



基坑二次开挖的排桩支挡结构承载特性分析

王子郡¹, 俞峰¹, 廖宇彪², 王磊¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘要: 通过基坑二次开挖的排桩支挡结构模型试验, 以新增支护桩桩间距为主要参数, 研究其对组合支挡结构承载特性的影响。试验结果表明: 随着开挖深度的增加, 既有支护桩桩顶位移比新增支护桩桩顶位移变化更明显; 随着新增支护桩桩间距的增加, 既有支护桩的最大弯矩值增大, 而维持稳定的极限开挖深度减小; 由于土拱效应的影响, 新增支护桩的桩间距过大会导致整个支挡结构的安全性降低; 为了确保整个支挡结构发挥最佳支挡性能, 应控制新增支护桩的桩间距在 2~3 倍桩径之间。该结果可为基坑二次开挖的相关研究提供一定的参考。

关键词: 二次开挖; 模型试验; 支护桩; 桩间距; 土拱效应

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 01-0131-08

Analysis on the bearing characteristics of the soldier pile retaining structure subject to supplementary excavation

WANG Zijun¹, YU Feng¹, LIAO Yubiao², WANG Lei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: A model test of the soldier pile retaining structure subject to supplementary excavation was performed using the spacing between newly-added retaining piles as the main parameter, in order to study its influence on the bearing characteristics of the combined retaining structure. The test results indicate that with the increase of excavation depth, the displacement of the top of the existing retaining piles changes more significantly than that of the newly-added piles. With the increase of the spacing of newly-added retaining piles, the maximum bending moment of existing retaining piles has increased, while the maximum excavation depth to maintain stability has decreased. Under the influence of soil arch effect, the excessive large spacing of newly-added retaining piles will reduce the security of the whole retaining structure. In order to ensure that the whole retaining structure gives full play to its performance, the pile spacing of the newly-added retaining piles should be 2-3 times the pile diameter. The results are expected to provide a reference for related research on the secondary excavation of foundation pit.

Key words: supplementary excavation; model test; retaining pile; piles spacing; soil arch effect

0 引言

土地资源日益紧缺的问题限制了城市规模的扩

展。为有效利用土地资源, 应合理开发和运用城市地下空间资源。由于城市中心区条件受限, 采用地下增层或开发地下空间来代替大拆大建是城市建设

收稿日期: 2021-05-06 网络出版日期: 2021-09-16

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LZ17E080002)

作者简介: 王子郡 (1997—), 女, 辽宁盘锦人, 硕士研究生, 主要从事基坑工程方面的研究。

通信作者: 俞峰, E-mail: pokfulam@zstu.edu.cn

和发展的改造方案之一^[1]。在保留既有建筑的前提下,研究既有建筑地下增层基坑的二次开挖有着重要的意义。

目前关于既有建筑物增建的研究尚处于初级阶段,仅有部分学者对地下增层各结构的受力性状进行了研究。吴铭炳等^[2]利用原有支护桩,采用长短桩组合、增加内支撑等方法,成功完成了地下室加层的改造工作。杨予等^[3]运用有限元软件,对杭州某高层饭店地下增层案例中桩-柱置换结构节点的应力进行分析,发现置换核心区会出现节点薄弱区。龚晓南等^[4]采用有限元和理论分析的方法,研究了增层开挖后桩基的承载力,发现桩基侧摩阻力的损失与开挖的宽度呈正比关系。单华峰等^[5]通过自编的迭代程序计算出单桩荷载-沉降曲线,得出单桩极限承载力下的最安全开挖深度。唐德琪等^[6]通过模型试验研究了地下增层条件下内外双层排桩的排间距对排桩工作性状的影响,推导出了既有支护桩桩背土压力的计算方法。Yu等^[7]通过对既有地下空间中双排支护桩的承载性能进行研究,发现既有桩的弯矩与新增桩的嵌固深度成反比,与排桩间距成正比。郑曙光等^[8]采用 PLAXIS 有限元软件对比研究了双层支护结构与单排支护结构的工作特性,发现两级支护桩在最优工作性能下的最佳排间距范围。

综上所述,目前地下增层工程主要关注的重点是开挖后桩基的受力性状、支护桩的排间距、桩顶约束条件、新增支护桩的嵌固深度等。但由于新增支护桩在基坑开挖时会产生水平位移,导致桩后土体发生不同程度的变形,使得桩后土压力重新分布,进而产生土拱效应。当支护桩桩间距在某一数值范围内时,桩后土体在桩间土附近形成土拱,桩间土体产生的土压力发生转移,使得支护桩发挥有效的支挡作用。所以在考虑地下增层设计方案时,应控制新增支护桩的桩间距在合理的范围内。杨帆等^[9]通过对悬臂排桩支护结构的桩间距进行理论推导计算,证明了桩间距是导致桩间土体出现土拱效应的影响因素之一。古海东等^[10]利用离心机进行了疏排桩支护基坑的模型试验,证实了桩间距与桩径的比值是支护桩内力和变形的重要影响因素。张婧等^[11]采用离散元 PFC2D 软件分析基坑排桩的支护机理,得出桩间距与排间距的支挡效果呈负相关。李涛等^[12]通过离散元 PFC2D 软件研究了桩-土在深基坑开挖过程中的受力变化规律,发现合理利用桩间土拱效应可提高支护结构的利用率。王洪木

等^[13]运用有限元 PLAXIS3D 软件,对开挖过程中土拱效应的空间分布情况进行分析,认为土拱效应的空间分布规律对支护桩的经济性、安全性有重要的影响。因此,合理利用土拱效应可以提高整个支护结构的安全性,合理设计桩间距可以在总体上减少工程量,提高经济性。

上述研究的主要对象是对新建基坑的支护桩,而在地下增层排桩支挡结构中,桩间土体所产生的土拱效应现象更为复杂。由于现有的学术研究成果不能直接应用到基坑二次开挖的排桩支挡结构中去,本文以新增支护桩桩间距为主要研究参数进行室内模型试验,分析支护桩桩身弯矩和桩顶位移的变化规律,研究桩间距对整体支挡结构承载性能的影响,为实际工程应用提供理论支撑。

1 模型试验设计

1.1 试验概况

为了研究地下增层工程中既有-新增支护结构的桩身弯矩及桩顶位移的变化规律,本文建立了基坑二次开挖排桩支挡结构的模型试验。唐德琪等^[14]通过强度折减法分析发现,排间距为 4 倍桩径、既有支护桩与新增支护桩的桩长比为 6:9 时,可以发挥支护桩的最佳支挡性能。试验桩桩径为 32 mm,既有支护桩桩长为 60 cm,新增支护桩桩长为 90 cm,弹性模量为 15.03 GPa;用其模拟原型支护桩桩径为 800 mm,桩长为约 15、25 m 的管桩,弹性模量为 30.00 GPa。模型的几何相似比 $C_L=15/0.6=25$,弹性模量相似比 $C_E=1.96$,桩身应力相似比为 $C_\sigma=C_E=1.96$,桩身应变相似比为 $C_\delta=C_L=25$,桩身弯矩相似比为 $C_M=C_E C_L^3=1.96\times 25^3=30625$ 。

1.2 试验装置及试验材料

1.2.1 模型箱

排桩支护产生的土拱效应现象一般与桩的尺寸、桩的抗弯刚度、桩的类型、桩间距、土体的性质有很大的关系,本文主要针对新增支护桩的桩间距进行模型试验。由于很难观察到桩间土拱^[9]的自然成拱现象,所以本文通过分析模型试验基坑开挖过程中支护桩的位移、弯矩的变化规律,来判断土拱效应对整个支护体系的影响。模型试验装置如图 1 所示,试验模型箱尺寸为长 3 m,宽 3 m,高 2 m。为了减小模型箱与土体间的摩擦,在模型箱内部贴上防渗透薄膜,减小试验过程中边界效应的影响。

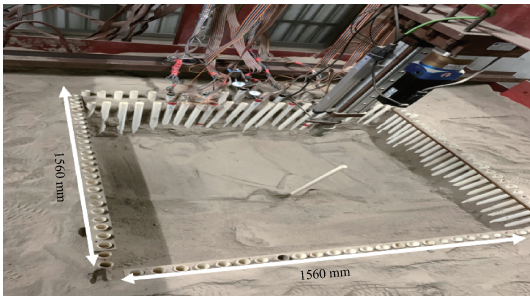


图 1 模型试验装置照片

1.2.2 试验土样

本试验所用土样为杭州下沙地区砂质粉土,土体的基本力学参数为:密度 $\rho = 1.58 \text{ g/cm}^3$,含水量 $\omega = 5\%$,内摩擦角 $\varphi = 24^\circ$,黏聚力 $c = 2 \text{ kPa}$ 。模型箱内土体处于自然松散状态。

1.2.3 支护试验桩

试验桩实物照片如图 2,采用 PVC 塑料管模拟,既有试验桩桩长 L_1 为 60 cm,新增试验桩长 L_2 为 90 cm,塑料管截面形状为圆形,其截面直径为 32 mm。



图 2 试验桩实物照片

由于需要布置的应变片数目较多,贴在桩身外侧会在试验中发生损坏,所以应将应变片贴在试验桩的内壁。选取 10 根试验支护桩将其剖开,每隔 10 cm 布置测试点,如图 3 所示。在对应的刻度处对称黏贴应变片并与专用导线连接,组成半桥桥路,并在应变片表面均匀涂抹防水胶,再用 704 硅胶固定,防止导线扰动应变片,将导线从桩顶上部引到桩外,最后用 502 胶水将试验桩重新黏合。10 根黏贴应变片的试验桩在试验中分别作为既有支护桩和新增支护桩。

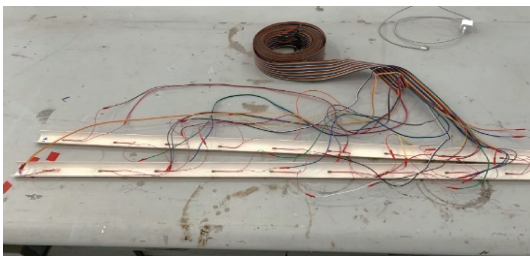


图 3 桩身应变片布置照片

1.2.4 位移百分表

为了检测支护桩的桩顶位移,将角钢固定在既有支护桩和新增支护桩的上方,将磁性表座固定在工字形钢梁上,并用支架连接百分表和磁性表座,使百分表布置在应变测试桩顶部。为方便布置位移监测设备,选取中间支护桩,设置其桩长为 65、95 cm,高出地面 5 cm,以便在桩顶布置百分表,百分表布置如图 4 所示。

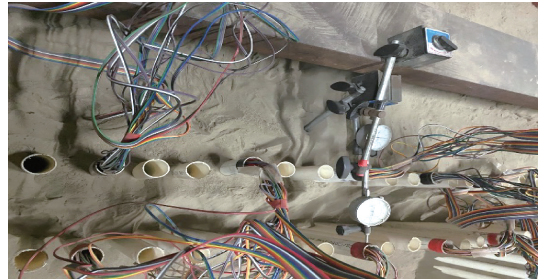


图 4 百分表布置图

2 试验过程

2.1 支护桩的修正系数标定试验

用 PVC 管模拟实际工程中的支护桩时,经过劈开和黏合后试验桩整体弹性模量会发生变化,需要对试验桩进行修正系数标定试验。因此,为确定桩身应变与桩身弯矩的关系,采用简支梁施加集中荷载的方法,找到应变值与弯矩理论值的关系,试验示意图如图 5 所示。

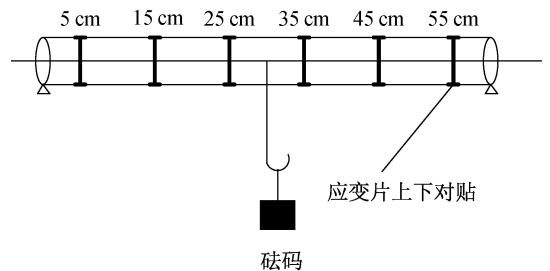


图 5 标定试验示意图

注:5、15、25、35、45、55 cm 表示试验桩中应变片测试点位置。

试验分六级加载,加载的同时记录应变仪读数,通过数据拟合得到式(1):

$$k = \frac{M}{\epsilon} \quad (1)$$

其中: M 为弯矩理论值, ϵ 为应变仪读数, k 为试验桩修正系数。

根据式(1)可以得出,60 cm 试验桩的平均修正系数 k_1 为 0.38,90 cm 试验桩的平均修正系数 k_2 为 0.42。这与 Yu 等^[7]得到的平均修正系数相近,表明本试验的可行性。

2.2 基坑二次开挖过程

试验模拟某项目基坑在形成既有地下空间后,对其进行二次开挖,测定在不同方案下,不同新增支护桩的桩间距对整个支护体系的影响,包括桩顶位移、桩身弯矩以及维持稳定的极限开挖深度,同时分析既有-新增支护桩协同工作的机理。试验桩平面布置示意图如图6所示。试验开挖区域尺寸为长1560 mm,宽1560 mm,三侧布置空白围护桩,一侧布置试验支护桩,其中既有支护桩靠近开挖区域,新增支护桩靠近模型箱边界。

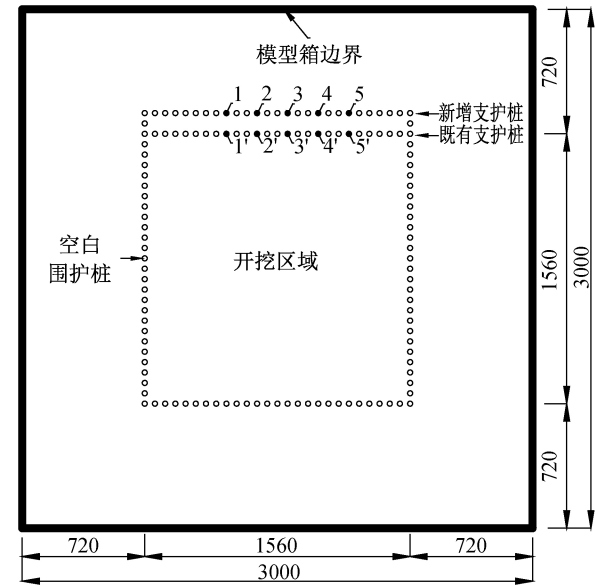


图6 试验桩平面布置示意图(mm)
注:1—5、1'—5'表示试验桩的位置。

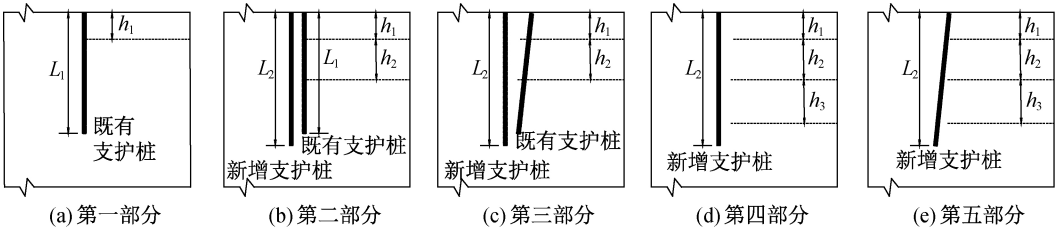


图7 基坑开挖过程

3 试验结果分析

3.1 桩顶位移变化规律

图8为既有支护桩桩顶水平位移与深度曲线,表示不同桩间距下既有支护桩桩顶位移的变化情况。压入新增支护桩前为既有支护桩形成既有地下空间的过程,即初始开挖深度;压入新增支护桩后为增层开挖的过程,即增挖深度。在开挖深度小于20 cm时,桩顶位移发展速度较慢,这是因为桩身变形小导致桩后土体变形处于弹性范围内,被动区土体仍有较大的刚度。

考虑到试验模型箱尺寸和测试桩大小的影响,本文设定了试验方案的参数,见表1。G1—G3表示新增支护桩在不同桩间距下的三种布置方案,桩间距变量分别为 $2d$ 、 $3d$ 、 $6d$,其中 d 为试验桩直径。 h_1 为首次形成既有地下空间的开挖深度, h_2 为既有支护桩倒塌时的开挖深度, h_3 为新增支护桩倒塌时开挖的深度。

表1 试验方案参数

试验方 案编号	既有支护 桩长度	新增支护 桩长度	桩间距	h_1	h_2	h_3
G1	60	90	6.40	20	35	25
G2	60	90	9.60	20	30	10
G3	60	90	19.20	20	25	5

模型试验基坑开挖分为五个阶段,如图7所示。首先埋入前排既有支护桩,模拟首次开挖,形成既有地下空间(第一部分)、压入后排新增支护桩组成协同体系进行增层开挖,形成地下增层空间(第二部分)、开挖至既有支护桩倾覆破坏(第三部分)、继续开挖形成新增地下空间(第四部分)、开挖至整体支护体系崩溃破坏(第五部分)。

将试验桩沿着基坑一侧对称布置,以此减小空间效应^[15]对支护体系的影响。整个试验过程分步进行,先按照每层10 cm进行开挖,监测桩顶位移不变时,再继续开挖下一层土体;等到增层开挖过程中桩顶位移变化幅度较大时,每层开挖5 cm,观察试验桩至其完全倾覆。

随着开挖深度的变化,既有支护桩增挖深度与桩顶位移成正比关系,且发展速度增加;在增挖到20 cm后发生突变,这与悬臂排桩模型试验^[9]的桩顶位移变形规律一致。既有支护桩桩顶位移随着开挖深度的增加而增大,这说明当开挖深度达到一定程度时,桩后被动区土体发生较大塑性变形,支护桩的承载能力降低。

随着桩间距的增大,维持稳定的极限开挖深度逐渐减小。增挖深度为25 cm时,桩顶位移分别为3.5、6.5、12.2 mm,此时G1、G2桩间距较小,桩顶位移相对较小,而G3桩间距过大,导致桩后土体发

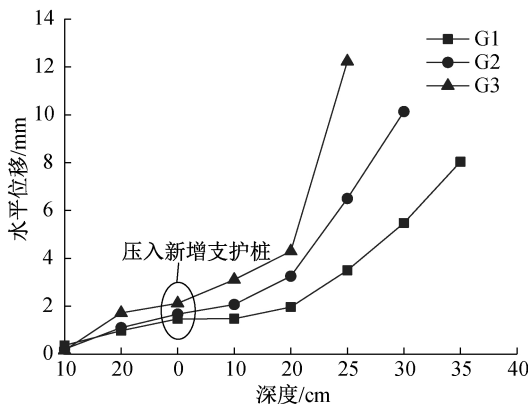


图 8 既有支护桩桩顶位移与深度曲线

生滑移,使桩顶位移发生突增。既有支护桩承担的桩后土压力变大,主动区影响范围增加,最后发生倾覆破坏。这说明当新增支护桩的桩间距过大时,桩后土体通过排间土传给既有支护桩的土压力增大,甚至导致既有支护桩未到达极限承载力时就发生倾覆破坏。

图 9 表示在既有空间形成的基础上,埋入新增支护桩后的桩顶位移变化规律。在既有支护桩和排间土未退出支护体系时,新增支护桩桩顶位移增幅分别为: 2.4 mm (G1)、2.3 mm (G2)、1.9 mm (G3)。新增支护桩的桩顶位移与增挖深度呈递增关系,但与桩间距呈递减关系。这是因为整个支护体系是由前排既有支护桩与后排新增支护桩共同承担桩后土压力,随着新增支护桩的桩间距逐步增大,一部分土压力通过排间土传递给既有支护桩,减小排间土对支护桩的反压作用,导致新增支护桩分担的土压力变少,桩顶位移变化减小。

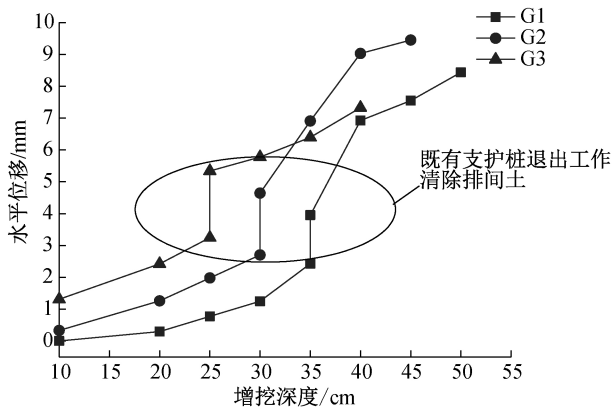


图 9 新增支护桩桩顶水平位移变化曲线

在移除前排支护桩和排间土后,新增支护桩的桩顶位移发生突变,新增支护桩桩顶位移分别为 1.5 mm (G1)、1.9 mm (G2)、2.1 mm (G3),随着桩间距的增大,新增支护桩的桩顶位移也增大。这是因为当既有支护桩退出工作后,新增支护桩作为单

排悬臂支护桩单独工作,单桩承担的侧向土压力不断增大,最后导致桩顶位移发生突增。

结合图 9、图 10 可以发现,G3 在移除既有支护桩后,桩顶位移的变化速度远远小于 G1、G2,当 G3 排间距为 $6d$,增挖到 25 cm 时,大部分土从支护桩缝隙中滑出,桩后土体形成稳定滑坡,桩顶位移几乎不发生变化。这是因为本次试验采用的土体是砂质粉土,其抗剪能力较小,黏聚力较差,导致桩身后土体形成滑坡,土坡形成稳定的倾斜角,达到平衡状态。此时,新增支护桩几乎退出工作,但由于新增支护桩嵌固深度较深,桩身底部的反压作用导致桩身未发生倾覆破坏。

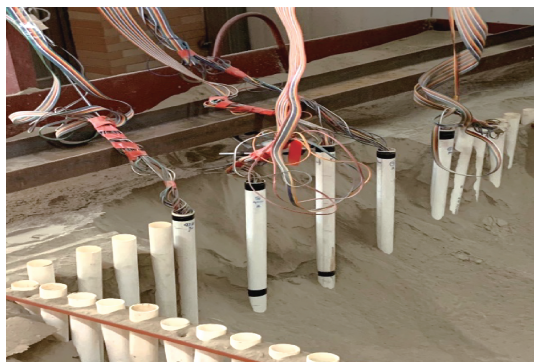


图 10 G3 桩后土体滑落示意图

结合图 8、图 9 中既有、新增支护桩的桩顶位移变化规律可知,在进行增挖工作时,既有支护桩的位移比新增支护桩的位移变化要大很多,新增支护桩的桩间距直接影响整个支护体系的承载性能。

3.2 桩身弯矩变化规律

3.2.1 既有支护桩弯矩变化规律

为了减小试验中的误差,取 5 根应变测试桩的弯矩平均值作为桩身弯矩取值。在基坑开挖过程中,既有支护桩会受到新增支护桩桩后土压力和排间土压力的作用,导致桩身发生变形并开始承担弯矩,支护桩开始发挥桩身抗弯性能,并抵抗桩后土压力^[17]。分析三组试验的弯矩变化情况,不同桩间距方案中新增支护桩桩身弯矩变化曲线如图 11 所示。

从图 11(a) — (c) 看出,既有支护桩的弯矩变化规律随着开挖深度增加而增加,并呈现出两端小,中间大的分布特点。在整个开挖过程中,弯矩增幅随着开挖深度逐渐增大;测点深度在 45 cm 附近处,桩身弯矩达到了最大值。这与普通悬臂单排桩开挖时的桩身弯矩变化规律大致相同,符合实际。

增挖 20 cm 时既有支护桩桩身弯矩的变化曲线如图 12 所示,增挖深度 20 cm 时,G1、G2 的变化情况比较接近,G3 的变化速率远远大于 G1、G2。在

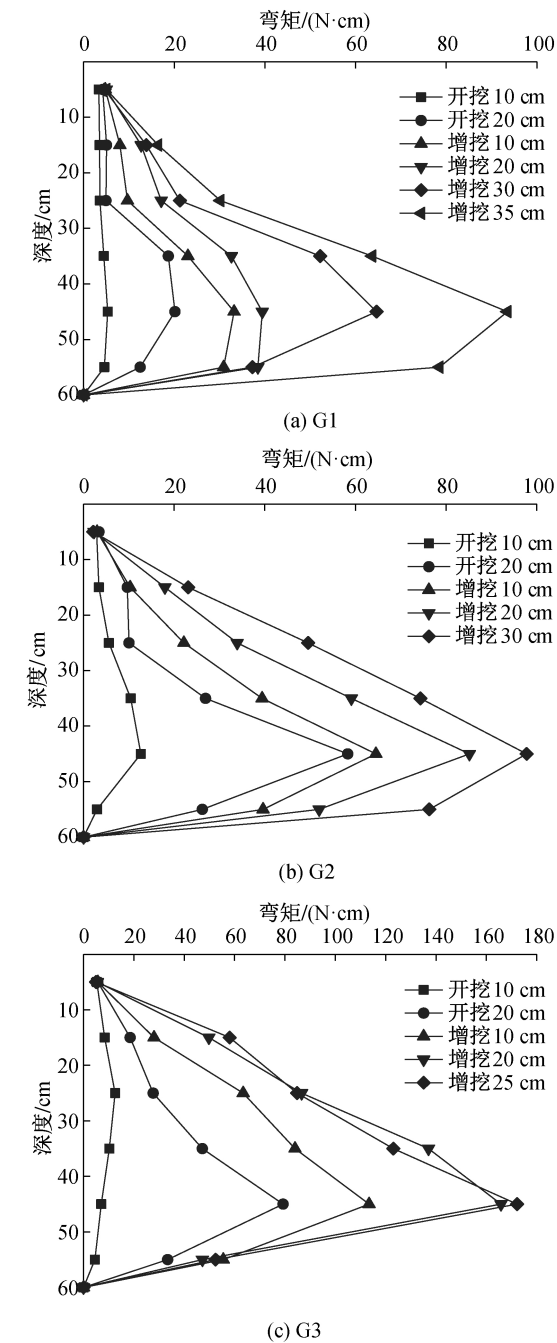


图 11 不同桩间距方案中既有支护桩桩身弯矩变化曲线

不同桩间距下,既有支护桩的最大弯矩比值为 1:2:4,略大于新增支护桩的桩间距的比值为 2:3:6。这是因为既有支护桩要承担的荷载包括两部分,一部分是桩后土压力,一部分是新增支护桩通过排间土传给支护桩的剪应力。

在桩身埋深 45~55 cm 处,G3 弯矩的减幅远远大于其他两组。因为 G3 的新增支护桩的桩间距过大,当增挖深度大于 20 cm 时,桩后土体几乎无法形成土拱效应,导致既有支护桩无法抵挡新增支护桩及排间土传递的土压力,这使得大部分土体从桩间滑落,桩身弯矩发生骤降。

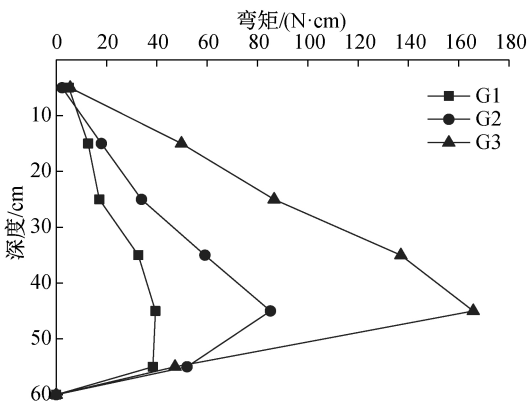


图 12 增挖 20 cm 时既有支护桩桩身弯矩变化曲线

结合表 2 和图 12,随着桩间距的增大,最大弯矩值随之增大,但维持稳定的极限开挖深度随着桩间距的增大而减小。3 组试验的最大弯矩值都出现在维持稳定的极限开挖深度附近,既有支护桩在增挖 35 cm 时,G1 最大弯矩值为 93.50 N·cm;在增挖 30 cm 时,G2 最大弯矩值为 97.77 N·cm;在增挖 25 cm 时,G3 最大弯矩值为 172.21 N·cm。

表 2 新增支护桩桩间距与既有支护桩维持稳定的极限开挖深度关系

桩间距	维持稳定的极限开挖深度/cm
2d	56
3d	51
6d	46

3.2.2 新增支护桩弯矩变化规律

不同桩间距方案中新增支护桩桩身弯矩变化曲线如图 13 所示。观察图 13(a)—(b)可以看出,当增挖深度在 20 cm 之前,由于 G1、G2 桩间距较小,新增支护桩桩身弯矩变化较小,此时整个支护体系主要承担荷载的是既有支护桩,新增支护桩几乎不承担荷载,随着开挖深度的增大,新增支护桩逐渐加入工作,桩身弯矩不断增大。在清除既有支护桩和排间土后,新增支护桩的弯矩值发生突变,说明在移除既有支护桩前,新增支护桩仍处于桩后土体的弹性范围内,由于基坑不断开挖,导致桩后土体应力重分布,一部分桩后土压力通过排间土传给既有支护桩,使得新增支护桩分担的弯矩较少,从而减小桩身压力。

G3 新增支护桩弯矩变化情况如图 13(c)所示,从图中可以看出:当增挖深度超过 10 cm 时,由于 G3 桩间距较大,新增支护桩的弯矩发生非常明显的变化,这是因为新增支护桩从初始增挖时就与既有支护桩协同工作,说明新增支护桩的桩间距过大会降低整个支护体系的承载性能。

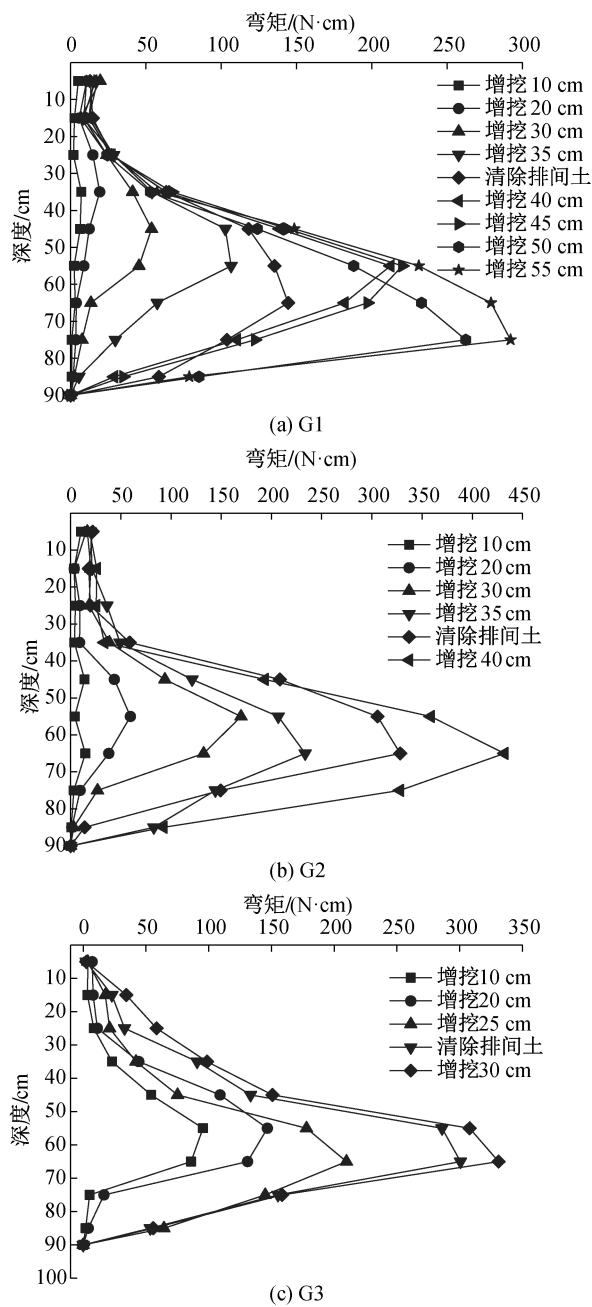


图 13 不同桩间距方案中新增支护桩桩身弯矩变化曲线

结合图 13 和表 3 对比可以发现,整个支护体系中维持稳定的极限开挖深度随着桩间距的增大而逐渐减小。当桩间距为 6d 时,维持稳定的极限开挖深度只有 51 cm,甚至小于既有支护桩的原始长度 60 cm,使得整个支护体系提前发生倾覆破坏。

表 3 新增支护桩桩间距与新增支护桩维持稳定的极限开挖深度关系	
桩间距	维持稳定的极限开挖深度/cm
2d	75
3d	66
6d	51

新增支护桩桩身位置最大弯矩与桩间距的关系见表 4,其中: m_1 为普通桩 M_{\max} 与边桩 M_{\max} 比值, m_2 为中心桩 M_{\max} 与边桩 M_{\max} 的比值。从表 4 中可以看出:受空间效应的影响, m 值随着桩间距的增大而增大,边桩的所承受的弯矩要远小于中心桩承担的弯矩;并且当桩间距为 6d 时,该比值发生显著提升,这说明桩间距可能会对中心桩造成更严重的影响。通过对支护桩桩顶位移和桩身弯矩分析,该比值在 1~2 之间是安全的。

表 4 新增支护桩桩身位置最大弯矩与桩间距的关系					
桩间距	边桩 M_{\max} /(N·cm)	普通桩 M_{\max} /(N·cm)	中心桩 M_{\max} /(N·cm)	m_1	m_2
2d	290.44	327.69	357.31	1.13	1.23
3d	323.23	491.47	607.53	1.52	1.88
6d	230.55	528.99	838.30	2.30	3.64

注:1 号、5 号桩为边桩,2 号、4 号桩为普通桩,3 号桩为中心桩。

通过图 13 可以发现,当新增支护桩的桩身最大弯矩分别为 292.1 N·cm(G1)、432.0 N·cm(G2)、330.9 N·cm(G3),当桩间距为 3d 时,新增支护桩所承担的弯矩达到最大值。这是因为 G2 形成土拱效应的范围比 G1 大,土体主应力集中效果更好,桩后主动区范围增加,使得桩身承担的荷载变大^[10]。在 G3 桩间距为 6d 时,桩间距过大,桩周土体较为松散,桩后土体无法进行应力重分布,导致土拱效应不能形成,使得桩身承担的荷载变小。

4 结 论

本文通过室内模型试验对 3 种不同桩间距的排桩支护结构进行承载特性分析,主要得出以下结论:

- a)既有支护桩桩顶位移随着开挖深度的增加而增大,并随着新增支护桩的桩间距增大而增大。新增支护桩的桩顶位移的增幅与增挖深度呈递增关系,但与新增支护桩的桩间距呈递减关系。
- b)在增层开挖过程中,既有支护桩要承担两部分荷载,一部分是桩后土压力,一部分是新增支护桩通过排间土传给支护桩的剪应力。随着桩间距的增大,既有支护桩桩身弯矩最大值与桩间距呈正比;新增支护桩和既有支护桩的维持稳定的极限开挖深度均与桩间距呈反比。
- c)通过对桩顶位移和桩身弯矩的分析,既有-新增支护结构的协同工作机理为:在初始开挖形成既有地下空间时,既有支护桩作为主要受荷结构,起到抗倾覆的作用。在增层开挖过程中,既有支护桩与

新增支护桩同时承担桩后土压力,共同承担抗倾覆的作用,排间土起到了传递土压力的作用;既有支护桩由主要受荷结构逐渐失效至退出工作,新增支护桩逐渐由辅助的嵌固结构转变为主要受荷结构。在既有支护桩失效时,主要由新增支护桩承担抗倾覆的作用。

d)在进行室内模拟增层开挖试验时,为确保既有-新增支护桩的支挡效果达到最佳状态,使桩后土体更好的形成土拱效应,应保证新增支护桩的桩间距在2~3倍桩径之间为最佳桩间距范围。对模型试验中的桩顶位移、桩身弯矩以及现场支护桩破坏情况可以看出,在实际工程中,应确保新增支护桩桩间距小于3倍桩径,来提高整个支护体系的安全性。

参考文献:

[1] 杨学林,祝文畏,周平槐. 某既有高层建筑下方逆作开挖增建地下室设计关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3775-3786.

[2] 吴铭炳,林颖孜,戴一鸣,等. 软土地基地下室加层的基坑支护[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 210-214.

[3] 杨予,俞峰,徐超晔. 地下增层托换桩-柱置换节点薄弱区应力分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 469-473.

[4] 龚晓南,伍程杰,俞峰,等. 既有地下室增层开挖引起的桩基侧摩阻力损失分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 1957-1964.

[5] 单华峰,夏唐代,俞峰,等. 软土地区地下室增层开挖对既有桩基沉降性状的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(6): 1995-2000.

[6] 唐德琪,俞峰,陈奕天,等. 既有-新增排桩双层支挡结构开挖模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1039-1048.

[7] Yu F, Xie Z B, Duan N, et al. Performance of double-row piles retaining excavation beneath existing underground space[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2019, 19(4): 167-180.

[8] 郑曙光,唐德琪,傅林峰,等. 既有建筑地下增层既有-新增双层排桩支护体系有限元分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(S2): 716-721.

[9] 杨帆,时仓艳. 悬臂排桩支护结构的水平土拱效应及桩间距研究[J]. 工程建设, 2020, 52(11): 29-33.

[10] 古海东,杨敏. 考虑土拱效应的疏排桩支护基坑内力和变形分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3531-3540.

[11] 张婧,王俊杰,武立清,等. 基于 PFC2D 的基坑排桩支护机理探讨[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 17-20.

[12] 李涛,朱连华,李彬如,等. 深基坑开挖土拱效应影响因素研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 58-65.

[13] 王洪木,陈金锋. 排桩支护体系的三维土拱效应及桩间距研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1033-1039.

[14] 唐德琪,俞峰,黄祥国,等. 既有建筑地下增层双层悬臂排桩承载性状及优化分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S1): 182-192.

[15] 郑刚,邓楚涵,程雪松,等. 空间效应对悬臂桩支护基坑连续破坏的影响研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(10): 1016-1026.

[16] 雷亚伟,郑刚,程雪松,等. 局部超挖对悬臂排桩基坑支护体系安全性能的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 70-78.

[17] 孔德森,张杰,王士权,等. 基坑支护倾斜悬臂桩受力变形特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 160-168.

(责任编辑:康 锋)