

文章编号:1005-0523(2025)06-0082-09



有限土体基坑围护结构侧移及地表沉降规律试验研究

方 煦,朱晓杰,方文苑,欧阳沛琦,夏良利

(华东交通大学土木建筑学院,江西南昌 330013)

摘要:为探究有限土体条件下基坑围护桩水平位移及坑外地表沉降的变化规律,开展了一侧为半无限土体、其余三侧为有限土体的基坑开挖模型试验。获取了有限土体基坑开挖下围护桩内力、变形及坑外地表沉降规律,并进一步分析了围护桩桩身水平位移与地表沉降的关系。结果表明:围护桩桩身水平位移与土体宽度 B 呈正相关,土体宽度的减小可有效降低围护桩桩顶及桩身水平位移;地表沉降最大值随土体宽度 B 的增加先增大后减小;有限土体宽度下,土体宽度对基坑坑外地表沉降影响显著,且土体宽度 B 存在临界值;围护桩桩身最大弯矩与土体宽度 B 呈正相关,土体宽度对最大弯矩的位置影响较小。研究可为今后有限土体基坑的设计及施工提供理论基础及依据。

关键词:有限土体基坑;模型试验;水平位移;地表沉降

中图分类号:TU473;[U25]

文献标志码:A

本文引用格式:方 煦,朱晓杰,方文苑,等.有限土体基坑围护结构侧移及地表沉降规律试验研究[J].华东交通大学学报,2025,42(6):82-90.

Experimental Study on Lateral Displacement and Surface Settlement Law of Foundation Pit Retaining Structures with Limited Soil

Fang Tao, Zhu Xiaojie, Fang Wenyuan, Ouyang Peiqi, Xia Liangli

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To explore the variation laws of horizontal displacement of foundation pit retaining piles and surface settlement outside the pit under finite soil conditions, an excavation model test was carried out on a foundation pit with semi-infinite soil mass on one side and finite soil on the other three sides. The variation laws of internal force, deformation of retaining piles and surface settlement outside the pit under the condition of limited soil mass were obtained and the relationship between the horizontal displacement of retaining piles and surface settlement was further analyzed. The results show that the horizontal displacement of retaining piles is positively correlated with the soil width B , and the reduction of soil width can effectively reduce the horizontal displacement at the top and along the body of retaining piles; the maximum surface settlement increases first and then decreases with the increase of soil width B . Under the condition of limited soil width, the soil width has a significant influence on the surface settlement outside the foundation pit, and there is a critical value of soil width B ; the maximum bending moment of the retaining pile body is positively correlated with the soil width B , and the soil width

收稿日期:2024-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(52168048)

has a small influence on the position of the maximum bending moment. The research can provide theoretical basis and basis for the design and construction of limited soil foundation pit in the future.

Key words: limited soil foundation pit; model test; horizontal displacement; surface settlement

Citation format: FANG T, ZHU X J, FANG W Y, et al. Experimental study on lateral displacement and surface settlement law of foundation pit retaining structures with limited soil[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(6): 82–90.

近年来,由于城市地下建设空间的大规模发展,导致拟建基坑工程与相邻建、构筑物及已有基坑的间距逐渐减小,从而产生了一些特殊的基坑工程,如基坑群工程、临近地下空间基坑工程等^[1],其围护结构均存在有限土体条件。有限土体与邻近结构相互作用,使基坑受力变形特征及开挖引发的周边环境响应异于常规基坑,亟需开展有限土体基坑受力及变形规律的研究。

目前,国内外学者针对有限土体基坑方面的研究已取得了一些成果。Khosravi 等^[2]通过模型试验的方法,研究了有限土体情况下的主动土压力问题,并运用颗粒图像测速技术(PIV)研究墙后土体的变形规律。Greco 等^[3]通过分析围护结构后的有限填土,采用极限平衡法推导出有限土体土压力。应宏伟等^[4]通过模型试验研究了不同有限土体宽度T模式下刚性挡墙土压力分布以及土体变形随墙体位移的变化规律。杨明辉等^[5]从试验、理论方面对有限土体土压力开展比较系统的研究,建立土体非线性变形与土压力关系式,提出考虑变形非线性影响的有限土体土压力计算方法。然而,上述研究大多针对有限土体基坑的土压力问题,对于有限土体基坑变形方面的研究则相对较少。

对于常规基坑工程中围护结构受力变形及地表沉降问题,众多国内外学者已进行了大量的研究。Wang 等^[6]收集并分析了多个上海软土深基坑工程开挖实例,总结出多种围护结构水平位移与开挖深度的关系,并给出围护结构水平位移最大值与地表沉降最大值的比例关系。Fan 等^[7]基于弹性位移边值理论及叠加原理,通过任意围护结构水平位移模式,求解得到相应的坑外地表沉降解析解。郑刚等^[8]借助模型试验,研究了多级支护基坑围护结构的受力及变形规律,并归纳出多级支护的3种破坏模式。韦实等^[9]通过3D 打印技术制作模型试验桩及冠梁,通过模型试验探究基坑开挖对锁口钢管桩围护结构受力及变形规律的影响。

上述学者对常规基坑工程中围护结构受力变形及地表沉降规律有诸多研究,但鲜少涉及有限土体基坑,且多为现场监测及理论分析,运用模型试验方法的相对较少。为此,本文开展一侧为半无限土体、其余三侧为有限土体的基坑开挖模型试验,研究不同开挖深度的有限土体情况下围护桩桩身水平位移、桩身弯矩及坑外地表沉降的变化规律。旨在探明基坑外土体宽度对基坑围护结构的内力、变形及坑外地表沉降的影响,并探讨了有限土体情况下基坑围护桩桩身水平位移与地表沉降的关系。本研究可为今后有限土体基坑的设计及施工提供理论基础及依据。

1 有限土体基坑模型试验

1.1 围护结构及模型箱

在有限土体基坑开挖模型试验过程中,模型桩可视为水平受荷桩。范晓真^[10]依据梁的挠曲微分方程推导水平受荷桩相似性方程为

$$\frac{1}{\lambda_L} = \frac{\lambda_R}{\lambda_E} \quad (1)$$

式中: λ_R , λ_L , λ_E 分别为抗力系数、长度及弹性模量相似比。基于试验条件综合考虑,选取模型试验相似比为 $\lambda_E = \lambda_L = 1/10$, λ_R 为1,即满足以上相似性方程。

围护结构由围护桩及冠梁组成,围护桩采用圆形PVC管模拟其弹性模量为3.0~3.5 GPa,是实际工程中围护桩的1/10,大致满足模型试验相似比 $\lambda_E = 1/10$;其长度为0.9 m,直径为32 mm,壁厚为2 mm,满足模型试验相似比 $\lambda_L = 1/10$ 。基坑四侧排桩的组成及尺寸一致,由12根围护桩组成,净间距为7 mm,其中一侧的围护桩立面布置示意图如图1所示。围护结构的冠梁(长500 mm×宽50 mm×厚30 mm)。在围护桩间填充发泡胶防止排桩间隙漏砂,确保基坑开挖稳定。基于实验室条件及边界效应,模型箱的净空尺寸为1.2 m×1.0 m×1.0 m。

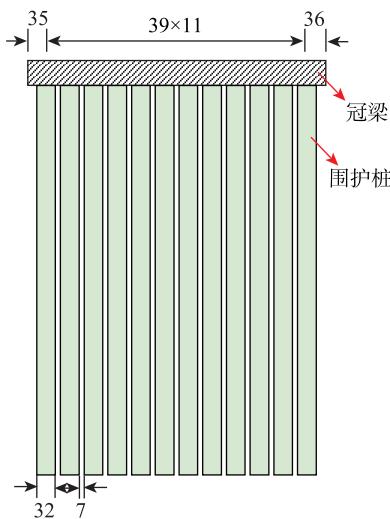


图1 围护桩立面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Elevation layout of retaining piles (Unit: mm)

1.2 试验土样

模型试验土样为过5 mm筛的干砂,根据相关土工试验对试验用砂的物理力学参数进行测定,所测试验用砂的黏聚力 c 为0,内摩擦角 φ 为30.6°。图2为试验用砂的颗粒级配曲线,其不均匀系数 C_u 为5.13,曲率系数 C_c 为1.31。模型试验采用人工砂雨法进行分层填筑,并用小型夯实机对填砂分层压实,以确保填砂均匀及各层密实度相同。

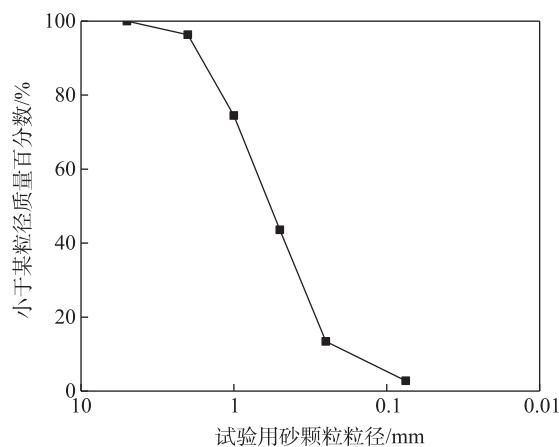


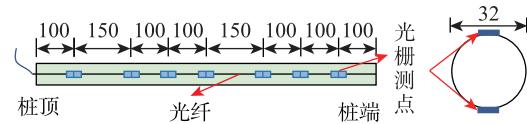
图2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle grading curve

1.3 传感器布置

本试验通过光纤光栅传感器测量围护桩的桩身应变^[1]。于模型基坑四侧中间位置各选一根围护桩布设光纤光栅传感器,每根待测围护桩对称位置两侧需要各布置7个光栅测点,两侧光栅测点分别通过两根光纤连接,通过光栅解调仪进行采

集,光栅测点布置如图3所示。试验前通过简支梁法标定PVC管桩抗弯刚度,测得模型桩抗弯刚度约92.84 N·m²。



(a) 光纤光栅传感器布置示意图 (单位: mm)



(b) 光纤光栅传感器布置实物图

图3 围护桩光纤光栅传感器布置

Fig. 3 Layout of fiber optic grating sensors for retaining piles

桩身水平位移采用HY-TM1型位移传感器测量,桩顶水平位移采用百分表测量。为布置位移传感器,在模型基坑坑内布置4根刚度较大的方钢。从基坑四侧模型排桩中间位置各选一根围护桩,每根桩布置7个水平位移传感器及1个百分表,布置图如图4所示。为研究有限土体基坑开挖时不同宽度侧地表沉降规律,在模型排桩后地表中间位置布置百分表。

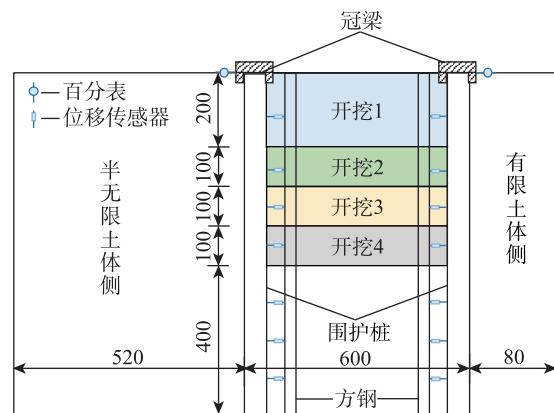


图4 围护桩水平位移传感器布置图(单位:mm)

Fig. 4 Layout of horizontal displacement sensors (Unit: mm)

1.4 试验方案

本试验旨在研究不同有限土体宽度对基坑围护结构变形、内力及地表沉降规律的影响。根据经典土压力理论计算破裂面开展宽度为288 mm

($0.577H$, H 为最大开挖深度),该宽度可视为本模型基坑的临界有限土体宽度。模型试验基坑一侧为半无限土体,土体宽度 B 为520 mm,三侧均为有限土体,土体宽度分别为80,160,240 mm,具体平面布置示意图如图5所示。试验基坑采用分步开挖方式,分4次开挖,每次开挖深度分别为200,100,

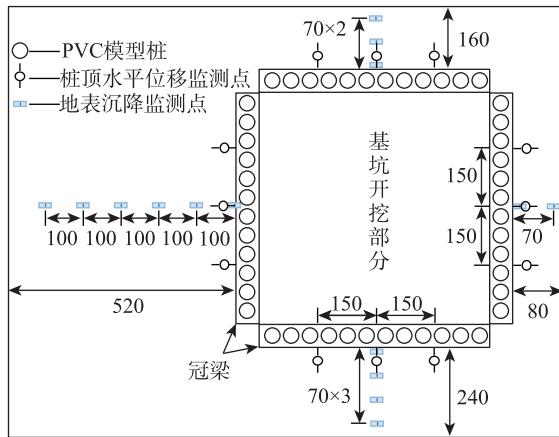


图5 地表沉降测点布置图(单位: mm)

Fig. 5 Layout of surface settlement measuring points (Unit: mm)

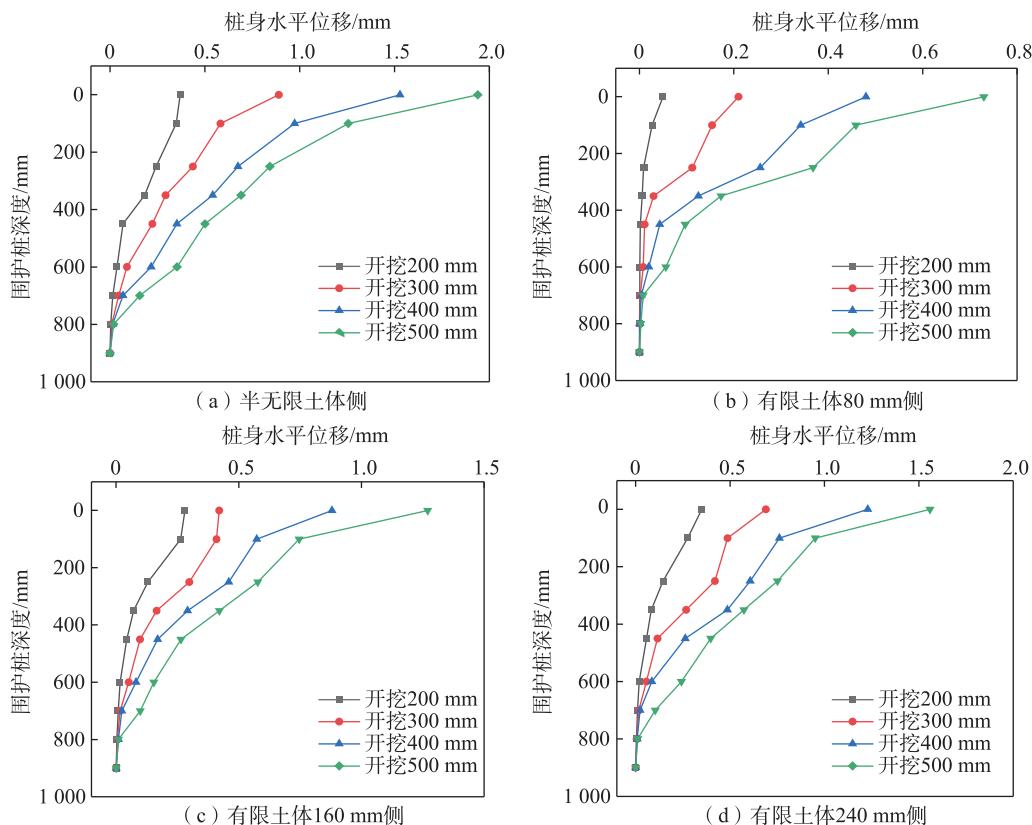


图6 不同开挖深度下围护桩桩身水平位移特征
Fig. 6 Characteristics of horizontal displacement of pile body of retaining pile under different excavation depths

100,100 mm,最大开挖深度为500 mm;每步开挖完成后静置1 h,待数据稳定后记录试验数据,再进行下一步开挖,直至开挖到最大深度结束。

2 试验结果及分析

2.1 桩身水平位移结果及分析

图6为不同开挖深度下有限土体基坑四侧围护桩桩身水平位移的变化特征。由图6可知,桩身水平位移随深度增大逐渐减小,桩身最大水平位移在桩顶位置,桩端处位移接近于零,此时围护桩变形特征类似端部固定的悬臂梁,这或许与基坑为悬臂式开挖且围护桩桩端在试验过程中与模型箱底部接触有关。

图6(a)为半无限侧基坑围护桩桩身水平位移变化曲线。由图可知,随着开挖深度的增大,围护桩桩身水平位移逐渐增大。对比图6(a)~图6(d)可以发现,不同有限土体宽度侧的围护桩桩身水平位移有与半无限侧相同的变化特征。当基坑开挖深度较浅($H=200$ mm)时,基坑半无限侧及有限土体侧围护桩变形相差不大。随着开挖的进行,围护排

桩后的砂土逐渐松动,四侧桩身侧移快速增加,填土宽度 B 越大,围护桩桩身水平位移增量就越大,最终使得开挖结束后的围护桩变形最大。当开挖深度为500 mm时,围护桩桩身水平位移最大值均在桩顶,其中半无限土体侧围护桩桩身水平位移最大,最大值为1.94 mm,有限土体宽度分别为80,160,240 mm时,侧围护桩桩身水平位移最大值分别为0.73,1.27,1.56 mm,是半无限土体侧的37.6%,65.5%,80.4%。由以上可知最大桩身水平位移随土体宽度的增加有非线性增大的趋势,且增幅逐渐减小,这表明土体宽度 B 的减小能有效地减小围护桩桩顶及桩身的水平位移。

图7为开挖深度500 mm时不同围护桩深度处桩身水平位移随土体宽度的变化曲线。由图7可以发现,随着土体宽度的增加,桩身水平位移在不同围护桩深度处均逐渐增大,该现象可归因于土体宽度越大,作用在围护桩的土压力就越大,最终引起的围护桩桩身变形也就越大。当土体宽度小于临界有限土体宽度,桩身水平位移增幅较大;当土体宽度大于临界有限土体宽度,桩身水平位移增幅变缓,表明桩身水平位移随土体宽度的变化在开挖面以上较为明显。

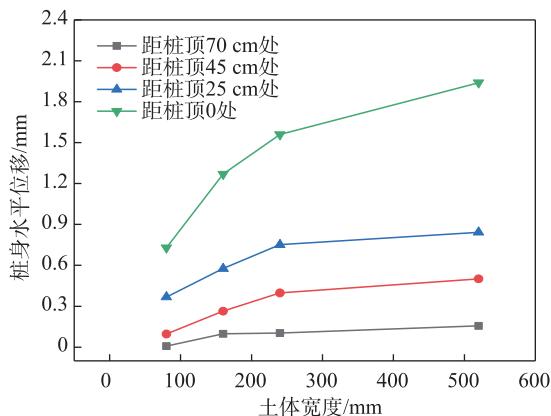


图7 各围护桩深度处桩身水平位移随土体宽度的变化
Fig. 7 Variation of pile horizontal displacement with soil width at each depth of retaining piles

2.2 地表沉降结果及分析

基坑开挖过程中半无限土体侧及有限土体侧地表沉降变化特征分别如图8与图9所示。由图8可知,半无限土体侧基坑坑外地表沉降随开挖深度的增大而逐渐增大,沉降曲线呈“勺”型分布且有向下拱曲的趋势,开挖深度越大沉降曲线向下拱曲越

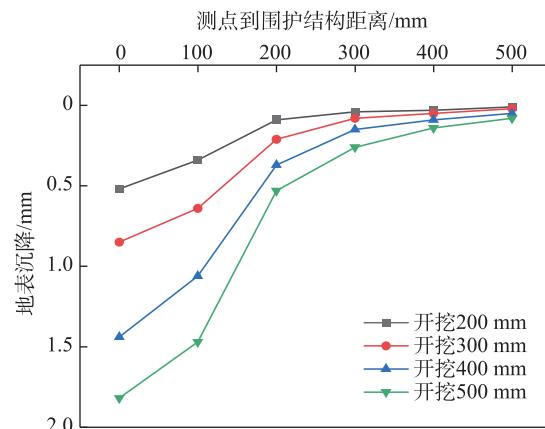


图8 半无限土体侧基坑坑外地表沉降特征
Fig. 8 Characteristics of surface settlement outside the pit on the semi-infinite soil side of the pit

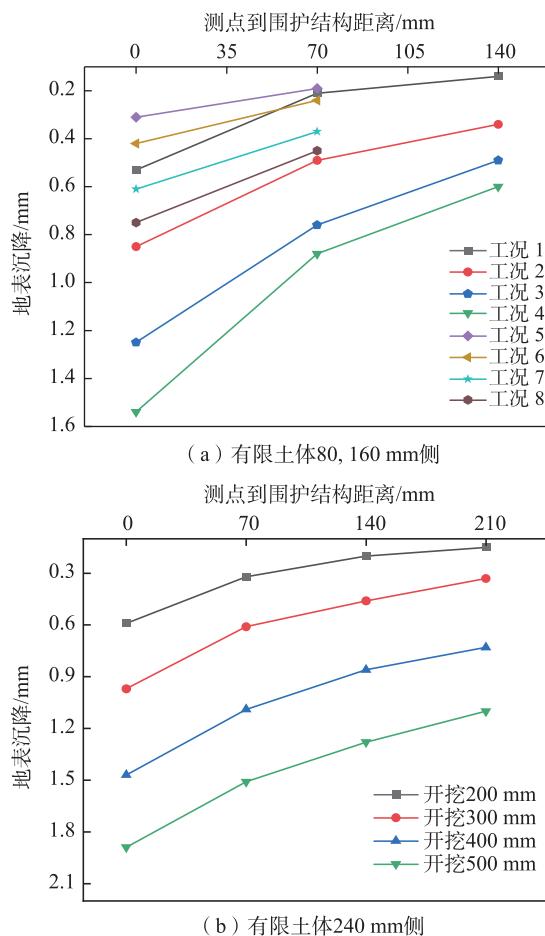


图9 有限土体侧基坑坑外地表沉降特征
Fig. 9 Characteristics of surface settlement outside the pit on the side of a finite soil body

明显。半无限土体侧各开挖阶段($H=200, 300, 400, 500$ mm)在距基坑围护结构200 mm处的地表沉降值分别占地表最大沉降值的17.31%, 24.71%,

25.69%, 29.12%, 这说明基坑开挖引起的地表沉降主要发生在距围护结构 200 mm($0.4H$)以内。以上得到的半无限土体侧基坑开挖引起的地表沉降规律与传统的悬臂式开挖基坑的地表沉降规律基本相符。

图 9 为各开挖阶段不同有限土体宽度侧基坑开挖引起的地表沉降变化曲线, 其中工况 1~工况 4、工况 5~工况 8 分别为有限土体 160 mm 侧、80 mm 侧基坑开挖 200, 300, 400, 500 mm。在各级开挖过程中, 有限土体 80, 160, 240 mm 三侧地表沉降变化趋势基本一致, 随着开挖深度增加, 地表沉降值随之增大, 开挖各阶段地表最大沉降值均出现在靠近围护结构的位置; 当开挖深度达到 500 mm 时, 有限土体三侧地表沉降最大值分别为 0.75, 1.54, 1.89 mm。随着与基坑围护结构距离越来越大, 地表沉降逐渐减小, 但减小速率不大, 最终得到三侧地表沉降最小值分别为 0.45, 0.60, 1.10 mm。可以发现, 随着有限土体宽度的增加地表沉降逐渐增大, 但增量有所减小, 并且与半无限土体侧不同的是有限土体侧随着与基坑围护结构距离的增大地表沉降不会减小到接近于零, 这可能是因为有限土体侧土体宽度较小, 且均处于基坑开挖引起的地表沉降影响范围内。

图 10 为不同开挖深度下最大地表沉降随土体宽度 B 变化的关系。由图 10 可知, 随着土体宽度的增加, 地表沉降最大值先增大后减小, 土体宽度 B 存在一个临界值; 4 个开挖阶段地表沉降最大值变化特征相一致, 但随着开挖深度的增加, 地表沉降最大值的变化趋势愈加明显; 当开挖深度为 500 mm 时, 有限土体 160 mm 侧地表沉降最大值比 80 mm 侧增加

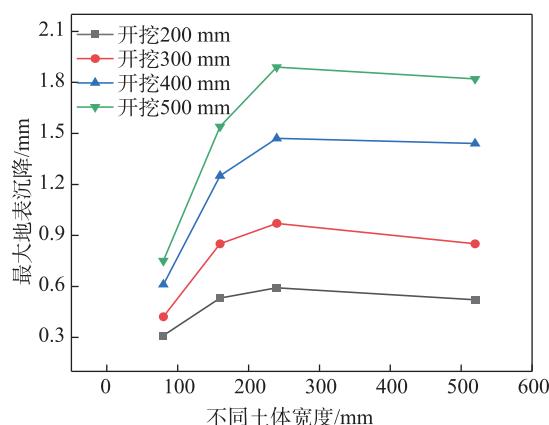


图 10 最大地表沉降随土体宽度的变化

Fig. 10 Variation of maximum surface settlement with soil width

了 0.79 mm, 而有限土体 240 mm 侧地表沉降最大值比 160 mm 侧增加了 0.35 mm, 说明有限土体宽度增大时, 地表沉降最大值增量呈减小趋势。

2.3 桩身弯矩结果及分析

图 11 为试验基坑在不同开挖深度下半无限土体侧及有限土体三侧的弯矩变化曲线。桩身弯矩数据是通过光纤光栅传感器测得的桩身应变结果而计算所得。对于半无限土体侧围护桩, 在基坑开挖的各阶段围护桩桩身弯矩呈现近似“S”型曲线, 即桩身下部为正弯矩, 上部出现负弯矩; 随着开挖深度增加, 最大正、负弯矩值随之增大且正弯矩增长幅度有所增大, 而最大正弯矩值均大于最大负弯矩值。通过对比图 11(a)~图 11(d)可得, 各开挖阶段有限土体侧围护桩弯矩变化特征与半无限土体侧基本相同。

不同土体宽度情况下最大正、负弯矩值及其位置随开挖深度的变化如图 12 和图 13 所示。在初始开挖阶段(200, 300 mm), 基坑有限土体侧围护桩最大正、负弯矩值随土体宽度的增大而增大, 但增长速率都较小, 而半无限土体侧相比有限土体侧最大正弯矩值增幅相对较大。

当开挖深度达到 400 mm 时, 基坑围护桩最大正弯矩值随土体宽度的增大增幅逐渐增大; 当开挖深度达到 500 mm 时, 试验基坑有限土体 80, 160, 240 mm 侧及半无限土体侧围护结构的正弯矩最大值分别为 0.87, 0.95, 1.28, 1.65 N·m, 负弯矩最大值分别为 0.52, 0.58, 0.70, 0.79 N·m。可以发现全部开挖结束基坑围护桩最大正弯矩值随土体宽度的增大, 增幅逐渐增大, 而最大负弯矩值从 160 mm 侧到 240 mm 侧有较大的增幅。另外随着开挖深度增加最大正、负弯矩的位置均有所下移, 其中最大负弯矩位置下移幅度较小, 最大正弯矩位置下移幅度相对较大, 但最大负弯矩点始终位于开挖面以下 100~250 mm($0.3H$ ~ $0.5H$)的深度。

由以上分析可知, 随着土体宽度的增加, 围护桩的最大正、负弯矩都逐渐增大, 但最大负弯矩增加幅度不大, 最大正弯矩增加幅度随土体宽度的增加而逐渐增大; 土体宽度对最大正、负弯矩的位置影响不大。这说明土体宽度的减小能够有效减小围护结构的最大弯矩, 使得基坑围护体系更加安全。

3 围护桩水平位移与地表沉降关系

大量工程实践表明, 基坑周边土体最大地表沉

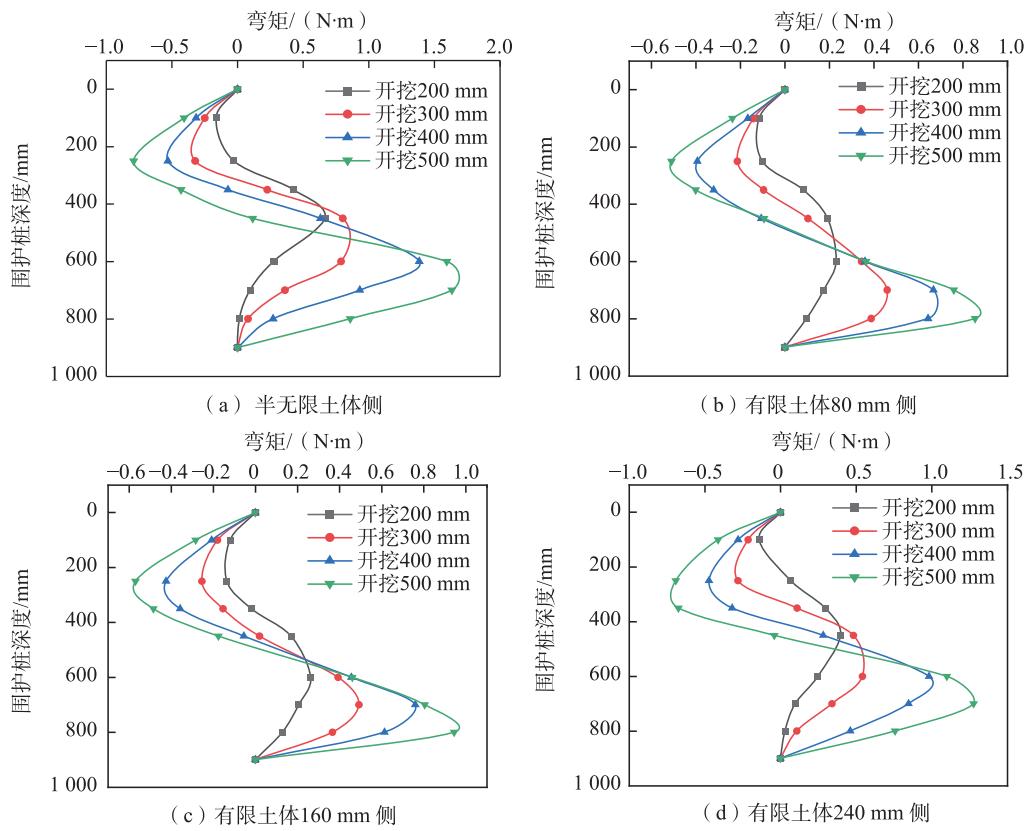


图11 不同开挖深度下围护桩桩身弯矩变化

Fig. 11 Variation of bending moment of pile body of retaining pile under different excavation depths

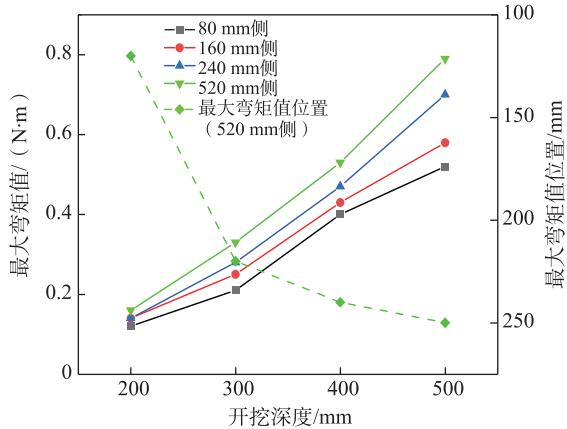


图12 最大负弯矩值及其位置随开挖深度的变化

Fig. 12 Variation of maximum negative bending moment value and its location with depth of excavation

降与围护结构的最大水平位移存在着一定关系。为了研究有限土体情况下基坑在不同开挖深度下地表最大沉降值与围护结构最大水平位移的关系,通过将本模型试验结果与 Ou 等^[12]收集的多个基坑监测数据、Mana 等^[13]整理的国外多个类型地层的基

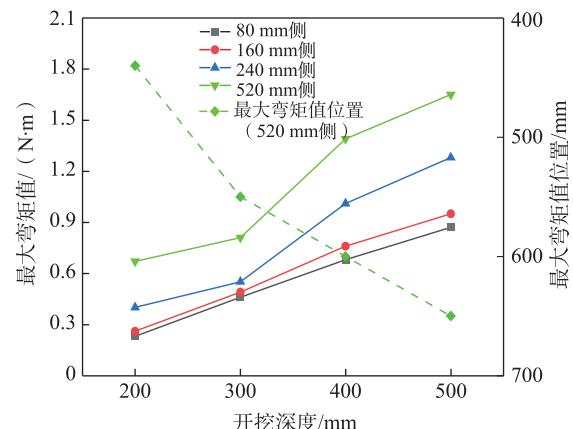


图13 最大正弯矩值及其位置随开挖深度的变化

Fig. 13 Variation of maximum positive bending moment value and its location with depth of excavation

坑监测结果以及应宏伟等^[14]得出的杭州地区软黏土层基坑监测数据结果进行对比,结果如图 14 所示。

由图 14 可知,本文模型试验基坑围护结构最大侧移与开挖深度之比 $\delta_{h,m}/H_0$ 为 0.14%~0.39%,位于

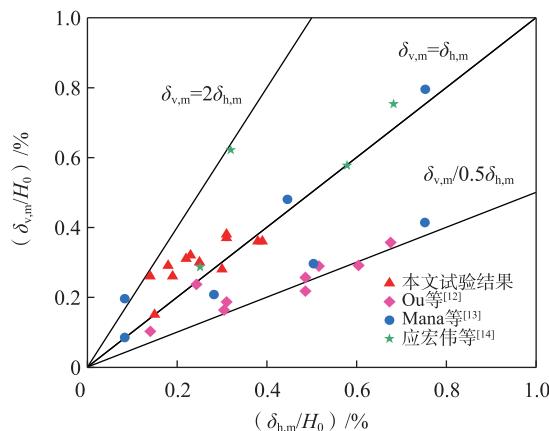


图14 围护结构最大水平位移与最大地表沉降的关系

Fig. 14 Relationship between maximum horizontal displacement of the retaining structures and maximum surface settlement

Ou 等^[12]通过现场监测得出的 $\delta_{h,m}/H_0$ (0.10%~0.70%), 小于应宏伟等^[14]提出的 $\delta_{h,m}/H_0$ (0.24%~0.75%), 这可能是因为 Ou 等^[12]收集基坑工程案例多针对粉砂土地层, 而应宏伟等^[14]考虑的是软黏土地层。本试验中基坑坑外地表最大沉降与基坑开挖深度之比 $\delta_{v,m}/H_0$ 为 0.15%~0.38%, 小于应宏伟等^[14]得出的 $\delta_{v,m}/H_0$ (0.28%~0.76%), 且位于 Mana 等^[13]统计出的 $\delta_{v,m}/H_0$ (0.10%~0.80%)。本文模型试验数据表明基坑坑外地表最大沉降 $\delta_{v,m}$ 约为围护结构最大侧移 $\delta_{h,m}$ 的 0.90~1.85 倍, 其中基坑有限土体侧坑外地表最大沉降与围护结构最大侧移的比值 $\delta_{v,m}/\delta_{h,m}$ 均大于 1, 且随着有限土体宽度的增大 $\delta_{v,m}/\delta_{h,m}$ 有减小的趋势; 而基坑半无限土体侧坑外地表最大沉降与围护结构最大侧移的比值 $\delta_{v,m}/\delta_{h,m}$ 小于 1, 但都接近于 1。这说明有限土体侧基坑开挖引起的地表沉降最大值增加速率大于围护桩侧移的增加速率; 半无限土体侧基坑开挖引起的地表沉降最大值增加速率小于围护桩侧移的增加速率, 但两者相差不大。除此之外, 随着基坑开挖深度的增加, 有限土体基坑坑外地表最大沉降与围护结构最大侧移的比值 $\delta_{v,m}/\delta_{h,m}$ 呈减小趋势, 所以对于有限土体基坑的设计及施工有必要更多地考虑基坑坑外地表沉降。

4 结论

1) 基坑有限土体侧围护桩桩身水平位移变化

趋势与半无限土体侧具有良好的一致性; 桩身水平位移与土体宽度 B 呈正相关; 最大桩身水平位移随土体宽度 B 的增加有非线性增大的趋势; 土体宽度的减小能有效地减小围护桩桩顶的水平位移。

2) 在有限土体情况下, 土体宽度对基坑坑外地表沉降影响显著; 地表沉降最大值随着土体宽度 B 的增加先增大后减小, 且随着开挖深度的增加其变化趋势愈加明显。

3) 开挖各阶段四侧围护桩桩身弯矩沿深度方向呈现近似“S”型曲线分布; 且围护桩桩身最大正弯矩值均大于最大负弯矩值, 最大弯矩与土体宽度 B 呈正相关, 桩身最大弯矩点始终位于开挖面以下 0.3~0.5 倍的开挖深度, 而土体宽度对最大正、负弯矩的位置影响不大。

4) 基坑围护结构最大侧移与开挖深度之比 $\delta_{h,m}/H_0$ 为 0.14%~0.39%, 地表最大沉降与开挖深度之比 $\delta_{v,m}/H_0$ 为 0.15%~0.38%, $\delta_{v,m}/\delta_{h,m}$ 为 0.90~1.85, 其中基坑有限土体侧的 $\delta_{v,m}/\delta_{h,m}$ 均大于 1, 且随着有限土体宽度的增大有减小的趋势, 因此对于有限土体基坑的设计及施工有必要更多地考虑基坑外地表沉降。

参考文献:

- [1] 黄沛, 杨潇, 李翔宇, 等. 软土地区基坑群施工对邻近浅埋地下管线影响[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 146-155.
- [2] HUANG P, YANG X, LI X Y, et al. Influence of construction of deep excavation groups on adjacent shallowly buried pipelines in soft clay[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(3): 146-155.
- [3] KHOSRAVI M H, PIPATPONGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. Géotechnique, 2013, 63(12): 1020-1028.
- [4] GRECO R R. Analytical solution of seismic pseudo-static active thrust acting on fascia retaining walls[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 57: 25-36.
- [5] 应宏伟, 张金红, 王小刚, 等. 有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 978-986.
- [6] YING H W, ZHANG J H, WANG X G, et al. Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils[J]. Chi-

- nese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 978-986.
- [5] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 等. 曲线滑裂面下有限宽度填土主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2029-2035.
YANG M H, DAI X B, ZHAO M H, et al. Calculation of active earth pressure for limited soils with curved sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2029-2035.
- [6] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985-994.
- [7] FAN X Z, PHOON K K, XU C J, et al. Closed-form solution for excavation-induced ground settlement profile in clay[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 137(9): 104266.
- [8] 郑刚, 聂东清, 程雪松, 等. 基坑分级支护的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 784-794.
ZHENG G, NIE D Q, CHENG X S, et al. Experimental study on multi-bench retaining foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 784-794.
- [9] 韦实, 邓成龙, 梁荣柱, 等. 基于3D打印的锁口钢管桩围护结构变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3676-3686.
WEI S, DENG C L, LIANG R Z, et al. Model testing on deformation characteristics of the locking steel pipe pile retaining structure by using 3D printing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3676-3686.
- [10] 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 X Z. Stress-deformation mechanism and deforma-
- tion-controlled design theory of braced retaining structure under asymmetrical excavation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [11] 朱怀龙, 王其标, 朱碧堂, 等. 无封装FBG应变传感器在不同布设方式下的标定试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 30-37.
ZHU H L, WANG Q B, ZHU B T, et al. Experimental study on the calibration of unencapsulated FBG strain sensors under different mounting methods[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 30-37.
- [12] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758-767.
- [13] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Geotechnical Special Publication, 2002, 107(118): 1840-1858.
- [14] 应宏伟, 孙威, 吕蒙军, 等. 复杂环境下某深厚软土基坑的实测性状研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 424-430.
YING H W, SUN W, LYU M J, et al. Measured characteristics of a deep soft soil excavation in complex environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 424-430.



通信作者:方焘(1976—),男,博士,博士生导师,研究方向为深基坑工程,地下空间及隧道工程,路基工程。E-mail: fangtaolq@163.com。

(责任编辑:吴海燕)