

新型装配式基坑抢险斜撑稳定性研究

周业¹ 王胜² 刘晓明² 谭鑫^{2,*} 黄华¹

(1. 中建五局第三建设有限公司, 长沙 410116; 2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘要 提出了一种新型基坑装配式斜撑支护结构,该斜撑可快速装配后处理基坑突发险情,及时遏制基坑围护结构变形,并可在基坑抢险结束后回收和重复利用。针对该新型基坑斜撑结构进行了室内物理模型试验和数值分析,获得了不同工况下斜撑荷载位移曲线和地基土变形特征,揭示了新型装配式斜撑的承载模式和失稳机理。斜撑所受荷载将由斜撑和底板两部分共同承担,斜撑+底板组合承载时的承载力明显大于底板单独承载时的承载力,且组合承载力随着斜撑的埋置长度增加不断增大,斜撑与底板共同承载具有良好的稳定性。

关键词 基坑, 装配式结构, 斜撑, 稳定性, 抢险

Stability Study of a New Fabricated Diagonal Brace for Emergency Reinforcement of Excavation

ZHOU Ye¹ WANG Sheng² LIU Xiaoming² TAN Xin^{2,*} HUANG Hua¹

(1. 3rd Construction CO., LTD of China Construction 5th Engineering Bureau, Changsha 410116, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract A new type of fabricated diagonal brace structure was proposed in this paper. The diagonal brace can be quickly assembled to support the foundation pit excavation in short time, and can be recycled and reused after the rescue. The physical model tests and numerical analysis of the proposed diagonal brace were conducted. The load-displacement curves of diagonal braces and the deformation characteristics of the ground soil under different working conditions were obtained, and the load-bearing mode and failure mechanism of the proposed diagonal were revealed. The load acting on the diagonal brace will be borne by the buried diagonal brace and the bottom plate. The bearing capacity of the buried diagonal brace and bottom plate is significantly greater than that of the bottom plate alone. The bearing capacity continues to increase with the increase of the embedded length of the buried diagonal brace, and the combination of buried diagonal brace and the bottom plate has a very good performance in stability.

Keywords excavation, fabricated structure, diagonal brace, stability, rescue

0 引言

随着我国城市化水平快速提高,城市地下空间的开发和利用已经成为解决人口、资源、环境问题的

重要措施和实施城市可持续发展的重要途径。向地层更深处开发各类地下空间的同时也催生了大量深基坑工程。基坑工程在天然地层中开挖,往往具有强烈的区域性和个体性,因此风险性较高^[1-3]。

基坑失稳往往会造成严重的生命财产损

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278348), 湖南省创新型省份建设专项资金项目(2019GK1010)

作者简介: 周业,男,工程师,主要从事土木工程施工管理。E-mail: 277098067@qq.com

* 联系作者: 谭鑫,男,副教授,主要从事岩土与地下工程研究。E-mail: xintan@hnu.edu.cn

失^[4],一旦基坑变形达到某个预警值则必须立即对其进行抢险加固。采用钢管斜撑加固的方法是当前基坑工程中最常采用的抢险措施之一^[5]。如图 1 所示,将钢管一端固定于坑底稳定区域,另一端支撑于基坑侧壁,形成斜撑。斜撑能够及时对坑壁形成有力支持,在大量基坑抢险工程中得到了应用^[6-10]。陈喜和许晓燕^[6]在基坑抢险工程中采用桩锚和斜撑除险加固获得了较好的效果。杨佳等^[7]采用弹性地基梁的有限元法和瑞典条分法对“桩+斜支撑”进行计算分析,得到了支护桩体和斜撑的位移及内力的分布变化规律。Thoms 等^[11]和 Feng 等^[12]研究了斜支撑支护结构的位移分布规律,并基于现场数据,指出当对斜支撑结构施加预应力时,可更有效地防止基坑变形。



图 1 基坑抢险斜撑(浇筑混凝土基座)

Fig.1 Diagonal brace for emergency reinforcement of excavation

但斜撑加固的稳定性往往受到斜撑撑脚地基土体的强度限制,当基坑坑壁稳定需要的抗力过大时易发生撑脚处局部地基失稳。虽然采用浇筑混凝土或钢结构基座能提高斜撑撑脚稳定性^[13-14],但现场浇筑或焊接施工工序较多,用在抢险工程中存在无法立即处置险情以及后续回收困难等缺点。

本文提出了一种新型基坑装配式斜撑支护结构,该种斜撑可快速处理基坑突发险情,及时遏制变形等灾害的进一步发生,并可在基坑回填后回收和重复利用。为揭示所提出的装配式斜支撑的承载特性,进行了室内物理模型试验和数值分析研究,获得了不同参数下斜撑荷载位移曲线和地基土变形特征,并据此讨论了斜撑承载机理及失稳模式。

2 装配式斜撑结构设计

所设计的装配式斜支撑结构如图 2(a)所示,

由①埋入段钢管;②装配式底板;③拼接段钢管三部分组成,通过插销和螺栓连接的形式可以对三者进行装配式拼接。埋入段钢管端部有多个开孔,通过插销插入不同位置的开孔可实现斜撑撑脚不同的地基埋入深度。拼接段钢管通过螺栓与埋入段钢管连接,可灵活调整斜撑长度。

在工程实际使用时,在选定坑底位置插入埋入式钢管撑脚后,便可以由吊机等直接吊装底板和装配式斜撑,对基坑发生大变形的位进行支撑加固。斜撑通过埋入式撑脚和底板组合作用能够有效提高撑脚处局部地基的稳定性。针对不同的基坑承载力需求可相隔一定的间距布置,如图 2(b)所示。

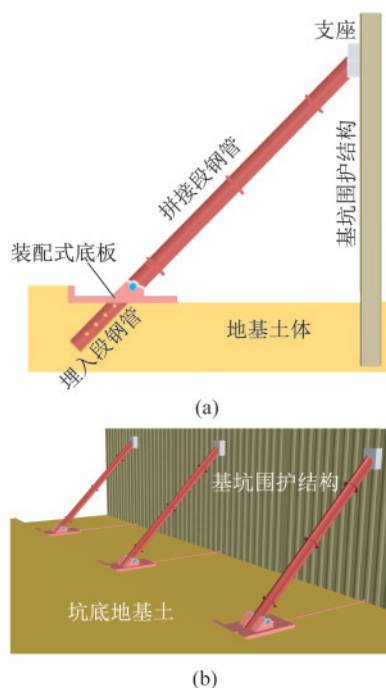


图 2 装配式斜撑结构示意图

Fig.2 Illustration of fabricated diagonal brace

3 物理模型试验

3.1 试验装置

室内模型装置如图 3(a)所示,模型箱净空间尺寸为 770 mm×520 mm×500 mm(长×宽×高),模型箱的两侧分别安装 10 mm 厚的透明钢化玻璃,以便观察撑脚地基的失稳形式。根据模型箱尺寸,缩尺模型斜撑钢管选用 304 不锈钢无缝钢管,斜撑钢管倾斜角度设置为 45°,直径为 50 mm,长度为 900 mm,壁厚为 2 mm。L 形底板长 300 mm,宽 200 mm,竖直面高 100 mm,厚度为 10 mm,底板

中间开孔面积为 135 mm×60 mm,上部焊接两块楔形钢板,楔形钢板厚度 20 mm,中间开孔孔径 20 mm,插销穿过该孔可与斜撑钢管进行连接。

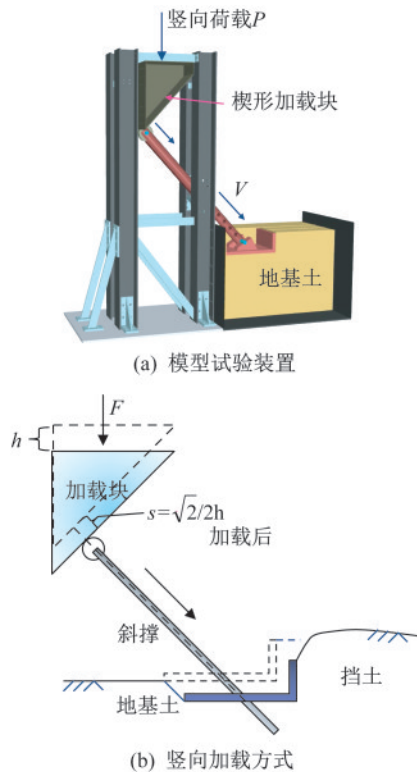


图3 模型试验装置及加载方式示意图
Fig.3 Model test setup and loading illustration

试验竖向荷载由竖向加载框架上部伺服电机

提供,电机最大推拉力能达到 50 kN。采用 YSF-Ⅱ/25-4 型电动伺服控制系统进行加载控制,可以通过位移、载荷及手摇三种加载方式进行加载的控制,伺服电动缸中安装有压力和位移传感器,可以实现对加载力、速度和位置的精密伺服控制。如图 3 (b)所示,通过楔形加载块可以将竖向加载转换为斜撑的轴向荷载。试验的加载采用位移控制,控制竖向传力杆以 0.167 mm/s 的速度推动楔形加载块匀速下降,直至达到斜撑轴向位移行程(40 mm)或者撑脚地基出现明显破坏。加载过程中传感器每隔 1 s 采集一次对应时刻的位移和荷载值。模型试验中对撑脚钢管埋置长度分别为 5 cm、10 cm、15 cm 和 20 cm 的斜撑进行了竖向加载试验。

3.2 模型用土

地基土选用干燥中砂,试验前将所有试验砂放置烘箱内烘干 24 h。所选砂土界限粒径 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为 0.21 mm、0.43 mm 和 1.29 mm,平均粒径 d_{50} 为 0.81 mm,不均匀系数 C_u 为 6.14。为保证试验地基的密实度和均匀性,往模型箱内填筑时采用分层压实填筑。试验砂的最大和最小干密度分别为 1.951 g/cm³ 和 1.523 g/cm³,通过分层压实后,试验地基土的密度为 1.681 g/cm³,此时地基土的相对密实度为 0.428,属于中密砂。试验用砂的主要性质参数如表 1 所示。

表 1 试验砂的主要性质参数
Table 1 Mechanics Parameters of Soil

不均匀系数	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	最小干密度 / (g·cm ⁻³)	密度 / (g·cm ⁻³)	相对密实度	摩擦角 / (°)
6.14	1.951	1.523	1.681	0.428	36.2

3.3 模型试验结果

为能更清晰地观察加载结束后撑脚处地基土的变形及破坏情况,使用白石灰粉在地基土表面进行网格划分,所划分的网格单元为 4 cm×4 cm 的方格(图 4(a)),填土和底板安装完毕后则开始进行加载试验。加载结束后记录各工况下地基土的破坏情况,如图 4(b)~(f)所示。不同斜撑撑脚埋置长度情况下的地基土破坏形式基本相同,均为地表的隆起开裂,且破坏范围和地表隆起量基本相同,破坏区域的形状与底板单独承载时相同,都表现为一个从底板端部处开始扩散的扇形区域,扇形破坏区域在垂直底板运动方向的尺寸为 41 cm 左右,在沿底板运动方向的尺寸为 34 cm 左右。

如图 3(b)所示,传感器所采集的位移和荷载值分别是加载块的下降高度 h 和加载块上的竖向荷载。斜撑的轴向位移 $s = \sqrt{2}/2 h$ 。斜撑所受到的轴力值则应为电动缸推杆所提供的竖向推力 F 沿斜撑轴线的分力,轴向压力为轴力除以截面积计算获得: $P = \sqrt{2} F/2A$ 。对斜撑承载试验的位移和轴向压力进行处理后,得到斜撑承载的荷载-位移曲线(P - s 曲线)如图 5 所示。可以看到,组合承载时与底板单独承载时的荷载-位移曲线的变化趋势基本一致,均有一个明显的拐点,取曲线发生拐点时对应的斜撑轴向压力作为组合承载时的极限承载力 P_u 。图 5 中底板单独承载为斜撑撑脚无埋置深度对应的荷载-位移曲线。

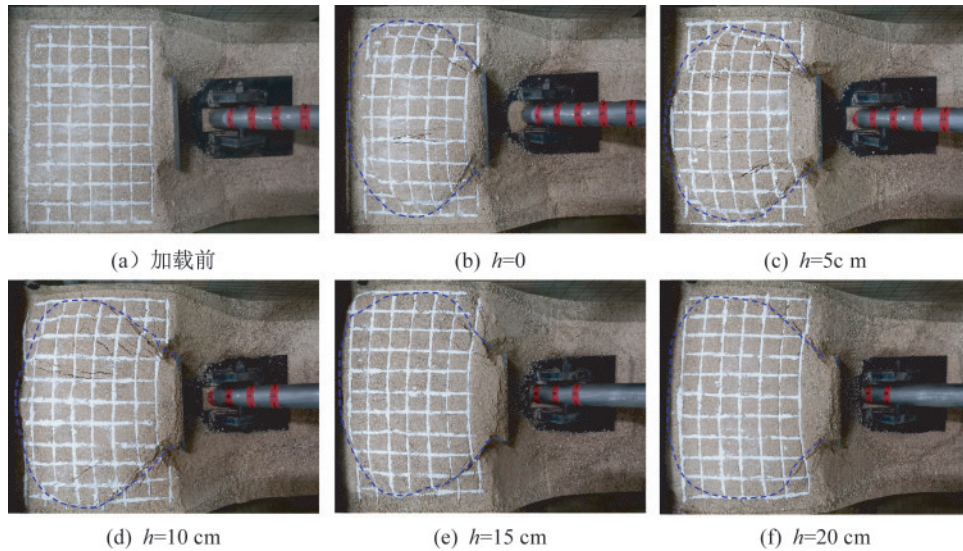


图4 地基土破坏情况

Fig.4 Failure states of the ground at brace foot

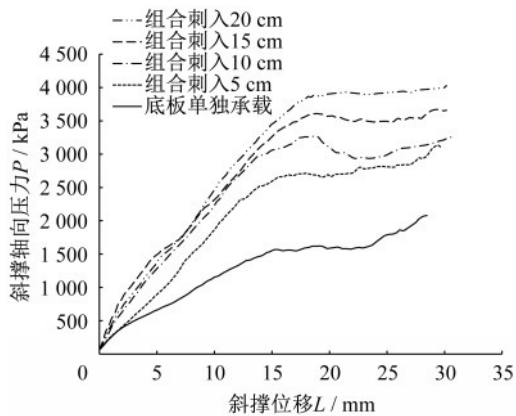


图5 斜撑承载荷载-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of diagonal braces

对应于不同斜撑刺入深度的斜支撑极限承载力分别如下:斜撑没有埋入时 $P_u=1\,566\text{ kPa}$,对应的斜撑位移 $L=15.23\text{ mm}$;斜撑埋入长度 5 cm 时, $P_u=2\,687\text{ kPa}$,对应的斜撑位移 $L=16.54\text{ mm}$;斜撑埋入长度 10 cm 时, $P_u=3\,259\text{ kPa}$,对应的斜撑位移 $L=17.88\text{ mm}$;斜撑埋入长度 15 cm 时, $P_u=3\,607\text{ kPa}$,对应的斜撑位移 $L=18.63\text{ mm}$;斜撑埋入长度 20 cm 时, $P_u=3\,884\text{ kPa}$,对应的斜撑位移 $L=18.72\text{ mm}$ 。可以看到,埋入撑脚+底板组合承载时的承载能力明显大于底板单独承载时的承载能力,在斜撑埋置长度 20 cm 时,组合承载力约为底板单独承载力的 2.48 倍,表明有一定埋深的斜撑撑脚可以有效提高斜撑整体的承载能力,且从图5中可以看到随着斜撑埋置长度的增大,组合承载的承载力也不断提高。埋置深度从 5 cm (1

倍管径)增加到 10 cm (2倍管径)承载力提升幅度较大(21%),因此建议在实际工程应用中确保斜撑撑脚有2倍管径以上的埋置深度。

4 数值模拟

4.1 计算模型及参数

为了进一步从土体内部变形及应力等方面分析斜撑撑脚地基破坏模式,利用FLAC3D建立了斜撑承载试验的数值模型。数值模型尺寸均与物理模型一致,考虑到模型的对称性,取一半进行建模如图6所示。数值模型的底面及侧面边界均为简支条件(限制法向位移),地表为自由边界;斜撑横截面为应力边界,施加轴向荷载。

其中蓝色网格为斜撑撑脚及底板部分。模型试验中的斜撑模型采用的是钢材,可认为整个实验过程中斜撑钢管处于线弹性变形状态,故使用弹性本构模型(elastic)进行模拟,斜撑钢管的相关模型参数如表2所示。地基土体选用摩尔库伦本构模型,参数根据室内土工试验结果选取,见表3。为更准确反映钢制斜撑与地基土之间的接触和滑移作用,在斜撑与地基土之间建立接触面单元进行模拟(图6)。地基土与底板接触面摩擦角参数取值根据室内试验结合模型试验结果数据进行反推确定。模型试验中的斜撑位移主要来自于土体自身的压缩(由土体刚度决定)以及接触界面的滑移(由接触摩擦角控制),因此接触面刚度参

数根据 FLAC3D 程序手册推荐的经验方法选取。接触面参数见表 4。数值模型采用逐级加载方式计算,在斜撑的上表面施加均布法向压力,在该级荷载作用时计算平衡后,读取该级荷载作用下的斜撑轴向位移,最终绘制斜撑承载数值模拟获得的荷载-位移曲线。

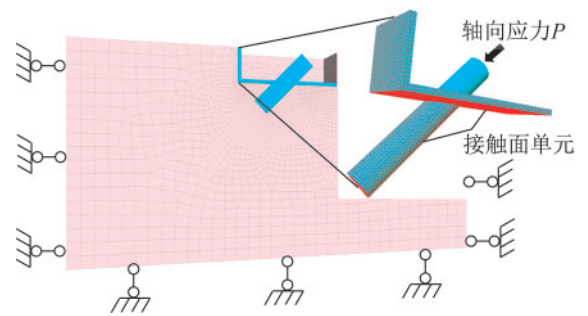


图 6 数值模型
Fig.6 Numerical model

表 2 斜撑钢管及底板模型相关参数 Table 2 Mechanics parameters of braces		
体积模量 K / GPa	剪切模量 G / GPa	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
2 060	792	2 200

表 3 地基土体力学参数 Table 3 Parameters of soil in numerical model			
体积模量 K / MPa	剪切模量 G / MPa	摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
23.7	12.2	36.2	1 681

表 4 接触面单元力学参数 Table 4 Parameters of interface in numerical model		
法向刚度 $/ \text{GPa}$	切向刚度 $/ \text{GPa}$	外摩擦角 $\delta / (^{\circ})$
7 950	3 975	27.6

4.2 数值模拟结果及分析

上节室内模型试验获得了斜撑撑脚地基土承载能力的变化规律,利用数值模型计算能够得到斜撑承载过程中地基土的变形特征,可对室内模型试验结果进行有效解释。图 7 为不同撑脚埋置长度情况下数值计算结果,与模型试验结果的对比,可以看到利用数值计算得到的荷载-位移曲线与相对应斜撑埋置长度下的模型试验结果整体十分吻合,因此可以认为该数值模型和相关参数的取值是合理可靠的,可以利用该模型开展进一步的分析。

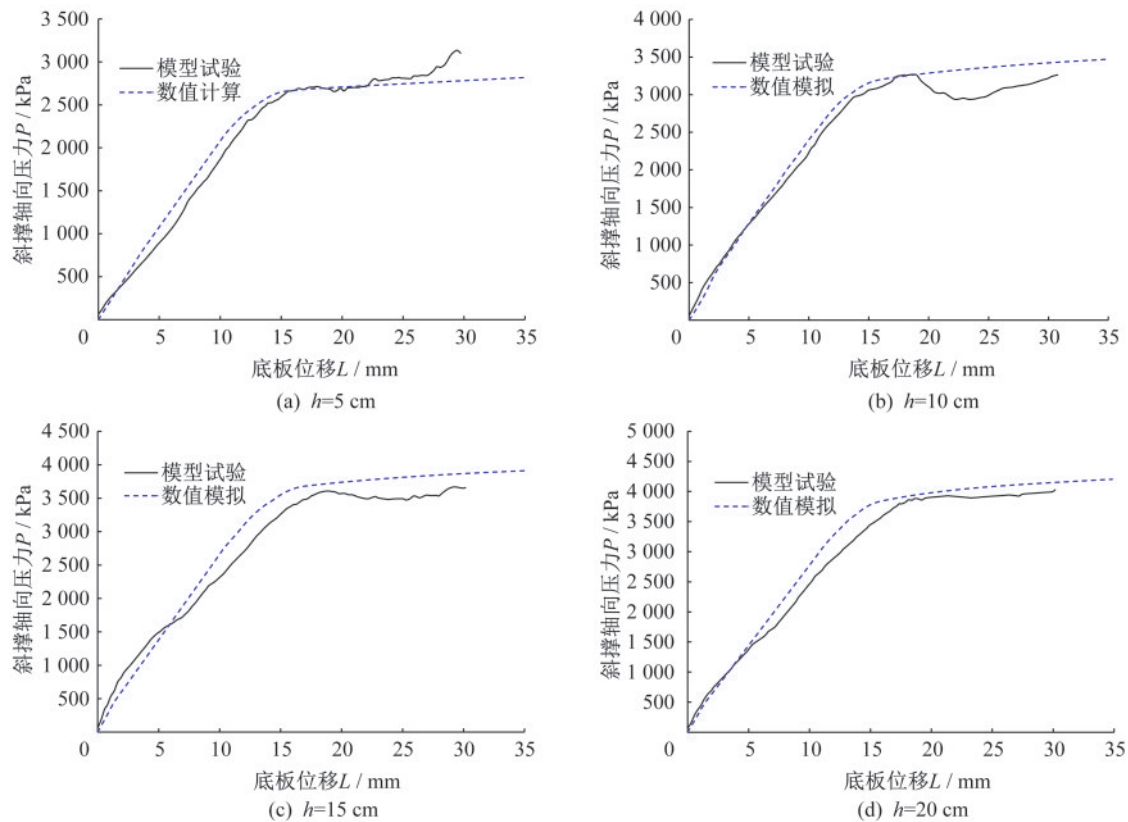


图 7 斜撑承载数值模拟结果对比
Fig.7 Comparison between numerical results and model tests

图 8 为斜撑模型达到承载力后的土体变形场,从图中可以看出,数值模拟结果与图 4 所示模型试验结果显示出较为一致的隆起破坏模式。底板下方的土体变形最大,其次是底板前方的挡土。达到极限承载力后,地基土出现了一个圆弧形的滑动面,说明对应极限承载能力的破坏状态均为

撑脚处地基土体出现被动土压力状态。但由于斜撑的加入,产生被动土压力状态的整体剪切滑动面将随着斜撑埋深而往更深处发展,因此也提高了达到被动土压力状态时地基土体能够提供支持斜撑撑脚的合力。

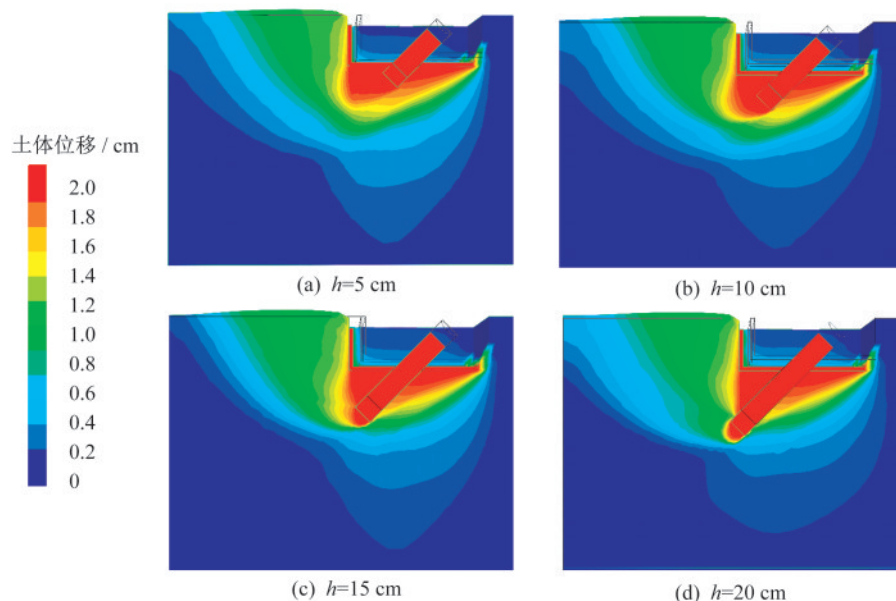


图 8 斜撑承载时地基土的变形

Fig.8 Displacement filed in the ground at the failure state

图 9 显示了没有埋置斜撑撑脚和斜撑撑脚埋置长度为 20 cm 两种情况下的土体最大主应力场数值计算结果。由于斜撑在承载过程中产生位移,引起相应位置地基土体压应力产生增量,因此土体最大主应力(压力)可以在数值上近似表示不同部位土体对斜撑产生的最大抗力。可以看到撑脚地基土体的主要抗力产生在底板下方。有无埋置斜撑撑脚的模型底板下最大主应力均在 200~

450 kPa 之间,两者区别不大。但是斜撑撑脚有一定埋置深度的模型,在撑脚钢管的端部和侧部均出现了较大的主应力增量,达到了 400~600 kPa,大大超过了底板下土体提供的最大抗力。因此对于斜撑的极限承载能力,撑脚有埋置深度的斜撑比没有埋置深度的斜撑更高。提高的承载能力主要来自斜撑撑脚埋置段所受到的端阻力和侧阻力。

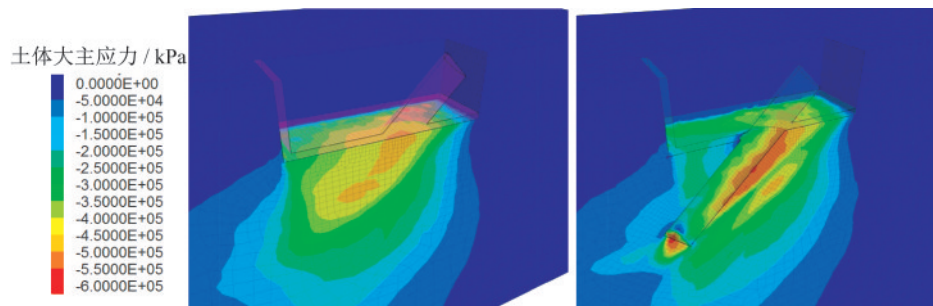


图 9 撑脚地基破坏时对应的土体大主应力场

Fig.9 Maximum principal stress filed in the ground at the failure state

根据模型实验的结果和数值分析揭示的现象,本文提出的装配式斜撑承载机理可如图 10 所

示。当斜撑撑脚具有一定埋置深度时,斜撑所受荷载将由斜撑和底板两部分承担。底板所受抗力

分布在底板下方以及底板侧方,其中侧方抗力由于底板埋置深度较浅,远小于底板下方地基土所提供的抗力。斜撑撑脚埋入段侧摩阻力及端阻力均较大,对斜撑整体承载力贡献十分重要。随着斜撑埋置深度加大,斜撑侧阻力和端阻力的合力都会增加,因此斜撑极限承载力也随之增加。

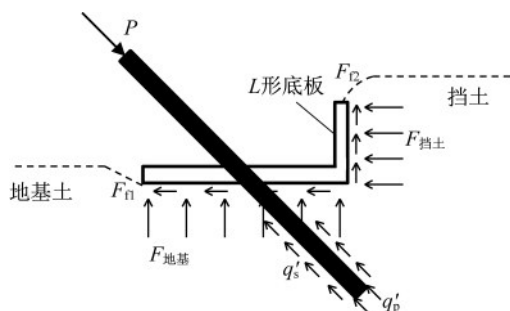


图 10 斜撑撑脚地基承载机理

Fig.10 Bearing mechanism and failure modes

5 结 论

本文提出了一种新型基坑装配式斜撑支护结构,该斜撑应用于基坑抢险加固具有施工快速及可回收利用等优点。为揭示所提出的装配式斜支撑的承载特性,进行了室内物理模型试验和数值分析研究,结合试验及模拟结果分析了斜撑撑脚地基的变形特征、承载机理及破坏模式。

斜撑所受荷载将由斜撑和底板两部分共同承担;底板下方地基土所提供的抗力远大于底板侧方土体;斜撑+底板组合承载时的承载力明显大于底板单独承载时的承载力,且组合承载力随着斜撑的埋置长度增加不断增大,表明斜撑与底板共同承载具有良好的效果。

斜撑撑脚埋入段侧摩阻力及端阻力均较大,对斜撑整体承载力贡献十分重要,建议在实际工程应用中要确保斜撑撑脚有2倍管径以上的埋置深度。

本文模型试验揭示的承载机理和破坏模式适用于砂土地层,有必要进一步开展针对软黏土地层的斜撑稳定性研究。

参 考 文 献

- [1] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016(6): 1-24.
Zheng Gang, Zhu Hehua, Liu Xinrong, et al. Control of

safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2016(6): 1-24. (in Chinese)

- [2] 李宁,张祥,张得煊,等. 考虑槽壁及坑底联合加固的上海地铁车站基坑变形特性分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(1): 148-154.

Li Ning, Zhang Xiang, Zhang Dexuan, et al. Analysis of deformation characteristics of subway excavation in shanghai considering reinforcement of groove wall and pit bottom [J]. Structural Engineers, 2020, 36(1): 148-154. (in Chinese)

- [3] 刘庆晨,宋昭煌,李秀峰. 基坑开挖对邻近地铁高架线路的影响及保护研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(6): 162-170.

Liu Qingchen, Song Zhaohuang, Li Xiufeng. Effect of excavation on adjacent metro elevated line and protective research [J]. Structural Engineers, 2016, 32(6): 162-170. (in Chinese)

- [4] 王立忠,刘亚竞,龙凡,等. 软土地铁深基坑倒塌分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1603-1611.

Wang Lizhong, Liu Yajing, Long Fan, et al. Collapse of deep excavations for metro lines in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1603-1611. (in Chinese)

- [5] 肖荣军. 深厚软弱土中钢管斜撑支护基坑的一种改进设计方法[J]. 土工基础, 2018, 32(1): 10-12, 16.

Xiao Rongjun. An improved design method for deep excavation in soft soil by steep pipe raking supports [J]. Soil Eng. and Foundation, 2018, 32(1): 10-12, 16. (in Chinese)

- [6] 陈喜,许晓燕. 预应力锚杆及斜撑在某基坑抢险加固中的应用[J]. 建筑安全, 2015, 12: 14-17.

Chen Xi, Xu Xiaoyan. The application of prestressed anchor rods and diagonal braces in the rescue and reinforcement of a foundation pit [J]. Construction Safety, 2015, 12: 14-17. (in Chinese)

- [7] 杨佳,张强勇,刘德军,等. 高层建筑深大基坑支护稳定性评价与监测分析[J]. 人民长江, 2010, 14: 90-93.

Yang Jia, Zhang Qiangyong, Liu Dejun, et al. Monitoring analysis and stability valuation of deep foundation pit excavation of high structure [J]. Yangtze River, 2010, 14: 90-93. (in Chinese)

- [8] 曹慧,许利东,徐金鑫. “SMW工法桩+斜撑”在昆明软土地区基坑施工中的应用研究[J]. 建筑施工, 2016, 8: 1017-1020.

Cao Hui, Xu Lidong, Xu Jinxin. Research of “SMW

- Construction Method+Inclined Bracing” Applied to Foundation Pit Construction in Kunming Soft Soil Area [J]. Building Construction, 2016, 08: 1017-1020. (in Chinese)
- [9] 刘燕, 刘俊岩, 辛振宇, 等. 排桩+斜撑组合支撑系统的换撑技术研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 306-311.
- Liu Yan, Liu Junyan, Xin Zhenyu, et al. Support replacement technology of bracing system with oblique bracing+piles in row [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 306-311. (in Chinese)
- [10] 刘燕, 刘俊岩, 王海平. 基坑斜撑支护体系先拆后撑法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 77-80.
- Liu Yan, Liu Junyan, Wang Haiping. Removing first and supporting then method for diagonal bracing system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 77-80. (in Chinese)
- [11] Thoms D, O'rourke T D. Ground movements caused by braced excavations. Journal of geotechnical engineering, ASCE, 1981: 107.
- [12] Feng T, Liu L. Numerical Study on Lateral Wall Displacement of Deep Excavation Supported by IPS Earth Retention System[J]. Underground Space, 2017, 2(4): 259-271.
- [13] 郭海柱, 张庆贺, 任小峰, 等. 深基坑新型钢斜撑接头承载力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3007-3014.
- Guo Haizhu, Zhang Qinghe, Ren Xiaofeng, et al. Experimental study of a new welded joint of steel diagonal bracing in deep pit excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3007-3014. (in Chinese)
- [14] 刘裕华, 陈征宙, 毕港. 一种改进的斜支撑体系支护某超大深基坑的变形分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(1): 38-43.
- Liu Yuhua, Chen Zhengzhou, Bi Gang. Practical study on displacements of oblique bracing supporting system in excavation of large pit [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(1): 38-43. (in Chinese)