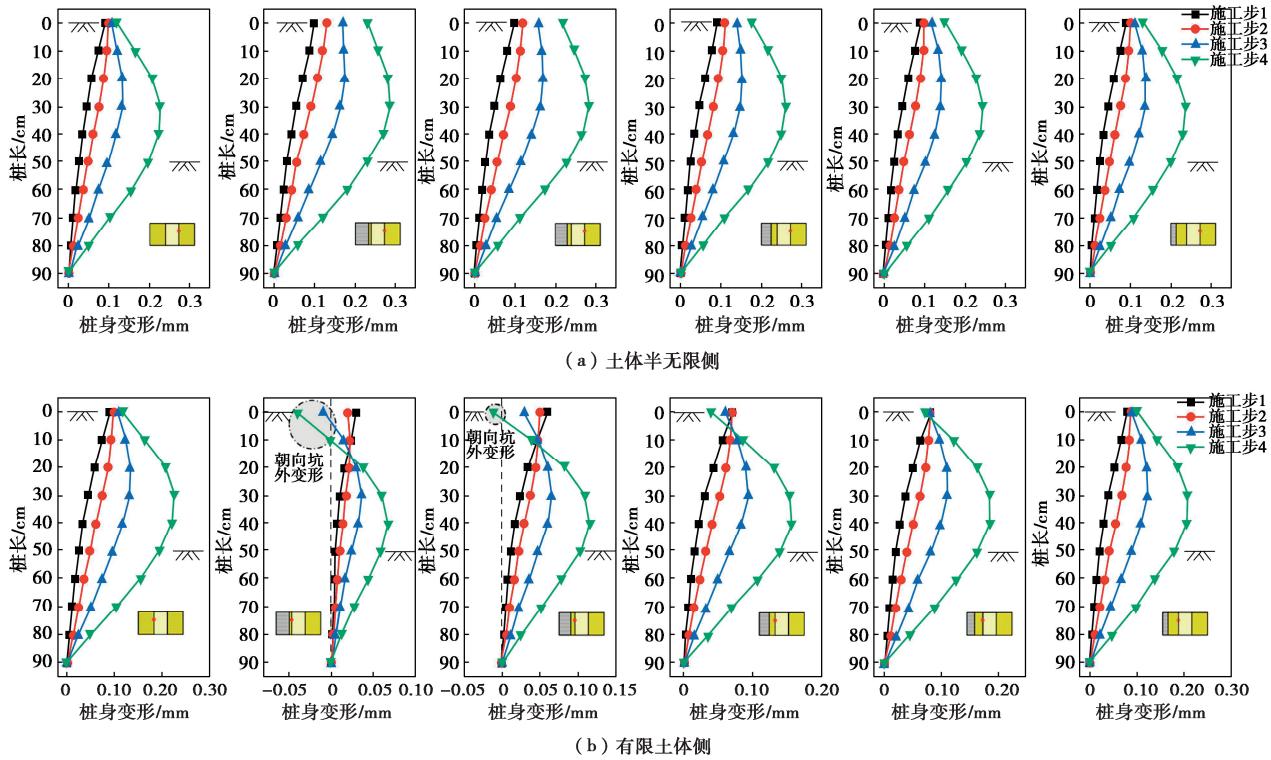


图 3 支护桩水平侧移

Fig. 3 Lateral displacement of supporting piles

## 2.2 支护桩最大侧移

图 4 总结了支护结构最大侧向挠度 ( $\delta_{hm}$ ) 与开挖深度 ( $H_d$ ) 之间的相关关系。在土体半无限侧, 随着基坑挖深增大, 支护桩最大侧移均呈线性增大趋势, 与既有实测研究的统计结果<sup>[22-24]</sup>趋势相同。在有限土体侧, 工况 2~4 在施工步二中出现挖深增大但最大侧移减小的情况, 其他工况下随挖深增大支护桩最大侧移仍线性增大。这是由于工况 2~4 的非对称程度较大, 在内支撑施工后, 支护结构整体推回位移对有限侧支护桩变形的限制作用大于土方卸荷造成的影响。

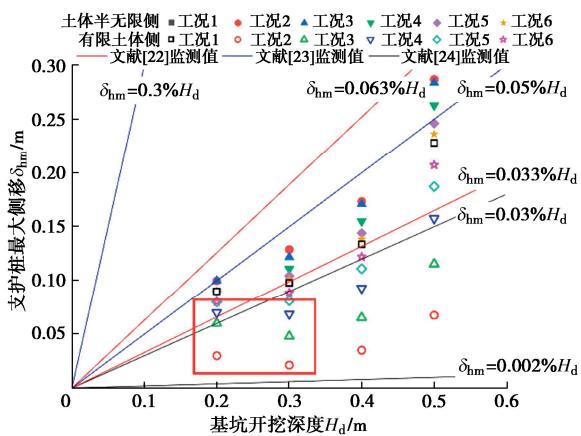


图 4 支护桩最大侧移随开挖深度的变化

Fig. 4 Variation of maximum lateral movement of supporting piles with depth of excavation

在工况 1 中,  $\delta_{hm}/H_d$  约为 0.032%~0.046%, 大于

文献[24]的统计结果, 与文献[22]的统计结果接近, 略小于文献[23]的统计结果。这种差异可能是由基坑的施工因素与试验的缩尺效应造成的, 但在趋势与数据范围上的一致性仍显示出本文试验研究的可靠性与合理性。以工况 1 为分界, 土体半无限侧的支护桩最大侧移均大于工况 1 的最大侧移情况, 有限土体侧的支护桩最大侧移均小于工况 1 的最大侧移情况。与工况 1 相比, 非对称程度最大的工况 2 土体半无限侧侧移幅值增长了约 25.8%, 有限土体侧侧移幅值减小了约 70.6%。这表明土体半无限侧支护桩存在较大变形与破坏风险, 存在倾覆破坏的可能。有限土体侧由于主动区的土体宽度减小与推回位移的共同作用, 侧移幅值大幅下降。因此, 适当减小有限土体侧的支护刚度或插入比, 增大其朝向基坑内的变形, 有利于抑制土体半无限侧的变形并提高支护结构的经济性, 是单侧有限土体非对称基坑优化设计的思路之一。

在工况 4~6 中, 随着非对称程度增大, 土体半无限侧最大侧移量逐渐增大, 有限土体侧的最大侧移量逐渐减小。在工况 2~3 中, 随着非对称程度增大, 土体半无限侧最大侧移量基本不变, 有限土体侧的最大侧移量大幅度减小。结合图 3 中支护桩水平侧移情况可以推知, 有限土体侧支护桩出现朝向坑外的位移是非对称工况的重要分界, 当非对称程度足以出现这一变形工况时, 进一步增大非对称程度不影响土体半无限侧最大侧移量, 但对有限土体侧的最大侧移量影响

显著。这种现象产生的原因可能是由于有限侧朝向坑外的变形, 导致桩后主动区出现较大的被动状态土压力, 并通过内支撑传递限制了半无限侧的进一步变形。有限土体侧最大侧移埋深主要集中在开挖面附近, 远离支护桩桩顶。其变形主要由有限土体区域的主动土压力控制, 土体宽度减小有效削减了这部分外力, 使得支护桩的最大侧移仍呈现减小的趋势。

图 5 展示了支护桩最大侧移埋深 ( $H_{\delta hm}$ ) 与开挖深度 ( $H_d$ ) 之间的相关关系。在施工步 1 中, 支护桩最大侧移均位于桩顶, 在内支撑施工后, 支护桩最大侧移埋深随开挖深度增大不断增加。在施工步 2~4 中, 支护桩最大侧移埋深均略高于基坑坑底, 与文献 [1] 总结规律接近。在土体半无限侧, 随着非对称程度改变, 支护桩最大侧移埋深均未发生改变; 在有限土体侧, 随非对称程度增大, 支护桩最大侧移埋深呈增大趋势。这表明非对称工况不影响土体半无限侧的支护桩的变形形态与潜在破坏形式, 但可能改变有限土体一侧的变形形态与潜在破坏形式。综合图 3 所展示的情况进行分析, 在非对称程度较小的工况 5, 6, 支护桩主要仍由朝向坑内的开挖变形控制, 基坑总体上呈现出朝向坑内的倾覆破坏趋势。在非对称程度较大的工况 2~4, 土体半无限空间侧仍由开挖变形控制, 但在有限土体侧由开挖变形与推回位移共同控制, 这导致了支护桩顶部侧移大幅减小, 最大侧移埋深迅速下降。

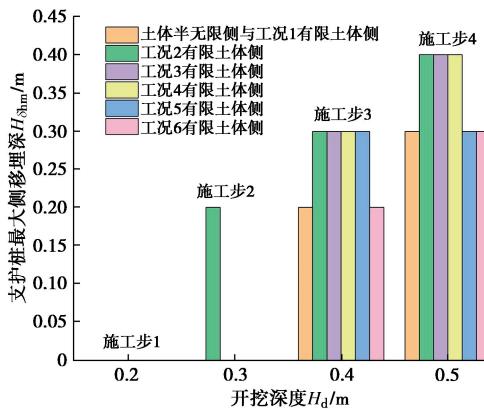


图 5 支护桩最大侧移埋深开挖深度的相关关系

Fig. 5 Correlation between the maximum lateral displacement of supporting piles and depth of excavation

### 2.3 桩顶位移变化情况

图 6 展示了各工况下桩顶位移随开挖深度的变化趋势。在工况 1 中, 随着基坑开挖进行, 桩顶位移值出现小幅度增长。在土体半无限侧, 施工步 1, 2 中, 随非对称程度增加, 支护桩桩顶位移值不断增大。在施工步 3, 4 中, 随非对称程度增加, 工况 2, 3 增幅显著小于工况 4~6。这证实了出现朝向坑外位移是非对称程度的一个重要分界。在有限土体侧, 工况 4~6

的桩顶位移仅出现小幅度变化。工况 2, 3 随着非对称程度增加, 桩顶位移值出现了大幅度减小, 并随着开挖进行进一步减小, 并出现了朝向坑外的位移。

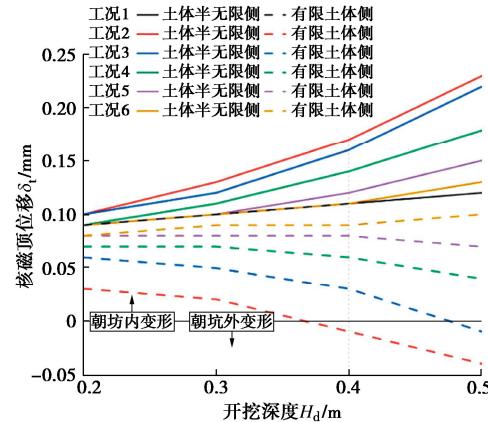


图 6 桩顶侧移随开挖深度变化

Fig. 6 Variation of lateral movement of pile top with depth of excavation

由于支撑仅架设于支护桩桩顶, 可以通过两侧桩顶位移值来描述内支撑的压缩变形情况。图 7 展示了内支撑压缩变形量随开挖深度的变化趋势。不同工况下随开挖深度增大内支撑均受到进一步压缩。非对称程度越大的基坑, 内支撑压缩变形量越小, 这佐证了非对称工况作用下内支撑将朝向有限土体侧发生平动。

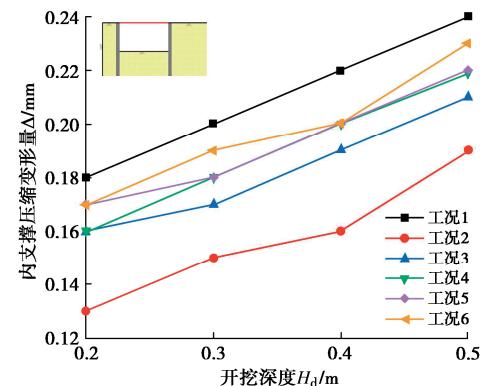


图 7 内支撑压缩量随开挖深度变化

Fig. 7 Variation of internal support compression with depth of excavation

### 2.4 支护桩土压力变化情况

选取工况 1, 2, 6 中支护桩侧向土压力进行分析。图 8 展示了各施工阶段下土体半无限侧土压力。在工况 1 中, 随着开挖施工的进行, 主动区土压力呈不断减小的趋势, 土压力沿深度方向呈接近线性增大分布, 各深度土压力均介于静止土压力与朗肯主动土压力之间。在坑内被动区, 接近基坑开挖面处被动土压力随基坑开挖深度增大而不断增大, 在支护桩桩底, 土压力随基坑开挖深度增大呈减小趋势。

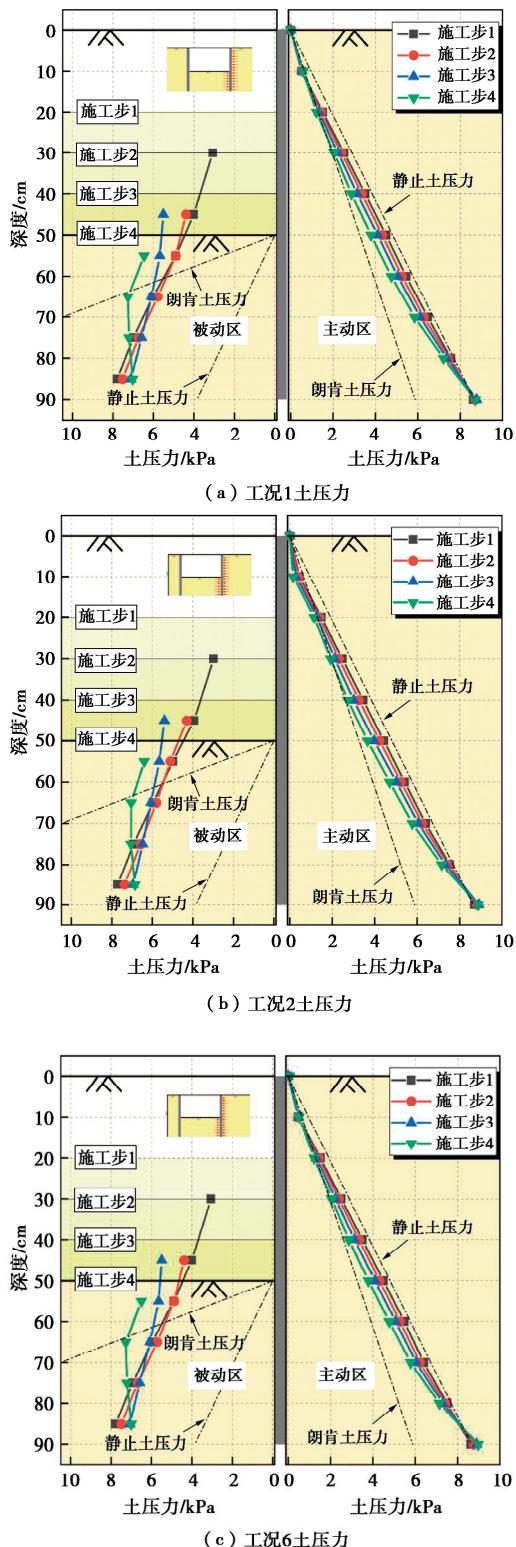


图 8 土体半无限侧土压力

Fig. 8 Earth pressure on semi-infinite side of soil body

结合图 3 所示的支护桩变形情况可以发现，被动区深度较浅处侧向位移较大，较深处位移较小。这将造成被动区较浅处土体易受到挤压，可能首先达到极限状态并产生较大的侧向土压力。桩底的位移较小，土体远未能达到极限状态，因此产生的侧向土压力较小。

与工况 1 相比，工况 2 主动区开挖面以上的土压力测点，土压力均出现了不同幅度的减小，测点 2 的影响程度最为显著，降幅达到 73%。这是由于支护结构朝向有限土体一侧整体的推回位移，导致开挖面以上支护桩朝向坑内的位移增大。受推回位移影响，较浅处土压力显著减小。主动区开挖面以下与土体被动区，土压力大小与分布情况与工况 1 接近。这表明了在非对称程度较大的工况下，土体半无限一侧主动区基坑开挖面以上区域是土压力主要影响范围，在支护设计工作中应进行充分考虑。工况 6 与工况 1 相比，土压力分布形态基本一致，土压力大小仅有小幅度变化。这说明在非对称程度较小的工况下，半无限侧的土压力受整体推回位移的影响较小。

图 9 展示了各施工阶段下土体有限侧土压力。与工况 1 相比，工况 2 主动区桩顶土压力出现了大幅度增长，测点 1, 2 分别增大约 0.41, 0.55 kPa。在测点 3~8，侧向土压力出现了大幅度减小，其中测点 6 土压力减小量最大，达到 0.69 kPa。在这种工况下，支护桩主动区侧向土压力呈现出 R 形分布模式，有别于经典土压力理论的线性分布形态。这种分布形态在已有文献的工程实测资料或试验研究中都曾观测到。文献[1]认为，这种分布形态可能是由于支护桩底端以上存在转动点，导致支护桩后同时存在主动和被动土压力。文献[22, 25]认为，这种分布形态可能是由于沿桩身方向的竖向土拱导致的。综合考虑该工况的实际情况。在支护桩的桩顶，由于推回位移的影响，有限土体侧桩顶出现了朝向坑外的位移，测点 1, 2 处土压力实际上处于被动状态。受有限土体宽度的影响，实际对支护桩产生土压力的土体宽度小于对照工况，因此在测点 3~8 土压力出现了大幅度减小。从土拱效应的角度分析，由于内支撑与桩底嵌固的作用，在支护桩桩顶与桩底形成相对静止的土体区域，支护桩中部的土体产生了朝向坑内的相对滑动，沿桩身方向土体形成与“活板门”试验类似的土体位移场。支护桩中部的土样在达到极限状态后，通过土拱线沿深度方向产生了应力重分布，土拱的拱脚分别位于测点 2 和测点 9 附近。在坑内被动区，随着开挖施工的进行，被动土压力变化幅度很小。这是由于非对称程度较大的工况下，开挖面以下支护桩变形量很小造成的。

工况 6 在土压力分布情况与工况 1 十分接近，数值上略小于工况 1 测得的数值。这是由于主动区土体宽度较窄，使得作用在支护桩上的土压力值较小。这表明了当非对称程度较小时，非对称工况的作用仅影响土压力的大小，不影响土压力的分布形态。

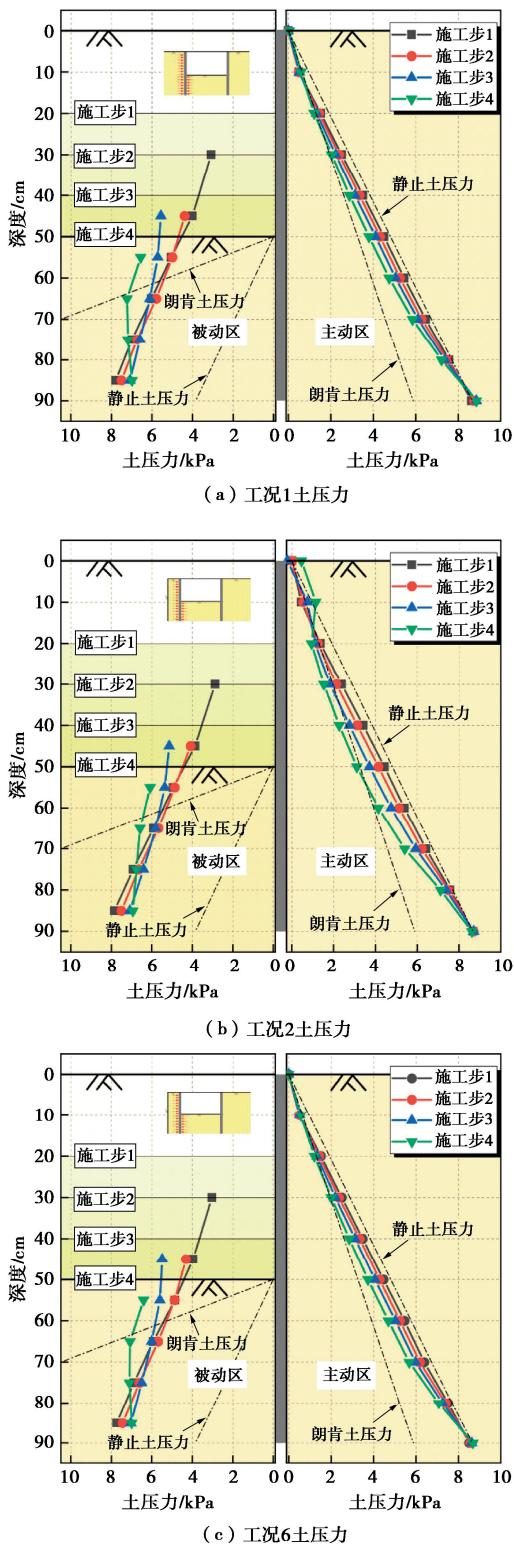


图 9 有限土体侧土压力

Fig. 9 Earth pressure on finite side of soil body

## 2.5 非对称工况作用机理

综合以上支护桩受力变形情况可知, 以内支撑为中介联系起基坑两侧支护桩的协同变形, 形成了支护结构整体的推回位移。这种推回位移是非对称基坑的重要考虑因素。为了明确推回位移的实际开展情况, 笔者将工况 2~6 半无限侧支护桩变形量与工况 1 分别

取差值, 得到图 10, 用以表征“推回位移”开展情况。可以看出, 在不同非对称工况下, 支护桩推回位移均沿桩深度逐步减小, 变化趋势基本一致。

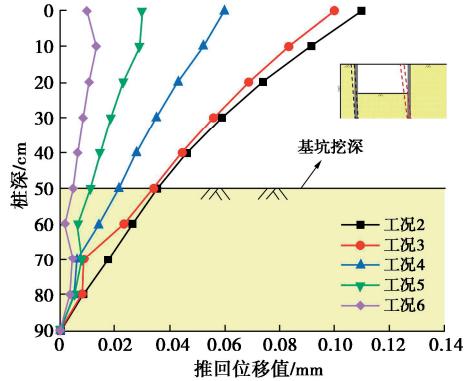


图 10 推回位移作用情况

Fig. 10 Push-back displacement action

在工况 4~6 中, 随着基坑非对称程度增大, 推回位移不断增大。相比工况 4~6, 工况 3 的推回位移值出现较大幅度增长, 且当进一步提高非对称程度的情况下(如工况 2), 推回位移值无明显增长。这是由于在工况 2, 3 下, 有限土体侧支护桩朝向基坑外的变形使坑外侧出现了被动状态的土压力, 限制了进一步的推回位移变形, 这说明支护桩是否出现朝向坑外变形的情况是判断非对称程度的重要临界点。单层内支撑的非对称基坑如果存在超过这一临界点的工况, 内支撑将在支护桩推回位移与朝向坑内的开挖形变共同作用下, 同时产生平动和压缩变形。从基坑设计角度分析, 这种情况下将不存在现行行标《建筑基坑支护技术规程: JGJ120—2012》<sup>[26]</sup>推荐使用的内支撑不动点; 从施工角度分析, 非对称程度大的基坑存在出现朝向坑外变形的临界挖深, 当开挖深度超过临界挖深时, 基坑支护结构变形可能产生突变。

## 3 地表沉降结果分析

图 11 给出了各试验工况中桩后地表沉降情况, 其中  $\delta_v$  代表典型断面的地表沉降,  $\delta_{vm}$  为同一断面最大地表沉降,  $d$  为距支护结构的距离,  $H_c$  为最终开挖深度。图 11 中使用了文献[27]提出的三角形和凹槽型沉降槽对试验工况进行了计算。在工况 1 中, 基坑两侧均呈现出凹槽型沉降模式, 地表沉降随开挖深度增大不断增大, 最大沉降值均出现在 0.9 倍开挖深度处。坑边地表沉降值为 0, 这说明试验中采用的内支撑对基坑变形起到了良好的限制作用。

在非对称工况下, 土体半无限侧地表沉降随开挖深度增大而逐渐增大, 地表最大沉降均出现在开挖深度 60% 处。这表明非对称工况出现, 将使最大地表沉

降位置向接近支护桩的方向移动,但进一步增大非对称工况,地表最大沉降位置并未发生改变。基坑坑边均测得了地表沉降,这是由于推回位移使土体无限侧支护桩顶部出现了朝向坑内的变形,进而引发了坑边地表沉降。在距离坑边较近处,沉降量随距离增大迅速增长,在距离坑边较远处,沉降量随距离增大迅速减小,即非对称工况使该侧地表沉降变化速率加快。

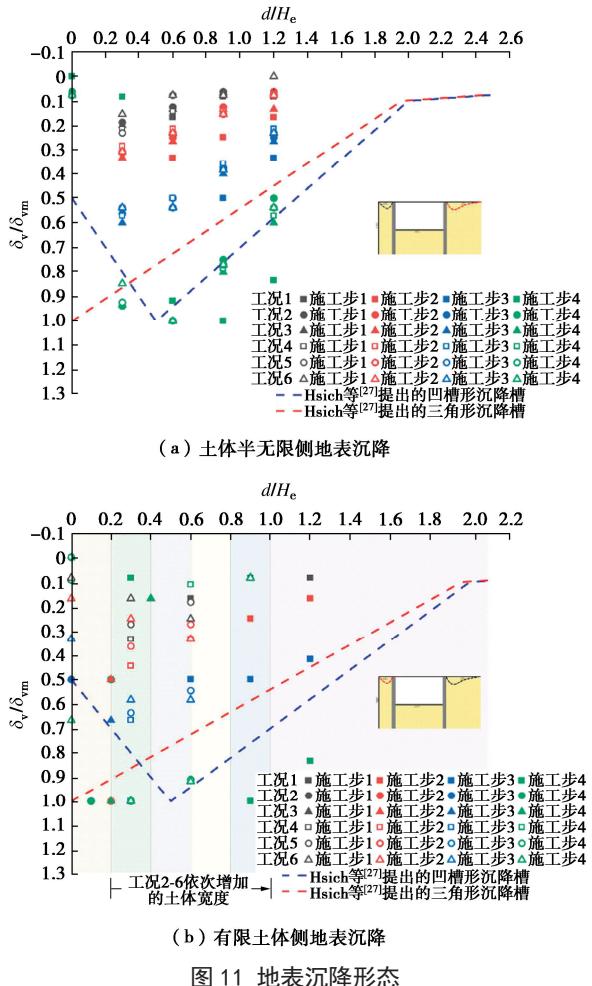


Fig. 11 Surface settlement patterns

结合支护桩推回位移形态的分析,坑外地表沉降应划分为基坑开挖引起和推回位移引起两部分。开挖引起的地表沉降呈现出凹槽形分布;推回位移形态接近朝向坑内的线性分布,其导致的坑外地表沉降形态接近三角形模式。文献[27]认为最大地表沉降位置不随工况的变化而变化。由于非对称基坑地表沉降包含凹槽形和三角形沉降两部分,出现非对称工况后,最大地表沉降位置朝向支护桩方向发生显著移动,增大非对称程度不能改变地表最大沉降位置,这与文献[27]观点一致。因此,存在非对称工况的内撑式基坑,最大地表沉降位置更接近坑边,在工程中应加以考虑。

在有限土体侧,非对称程度较大的工况 2, 3 中,地表最大沉降位置位于地表中部点位,靠近支护桩与

临近建构构筑物的监测点位测得的数值均较小。工况 4~6 中,地表最大沉降位置均位于开挖深度 30% 处,改变非对称程度没有改变地表最大沉降位置。相比土体半无限侧,有限土体侧地表最大沉降位置更接近坑边。

## 4 结 论

为探究单侧有限土体非对称工况下基坑支护受力变形情况,开展了室内模型试验,主要得到以下 4 点结论。

(1) 基坑两侧非对称工况将导致内撑式基坑支护结构出现朝向有限土体侧的整体推回位移,非对称程度过大时将使有限土体侧支护桩出现朝向坑外的变形。是否存在造成有限土体侧朝向坑外变形的工况,是非对称程度的重要分界。

(2) 土体半无限侧基坑受力变形形态与对称情况一致。推回位移将削弱内支撑对支护桩桩顶的约束,并增大桩顶与坑边的变形,减小桩顶主动区的土压力。

(3) 有限土体侧受推回位移约束,变形减小。非对称程度较大的工况下,有限土体侧受推回位移与有限宽度土体的共同影响,主动区土压力呈 R 形分布,被动区土压力波动较小。非对称程度较小的工况下,有限土体侧土压力与对称工况形态一致,数值较小。

(4) 将非对称基坑变形划分为由开挖引起和由推回位移引起两部分进行讨论,可以满足支护桩和地表沉降变形分析的需要。

值得注意的是,本文研究仅针对单道内支撑工况,多道内支撑工况下的情况,有待进一步开展研究。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 林钊睿、蒋亚龙和方焘设计试验内容,林钊睿、蒋亚龙、范晓真和丁海滨参与试验实施,徐长节、方焘和石钰峰提供研究指导,林钊睿、蒋亚龙和徐长节参与论文的写作和修改,蒋亚龙、徐长节和方焘提供工作支持。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The experiment was designed by LIN Zhaorui, JIANG Yalong and FANG Tao; LIN Zhaorui, JIANG Yalong, FAN Xiaozhen and DING Haibin were involved in the implementation of the experiment; XU Changjie, FANG Tao and SHI Yufeng provided research guidance; LIN Zhaorui, JIANG Yalong and XU Changjie were involved in the writing and revising of the paper; JIANG Yalong, XU Changjie and FANG Tao provided work support. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

**参考文献:**

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guobin, WANG Weidong. Foundation Pit Engineering Manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 徐长节, 殷铭, 胡文韬. 非对称开挖基坑支撑式围护结构解析解[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2306-2312. (XU Changjie, YIN Ming, HU Wentao. Analytical solutions of calculating length of retaining structures of foundation pit under asymmetric excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2306-2312. (in Chinese))
- [3] 范晓真. 非对称开挖内撑式支护受力变形机理及变形控制设计理论[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. (FAN Xiaozhen. Stress-Deformation Mechanism and Deformation-Controlled Design Theory of Braced Retaining Structure under Asymmetrical Excavation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese))
- [4] 范晓真, 许海明, 徐长节, 等. 非对称开挖砂性土基坑刚性支护结构解析解[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(4): 397-405. (FAN Xiaozhen, XU Haiming, XU Changjie, et al. Analytical solution for rigid retaining structure under asymmetric excavation in cohesionless soil[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(4): 397-405. (in Chinese))
- [5] 金亚兵, 刘 动, 孙 勇. 非对称荷载基坑内支撑支护结构设计计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1811-1818. (JIN Yabing, LIU Dong, SUN Yong. Design and calculation method of inner support structure in deep foundation pit under asymmetric load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1811-1818. (in Chinese))
- [6] 阮 升, 金亚兵, 徐晶鑫, 等. 非对称荷载单层对撑基坑计算方法研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2296-2304. (RUAN Sheng, JIN Yabing, XU Jingxin, et al. A calculation method of single-layer opposite bracing foundation pit under asymmetric load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2296-2304. (in Chinese))
- [7] XU C J, LIN Z R, JIANG Y L, et al. Research on the spatial effect of foundation pit under asymmetric loads[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 976696.
- [8] XU C J, XU Y L, SUN H L, et al. Characteristics of braced excavation under asymmetrical loads[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013(1): 452534.
- [9] 林 刚, 徐长节, 蔡袁强. 不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2592-2598. (LIN Gang, XU Changjie, CAI Yuanqiang. Research on characters of retaining structures for deep foundation pit excavation under unbalanced heaped load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592-2598. (in Chinese))
- [10] 姚爱军, 张新东. 不对称荷载对深基坑围护变形的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 378-382, 388. (YAO Ajun, ZHANG Xindong. Influence of asymmetric load on supporting deformation for deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 378-382, 388. (in Chinese))
- [11] 石钰锋, 阳军生, 白 伟, 等. 紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 826-833. (SHI Yufeng, YANG Junsheng, BAI Wei, et al. Analysis of field testing for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pit's enclosure structure close to railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 826-833. (in Chinese))
- [12] 张学民, 石钰锋, 张自力, 等. 列车动载作用下偏压基坑围护结构的动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 103-109. (ZHANG Xuemin, SHI Yufeng, ZHANG Zili, et al. Dynamic response of enclosure structure of an unsymmetrical loaded foundation pit under train induced dynamic load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 103-109. (in Chinese))
- [13] OU X F, ZHANG X M, FU J Y, et al. Cause investigation of large deformation of a deep excavation support system subjected to unsymmetrical surface loading[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 107: 104202.
- [14] FAN X Z, XU C J, LIANG L J, et al. Experimental and numerical study of braced retaining piles with asymmetrical excavation[J]. International Journal of Civil Engineering, 2024, 22(8): 1339-1356.
- [15] 葛 帆, 李泽江, 刘家国, 等. 非对称荷载下基坑内支撑结构受力与变形试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 162-170. (GE Fan, LI Zejiang, LIU Jiaguo, et al. Experimental study on stress and deformation of internal support structure under asymmetric load[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(1): 162-170. (in Chinese))
- [16] LIAO S M, WEI S F, SHEN S L. Structural responses of existing metro stations to adjacent deep excavations in Suzhou, China[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(4): 04015089.

- [17] LIU S H, YANG J S, FU J Y, et al. Performance of a deep excavation irregular supporting structure subjected to asymmetric loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, **19**(7): 05019007.
- [18] FIORAVANTE V. On the shaft friction modelling of non-displacement piles in sand[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(2): 23-33.
- [19] 迟民良, 梁禄矩, 徐长节, 等. 降水开挖共同作用下地连墙受力变形机制模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, **47**(2): 365-375. (CHI Minliang, LIANG Luju, XU Changjie et al. Laboratory-scale model test on the stress and deformation mechanism of diaphragm wall under combined effect of dewatering and excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, **47**(2): 365-375. (in Chinese))
- [20] 程雪松, 张润泽, 郑刚, 等. 局部超挖或超载作用下桩锚支护基坑连续垮塌试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(10): 2078-2088. (CHENG Xuesong, ZHANG Runze, ZHENG Gang, et al. Experimental study on progressive collapse of tied-back retaining system of excavations induced by partial over-excavation or surcharge loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(10): 2078-2088. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] YANG K W, LI Z F, CHEN Y M, et al. Soil arching - induced lateral earth pressure redistribution on the retaining wall in a multistrutted excavation in soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, **149**(10): 05023004.
- [23] TAN Y, ASCE M, WEI B, et al. Lessons learned from construction of shanghai metro stations: importance of quick excavation, prompt propping, timely casting, and segmented construction[J]. J Perform Constr Facil, 2015, **29**(4).
- [24] WANG R S, LIU S J, XU L H, et al. Performance of a 56 m deep circular excavation supported by diaphragm and cut-off double-wall system in Shanghai soft ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2023, **60**(4): 521-540.
- [25] CHEN R P, LIU M C, MENG F Y, et al. Soil arching effect associated with ground movement and stress transfer adjacent to braced excavation in clayey ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, **149**(12): 04023113.
- [26] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [27] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004-1017.