

[文章编号] 1003—4684(2019)04-0099-05

弧形间隔排桩—土钉墙组合支护结构研究

江 凯, 范 瑛

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为了充分地利用地表地形、地质结构和混凝土的材料特性,改进直线排桩的不利受力性状和提高排桩的整体稳定性,提出弧形间隔排桩—土钉墙组合支护结构,通过基坑支护的 4 组水平向千斤顶试验机模型试验,并利用 ABAQUS 有限元分析软件,对横向荷载下弧形间隔排桩和土钉墙的变形特征进行研究,分别讨论不同桩距、基坑高度和土钉长度的基坑支护结构变形性状。试验结果表明:在一定荷载下,减小桩距或基坑高度可降低基坑支护结构的变形,当土钉长度与基坑高度之比小于 0.29 时,桩间土钉墙变形明显;当土钉长度与基坑高度之比大于 0.29 时,其变形不明显。

[关键词] 有限元;弧形间隔排桩;土钉墙;变形;模型试验

[中图分类号] TU46

[文献标识码] A

我国是滑坡灾害较为严重的国家,随着房屋建筑、公路、铁路工程等基础设施建设规模的扩大,滑坡给人类造成的灾害日渐加重。

为整治滑坡地段变形,王辉等^[1]提出了弧形排桩组合抗滑结构,即把抗滑桩在平面内设置为弧形,桩顶部用弧形连系梁联系为整体;张志伟等^[2]对弧形排桩组合抗滑结构进行了有限元模拟,分析有关结构参数对其内力分布规律的影响,并指出弧形间隔排桩的弧形水平连系梁与直线连系梁相比,弧形水平连系梁弯矩减小,并且由于处于受压状态,使得连系梁的抗弯要求降低,从而发挥出混凝土的高抗压性能,结构受力状态更为合理,但受土体滑坡失稳的影响,限制了排桩的桩距;Bosscher,杨敏等^[3]通过室内模型试验,模拟土钉墙在组合支护结构中的加固效果,并指出桩间土钉墙对支护结构位移变形有显著的影响,土钉墙结构轻型,密封性好,施工速度快,但其变形条件受环境影响,难以得到有效的控制,且基坑高度有限。将弧形间隔排桩与土钉墙组合,土钉墙用于支护弧形间隔排桩桩间土体,形成弧形间隔排桩—土钉墙组合支护结构。即通过土钉墙弥补弧形间隔排桩桩间土体滑坡失稳的不足,同时弧形间隔排桩也消除了土钉墙支护深度的限制,提高了土钉墙的支护深度。众多基坑支护方法中,排

桩加土钉墙支护体系由于具有稳定性,施工效率高等优点,已在工程实践中广泛应用,目前弧形间隔排桩加土钉墙组合支护时土钉墙的破坏机理及组合支护结构的变形性状还有待深入研究。

通过基坑支护的 4 组水平向千斤顶试验机模型试验(第 1 组是不设支护基坑,第 2 组是弧形间隔排桩基坑,第 3 组是弧形间隔排桩—土钉墙组合支护基坑,第 4 组是弧形间隔排桩—土钉墙组合支护基坑,其基坑高度大于第三组),并利用 ABAQUS 有限元分析软件建立了三维有限元模型,深入分析了以上支护结构排桩和桩间土钉墙的破坏机理,相关结果能为弧形间隔排桩—土钉墙组合支护结构的变形性状提供参考。

1 模型试验

1.1 不设支护的试验

模型试验的主要目的是定性分析组合结构在水平推力作用下的受力及变形特征。试验模型如图 1a 基坑部分所示,确定基坑支护结构几何相似比为 1:100,基坑土体采用天然土体,土样的物理性质如表 1 所示,根据土体的最大干密度,确定该基坑土体的压实度为 93%。试验在净空为 350 mm×400 mm×350 mm 的模型箱中进行。基坑尺寸为

[收稿日期] 2019—03—07

[基金项目] 国家自然科学基金(51578219)

[第一作者] 江 凯(1995—),男,湖北孝感人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为桥梁与隧道工程

[通信作者] 范 瑛(1969—),女,湖北武汉人,湖北工业大学教授,研究方向为路基路面理论,道路与桥梁监控

200 mm×200 mm,开挖深度为 100 mm,坡角为 90°竖直基坑。

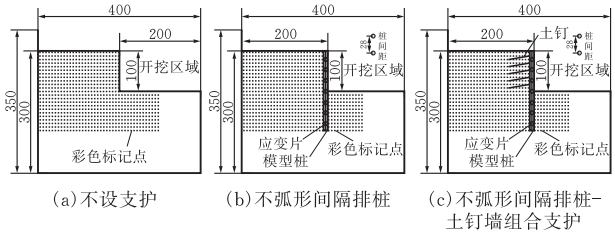


图 1 基坑组合支护变形试验示意图

表 1 土体物理性质参数

土样参数	最大干密度/ (g·m ⁻³)	最优含水率/%	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
测试值	2.07	16.2	51.3	33.1

模型填筑前,在模型箱两侧用机油黏贴双层塑料薄膜,使减小土体与侧壁的摩擦。然后在模型基坑侧表面用彩色油性笔布置标记点,用游标卡尺测量标记点位移,从而获得土体的水平向变形量。标记点布置完毕后,再将模型箱重新装配在一起,然后在模型箱表面设置差动式位移传感器,这是为了直观测量试验过程中土体的位移,随后将土压力盒埋设在土体中,土压力盒可测试荷载作用下土体的应变值,进而可转换为土压力值。待所有接线通道调试完毕后,开启水平向千斤顶试验机,通过伺服液压控制台对土体分级加载,先在 1.2 MPa 的初始荷载下稳压 20 min,以使得土体与支护结构之间能充分接触,待数据采集完成后,以每 0.4 MPa 为一级,每级稳压 20 min,直至施加荷载后采集的数据长时间不稳定时,试验即告结束。加载过程中,可利用模型箱中的土压力盒与位移传感器,测试作用于土体间

的土压力值与土体的位移,由此分析不设支护时土体的受力特征。

1.2 弧形间隔排桩的试验

试验模型如图 1b 所示,采用弧形间隔排桩基坑支护,基坑采用本节 1.1 中的模型。支护结构所用模型材料为钢材,钢材的物理性质如表 2 所示,模型桩采用钢管制成,钢管长 300 mm,外径 18 mm,内径 15 mm,沿管内壁布置应变片,桩头用带圆孔钢板条将钢管并排固定在一起。排桩中桩数与排列为 5×1,桩距为 60 mm。试验主要分析试验过程中传感器读数和应变片读数来观测排桩的变形特性^[4]。

表 2 钢材有关力学性质参数

钢材相关参数	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗弯强度/MPa	抗剪强度/MPa
参数取值	210	0.30	215	125

1.3 弧形间隔排桩-土钉墙组合支护的试验

试验模型见图 1c,采用弧形间隔排桩-土钉墙组合支护,弧形间隔排桩采用本节 1.2 中的模型,土钉墙则采用 0.5 mm 厚钢板作为面板,土钉选用直径为 4 mm 的螺丝钉,然后将面板与螺丝钉进行焊接。填土时先将排桩预先埋入土体中,填土后再安装土钉墙^[5]。试验过程中,通过位移传感器、土压力盒,以及应变片读数来测试作用于组合支护结构的抗力。

1.4 数据整理及结果分析

模型试验的数据主要为土体位移、土压力盒应变以及支护结构应变数据,不同支护结构加载破坏时的试验结果如表 3 所示。

表 3 模型试验结果

模型编号	模型桩 间距/mm	模型土钉 长度/mm	土钉水平 间距/mm	土钉竖向 间距/mm	基坑原型 高度/M	最大水平 荷载/MPa
1	—	—	—	—	10	1.2
2	60	—	—	—	10	1.9
3	60	63.3	10	20	10	3.2
4	60	63.3	10	20	15	2.6

表 4 水平荷载与原型尺寸关系

水平荷载 值/MPa	边坡高 度/m	排桩长度 L/mm	排桩直径 D/mm	土钉长度 l/m	土钉直径 d/mm	土钉间距/m	
						水平向S _h	竖向向S _v
10	0.400	0.800	40	0.400	4	0.01	0.02
200	12.00	16.00	1200	12.00	120	1.20	2.40
300	16.00	23.00	1500	15.00	150	1.50	3.00
400	20.00	30.00	1800	18.00	180	1.80	3.60

为了将桩身应变片读书换算成相应桩身相应位置处的弯矩值,需先根据等直梁纯弯曲的内力计算公式进行换算,具体换算公式如

M = ε W_{x'(z')} E

式中: E 为模型桩材料的弹性模量;ε 为弯矩应变实

测值;M 为弯矩值; W_{x'(z')} 为应变片的抗弯截面系数。

由表 3 可得,弧形间隔排桩-土钉墙组合支护基坑的最大水平荷载远大于其他支护基坑,但试验过程中测得,弧形间隔排桩支护基坑中桩身的最大

弯距约为弧形间隔排桩-土钉墙组合支护基坑的 4 倍,这是由于土钉墙的存在,桩土间土体荷载首先由土钉墙承担,当荷载超过土钉墙的承载极限后,桩身将承担大部分荷载,桩身内力也将显著增加^[6]。由 3 组试验加载破坏后的边坡变形情况可得出在水平推力一定的情况下,土体离支护桩越近,变形越大,变形区在边坡上部为直立土拱曲面,在边坡下部为平面斜坡。

2 有限元分析

通过以上 4 组试验的对比分析,初步探明了不同支护结构的破坏机理,可以得出弧形间隔排桩-土钉墙组合支护结构内力分布更加合理,对桩间土体的位移有明显的约束效果。但是,由于室内试验的局限性,不能全面充分地分析弧形间隔排桩桩距、桩径、桩长对土坡和土钉墙稳定性的影响。本章节研究内容正是针对这一问题,通过桩土墙三维有限元模型更为深入地研究分析了桩距、基坑高度、土钉长度等因素变化对排桩和土钉墙稳定性的影响^[7]。

2.1 建立模型

1)假设条件 本有限元模型的假定条件:a)采用理想弹塑性桩土三维计算模型,且模型服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。b)将临界状态塑性模型(Cloy plasticity)与多孔弹性模型(Porous elasticity)联合使用。c)采用四面体进行网格划分,模型桩和土钉墙距其较近区域网格划分较密,距其较远区域网络划分较疏。d)土钉与面层之间采用 Coupling(Kinematic)约束,面层与土体之间采用 Tie 约束,其中土体和土钉分别采用 CPE4 实体单元和 T2D2 桁架单元。e)采用单元生死功能(Model Change)对支护结构进行抗压模拟。

如图 2 所示,在建模时桩体、墙体和土体都采用实体单元,三者皆视为弹塑性介质,为简化操作,可将经喷浆加固土体和土钉作为整个复合土体考虑,即把土钉墙设置为独立单元划分出来,模型的材料参数如表 5 所示。

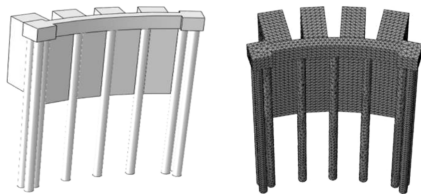


图 2 弧形间隔排桩-土钉墙组合支护的三维有限元模型

2)屈服准则 本文采用 ABAQUS 有限元分析软件,软件中采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,屈服面是一个不规则的六角形截面的锥体表面,并采用

了在平面应变条件下能解决强度问题的 D-P 准则。根据关联流动法则,可得 $\Psi=\varphi$,表达式为^[8]:

$$\begin{cases} \alpha I + J = k \\ \alpha = \frac{\sin \varphi}{3(3 + \sin \varphi)} \\ k = \frac{3c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \varphi)}} \end{cases}$$

式中: φ, c 依次为内摩擦角和内聚力; α, K 是与 c, φ 有关的参数。

表 5 模型参数

名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
桩体	2500	40000	0.2	—	—
土体	1770	2	0.45	16	10.2
复合体	2300	25	0.3	23	20.4

3)有限元模型 本部分共为两类模型,模型一和模型二。

在建模时桩体、墙体和土体都采用实体单元,三者仅材料属性不同,为方便桩与其它材料介质的接触,桩径设置得比较大,这都是为了更加真实地模拟桩土墙之间的作用。

模型一:桩径为 1.5 m,桩长为 20 m,桩距沿距度方向为 6 m,桩顶连系梁跨度 $l=4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,为了讨论直线系梁与弧形连系梁在相同条件下的受力性状,共建立两个相同桩距、桩长、桩数、桩径的支护桩模型。

模型二:为了研究不同条件下抗滑桩的受力性状,共建立了 4 组支护桩模型,分别研究了弧形间隔排桩桩间土钉墙不同位置位移变形特征,不同土钉长度、桩距和基坑高度弧形间隔排桩-土钉墙组合支护桩间土钉墙变形特征^[9]。

4)接触面 由于桩体、墙体与土体的模量之间相差较大,故可以考虑采用单纯主从接触算法:节点无法由从属表面上穿透到主控表面。但该算法中节点可以由自主控表面上穿透到从属表面。因此,在这种严格的主-从关系条件下,必须谨慎和准确地选择主控表面和从属表面,进而可得出最佳可能性的接触模拟结果。一些基本的要求如下:

- a)从属表面应选择网格划分更为密集的表面。
- b)若是在网格划分的密度相近的情况下,从属表面应选择弹性模量更低的表面。根据这些规则,主接触面应取自采用桩体的表面,从接触面应取自采用墙体与土体的表面,其余接触均采用 tie 方式连接。

5)荷载 模型一中,直线连系梁与弧形连系梁的桩距、桩长、桩数和桩径相同,为确保试验在相同条件下进行,模型中皆采用相同的荷载分布,另外,

从桩基的试验测试表明,可不考虑支护桩受荷段外围土体刚度对连系梁荷载分布的影响。因此在支护桩受载段直接采用完全固定的方式,由于试验只考虑直线连系梁与弧形连系梁的受力,因此连系梁的受荷面直接施加相同大小的均布荷载^[10]。

模型二中,由于土钉长度、桩距和基坑高度的不同,土钉墙和排桩模型的尺寸发生了改变。为方便计算,统一对模型施加水平向加速度,通过对比各组试验模型的位移云图,进而可获知土钉墙在弧形间隔排桩-土钉墙组合基坑中的加固效果。

2.2 结果分析

1)直线间隔排桩与弧形间隔排桩变形特征 如图 3 所示,对比了相同荷载下,直线连系梁与弧形连系梁的变形特征。桩顶拱梁的弯矩最大值约为直线连系梁的 1/3,可见,在空间抗滑结构中弧形连系梁的内力分布显得更为合理,弧形连系梁对抗滑桩有着显著的位移约束效果。

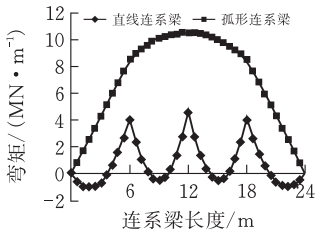


图 3 连系梁弯矩图

2)弧形间隔排桩桩间土钉墙不同位置位移变形特征 为了解桩间土钉墙在水平加速度下位移变形的一般规律,对桩间土钉墙不同垂直平面位置的位移变形特征进行了分析,如图 4~5 中所示,给出了在水平加速度下桩间土钉墙不同位置(距排桩 0~5 倍桩的半径,半径为 r)的位移变形。在水平加速度一定的情况下,土钉墙离支护桩越近,变形越大,变形区在边坡上部为直立土拱曲面,在边坡下部为平面斜坡。

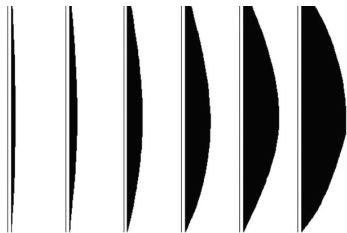


图 4 桩间土钉墙不同位置位移变形网格图

3)不同土钉长度排桩-土钉墙组合支护桩间土钉墙变形特征 如图 6 所示,与弧形间隔排桩相比,随着土钉长度的变化,其对直线间隔排桩有着更加明显的影响,即土钉长度减小,组合支护结构中的排桩内力逐渐增大。可见,正因有了土钉墙的存在,基坑边坡的荷载首先传递给了土钉墙承担,从而减小

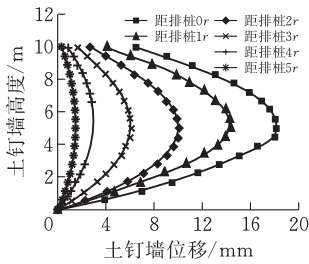


图 5 桩间土钉墙不同位置位移

了排桩的内力。即土钉长度增加时,逐渐消除了排桩桩间土拱效应,进而减小了桩身内力。

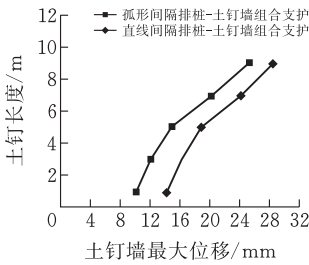


图 6 不同土钉长度组合支护桩间土钉墙最大位移图

4)不同桩距弧形间隔排桩-土钉墙组合支护桩间土钉墙变形特征 如图 7 所示,对比了相同水平加速度下直线、弧形间隔排桩-土钉墙组合支护桩间土钉墙的变形特征。桩距为 6 m 时,土钉墙的最大变形量分别为 10 mm 和 8 mm,桩距为 3 m 时,土钉墙的最大变形量为 5 mm 和 3 mm,进而可得,在水平加速度一定时,桩距越小,变形越小。

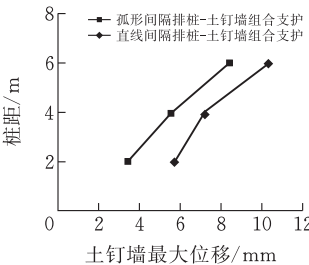


图 7 不同桩距组合支护桩间土钉墙最大位移图

5)不同基坑高度排桩-土钉墙组合支护桩间土钉墙变形特征见图 8,当土钉墙高度在 6 m 以内时,土钉墙最大变形分别为 10 mm 和 6 mm,随着土钉墙高度的增加,土钉墙高度的改变对土钉墙的变形影响逐渐增大,当基坑高度超过 6 m 时,土钉墙最大变形发生突变,且土钉墙的变形越来越大^[11]。

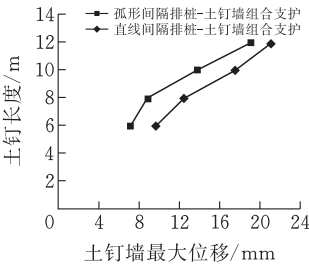


图 8 不同基坑高度组合支护桩间土钉墙最大位移图

3 结 论

本文通过室内模型实测结果,并采用了符合工程实际的有限元模型综合研究分析了不同土钉长度、桩距和基坑高度的组合支护结构的变形特征,主要得出如下 3 点结论。

1)利用有限元软件对基坑组合支护结构的变形特征进行了分析,所得结果与室内模型试验基本符合,并通过与传统支护结构比较,验证了其内力分布的合理性。

2)由实验数据可知,在一定荷载下,减小桩距或基坑高度,可降低组合支护结构的变形。

3)土钉墙有助于减小排桩的内力,且随着土钉墙长度的增加,桩身内力逐渐减小。当土钉长度与基坑高度比小于 0.29 时,桩间土钉墙变形明显,当其大于 0.29 时,桩间土钉墙变形不明显^[12]。

[参 考 文 献]

[1] 程建华,王辉.排桩与土钉联合支护结构的土压力分配机制[J].公路工程,2016,17(21):1-3.

[2] 张志伟.弧形间隔排桩+桩顶连系梁空间抗滑结构研究[D].成都:西南交通大学,2014.

[3] 杨敏,孙宽,古海东,等.疏排桩-土钉墙组合支护结构离心模型试验研究——稳定性与破坏模式[J].结构工

程师,2012,11(26):2-5.

[4] Chen R P,Li Z C,Chen Y M,et al. Investigation at a collapsed deep excavation in very sensitive Organic soft clay [J].Journal of Performance of Constructed Facilities-ASCE,2015,24(13):4-6.

[5] 盛志强,石玉成,孙军杰,等.基于 ABAQUS 的竖向荷载下三维桩土沉降变形分析[J].岩土工程学报.2013,18(24):2-4.

[6] Ashour M, Ardalan H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction [J]. Computers And Geotechnics.2012,39(19):85-97.

[7] 宋享桦,谭勇,刘俊岩,等.拉拔作用下锚杆复合土钉支护协同作用微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2018,13(21):5-7.

[8] 褚松辉.深基坑桩锚与土钉墙分段组合支护的数值模拟[D]. 保定:河北大学,2016.

[9] 陈乾浩.复合土钉墙支护工作特性及影响因素的离散元数值模拟[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.

[10] Kourkoulis R,Gelagoti F,Anastasopoulos I,et al.Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights [J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2010,137(7):663-667.

[11] 张志伟,邓荣贵.弧形间隔排桩+桩顶连系梁空间抗滑结构研究[J].岩土力学,2013,18(14):1-4.

[12] 秦会来,张甲峰,郭院成,等.ABAQUS 在计算基坑开挖变形中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2012,11(23):3-6.

Research on Influence of Pile Foundation Defects
Based on Acoustic Transmission Method

JIANG Kai, FAN Ying

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: In order to make full and reasonable use of the material properties of surface topography, geological structure and concrete, and to improve the unfavorable bearing behavior of straight row piles and increase the overall stability of row piles, this paper proposes a support structure combined with a curved spacer pile and a soil wall. By testing four horizontal jack testing machine models and applying ABAQUS finite element analysis software, this paper studied the deformation characteristics of curved spacer piles and soil nail walls under lateral load, with the four different pile spacings discussed respectively. The test results show that under certain load, reducing the pile spacing or foundation pit height can reduce the deformation of the foundation pit supporting structure. When the ratio of soil nail length to foundation pit height (l/h) is less than 0.29, the deformation of the soil nail wall between piles is obvious. When l/h is greater than 0.29, the deformation is not obvious.

Keywords: finite element; curved spacer pile; soil nail wall; deformation; model test