

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.019



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基坑扩底承载式斜撑支护变形数值模拟研究

仇文岗¹, 严玉苗¹, 袁运涛², 陈春霞³, 牟云贞⁴, 黎泳钦¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 江苏华岩建设有限公司, 江苏 苏州 215101; 3. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610093; 4. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010)

摘要: 扩底承载式钢管混凝土斜支撑技术是一种新型基坑开挖支护技术, 许多工程案例已经证实了其良好的支护性能, 但目前还缺乏对该倾斜支撑功能机理的深入研究。通过有限元数值模拟建立应用扩底承载式斜撑基坑开挖的数值模型, 利用监测数据验证模型的合理性。基于此模型探究扩底承载式斜撑在基坑开挖过程中的变形特性, 通过分析不同工况时的挡墙变形、基底隆起量和地表沉降量得到土体刚度、土体强度、斜支撑的倾斜角度对扩底承载式斜撑支护性能的影响。结果表明: 扩底斜撑对基坑开挖的土体与支护变形具有明显控制效果, 能有效减小基坑的基底隆起、挡墙侧移和坑外地表沉降, 且在软土地区的适用性更高; 扩底斜撑倾斜角度的增加使支撑趋于横向受力, 具有更高的承载力, 有利于控制基坑开挖过程中土体和挡墙的变形, 但会提高工程造价, 需要根据具体工程情况以及对土体控制要求选择合适的倾斜角度。

关键词: 基坑工程; 有限元; 扩底斜撑; 地表沉降; 基底隆起

中图分类号: TU751 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)04-0019-09

Numerical study on deformation of pit tilted strut of concrete-filled steel tube with belled bearing base

ZHANG Wengang¹, YAN Yumiao¹, YUAN Yuntao², CHEN Chunxia³,
MOU Yunzhen⁴, LI Yongqin¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Jiangsu Huayan Construction Co., Ltd., Suzhou 215100, Jiangsu, P. R. China; 3. China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610093, P. R. China; 4. Yangtze River Chongqing Navigation Engineering Bureau, Chongqing 400010, P. R. China)

Abstract: Bottom-bearing steel pipe concrete inclined support technique is a promising method for foundation pit excavation. While its effectiveness is evident in various engineering cases, its underlying mechanism requires

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 中国建筑西南勘察设计研究院科研项目(H20220430); 长江重庆航道工程局科技项目(H20230330); 国家自然科学基金(52078086)

作者简介: 仇文岗(1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事地下空间稳定性研究, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn。
黎泳钦(通信作者), 女, 博士生, E-mail: leeyq@cqu.edu.cn。

Received: 2023-12-11

Foundation items: Southwest Survey and Design Institute of China Construction Cooperative Research Project (No. H20220430); Science and Technology Program of Yangtze River Chongqing Navigation Engineering Bureau (H20230330); National Natural Science Foundation of China (No. 52078086)

Author brief: ZHANG Wengang (1983-), PhD, professor, main research interest: underground construction stability, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

LI Yongqin (corresponding author), PhD candidate, E-mail: leeyq@cqu.edu.cn.

further investigation. This study establishes a numerical model using finite element simulation, validated against monitoring data from specific projects. It explores the deformation of the inclined support during excavation, revealing insights into its performance under different soil conditions and tilt angles. Findings indicate significant control over soil and support deformation, especially in soft soil areas. Increasing the tilt angle enhances lateral force resistance but raises project costs. Thus, selecting the appropriate angle is crucial based on specific project needs and soil conditions.

Keywords: excavation; finite element; belled bearing base; ground settlement, basal heave

随着城市地下空间的发展,深基坑工程的建设技术不断进步,其设计方法不断改进,施工水平也不断提高。传统的深基坑支护模式一般有桩锚支护、内支撑结构、悬臂式支护等。但传统的支护形式也常常存在因稳定性不足而引起周围地表沉降或基底隆起量过大的现象。另外,在软土地区,尤其是在一些异形或者面积较大的基坑中,常用的内支撑形式结构与施工都较为复杂,会导致工期延长和成本增加。因此,发展性能与经济兼顾的新型支护与加固方式具有重要意义。

近年来出现了不少无支护或者无支撑技术:倾斜排桩支护^[1-8]、桩-土-斜支撑组合体系^[9]、多级支护等。斜支撑是基坑开挖支护系统中的一种结构形式,目前在工程中已有较为广泛的使用。简浩等^[10]提出了新的斜支撑设计和计算方法,在实际工程中有较好的效果;崔永高等^[11]提出了一种采用坑底搅拌桩和树根桩相结合的复合结构来平衡基坑斜支撑水平力的方法,并证实了其可以控制局部位移;刘燕等^[12]结合工程实例提出了在排桩和斜支撑组合支护体系中拆撑的方法;刘裕华等^[13]采用 FLAC3D 对一种改进的斜支撑进行数值分析,得到了支护体系的变形规律;朱碧堂等^[14]利用数值模拟方法对超前斜支撑的力学特性进行研究,提出了基于弹性支点法的超前斜撑排桩支护的设计计算方法。与普通斜支撑不同的是,扩底承载式钢管混凝土斜支撑(简称扩底斜撑)是在其嵌入坑底一定深度时通过钢管端部注浆在坑底形成加固体来提高地基承载力,最后在钢管中注满混凝土,形成一个扩底承载体。与其具有相似工作机理的结构是载体桩^[15-16],全称为复合载体夯扩桩。通过桩端加固体(扩大头)增加桩端反力,从而提高地基承载力。Kim 等^[17-18]通过现场试验研究了桩端焊接环形钢板 EXT 桩的受力特性,证实了 EXT 桩的承载力优于 PHC 桩;Liu 等^[19]对海洋沉积条件下长轴扩底桩进行荷载试验发现,长轴扩底桩极限侧摩阻力高于普通长轴桩;Zhang 等^[20]研究了深层强夯桩对湿陷性黄土的改善作用,证实其能对 50 m 深度范围内的湿陷性黄

土进行夯实处理;Gao 等^[21]进行扩底桩测试研究发现,增加扩底端直径较增加桩径对承载力的提高效果更显著;Xu 等^[22]开展了扩底桩室内拉拔试验,结果表明,扩底桩的荷载-位移曲线呈现软化特征。在数值模拟研究方面:Kong 等^[23]运用 FLAC3D 对扩底楔形桩进行数值模拟,结果表明,扩底楔形桩在抗压、抗拉承载性能方面优于楔形桩和普通桩;Kumar 等^[24]在试验的基础上用有限元方法模拟了砂土中扩底桩的抗拔承载性能,提出了一种扩底桩抗拔承载力预测模型,并通过文献数据验证了其拟合优度;Moayed 等^[25]在考虑扩底端直径、桩径、扩底端倾角、埋深率等主要影响因素的基础上提出了一种优化的人工神经网络预测模型。

目前,扩底承载式斜撑的力学性能和机理尚不明确,笔者依托苏州金融小镇 C 地块基坑开挖项目,采用 PLAXIS 建立有限元模型,研究在深基坑开挖中使用这种扩底斜撑的变形响应,讨论扩底斜撑的最优倾斜角度和工程适用条件,并为实际工程应用提出建议。

1 工程概况

苏州市金融小镇 48 号地块三期 C 地块工程位于苏州高新区济慈路北侧、光启路西侧、五龙山南侧,图 1 为基坑周边环境平面图。该工程开挖范围为不规则形状,基坑形状近似曲边三角形,基坑开挖面积 19 700 m²。基坑西南侧与东南侧分别是金

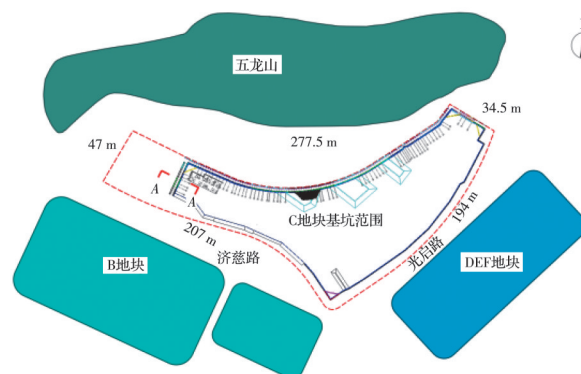


图 1 基坑周边环境平面图

Fig. 1 Environmental plan of pit surroundings

融小镇B地块和DEF地块。建筑红线总长约760 m。两侧临街地面标高较低,北侧靠山地面标高较高。

1.1 地质构造及水文条件

拟建场地位于苏州西部太湖之滨的苏州高新区科技城,地貌单元属于苏州西部构造的剥蚀低山丘陵地貌。场地地质条件复杂,自然地面下最大勘探深度45 m由人工填土、第四纪沉积物、泥盆系中下统茅山群(D1-2 ms)石英砂岩以及二叠纪晚世长兴组灰岩变质而成的大理岩组成。根据勘探钻孔展示的地层结构、岩性特征及物理力学性质,可得到基坑开挖范围内主要岩土层分布,从上至下依次为:杂填土(序号为地层代号,下同),回填时间小于10 a,压缩性高,层厚0.40~5.20 m;黏土,压缩性中等,层厚1.60~5.40 m;黏土,土层场地内基本均有分布,层厚1.30~9.80 m;含碎石黏土,空间分布不均匀,该土层场地内大多有分布,厚度、埋深变化较大,层厚2.20~12.60 m;碎石土,岩土层场地内基本均有分布,厚度、埋深起伏变化大,层厚1.90~13.50 m;滚石,由全风化、强风化、中风化砂岩和微风化大理岩等组成。

按照埋藏条件,场地范围内地下水主要为上层滞水,且大都分布在上部的坡积土层中。地下水位受大气降水和地势起伏影响较大,稳定的水位埋深在4.11~11.31 m之间。该场地地下水对混凝土结构、钢筋混凝土结构均具有微腐蚀性。

1.2 基坑支护设计

基坑采用的围护方案如下:相邻山体侧采用双排钻孔灌注桩,局部单排钻孔灌注桩作为围护体,采用水平设置角撑或扩底承载式钢管混凝土斜支撑的围护形式;相邻道路侧采用悬臂式钻孔灌注桩的围护形式;宽松区域采用放坡围护形式。

工程使用新型扩底承载式钢管混凝土斜支撑,现场施工图如图2所示,工作流程为:1)斜钢管植入;2)扩底承载体施工;3)钢管内混凝土填筑;4)支撑与支护结构连接,扩底斜撑顶部固定,与围护结构顶部的围檩或冠梁进行连接。扩底斜撑工艺示意图如图3所示,采用扩底承载式钢管混凝土斜支撑技术代替传统的水平支撑,钢管中灌注填充混凝土能充分发挥材料性能,节约钢筋混凝土和钢材。支撑的底端采用扩底承载体(用干硬混凝土夯实形成加固土),可以提高支撑承载能力。因此,在工程中具有安全可靠、经济合理、性能突出、施工方便、环境友好等优点,未来具有极大的应用空间。



(a) 钢管植入



(b) 施工完成

图2 施工现场图

Fig. 2 Construction site plan

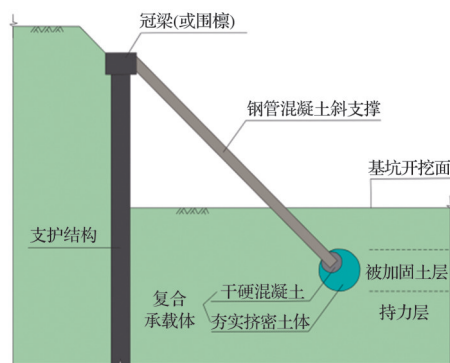


图3 新工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the new process

2 数值模型的建立与验证

针对金融小镇48号地块三期C地块工程中扩底斜撑的性能及稳定性问题,用PLAXIS软件对场地岩土体和结构进行二维有限元建模分析,选择的截面为图1所示的A-A剖面,模型尺寸为55 m×40 m (x - y 轴)。基坑最大开挖深度约10.0 m。根据勘察报告以及图纸中的钻孔信息,模型尺寸考虑范围内的场地土由上至下主要有:素填土、黏土、含碎石黏土、碎石土、全风化砂岩。由于上海、无锡等地区(苏州临近地区)典型软土已有较多文献研究^[26-28],并已有合理的表征模型及参数,笔者采用小应变硬化软土模型(HSS)模拟软黏土行为,颗粒较大的碎石与全风化砂岩采用摩尔-库仑模型模拟。为简化数值模型,建模时考虑各土层都近似水平分布,分布情况与主要模拟参数见表1。模型结构构件主要包括:挡土结构、基坑开挖底面垫层、扩底承载式钢

筋混凝土斜支撑。结构模拟情况见表 2,场地地层与结构建模情况见图 4。

表 1 土层参数
Table 1 Soil properties

岩性	重度 γ / (kN/m^3)	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	压缩模量 E_s/MPa	$E_{50}^{\text{ref}}, E_{\text{ocd}}^{\text{ref}},$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}, G_0^{\text{ref}}$
素填土	19.2	12.0	8.0	6.49	1:1.2:6:15
黏土	20.1	63.8	15.7	8.31	1:1.2:6:15
含碎石黏土	19.7	64.4	15.6	7.67	1:1.2:6:15
碎石土 ¹⁾	20.2	46.0	16.0		
全风化砂岩 ²⁾	18.2	39.6	14.5		

注:1)碎石土采用摩尔-库伦模型,弹性模量为 30.3 MPa,泊松比为 0.34;2)全风化砂岩采用摩尔-库伦模型,弹性模量为 60 MPa,泊松比为 0.3。

表 2 结构参数
Table 2 Structural properties

结构类型	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	尺寸	弹性模量 E/GPa
板桩墙	23	$D=1.5\text{ m}$	30
底部垫层	23	$D=0.5\text{ m}$	30
斜支撑	28	$d=0.426\text{ m}$	40
扩底承载体	23		30

注: d 为扩底斜撑钢管外径; D 为板单元厚度。

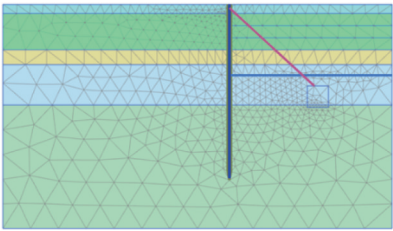


图 4 模型网格划分形式
Fig. 4 Model meshing

建立无扩底斜撑和有扩底承载式钢管混凝土斜支撑(其后简称为扩底斜撑)的基坑开挖模型,对扩底斜撑性能进行分析。由于开挖面对称,采用对称面一半进行建模,其中,模型施工步骤共分为地应力平衡、施工地连墙、分阶段降水和开挖、施工扩底斜撑、施工基底垫层等阶段。

如表 3 所示,选取数值模拟断面及周边的深部水平位移最大值及墙顶水平位移监测点进行模型验证。表 3 中 CX 为挡墙深部水平位移监测点, Q 为墙顶水平位移监测点。现场监测数据点布置离散性较大,且现场大面积开挖空间效应明显,难以选择一个确定性的监测断面与数值模拟高度吻合对应。因此,选取临近 5 个监测点进行对照。由表 3 可以看出,从桩顶水平位移和深部最大水平位移来看,数值模拟结果与现场监测数据表征均为极低变形水平。数值模拟得出的桩顶水平位移值非常接近 5 个监测点变形均值,而深部最大位移略高于监

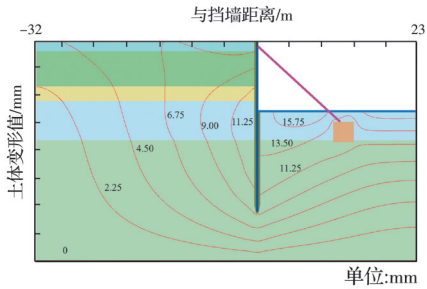
测数据,最大误差约为 32.6%,但考虑到工程变形绝对值偏低,认为建立的数值模型准确度满足要求。

表 3 监测验证数据
Table 3 Monitoring of validation data

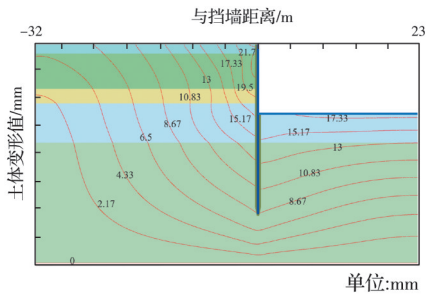
监测点 1	顶部水平位移/ mm	监测点 2	深部水平位移最 大值/mm
Q7	4.4	CX13	8.49
Q8	5.7	CX14	8.50
Q9	5.6	CX15	9.58
Q10	5.5	CX16	8.18
Q11	6.7	CX17	9.18
数值点	5.319	数值点	12.14

3 开挖响应结果分析

首先对是否采用扩底承载式钢管混凝土斜支撑的两种工况进行对比分析。从土体变形等值线图(图 5)可见:在没有扩底斜撑的情况下,基坑土体变形更加明显。无扩底斜撑时,土体最大变形达到 24.7 mm,且集中在坑外靠近挡墙附近,主要是坑外土体向内位移;与之相比,有复合斜支撑时,土体位移量更小,最大值为 17.8 mm。从两种工况的基底变形情况来看,坑底的隆起呈分区化特征,这是因为扩底斜撑底部的扩底部分形成了加固体,抑制了坑底的隆起变形。



(a) 有斜撑



(b) 无斜撑

图 5 土体变形等值线图

Fig. 5 Contour map of soil deformation

从地表沉降曲线(图 6)可见:无扩底斜撑的情况下,坑外距离挡墙较近的位置(1~2 m 范围内)发生大幅度沉降,并很快在距离基坑边界 2 m 处达到

最大沉降值 9.5 mm。随着与基坑距离的不断增大,地表沉降值逐渐减小,在距离挡墙约 30 m 处趋于平缓,减小至 5 mm 左右。这是由于在无支撑的悬臂式支护条件下,挡墙变形顶部最大,造成了坑外沉降在靠近基坑处最大,随着距离变远,沉降变小。与之相比,有扩底斜撑的情况下,地表沉降量更小,且沉降曲线也有差异。有斜撑的情况下,坑外土体沉降缓慢发展,最大沉降约为 5 mm。从沉降曲线来看,呈现出随距离变大的趋势。这是由于斜撑与挡墙顶部连接,有效抑制了挡墙顶部的变形,从而大幅度减小了靠近基坑处的坑外沉降,甚至有向上移动的趋势。而较远距离存在 4 mm 左右的沉降,主要是因为坑内降水过程中坑内外存在较大水头差,水头差会使得坑外水绕着墙底部流入坑内,引起坑外远距离沉降偏大。因此,从最大沉降量来看,与无斜撑的情况相比,有斜撑的情况地表沉降减少约 48.2%,说明扩底斜撑能较大程度降低基坑外的地表不均匀沉降,减少对周边建筑物的影响。

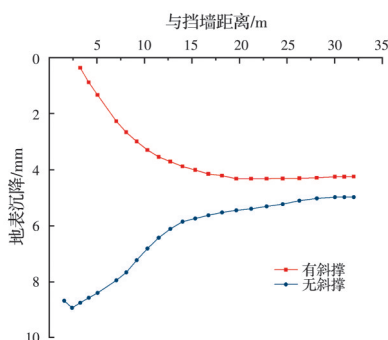


图6 地表沉降曲线

Fig. 6 Surface settlement curves

另外,从挡墙侧移曲线(图7)来看,设有扩底斜撑的模型墙体侧移远小于无扩底斜撑的情况,二者墙体侧移曲线变化规律也不相同:有斜撑的墙体最大侧移为 12.14 mm,出现在距离基坑底部 3 m 处,

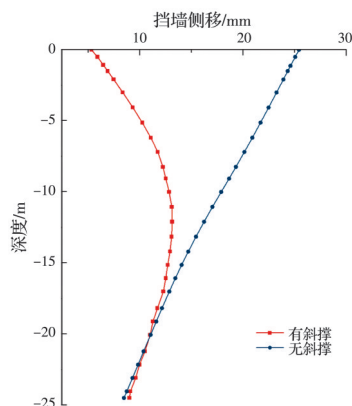


图7 挡墙侧移曲线

Fig. 7 Retaining wall lateral curves

其墙体侧移曲线是一个上下小、中间大的“弓”形;无斜撑最大侧移为 25.4 mm,出现在墙体顶部。墙体侧移曲线为典型的悬臂式挡墙变形曲线。挡墙深部的侧向位移逐渐减小,墙底部的侧向位移约为 9 mm。对比可以看出,扩底斜撑对挡墙的顶部约束作用十分明显,这是因为斜撑提供的水平约束作用直接将原来顶部的 25.4 mm 挡墙侧移减小到了 5.24 mm。从挡墙最大位移来看,有斜撑比无斜撑情况下的挡墙侧移减少了约 48.3%。因此,扩底斜撑在抗基底隆起、控制支护墙体与土体变形等方面作用显著。

4 扩底斜撑加固效果影响因素分析

4.1 土体刚度与强度

软土地基具有天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、渗透性弱、抗剪强度和承载能力低等特点。软土中的基坑开挖常常存在过大的挡墙变形、地表沉降和基底隆起等现象。将基本模型中的土体强度、刚度参数进行整体折减,模拟在软土中的情况,分析对比在软土地基中扩底斜撑的加固效果。通过将强度与刚度分别折减至原来土体的 75% 和 50%,即强度与刚度指标分别为 1.0、0.75、0.5,对比强度与刚度指标为 1.0、0.75 和 0.5 情况下的扩底斜撑加固效果。

图8为软土与非软土地基中的挡墙侧移曲线。由图8可见,刚度指标为 1.0、0.75、0.5 时,与不设置扩底斜撑时相比,挡墙侧移变形量分别减少到 45.67%、52.18% 和 59.47%。从变形趋势来看,未设置斜撑时为典型的悬臂式挡墙变形曲线,有斜撑支护时挡墙变形曲线发生改变,并且强度、刚度折减程度越大,挡墙最大侧移量在有斜撑的情况下减小幅度越明显,扩底斜撑加固效果越好。

图9为软土与非软土地基中的地表沉降曲线。

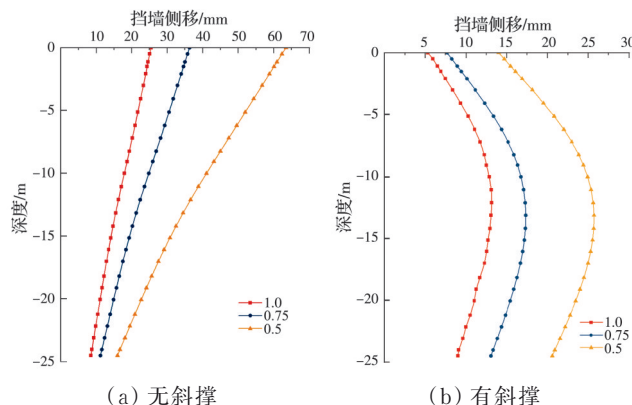


图8 软土与非软土地基中挡墙侧移曲线

Fig. 8 Lateral movement curves of retaining walls in soft and non-soft foundations

由图 9 可见,刚度指标为 1.0、0.75、0.5 时,与不设置扩底斜撑时相比,坑外地表沉降最大值分别减少到 48.64%、56.24% 和 65.27%。从地表沉降曲线来看,未设置扩底斜撑情况时,坑外地表沉降为典型的“勺”形曲线,增加扩底斜撑后,地表沉降曲线趋于平缓。但刚度指标折减至 0.5 时,曲线形状与未设置斜撑时一致,仍然为类似的“勺”形曲线。强度、刚度折减程度越大,有斜撑坑外地表沉降减少程度越大,扩底斜撑加固效果越好。

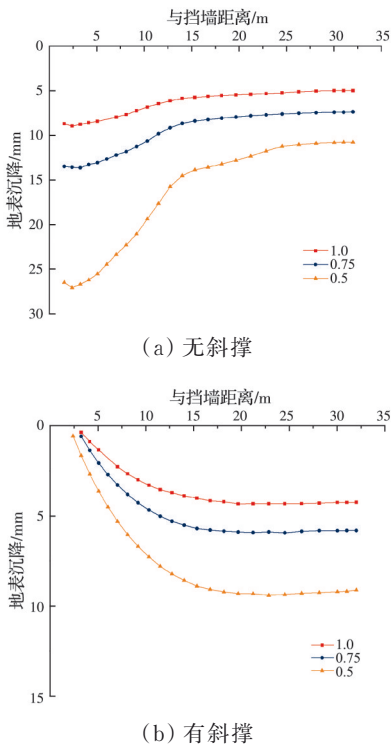


图 9 软土与非软土地基中地表沉降曲线
Fig. 9 Surface settlement curves in soft and non-soft foundations

综上,扩底式斜撑在软土地基中的加固效果更加优良和显著,这种情况下应联合使用地基加固技术,控制基坑及地表整体变形。

4.2 倾斜角度

因为扩底斜撑顶部固定,其倾斜角度的变化直接关系到支撑长度和基底嵌入位置的改变。为获取扩底斜撑的最优倾斜角度范围,建立相同条件下倾斜角度分别为 30°、35°、40°、45°、50°、55° 六个倾斜角度工况的扩底斜撑模型,根据计算结果讨论其最有效的布设角度。

倾斜角度对支护结构内力的影响见表 4。由表 4 可知,随着倾斜角度的增大,斜撑的最大轴力逐渐减小,但水平方向的分力逐渐增大,竖直方向分力减小,斜撑的水平支撑作用较明显,竖向抗拔作用减弱。桩端反力与最大轴力比值增加,说明倾斜角

度越大,斜撑的受力特点越接近摩擦型桩基。观察挡墙弯矩,斜撑倾斜角度越大,挡墙弯矩越大,这是因为斜撑的性能逐渐接近水平内支撑,不能分担挡墙弯矩。

表 4 倾斜角度对支护结构内力影响
Table 4 Influence of deflection angle on forces of retaining structures

角度/ (°)	斜撑最大轴 力/kN	斜撑桩端反 力/kN	水平分力/ kN	挡墙最大弯矩/ (kN·m)
30	367.1	215.0	183.6	1 287
35	365.6	205.5	209.7	1 297
40	356.0	202.1	228.8	1 331
45	346.0	182.1	244.6	1 413
50	340.5	179.0	260.8	1 434
55	336.7	170.2	275.8	1 441

由图 10 与图 11 的最大基底隆起量和基底隆起曲线可知,30°~55° 范围内,斜撑的倾斜角度越大,最大基底隆起量越小。从隆起曲线来看,不同角度的基底隆起量均从靠近挡墙的位置开始增大,在接近注浆体位置时开始减小并在注浆位置处达到最小值,随后隆起量继续增加至最大值。注浆位置处出现最小值。拐点前的角度越大,隆起量越大;拐点之后基底隆起量开始回升并达到最大,并且角度越大隆起量越小。说明扩底式斜撑的侧摩阻力对基底隆起变形有约束作用,由于隆起变形的最大值

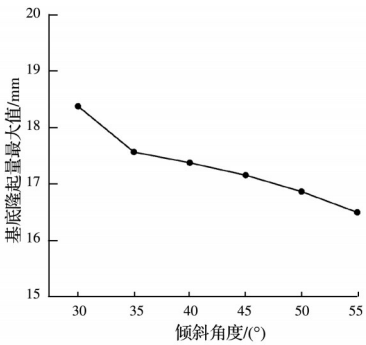


图 10 最大基底隆起量
Fig. 10 Maximum basal bulge

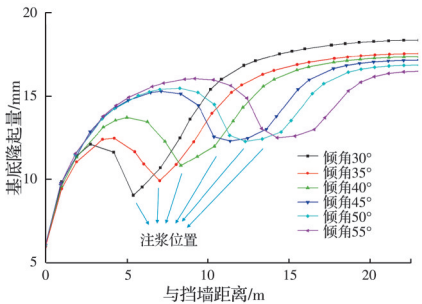


图 11 不同角度基底隆起曲线
Fig. 11 Base elevation curves at different angles

多位于基坑开挖面中轴线,因此,斜撑与土层的接触点越靠近开挖底面中轴线,对隆起变形的抑制效果越明显。但从基底隆起量来看,扩底斜撑倾斜角度的增大对控制基底隆起的作用有限。

由挡墙水平位移曲线(图12)可知,随着斜撑倾斜角度的增加,挡墙的最大水平位移与顶部水平位移均减小,且最大水平位移的位置不断向下延伸,斜撑倾斜角度超过 45° 时,挡墙水平位移变化幅度明显变缓。结合表3中不同倾斜角度的支护结构内力情况可见,斜撑的倾斜角度应控制在 45° ,尽量不要超过 55° ;可根据墙顶水平位移与深部水平位移的控制要求及挡墙抗弯承载力选择合适的倾斜角度。

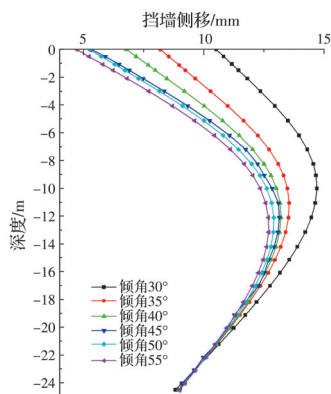


图12 不同角度挡墙侧移曲线

Fig. 12 Lateral curves of retaining walls at different angles

不同角度地表沉降情况如图13所示,不同倾斜角度下地表沉降曲线形状相似。在距离基坑边界10 m范围内发生大幅度沉降,在达到沉降最大值后,随着距离的增加,沉降量开始趋于平缓。由整体沉降曲线可知,随着斜撑倾斜角度的增加,地表沉降曲线整体上移,因扩底斜撑倾斜角度的增大对地表沉降有控制作用,当倾斜角度大于 45° 时,沉降曲线的变化幅度明显变缓,与挡墙变形曲线一致,说明此时继续增大倾斜角度对抑制变形效果有限。

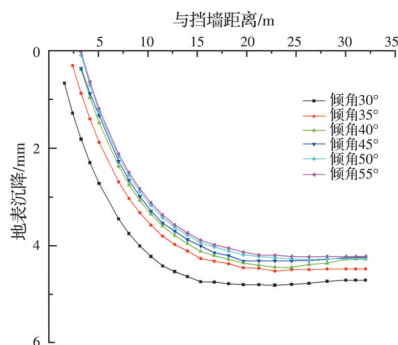


图13 不同角度地表沉降曲线

Fig. 13 Surface settlement curves at different angles

由此可见,在扩底承载式钢管混凝土斜支撑的实际工程应用中,可在倾斜角度规范值的基础上进行适当增加,这样可对整体支护进行优化,一定程度上减小挡墙侧移值和地表沉降,并改善基底隆起情况。另外,建议倾斜角度不要超过规范值 10° (55°),过大的倾斜角度会影响场地施工并造成材料浪费。

5 结论

扩底承载式钢管混凝土斜支撑是一种创新的基坑支护方式,具有安全可靠、经济合理、环境友好等特点。基于有限元模拟计算,揭示了使用扩底斜撑的基坑开挖变形响应,分析了影响扩底斜撑变形特性的主要因素。得出以下主要结论:

1) 扩底承载式钢管混凝土斜支撑通过端部设置加固体形成扩底承载体,提高地基与斜支撑的承载力,在控制基坑开挖变形方面有显著作用,能有效控制基坑的基底隆起、挡墙侧移和坑外地表沉降变形。

2) 扩底斜撑在软土地基中效用显著。在深厚高压缩性软土开挖时,为满足基坑和环境变形控制要求,可以联合使用地基加固技术与扩底式斜撑支护体系。

3) 扩底斜撑倾斜角度的增加虽然能使基坑开挖变形量减小,但倾角的增加会使扩底斜撑的长度变长,从而增加成本。因此,建议根据不同的工况做出合理的选择:对于土体位移控制要求较低的工程,可以采用倾角较小的斜支撑,以降低成本和增大施工空间;对于土体位移要求较严格的工程,可适当增加扩底斜撑的倾斜角度来控制土体位移,但斜撑的倾斜角度应尽量控制在 55° 以内。

参考文献

- [1] 周海祚,郑刚,何晓佩,等. 基坑倾斜桩支护稳定特性及分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 271-277.
ZHOU H Z, ZHENG G, HE X P, et al. Stability characteristics and analysis method for inclined retaining walls in excavations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 271-277. (in Chinese)
- [2] ZHOU H Z, ZHENG G, HE X P, et al. Numerical modelling of retaining structure displacements in multi-bench retained excavations [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(9): 2691-2703.
- [3] 郑刚,何晓佩,周海祚,等. 基坑斜-直交替支护桩工作机理分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 97-100.
ZHENG G, HE X P, ZHOU H Z, et al. Working mech-

- anism analysis of inclined-straight alternate supporting piles in foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 97-100. (in Chinese)
- [4] ZHENG G, HE X P, ZHOU H Z, et al. Performance of inclined-vertical framed retaining wall for excavation in clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 130: 104767.
- [5] ZHENG G, GUO Z Y, ZHOU H Z, et al. Parametric studies of wall displacement in excavations with inclined framed retaining walls [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(9): 04022157.
- [6] SEO M, IM J C, KIM C, et al. Study on the applicability of a retaining wall using batter piles in clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(8): 1195-1212.
- [7] 王恩钰, 周海祚, 郑刚, 等. 基坑倾斜桩支护的变形数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 73-76.
WANG E Y, ZHOU H Z, ZHENG G, et al. Numerical analysis of deformation of inclined pile support in foundation pit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 73-76. (in Chinese)
- [8] ZHENG G, LIU Z P, ZHOU H Z, et al. Behaviour of an outward inclined-vertical framed retaining wall of an excavation [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(12): 5521-5532.
- [9] 窦锦钟, 孙旻, 韩磊. 桩-土-斜撑组合支护基坑失稳破坏机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(增刊 1): 448-457.
DOU J Z, SUN M, HAN L. Study on instability and failure mechanism of foundation pit supported by pile-soil-diagonal brace combination [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(Sup 1): 448-457. (in Chinese)
- [10] 简浩, 顾国荣, 齐良锋. 基坑竖向斜支撑基础设计[J]. 地下空间, 2004, 24(增刊 1): 692-694.
JIAN H, GU G R, QI L F. Design of the vertical inclined brace foundation in excavation engineering [J]. Underground Space, 2004, 24(Sup 1): 692-694. (in Chinese)
- [11] 崔永高, 阳吉宝. 坑底搅拌桩和树根桩复合结构用作基坑竖向斜支撑基础[J]. 建筑结构, 2001, 31(10): 45-46.
CUI Y G, YANG J B. Compound structure of deep mixed-in-place piles and root piles used as foundation of deep excavation diagonal brace [J]. Building Structure, 2001, 31(10): 45-46. (in Chinese)
- [12] 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(增刊 1): 306-311.
LIU Y, LIU J Y, XIN Z Y, et al. Study on bracing replacement technology of composite bracing system with row piles and inclined braces [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup 1): 306-311. (in Chinese)
- [13] 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 Y H, CHEN Z Z, BI G. 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)
- [14] 朱碧堂, 王瑞祥, 杨敏. 超前斜撑排桩支护的力学特性与分析设计[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1763-1770.
ZHU B T, WANG R X, YANG M. Behavior and design of fore-batter propped retaining piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1763-1770. (in Chinese)
- [15] 张学元, 肖成志, 王子寒. 载体桩单桩竖向承载力学性能研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 163-169.
ZHANG X Y, XIAO C Z, WANG Z H. A review of research on vertical bearing capacity of single pile with ram-compacted bearing sphere [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(6): 163-169. (in Chinese)
- [16] 周航, 刘汉龙, 丁选明, 等. 基于球孔扩张理论的软黏土中载体桩桩端挤密加固效应[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 1-10.
ZHOU H, LIU H L, DING X M, et al. Compaction and reinforcement effect at the pile end of carrier pile in soft clay based on spherical cavity expansion method [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 1-10. (in Chinese)
- [17] KIM S, WHANG S W, KIM S. Pile foundation design through the increased bearing capacity of extended end pile [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2017, 16(2): 395-402.
- [18] KIM S, WHANG S W, KIM S, et al. Application of extended end composite pile design in pile foundation work [J]. Geotechnical Engineering, 2017, 170(5): 455-465.
- [19] LIU K F, XIE X Y, LUO Z, et al. Full-scale field load testing of long drilled shafts with enlarged base constructed in marine sediment [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(3): 346-356.
- [20] ZHANG Y C, YAO Y G, MA A G, et al. In situ tests on improvement of collapsible loess with large thickness by down-hole dynamic compaction pile [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(2): 156-170.
- [21] GAO G Y, GAO M, CHEN Q S, et al. Field load testing study of vertical bearing behavior of a large

- diameter belled cast-in-place pile [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(5): 2009-2016.
- [22] XU J, REN J W, WANG S H, et al. Axial uplift behaviour of belled piers in coarse-grained saline soils [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 4735423.
- [23] KONG G Q, YANG Q, LIU H L, et al. Numerical study of a new belled wedge pile type under different loading modes [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, 17: s65-s82.
- [24] KUMAR A, KHATRI V N, GUPTA S K. Numerical and analytical study on uplift capacity of under-reamed piles in sand [J]. Marine Georesources & Geotechnolgy, 2022, 40(1): 104-124.
- [25] MOAYEDI H, REZAEI A. An artificial neural network approach for under-reamed piles subjected to uplift forces in dry sand [J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(2): 327-336.
- [26] 王卫东, 李青, 徐中华, 等. 软黏土小应变本构模型参数研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(3): 844-855.
- WANG W D, LI Q, XU Z H, et al. Investigation and application of small-strain model parameters for soft clay deposits [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(3): 844-855. (in Chinese)
- [27] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
- GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845. (in Chinese)
- [28] 刘书斌, 王春波, 周立波, 等. 硬化土模型在无锡地区深基坑工程中的应用与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3022-3028.
- LIU S B, WANG C B, ZHOU L B, et al. Application and analysis of hardened soil model in deep foundation pit engineering in Wuxi Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 1): 3022-3028. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)