

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.019



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 方形基坑尺寸效应对长短桩围护结构 支护效果的影响

周旭明<sup>1</sup>, 詹刚毅<sup>2</sup>, 石钰锋<sup>1,3</sup>, 占宇飞<sup>3</sup>, 徐长节<sup>1</sup>, 蒋亚龙<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013; 2. 中铁上海设计集团有限公司, 上海 200070; 3. 华东交通大学江西建筑设计院有限公司, 南昌 330013)

**摘要:**为研究方形基坑尺寸效应对长短桩围护结构支护效果的影响,以某桥梁承台基坑为依托,采用数值分析手段,通过现场实测对选用参数进行验证,依托选用参数拟定不同平面尺寸计算工况,通过地层应力与桩后土压力变化分析其尺寸效应;通过对比长短桩围护结构与等长桩围护结构的变形受力差异,探明尺寸效应对长短桩围护结构支护效果的影响。结果表明:当方形基坑尺寸较小时,在坑边一定距离处会形成连续、封闭的“类圆形”拱区域,存在与圆形基坑中环箍效应相似的“类环箍效应”,算例表明该效应在边长大于18.0 m后环箍断开,效应消失;当拱区域封闭为环箍时,围护结构桩后土压力显著降低,当其不封闭时,土压力增长,坑边中部桩后土压力增长量大于坑角处;长短桩围护结构的支护效果在尺寸效应越强的方形基坑中降低越少,基坑的尺寸效应对其变形及稳定有利,算例中边长小于等于14.4 m的基坑可充分利用其尺寸效应,采用长短桩代替等长桩围护,做到绿色环保。

**关键词:**长短桩;围护结构;基坑;尺寸效应;支护效果

中图分类号: TU751 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)02-0033-09

## Size effect of square foundation pit on supporting effect of long-short pile retaining structure

ZHOU Xuming<sup>1</sup>, ZHAN Gangyi<sup>2</sup>, SHI Yufeng<sup>1,3</sup>, ZHAN Yufei<sup>3</sup>, XU Changjie<sup>1</sup>,  
JIANG Yalong<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, P. R. China; 3. East China Jiaotong University Jianxi Architectural Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330013, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the influence of size effect of square foundation pit on the supporting effect of long and short pile retaining structure, numerical simulation is adopted for analysis of foundation pit of a bridge cap. Firstly, the selected parameters are verified by field measurement and the calculation conditions of different

收稿日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(42177162)

作者简介: 周旭明(1996-), 男, 主要从事基坑工程研究, E-mail: 1204370131@qq.com。

詹刚毅(通信作者), 男, 高级工程师, E-mail: z17855827972@163.com。

Received: 2022-11-28

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 42177162)

Author brief: ZHOU Xuming (1996-), main research interest: foundation pit engineering, E-mail: 1204370131@qq.com.

ZHAN Gangyi (corresponding author), senior engineer, E-mail: z17855827972@163.com.

plane sizes are proposed, the size effect is analyzed by the change of stratum stress and soil pressure behind piles. Then, by comparing the deformation and stress of the long-short pile retaining structure and the equal-length pile retaining structure, the influence of the size effect on the supporting effect of the long-short pile retaining structure is examined. The main conclusions arrived at include: When the size of the square foundation pit is small, a continuous and closed “quasi-circular” arching area would be formed at a certain distance from the pit edge, and there is a “quasi-circular hoop effect” similar to the hoop effect in the circular foundation pit. When the arch area is closed as ring hoop, the earth pressure behind the retaining structure pile is significantly reduced. Otherwise, the earth pressure increases, and the increment of the earth pressure behind the pile in the middle of the pit is greater than that at the corner. The supporting effect of the long-short pile retaining structure is less in the square foundation pit with stronger size effect. The size effect of foundation pit is beneficial to its deformation and stability. In this project, the foundation pit with a side length of less than or equal to 14.4 m can make full use of the size effect and use long and short piles instead of equal-length piles for green environmental protection.

**Keywords:** long-short piles; enclosure structure; foundation pit; size effect; support effect

排桩支护作为常见的基坑支护形式之一,因施工简单、成本相对低廉而得到广泛使用。当前,排桩桩长通常按最不利钻孔参数设计,并取等长桩布置,这在一定程度上造成安全系数过于“保守”,结构承载能力发挥不充分,导致工程造价偏高。长短桩围护结构在等长桩围护结构的基础上减少部分排桩桩长,将长桩与短桩按一定比例组合布置,在满足支护要求的前提下<sup>[1]</sup>,降低造价,缩短工期。在研究长短桩围护结构作用机理方面,郑刚等<sup>[2]</sup>、李竹等<sup>[3]</sup>采用模型试验研究了长短桩围护结构分别在悬臂与带支撑情况下的变形受力规律及长短桩作用机理,得出长短桩围护结构的桩身水平位移与等长桩围护结构接近,且长桩承担更多的弯矩,主要起嵌固与抗倾覆的作用,短桩则起挡土与传递土压力的作用。Xu等<sup>[4-5]</sup>通过现场测试与数值分析,研究了短桩桩长、桩径、桩间距及根数对整体结构变形受力的影响规律,分析了长短桩的作用机理。王际凯等<sup>[6]</sup>通过模型试验结合数值模拟的方法分析了倾斜长短组合桩围护结构的受力机理,得出围护结构支护效果受斜桩倾角与桩长之间的关系。

学者们针对长短桩围护结构的研究取得了丰富的成果,但在研究过程中将长桩与相邻短桩作为基本单元进行研究分析,而较少考虑基坑尺寸效应的影响。基坑尺寸效应与开挖形状及尺寸密切相关,一个好的开挖形状可以优化基坑的应力布局,减少基坑变形,节省支护费用<sup>[7]</sup>。例如,圆形基坑中的围护结构受力以环向受压为主,竖向受弯为辅<sup>[8-9]</sup>。方形基坑相比矩形基坑具有更强的尺寸效应,对基坑变形控制效果明显优于矩形基坑<sup>[10]</sup>且能够减小围护结构的受力,优化结构背后的土压力分布<sup>[11-12]</sup>,有利于基坑安全稳定,在进行围护结构设计

时,不可忽略这种效应带来的影响。为研究方形基坑中尺寸效应对长短桩围护结构支护效果的影响,笔者通过现场实测与数值模拟相结合,比较不同尺寸基坑开挖下长短桩围护结构与等长桩围护变形受力差异,分析尺寸效应对长短桩围护结构支护效果的影响,以期为长短桩围护结构的设计应用提供参考。

## 1 工程实例

### 1.1 工况概况

某拟建大桥上跨既有铁路,采用平面转体法施工,桥梁承台基坑分别位于铁路左右两侧,开挖形状均近似边长为22.2 m的正方形。左侧基坑与铁路路基最近距离为1.8 m,开挖深度4.7 m,采用等长桩围护结构进行支护,其中,等长桩桩长为10 m,桩径为1.5 m,桩间距为1.8 m,桩顶设有冠梁,梁宽1.7 m,高1 m,灌注桩与冠梁均采用C30混凝土进行浇筑。右侧基坑与铁路路基最近距离为2.1 m,开挖深度为4.8 m,采用长短桩围护结构进行支护,其中,长桩桩长10 m,短桩桩长8 m,按1:1比例相邻排布,围护结构其余设计参数同左侧基坑。两侧基坑均设桩径为0.6 m,桩间距为0.4 m,桩长为5.5 m的水泥搅拌桩作为止水帷幕。基坑所在区域内地层分布均匀,从上到下分布依次为素填土、粉质黏土、强风化粉砂岩与中风化粉砂岩,为典型的土岩复合地层。现场基坑平面分布如图1所示。

### 1.2 现场监测

工程现场对左右两侧基坑紧邻铁路侧的围护结构进行了安全监测,监测内容为桩身水平位移监测与内力监测,如图1所示,水平位移监测点共布置4处,分别为:LCX1、LCX2、RCX1、RCX2;桩身内

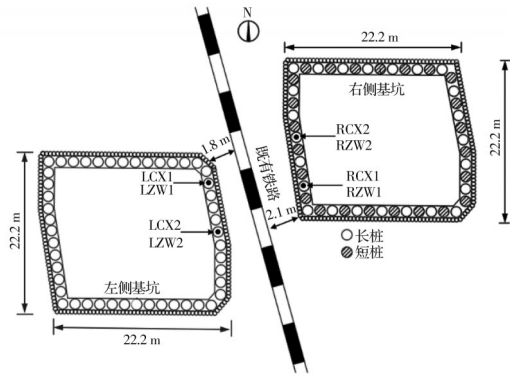


图 1 基坑平面分布

Fig. 1 Foundation pit plane distribution map

力监测点共布置 4 处,分别为 RZW1、RZW2、LZW1、LZW2,左右两侧基坑的监测点呈中心对称布置。水平位移监测通过测斜管与测斜仪进行,测斜管的布置深度为 10 m。内力监测通过埋设混凝土应变计配合 609 测读仪进行,应变计沿深度方向每隔 2 m 布置一对,每对分别布置于桩身的迎土侧与背土侧,共 4 对。监测元件现场安装情况如图 2 所示。

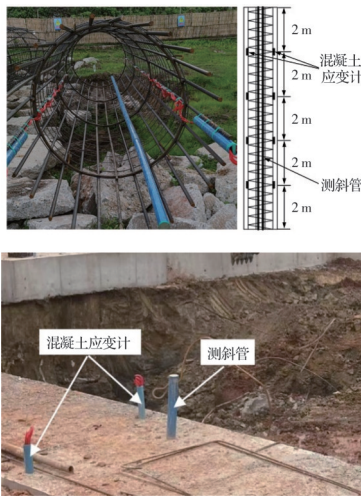


图 2 监测元件布置

Fig. 2 Monitoring element arrangement

### 1.3 数值验证

以右侧基坑为原型,采用有限元软件 MIDAS/GTS 建立三维有限元模型,模型中土层采用修正摩尔库仑本构,铁路路基采用摩尔库仑本构,土层参数如表 1 所示。排桩、冠梁及止水帷幕均采用弹性模型,力学参数如表 2 所示。

长、短桩与冠梁均采用梁单元模拟,设置桩界面单元模拟桩土接触,单元中的剪切刚度模量与法向刚度模量取值可按式(1)、式(2)计算得到。

$$K_t = G_i / t_v \quad (1)$$

$$K_n = E_{\text{od},i} / t_v \quad (2)$$

式中: $G_i = R \times G_{\text{soil}}$ ,  $G_{\text{soil}}$  为不同土层的剪切模量,  $R$  为强度折减系数;  $E_{\text{od},i} = \frac{2G_i(1-\nu_i)}{1-2\nu_i}$ ,  $\nu_i$  为界面泊松比,取 0.45;  $t_v$  为虚拟厚度因素,取 0.01。桩界面单元取值如表 3 所示。

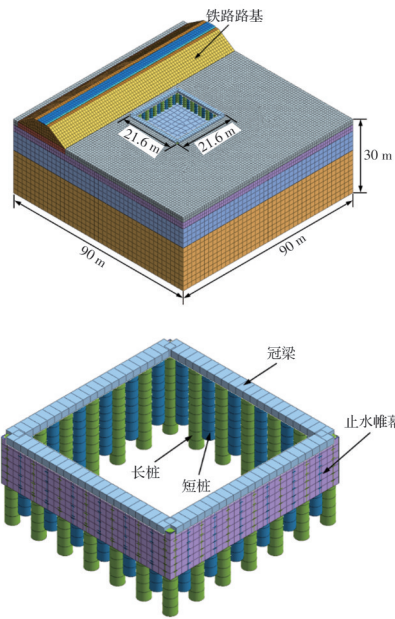


图 3 三维基坑模型

Fig. 3 3D model of foundation pit

表 1 土层力学参数

Table 1 Soil mechanical parameters

土层	厚度 $d/m$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	切线模量 $E_{\text{od}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
素填土	2.2	18.6	7	12		2.2	3.2	11.0	0.28
粉质黏土	2.6	19.2	12	15		5.6	5.6	28.0	0.28
强风化砂岩	7.8	21.0	40	25		55	55	165	0.24
中分化砂岩	17.4	23.0	300	40		150	150	450	0.22
铁路路基		20.0	25	30	50				0.24

止水帷幕按刚度等效原则<sup>[13]</sup>等效成 0.34 m 厚的板单元进行模拟。为便于拓展工况,将基坑开挖形状简化为边长为 21.6 m 的正方形。基坑紧邻既

有铁路,处在影响范围中<sup>[14]</sup>,列车荷载对围护结构变形受力有一定影响,取列车荷载为 50 kPa<sup>[15-16]</sup>。为消除边界效应影响,模型尺寸取为 90 m × 90 m ×

表 2 结构力学参数

Table 2 Structure mechanical parameters

结构	材料	弹性模量 $E/\text{MPa}$	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	泊松比 $\nu$
排桩	C30	30 000	24.0	0.22
冠梁	C30	30 000	24.0	0.22
止水帷幕	C20	25 500	24.0	0.22

表 3 桩界面单元参数

Table 3 Pile interface element parameters

土层	剪切刚度模量 $K_t/\text{MPa}$	法向刚度模量 $K_n/\text{MPa}$
素填土	50.4	554.4
粉质黏土	137.0	1 507
强风化粉砂岩	1 429	15 719

30 m(长×宽×高)。模型采用六面体网格进行划分,总共生成 65 138 个节点和 80 804 个单元数值模型如图 3 所示。

现场施工过程中,左侧基坑先进行开挖,右侧基坑在左侧基坑开挖 7 d 后再进行开挖,两侧基坑开挖深度均较小,加之现场施工进度较快,两侧基坑均于 1 d 内开挖完毕,由于在施工前采取降水措施,因此模拟过程中不考虑地下水的影响,数值模拟过程如表 4 所示。

表 4 数值模拟过程

Table 4 Process of numerical simulation

模拟阶段	模拟项目
阶段 1	地应力平衡
阶段 2	既有铁路应力平衡
阶段 3	左侧基坑围护结构施工
阶段 4	左侧基坑开挖至坑底
阶段 5	右侧基坑围护结构施工
阶段 6	右侧基坑开挖至坑底
阶段 7	施加列车荷载

图 4 与图 5 分别为左右两侧基坑各监测点桩身水平位移与弯矩的实测结果与数值结果对比情况。

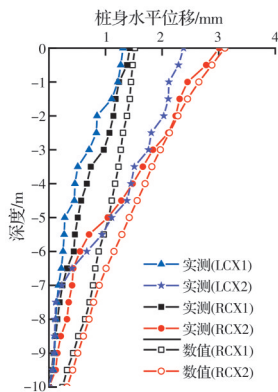


图 4 桩身水平位移对比

Fig. 4 Comparison of pile horizontal displacement

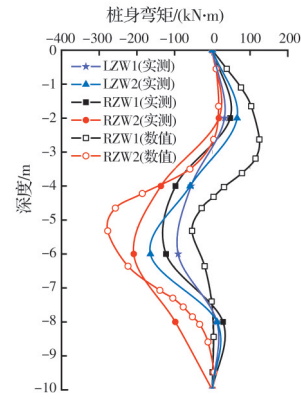


图 5 桩身弯矩对比

Fig. 5 Comparison of Pile bending moment

由图 4 可知,左右两侧基坑围护结构均无内支撑,桩身水平位移最大值均位于桩顶。同时,桩身变形主要集中在桩体上半区域,而下半区域的变形相对较小,围护桩在强风化粉砂岩中得到了较好的嵌固。测点 LCX1 与测点 RCX1 的位移最大值为 1.31、1.43 mm,两者相差 0.12 mm;测点 LCX2 与测点 RCX2 的位移最大值为 2.38 mm 与 3.01 mm,两者相差 0.63 mm,可见相比等长桩围护结构,长短桩围护结构的变形出现了增长,且基坑中部处的增值大于基坑坑角处。

由图 5 可知,4 处测点的桩身弯矩变化趋势基本一致,桩身弯矩最大值均位于开挖面以下,而开挖面以上的则较小,可见在土岩复合地层中,桩身受弯区域主要集中在嵌固段,非嵌固段主要以变形为主。测点 LZW1 与测点 RZW1 的桩身弯矩最大值分别为 90.6、122.7 kN·m,两者相差 32.1 kN·m;测点 LZW2 与测点 RZW2 的桩身弯矩最大值分别为 164.4、208.3 kN·m,两者相差 43.9 kN·m,长短桩围护结构的桩身弯矩总体上大于等长桩围护结构,且基坑中部处的弯矩增值大于基坑坑角处。

综上所述,减少部分排桩桩长将使围护结构的变形增大,桩身受弯加深,结构整体支护效果减弱。在本工程中,由于基坑平面尺寸较小,长短桩围护结构的变形与受力增量均处于可控范围中,结构的支护效果仍能得到较好保障。

通过对比实测结果与数值结果可知,测点 RCX1 与测点 RCX2 处的桩身水平位移实测结果总体上小于数值结果,但变化趋势一致,两处测点处桩身水平位移最大值均位于桩顶。测点 RCX1 处桩身水平位移最大值的实测结果与数值结果分别为 1.43、1.52 mm,测点 RCX2 的实测结果与数值结果分别为 3.01、3.11 mm,两处测点的数值结果与实测结果均较接近。测点 RCX1 与测点 RCX2 处桩身弯矩的数值结果与实测结果在变化趋势上较相符,

但在弯矩值大小上,存在差异,这主要是因为测量元件灵敏度较高,在埋设过程中易受各种不确定因素的影响。但综合对比两处测点的桩身水平位移与弯矩的实测结果与数值结果可知,建立的三维模型能够一定程度上反映现场工况。

## 2 方形基坑尺寸效应分析

为研究方形基坑尺寸效应随尺寸增大的变化规律,拟定边长为7.2、10.8、14.4、18.0、19.8、21.6、28.8 m的方形基坑进行分析,其余计算参数不变,各计算工况基坑边长如表5所示。为提高计算结果准确度,对距坑边3倍开挖深度<sup>[17]</sup>的区域网格加密,建立的方形基坑三维模型如图6所示。

表5 计算工况基坑边长

Table5 Calculate the side length of foundation pit under working conditions

m						
工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6	工况7
7.2	10.8	14.4	18.0	19.8	21.6	28.8

注:各工况的围护结构均按照依托工程设计考虑,其中为对比计算,工况1、工况3、工况6、工况7补充考虑等长桩的工况,桩长取为10 m。

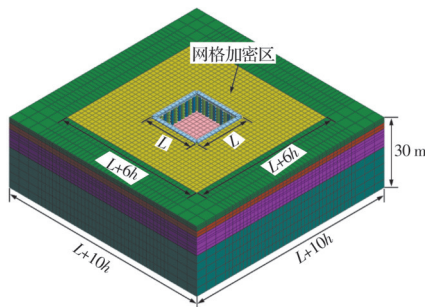


图6 不同尺寸下方方形基坑三维模型

Fig. 6 3D model of square foundation pit with different sizes

### 2.1 土体拱效应分析

基坑具有尺寸效应,其本质为坑边土体存在拱效应,对抗边土体的应力大小及分布产生影响<sup>[18]</sup>,可通过研究坑边土体应力状态来研究方形基坑的尺寸效应变化规律。工程基坑开挖面以上的土体为素填土与粉质黏土,两者性状较接近,为此以断面1.1 m处的土体主应力为例来说明土体拱效应变化规律。图7为基坑在不同尺寸下开挖前后土体中主应力变化图。

根据图7(a)、(c)、(e)、(g)知,当基坑未开挖时,观测面上的中主应力为 $\sigma_y = K_0 \gamma z$ ( $\sigma_y$ 为y方向应力, $K_0$ 为侧应力系数),此时中主应力均匀分布于各个单元中,大小均为7.93 kPa,土体不存在拱效应。

根据图7中(b)、(d)、(f)、(h)知,当基坑开挖后,土体应力重分布,主要为:

1)边长为7.2 m时,中主应力减小的区域(图中红色区域)主要分布在围护结构背后,土体松动的区域主要集中在围护结构背后。与坑边一定距离处的中主应力增大,形成了连续、封闭的“类圆形”拱区域(图中虚线所包围区域),拱区域中的环向拱效应随与坑边距离的增加而减弱,直至消失。

2)边长增至14.4 m时,中主应力减小的区域扩大(图中红色区域),坑边中部处扩大最明显,坑角处最微弱,土体松动的区域呈“两边小,中间大”的拱形分布。此时拱区域在基坑中部处向内凹陷,并在坑角处向外凸起。

3)边长增至21.6 m时,主应力减小的区域进一步扩大,拱区域的分布不再呈连续、闭环状态,而是在坑边中部断开,断开后的拱区域集中分布在基坑坑角处。此时,距坑边较远处的土体中主应力也减小(图中淡黄色区域)。

4)边长为28.8 m时,围护结构背后处中主应力减小的区域向外扩张,并与距坑边较远处的主应力减小区域连通,使得土体松动区域迅速扩大。

综上可知,当基坑开挖尺寸足够小时,可在坑边一定范围内形成连续、封闭的“类圆形”环向压力拱区域,这与圆形基坑中存在的环箍效应<sup>[19-20]</sup>相似,可将其称为“类环箍效应”。随着基坑开挖尺寸增大,环向压力拱区域在坑边中部断开,“类环箍效应”消失。此时,由于缺少了“类环箍”对箍内土体与箍外土体的隔断作用,距坑边较远处的土体也发生扰动,并与围护结构背后的土体松动区域相连,进一步形成大范围的开挖影响区域。

为了确定“类环箍效应”存在对应的基坑平面尺寸,取基坑边中心剖面处的中主应力最大值进行对比,以开挖后最大中应力值/开挖前最大中应力值(用K表示)大小判断拱效应是否存在,若K大于1,则说明拱区域封闭成环,有环箍效应。图8为K随基坑边长增加的变化规律。

由图8可知,K的大小随基坑开挖尺寸增大而减小,素填土的下降速度大于粉质黏土,这是由于粉质黏土的土体性质更好,稳定性更强,中主应力变化幅度更小。当基坑边长L小于18.0 m时,素填土与粉质黏土的主应力比值K均大于1,说明方形基坑边长小于18.0 m时,各土层中的环向拱区域处于连续、封闭状态,此时“类环箍效应”存在。当正方形基坑边长大于18.0 m后,素填土的主应力比值K小于1,而粉质黏土的主应力比值K仍大于1,说此时素填土中的“类环箍效应”已消失,粉质黏土中的“类环箍效应”存在。当基坑边长L大于21.6 m时,粉质黏土的主应力比值K小于1,此时粉质黏土

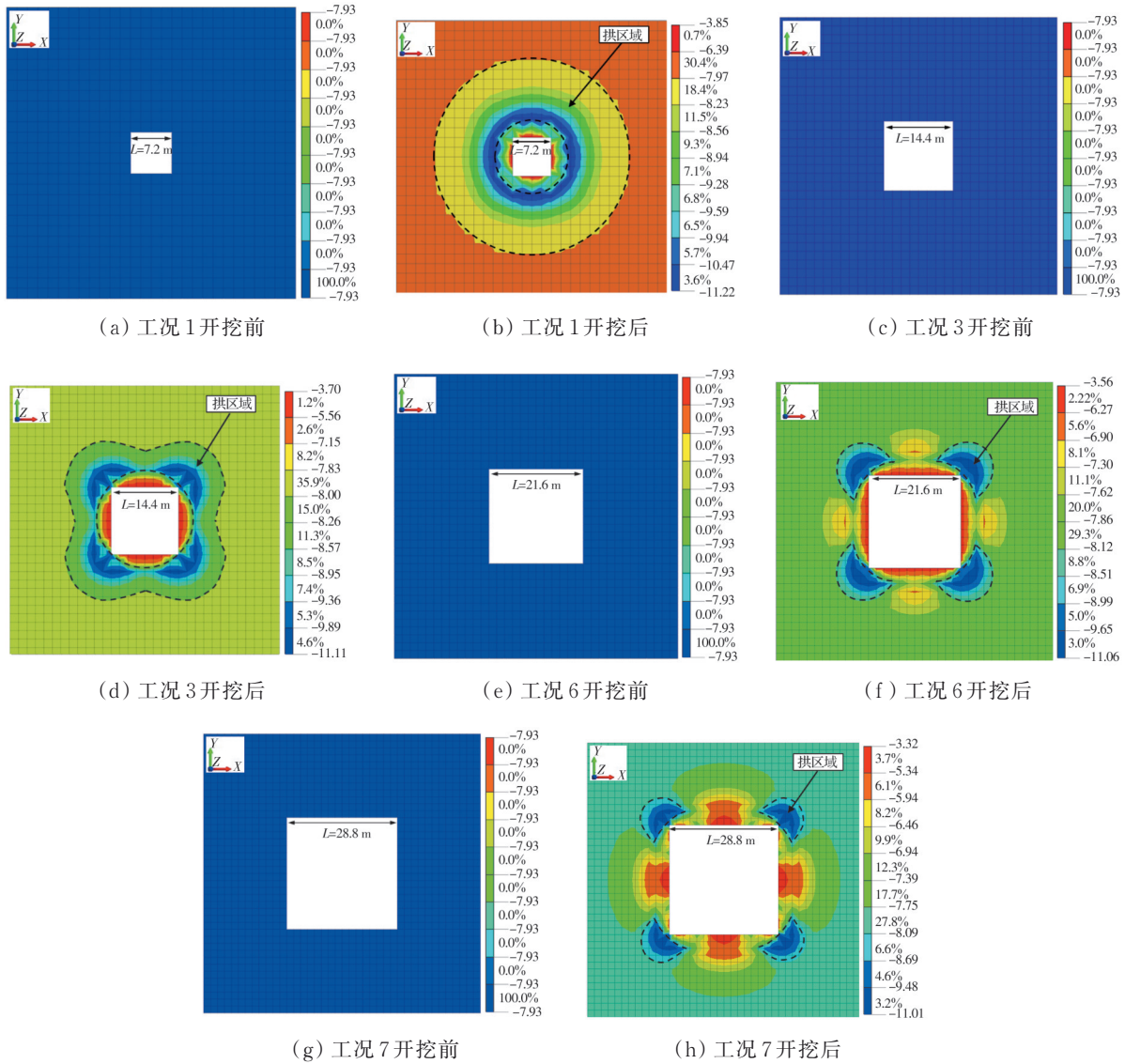


图 7 中主应力云图(单位:kPa)

Fig. 7 Middle principal stress cloud diagram (unit: kPa)

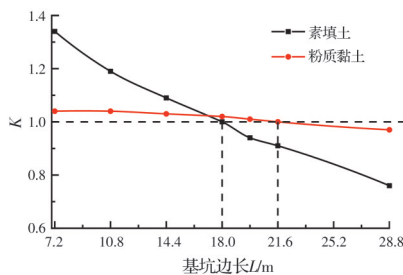


图 8 主应力比值  $K$  随基坑边长变化分布

Fig. 8 Distribution of principal stress ratio  $K$  with side length of excavation

中的“类环箍效应”消失。由此可知,土体性质越好,“类环箍效应”随尺寸增大而消失的速度越慢,在本工程中,素填土的“类环箍效应”在方形基坑边长大于 18.0 m 时消失,粉质黏土则为大于 21.6 m 时消失。

## 2.2 土压力分析

为了进一步研究方形基坑尺寸效应影响,分别对基坑中部与坑角处的土压力进行分析,图 9 为不同平面尺寸的方形基坑中部与坑角处的土压力沿深度的分布图。

从图 9 可知,围护结构背后的土压力沿深度逐渐增加,且在深度 2.2 m 与深度 4.8 m 处发生突变,这是由于此处位于土层分界处,上下两层土性质存在差异,但土压力的变化趋势与静止土压力基本吻合,本工程围护结构变形很小,桩后的土压力没有达到主动土压力的程度。

从图 9(a)可知,当基坑边长  $L$  为 7.2 m 时,主动土压力总体小于静止土压力。当基坑边长  $L$  增至 14.4 m 时,土压力增加,但增量较小,总体上仍小于静止土压力。当基坑边长增至 21.6 m 时,主动土压力进一步增加,且增量明显上升,土压力总体上大

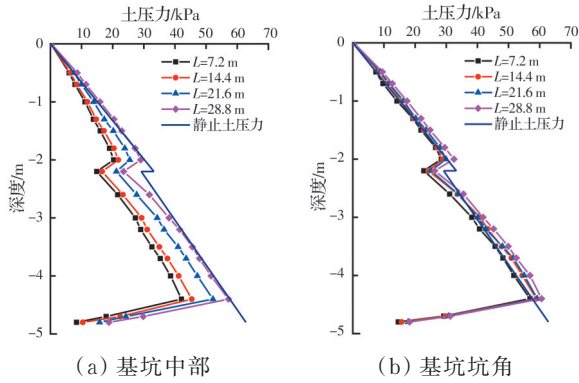


图 9 土压力沿深度分布图

Fig. 9 Earth pressure distribution along depth

于静止土压力。当基坑边长  $L$  增至 28.8 m 时,土压力继续增加,但增速有所下降。从图 9(b)可知,坑角处的土压力在不同平面尺寸下和静止土压力相当,随着尺寸的增大而增加,增长不是很明显,且每次增量明显小于基坑中部。

由此可见,基坑不同部位受到尺寸效应的影响存在差异,基坑中部处受影响的程度明显大于坑角处。同时,结合对坑边土体的主应力分析可知,当基坑边长  $L$  小于 14.4 m 时,由于存在“类环箍效应”,环箍隔断了环箍内、外的土体,土体松动的区域主要集中在围护结构背后小范围内,作用于结构的主动土压力较小,当基坑边长  $L$  为 21.6 m 与 28.8 m 时,环箍在基坑中部处断开,导致环箍内的土体与环箍外的土体相连,土体松动区域向外扩张,围护结构背后的土压力增大。基坑坑角处由于始终存在拱区域,土体稳定性变化不明显,因此,主动土压力只出现了少量增长。

### 2.3 坑边土体沉降

坑边土体沉降量可进一步反映尺寸效应对坑边土体稳定性的影响,由此分别对基坑中部处与坑角处的土体沉降情况进行分析。图 10 为坑边不同位置土体沉降情况。

由图 10 可知,随着基坑开挖尺寸增大,中部处与坑角处的土体沉降量逐渐上升,沉降范围向外扩张。在基坑中部,当边长为 7.2 m 与 14.4 m 时,土体沉降量较小,沉降区域距坑边 0~7.2 m。当边长为 21.6 m 时,沉降量明显上升,沉降区域扩张至距坑边 0~14 m。当边长为 28.8 m 时,沉降量进一步上升,沉降区域扩散至距坑边 0~18 m。在基坑坑角,随着边长增大,土体沉降增长量小于中部处,沉降范围扩张较小。由此可见,坑角处由于拱效应一直存在,土体稳定性更强。存在“类环箍效应”基坑的土体稳定性要明显优于不存在的基坑,“类环箍

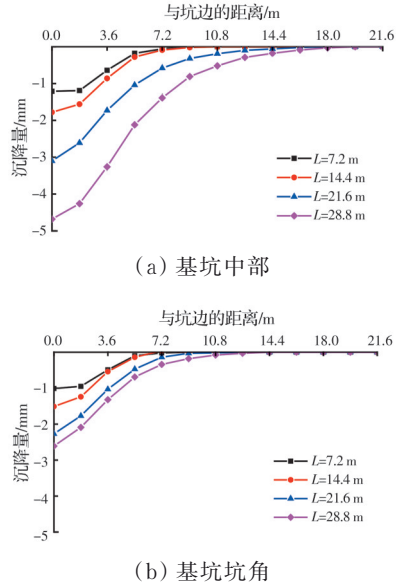


图 10 坑边土体沉降曲线

Fig. 10 Pit edge soil settlement curve

效应”有利于土体稳定。

### 3 长短桩围护结构变形受力分析

方形基坑的尺寸效应能影响坑边土体的稳定性,且进一步影响作用于围护结构上的土压力大小,而长短桩围护结构是在等长桩围护结构的基础上,减少了部分围护桩长,使整体结构抵挡土体变形的能力有所下降。为分析长短桩围护结构在尺寸效应影响下支护效果的降低程度,比较长短桩围护结构与等长桩围护结构的变形受力差异。

由于基坑中部处的土体主应力与土压力变化较明显,选取此处的桩身水平位移与弯矩进行对比。图 11 与图 12 分别为长短桩围护结构与等长桩围护结构位于基坑中部处的桩身水平位移与弯矩对比情况。

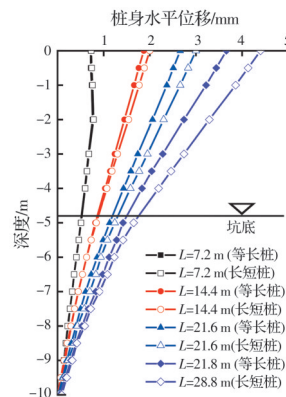


图 11 基坑中部处桩身水平位移

Fig. 11 Horizontal displacement of pile in middle of foundation pit

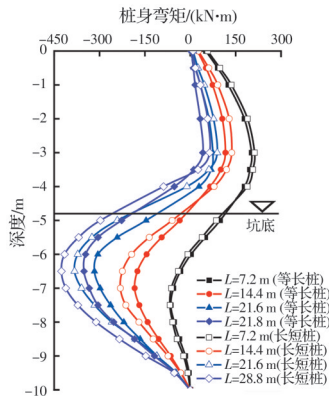


图 12 基坑中部桩身弯矩

Fig. 12 Pile bending moment in middle of foundation pit

### 3.1 桩身水平位移分析

从图 11 可知,当基坑边长为 7.2 m 时,长短桩围护结构与等长桩围护结构的桩身水平位移最大值均位于桩顶以下,长短桩围护结构的位移最大值相比等长桩围护结构几乎无增长。当基坑边长  $L$  增至 14.4 m 时,两者的桩身水平位移最大值均出现了明显的增长,位移最大值位于桩顶,长短桩围护结构的位移最大值比等长桩围护结构大 6.95%。当基坑边长增至 21.6 m 时,两者的桩身水平位移最大值继续增加,长短桩围护结构的位移最大值比等长桩围护结构大 15.00%。当基坑边长  $L$  为 28.8 m,长短桩围护结构的位移最大值比等长桩围护结构大 20.82%。

由此可见,尺寸效应对长短桩围护结构的支护效果有较大影响。当基坑尺寸效应较强时,坑边土体自稳性强,土体对围护结构的作用较弱,减小部分排桩桩长不会使整体结构变形大幅增长,但随着开挖尺寸增大,尺寸效应减弱,坑边土体松动区域扩大,土体对围护结构的作用加深,此时若减小部分排桩桩长,整体结构支护效果将大幅度下降。

### 3.2 桩身弯矩分析

根据图 12 可知,随着基坑平面尺寸增大,桩身弯矩发生改变,主要表现为上部弯矩减小,下部弯矩增大,弯矩最大位置表现为上部下移,下部上移。相同工况下,采用长短桩围护结构将使桩身弯矩最大值增大,然而,当基坑尺寸效应较强时,桩身弯矩增量较小,随着基坑尺寸不断增大,增量逐渐加大。可见,在小尺寸的方形基坑中,坑边土体具有较强的自稳性,此时减小部分排桩桩长,不会导致其余排桩的桩身弯矩最大值出现大幅增长,随着基坑平面尺寸的不断增大,基坑尺寸效应逐渐减弱,围护结构受到的土体作用加强,此时长短桩围护结构中的长桩承担的弯矩将大幅增加,桩身受弯程度迅速上升。

## 4 结论

通过现场测试与数值模拟,研究了不同开挖尺寸方形基坑中的尺寸效应变化规律,比较了长短桩围护结构与等长桩围护结构在尺寸效应影响下的变形受力差异,得出以下主要结论:

1) 方形基坑平面尺寸足够小时,在坑边一定距离处形成连续、封闭的“类圆形”拱区域,存在与圆形基坑中环箍效应类似的“类环箍效应”。本工程中,基坑边长大于 18.0 m 后,环向拱区域在基坑中部处断开,环箍效应消失,断开后的拱区域移向基坑坑角处。

2) 方形基坑尺寸效应对基坑中部的土压力影响大于坑角处,当方形基坑具有“类环箍效应”后,围护结构受到的土压力下降显著。

3) 相比等长桩,方形基坑尺寸效应越强,长短桩围护结构支护效果减弱程度越小,桩身水平位移与弯矩变化不明显。本工程中,边长不大于 14.4 m 的基坑可充分利用其尺寸效应,采用长短桩围护替代等长桩,可在保证安全前提下,节省材料和缩短工期。

## 参考文献

- [1] 丁士龙, 张昊, 徐长节. 长短桩在深厚软土基坑中的应用[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(9): 130-131.  
DING S L, ZHANG H, XU C J. Application of long and short piles in deep soft soil foundation pit [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(9): 130-131. (in Chinese)
- [2] 郑刚, 程雪松. 长短桩组合排桩悬臂支护工作机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(Sup1): 410-415.  
ZHENG G, CHENG X S. Experimental study on cantilever contiguous retaining piles with different lengths [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Sup1): 410-415. (in Chinese)
- [3] 李竹, 郑刚, 王海旭. 带水平支撑长短桩组合排桩工作性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(Sup1): 440-446.  
LI Z, ZHENG G, WANG H X. Model tests on work behaviors of retaining piles with different lengths and horizontal support [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 440-446. (in Chinese)
- [4] XU C J, XU Y L, SUN H L. Application of long-short pile retaining system in braced excavation [J]. International Journal of Civil Engineering, 2015, 13(2): 81-89.
- [5] XU C J, DING H B, LUO W J, et al. Experimental and numerical study on performance of long-short combined retaining piles [J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 20(3): 255-265.



- [6] 王际凯, 石钰锋, 刘伟煌, 等. 基坑开挖下倾斜长短组合桩的受力变形特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(4): 35-44.  
WANG J K, SHI Y F, LIU W H, et al. Mechanical and deformation characteristics of inclined long short composite pile under foundation pit excavation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(4): 35-44. (in Chinese)
- [7] 姜晨光, 贺勇, 朱焯昕. 基坑形状与基坑稳定性关系的实测与分析[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(5): 246-249.  
JIANG C G, HE Y, ZHU Y X. Relationship between the plane shape of foundation pit and its stability [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(5): 246-249. (in Chinese)
- [8] 宗露丹, 王卫东, 徐中华, 等. 软土地区56m超深圆形竖井基坑支护结构力学分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(7): 1248-1256.  
ZONG L D, WANG W D, XU Z H, et al. Mechanical properties of a 56-m deep circular shaft foundation pit support structure in soft soils [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(7): 1248-1256. (in Chinese)
- [9] 王卫东, 徐中华, 宗露丹, 等. 软土地区56m深圆形基坑的优化设计与实践[J]. 建筑结构, 2022, 52(10): 1-10.  
WANG W D, XU Z H, ZONG L D, et al. Optimal design and practice of a 56m ultra-deep circular excavation in soft soils [J]. Building Structure, 2022, 52(10): 1-10. (in Chinese)
- [10] 葛晓永, 王兴亚, 宋林辉, 等. 狭长型地铁基坑的空间效应量化研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8614-8620.  
GE X Y, WANG X Y, SONG L H, et al. Quantitative study on spatial effect of elongated metro foundation pit [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8614-8620. (in Chinese)
- [11] 项龙江, 龙照, 时轶磊, 等. 考虑尺寸效应的小尺寸深基坑土压力与变形计算分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 14178-14184.  
XIANG L J, LONG Z, SHI Y L, et al. Calculation and analysis of soil pressure and deformation about small size deep excavation considering size effect [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(34): 14178-14184. (in Chinese)
- [12] 贾敏才, 杨修晗, 叶建忠. 小尺度井结构基坑墙后土压力的坑角效应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 95-102.  
JIA M C, YANG X H, YE J Z. Corner effect of active earth pressure for small-sized excavation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 95-102. (in Chinese)
- [13] 唐福源, 衣利伟, 曹勇, 等. 填海地层深基坑支护参数优选与基坑变形分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 707-714.  
TANG F Y, YI L W, CAO Y, et al. Optimization of cross section parameters and analysis of foundation pit deformation in complex reclamation strata [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 707-714. (in Chinese)
- [14] 国家铁路局. 邻近铁路营业线施工安全监测技术规程: TB 10314—2021 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.  
National Railway Administration of the people's Republic of China. Technical specification for safety monitoring of operating railway infrastructures with adjacent constructions: TB 10314—2021 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021. (in Chinese)
- [15] 铁路路基设计规范: TB 10001—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
Code for design of railway earth structure: TB 10001—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [16] 吕文强. 大轴重重载铁路路基基床结构设计方法及技术标准研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
LV W Q. Study of subgrade structure design theory and key technology on heavy haul railway of large axle load [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [17] 李涛, 杨依伟, 贾奥运, 等. 空间效应下狭长深基坑地表三维变形预测[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1101-1110.  
LI T, YANG Y W, JIA A Y, et al. Prediction of three-dimensional surface deformation of long and narrow deep foundation pit under spatial effect [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1101-1110. (in Chinese)
- [18] 李大鹏, 唐德高, 闫凤国, 等. 深基坑空间效应机理及考虑其影响的土应力研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(9): 1632-1639, 1720.  
LI D P, TANG D G, YAN F G, et al. Mechanics of deep excavation's spatial effect and soil pressure calculation method considering its influence [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(9): 1632-1639, 1720. (in Chinese)
- [19] LI H J, LENG Y, ZHANG S L, et al. Deformation characteristics and stability of shaft-type foundation pit excavation [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1395-1403.
- [20] 徐中华, 李靖, 翁其平, 等. 超深圆形基坑计算分析方法及工程应用[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 13-20.  
XU Z H, LI J, WENG Q P, et al. Analysis method of ultra-deep circular excavation and its application [J]. Construction Technology, 2022, 51(1): 13-20. (in Chinese)