

文章编号: 1007-2993(2026)02-0221-10

固化泥浆扶壁式支护对坑外土体变形影响分析

张楠¹ 张慧¹ 刘永超^{2,3} 李兵兵⁴ 王浩⁵ 姚懿煊²

(1. 天津滨海新区轨道交通投资发展有限公司, 天津 300450; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 天津建城基业集团有限公司, 天津 300301; 4. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040; 5. 中铁二十二局集团房地产开发有限公司, 北京 100043)

【摘要】 为推动废弃泥浆的资源化利用, 提出将工程废弃泥浆改良并用于扶壁式基坑支护结构中的扶壁墙。利用 PLAXIS 3D 有限元软件建立三维模型, 验证模型可靠性并对比分析有无泥浆扶壁作用下坑外土体变形的差异。计算结果表明: 模型较好地反映了坑外土体变形情况, 相较无泥浆扶壁, 支护中预先设置的泥浆扶壁墙体可减小坑外地表土体变形, 在各种参数的不利工况下, 地表沉降量降幅仍可达 73.3%, 地表水平位移降幅可达 66.4%; 预置扶壁墙对坑外深层土体变形趋势影响较小, 可有效控制坑外深层土体变形, 并缩小不利变形影响区域; 预置泥浆扶壁墙不仅能够对坑外土体变形所产生的角应变和拉应变进行约束, 也能降低角应变和拉应变影响范围, 进而一定程度上减少角应变和拉应变对坑边既有建构物及管线的损害。

【关键词】 废弃泥浆; 资源化利用; 扶壁式支护结构; 土体变形; 影响范围

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0562

Analysis of the influence of solidified slurry buttress support on the deformation of soil outside the pit

ZHANG Nan¹ ZHANG Hui¹ LIU Yongchao^{2,3} LI Bingbing⁴ WANG Hao⁵ YAO Yixuan²

(1. Tianjin Binhai New Area Rail Transit Investment and Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Construction Inheritance Group Company Limited, Tianjin 300301, China; 4. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China; 5. China Railway 22 Bureau Group Real Estate Development Co., Ltd., Beijing 100043, China)

【Abstract】 To effectively solve the two major problems of controlling engineering waste generation and foundation pit deformation, this research proposes to improve the engineering waste mud and use it in the buttress wall of the buttress foundation pit support structure. The three-dimensional model was established by using PLAXIS 3D finite element software. The reliability of the model was verified and the difference of soil deformation outside the pit under the action of slurry buttress was compared and analyzed. The calculation results show that the constitutive model can better reflect the deformation of the soil outside the pit. Compared with no slurry buttress, the pre-buried slurry buttress wall can pre-suppress the adverse deformation of the surface soil outside the pit. Under the most dangerous working conditions, the surface settlement can be reduced by 73.3%, and the horizontal displacement of the surface can be reduced by 66.4%. The embedded buttress wall has little effect on the deformation trend of deep soil outside the pit, but it can effectively control the deformation of deep soil outside the pit and reduce the area affected by adverse deformation. The embedded slurry buttress wall can not only constrain the maximum angular strain and tensile strain generated by the deformation of the soil outside the pit, but also reduce the influence range of angular strain and tensile strain, thus reducing the damage of angular strain and tensile strain to the existing buildings near the pit to a certain extent.

【Key words】 waste mud; resource utilization; counterfort supporting structure; soil deformation; scope of influence

基金项目: 国家自然科学基金(52178343)

作者简介: 张楠, 女, 1982年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑工程、轨道建设工程设计、施工管理的研究。E-mail: 55102439@qq.com

通信作者: 刘永超, 男, 1970年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计与施工技术研究。E-mail: chao96521@vip.sina.com

0 引言

城市基坑工程设计理念已由强度控制向变形控制转变,即通过对基坑支护结构及周边地层变形的控制来减小对周边环境的影响,实现基坑安全与环境稳定的协调统一^[1]。在扶壁加固技术的应用研究方面,一些学者针对土方开挖阶段内隔墙的变形控制效果进行了研究分析,并设计优化布置方案^[2-4]。一些学者针对软土地区基坑施工常用的坑内布设扶壁墙的分段施作方法,提出了考虑壁墙支护效应及优化布置壁墙的变形控制理念,实现了基坑挖前抽水引发围挡变形的有效控制^[5-9]。

吴忠等^[10]采用ABAQUS有限元软件分析了土体的应力—应变关系,结果表明,随着扶壁间距的增大结构应力安全性降低。葛梁等^[11]结合某工程实例,对比分析T型墙与等刚度一字墙的变形特点,结果表明,T型墙具有更好的变形控制能力。殷俊鹏等^[12]结合数值模拟和现场监测,分析了开挖对新型基坑支护结构T型地连墙侧向变形的影响,结果表明,T型连续墙与传统悬臂式地连墙相比具有增加弯曲刚度、减少顶部位移等优势,有助于基坑工程的安全性和稳定性。Hsu等^[13]利用PLAXIS 3D软件结合某工程分析了扶壁墙和横墙对基坑变形的影响,结果表明,在深基坑开挖过程中,逐步拆除支撑墙可有效控制地下连续墙的侧向变形。

上述研究表明,在基坑内紧邻地连墙设置扶壁墙体,能够有效控制基坑变形,减小基坑开挖对支护结构和周边环境的不利影响。但是,现有研究和工程实践中扶壁墙体与地连墙材质相同,设置扶壁墙体导致工程成本大幅增加,并且扶壁施工会加剧工程废料的产生,对环境产生一定的污染。为此,本研究通过将工程废弃泥浆与掺料配合最优后代替素混凝土材料,将其用作扶壁墙体材料,形成一种固化泥浆扶壁式支护结构,并就该扶壁式基坑支护结构对基坑周边环境的影响进行系统性分析,以求实现环境保护和废物利用的最大化。

1 有限元模型建立

为更好地进行基坑扶壁式支护结构体系机理分析,采用PLAXIS 3D有限元软件,分析泥浆扶壁式支护结构作用下,基坑开挖时周边土体变形规律,为泥浆扶壁墙进一步应用提供技术支持。

1.1 扶壁式基坑工程

天津某地铁车站为地下两层的岛式站台车站,横断面采用双柱三跨的矩形框架结构,车站总长275 m。车站基坑分两期进行,一、二期基坑长分别为

141.8 m和133.2 m。标准段宽21.1~26.6 m,深17.07~17.32 m,二期盾构井段宽28.9 m、深19.212 m。

工程区域地貌类型属于海积—冲积作用形成的滨海平原,场地地势平坦、开阔,主要为现状道路。经勘察实测,各勘探孔孔口高程在2.09~2.82 m,相对高差0.73 m。根据勘察揭示,本工程场地地基土主要为黏土、粉质黏土、粉土和粉砂等,各土层物理力学参数如图1所示。

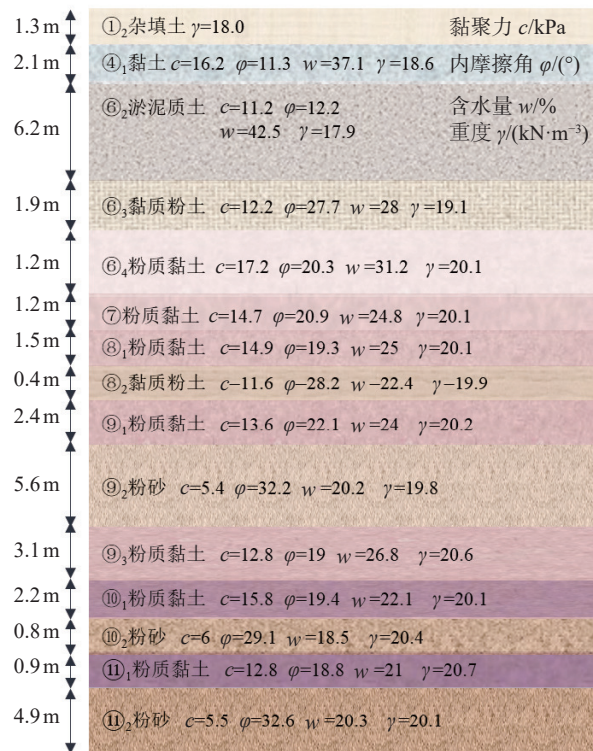


图1 土层物理力学参数

Fig. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

基坑原设计支护体系为地下连续墙+内支撑,标准段地下连续墙竖向深度为32.3 m(自地面起算),沿竖向共布置4道支撑结构,其中第1道采用截面尺寸为800 mm×1000 mm的钢筋混凝土支撑,第2—4道采用直径800 mm、壁厚16 mm的钢支撑,具体布置形式见图2。图3为本工程某处研究专用观测点位布置图,其中测斜孔位于每片地连墙中心。

结合废弃泥浆资源化利用环保理念,将改良的废弃泥浆^[14]用作基坑支护扶壁材料,图4为该工程提出的固化泥浆扶壁式基坑支护,即在常规基坑支护结构设计中新增预埋一定间隔、长度、强度、深度的泥浆扶壁墙。采用一般连续墙施工工艺,但不再进行槽段周边土体加固,基坑未开挖前开槽,浇筑形成固化泥浆扶壁墙,借此对坑内被动区土体预加固,后随基坑开挖至指定标高,一并挖除泥浆扶壁墙。

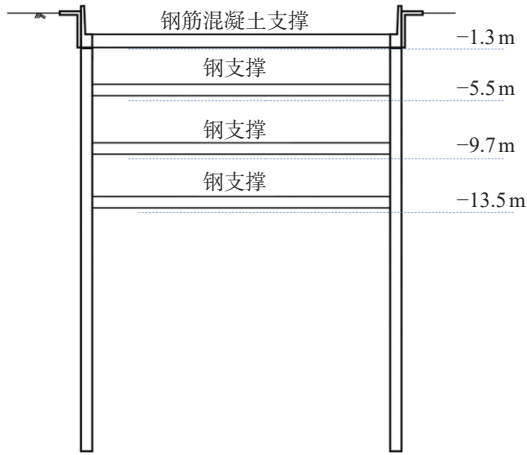


图2 原基坑支护体系简图

Fig. 2 Original foundation pit support system diagram

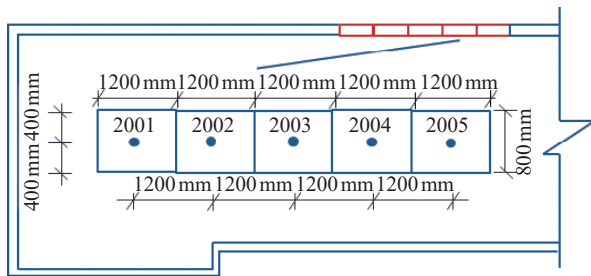
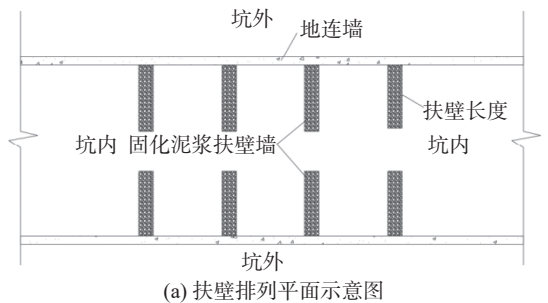
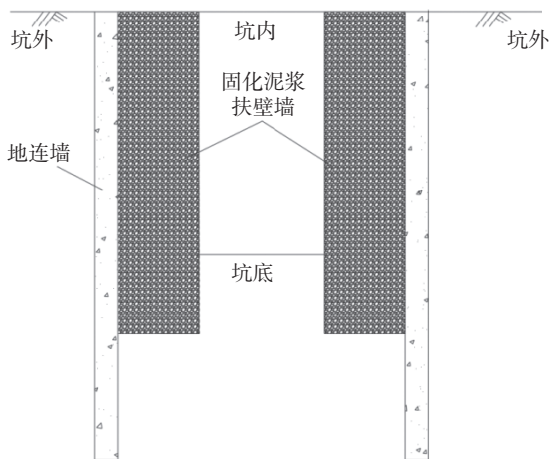


图3 原基坑支护结构实测测点图

Fig. 3 Measured measuring point diagram of the original foundation pit supporting structure



(a) 扶壁排列平面示意图



(b) 扶壁式支护结构剖面图

图4 固化泥浆扶壁式基坑支护体系

Fig. 4 Solidified slurry buttressed foundation pit supporting system

1.2 模型建立与验证

以本工程标准段为参照对象,因标准段基坑具有对称性,为方便建模与计算,采用 PLAXIS 3D 软件建立对称基坑模型,扶壁墙长 10 m,间距 6 m,墙体厚度 800 mm,墙体强度为 8 MPa,扶壁加固深度为地表至坑底以下 4 m,对撑基坑模型如图 5 所示,图内虚线段为坑内拟建泥浆扶壁墙。为消除模型边界效应对数值计算结果准确性影响,模型长度取 3~4 倍坑深,模型高度取 2~3 倍坑深,宽度取 36 m,故模型最终尺寸为 93.25 m(长)×36 m(宽)×60 m(高)。模型底面固定,侧面法向约束,上表面为自由面。

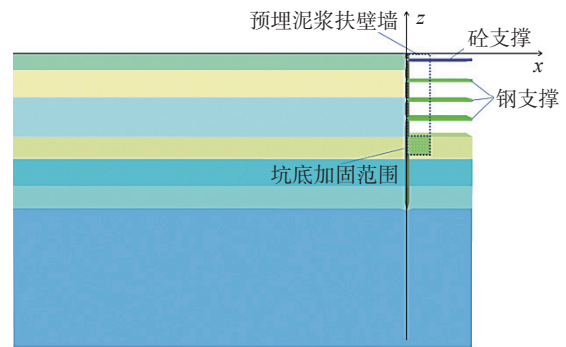


图5 模型示意图

Fig. 5 Model diagram

地连墙采用板单元,材料类型为弹性,厚度为 800 mm,强度为 C35,弹性模量为 31 GPa,泊松比为 0.2;钢筋混凝土对撑采用锚杆单元,材料类型为弹性,截面尺寸为 800 mm×1000 mm,弹性模量为 31 GPa;钢支撑采用锚杆单元,材料类型为弹性,截面直径、管壁厚度分别为 800 mm、16 mm,弹性模量为 210 GPa;冠梁及围檩采用梁单元,材料类型为弹性,截面尺寸为 1000 mm×1000 mm,弹性模量为 30 GPa;泥浆扶壁墙采用实体单元,厚度为 800 mm,材料类型选为线弹性,排水类型为非多孔,泊松比为 0.25,参照曹宝飞^[15]建议,泥浆固化物弹性模量 E_c 取 4~5 倍 E (E 取试块无侧限抗压强度的 60~160 倍),故基于膏状浆液试验推荐最优配比 K3 在 28 d 下无侧限抗压强度,即 7.5 MPa^[15],本模型泥浆扶壁墙弹性模量取为 6 GPa。

为提升网格划分的精度与计算效率,模型中将原始土层按其物理力学性质及厚度进行归并简化,最终整合为 7 层。调整后的各层土性参数详见表 1,其中土体重度及孔隙比主要依据较厚土层的实测值选取,有效黏聚力与有效内摩擦角则根据三轴剪切试验结果进行了相应修正。土体网格为四面体单元,本模

表 1 模型土体参数表
Tab. 1 Model soil parameters table

土层性质	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c' / kPa	$\varphi' /(^{\circ})$	E_{50} / MPa	$E_{\text{ocd}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}} / \text{MPa}$	G_0 / MPa	$\gamma_{0.7} / \times 10^{-4}$	e
④ ₁ 黏土	18.6	6.0	22.1	3.96	3.96	23.76	47.5	1.5	1.015
⑥ ₂ 淤泥质土	17.9	1.0	17.0	2.73	2.73	19.11	38.2	1.5	1.173
⑥ ₄ 粉质黏土	20.1	9.5	28.6	6.81	6.81	44.27	88.5	1.7	0.875
⑧ ₁ 粉质黏土	20.2	14.0	25.7	6.91	6.91	48.37	130.6	4.2	0.672
⑨ ₂ 粉砂	19.8	5.4	32.2	15.24	15.24	60.96	152.4	4.5	0.602
⑩ ₁ 粉质黏土	20.6	15.8	19.4	4.00	4.00	44.00	118.8	4.2	0.738
⑪ ₂ 粉砂	20.1	5.5	32.6	13.75	13.75	55.00	148.5	4.5	0.614

型共 34690 个单元, 59769 个节点。

基坑开挖工况流程中, 工况 I—工况 V 中均为先拆除预埋扶壁支护结构再设支撑, 详细步骤如表 2 所示。

表 2 基坑开挖工况流程
Tab. 2 Foundation pit excavation process

工况	开挖深度/m	工作内容	架设支撑深度/m	材质
I	-1.8		-1.3	钢混支撑
II	-6		-5.5	钢支撑
III	-10.2	拆除预埋泥浆扶壁	-9.7	钢支撑
IV	-14		-13.5	钢支撑
V	-17.07			

在无扶壁墙情况下, 当基坑开挖至坑底后, 将 2003 号和 2004 号测孔处的实测墙体深层水平位移值与计算值进行对比, 对比情况如图 6(a) 所示。可以看出, 随着围护墙体埋深的增加, 实测和计算的墙体深层水平位移均呈现“先增后减”的趋势。可以看出坑内支撑起到约束围护结构变形的作用。监测显示, 2003 号测孔测得墙体最大水平位移为 33.28 mm, 约为基坑深度的 0.195%, 位置大致在坑深-13.5 m 处, 2004 号测孔测得的最大水平位移则为 30.4 mm, 约为坑深的 0.178%, 大致位于-12.5 m 处, 均小于徐中华^[6]提出的最大限值 $\delta_{\text{lm}} = 0.25\%H$ (H 为基坑深度)。在实测数据的基础上, 利用 PLAXIS 3D 进行建模分析, 将支护结构模拟值与实测进行比对, 得到无扶壁时墙体水平最大位移为 31.23 mm, 约为 0.183% 的坑深, 大致位于-13.5 m 处, 模拟结果同现场实测数据比较吻合, 进一步验证了无扶壁的数值模型能够较好地预测并计算出实际工程中围护结构的变形情况。

对于基坑地表沉降, Hsieh 等^[7]系列研究表明, 距离围护墙体 2 倍基坑开挖深度距离内为主要影响

区域, 且呈“凹槽形”; 2 到 4 倍基坑开挖深度为次要影响区。将无扶壁工况基坑地表沉降数值计算结果同前人研究结果进行对比, 对比情况如图 6(b) 所示, 可见变形趋势基本保持一致, 最大沉降所处位置均位于 0.5 倍基坑开挖深度处, 2 倍基坑开挖深度后, 地表沉降变形逐渐平稳。对于无扶壁工况基坑地表水平位移, 将数值计算结果同 Schuster 曲线^[8]进行对比, 对比情况如图 6(c) 所示, 可以看出, 距围护墙水平距离为 0.7 倍的基坑开挖深度处地表水平位移最大, 该距离略小于 Schuster 经验曲线预测位置, 但影响区域内变形趋势相似, 均呈“凹槽形”。

综上可知, 计算模型所得结论与前人研究结果^[7-18]基本一致, 表明本模型采用 HSS 本构能够较好地反映坑外地表土体变形情况, 且土体参数取值合理, 可以在此基础上进一步探究有无扶壁时基坑开挖过程中对既有围护墙体与土体变形影响。

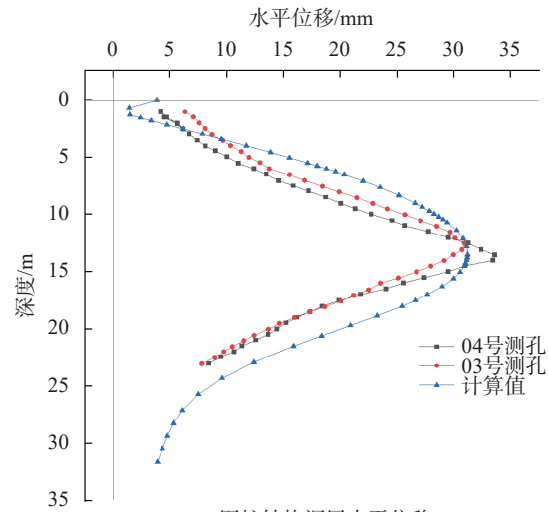
2 基坑开挖对周边土体变形影响

对于安全等级为一级的基坑, 当基坑周围环境无明确变形控制要求, 坑外地表沉降建议取 20~30 mm^[9]。本研究基坑安全等级为一级, 综合考虑坑外地表沉降控制值设定为 20 mm。

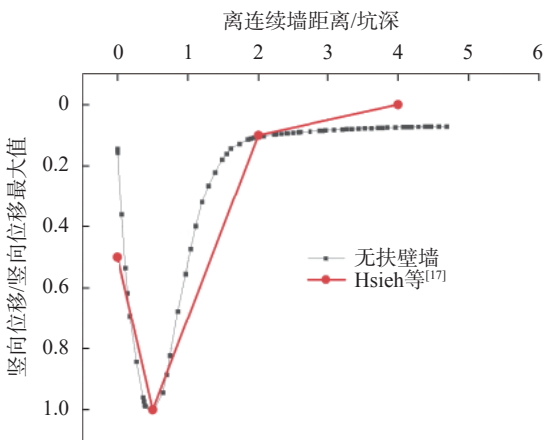
2.1 坑外土体沉降

图 7(a) 为不同工况下无泥浆扶壁时坑外地表沉降曲线。可以看出, 随基坑开挖深度加深, 工况 I—工况 V 坑外地表沉降最大值呈 1.28 mm→16.1 mm→19.1 mm→23.78 mm→27.12 mm 变化, 工况 I—工况 II 地表沉降变化速率尤为显著, 这是由于两工况区间基坑开挖跨度大, 使得围护结构侧向位移增大, 进而导致坑外土体沉降激增; 工况 V 下, 沉降最大值所处位置距围护墙体水平距离约为 8.8 m, 距围护墙体距离超过 70 m 处坑外地表土体沉降量很小, 基本趋于稳定。

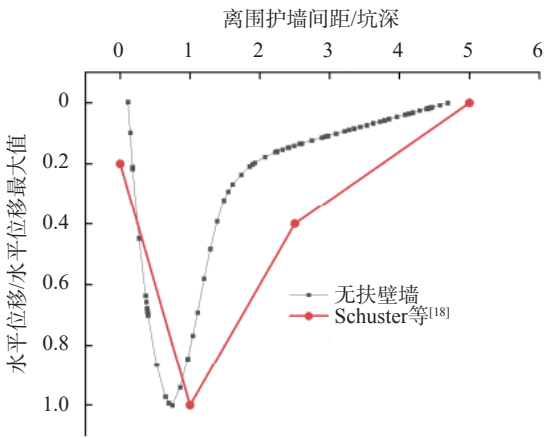
图 7(b) 为不同工况下有泥浆扶壁时坑外地表沉



(a) 围护结构深层水平位移



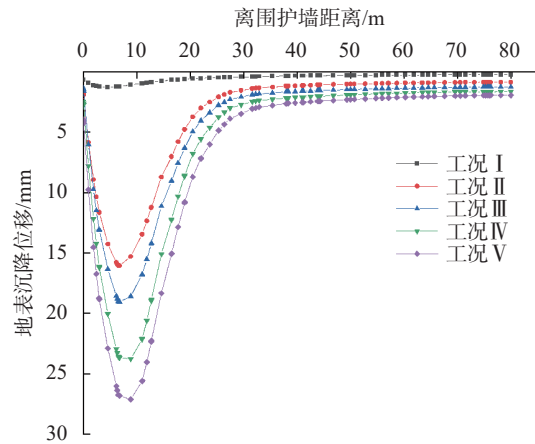
(b) 地表沉降



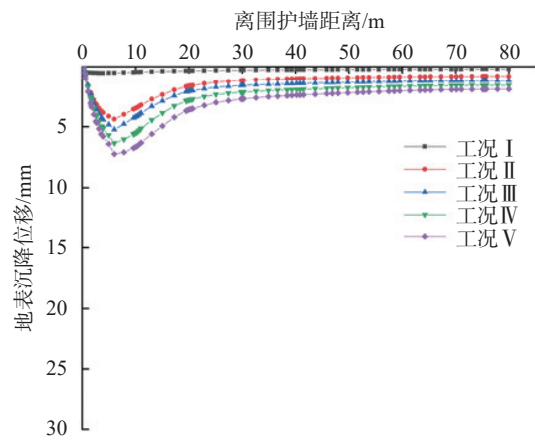
(c) 地表水平位移

图6 无扶壁围护结构及坑外地表土体变形趋势对比
Fig. 6 Comparison of the deformation trend of the retaining structure without buttress and the surface soil outside the pit

降位移曲线。可以看出,随基坑开挖深度加深,工况 I—工况 V 坑外地表沉降最大位移值呈 0.55 mm→4.38 mm→5.24 mm→6.36 mm→7.25 mm 变化,相较无扶壁方案下坑外地表沉降位移值虽有大幅降低,但变形趋势未发生明显变化;工况 V 下,坑外地表



(a) 无扶壁坑外地表沉降曲线



(b) 有扶壁坑外地表沉降曲线

图7 不同工况下坑外地表沉降曲线

Fig. 7 Ground surface settlement curve outside the pit under different working conditions

沉降最大值所处位置距围护墙体距离约为 7.3 m,较无扶壁方案更向围护墙靠近。

为更直观地对坑外深层土体竖向位移变化进行分析,以 4 m 埋深为间隔,绘制坑外不同深度处的土体竖向变形曲线,如图 8 所示。

图 8(a)为基坑开挖至底部后不同深度下无泥浆扶壁时坑外土体沉降曲线。可见,不同深度处,接近围护墙体一侧的土体沉降在墙体 1.64 倍坑深范围内为正值,且在 0.94 倍坑深范围内,紧邻墙体一侧的土体沉降值增大,0.94~1.41 倍坑深范围内,沉降值逐渐趋于 0;在超 1.87 倍坑深范围内为负值,产生土体隆起现象,在 1.64~1.87 倍坑深范围内土体隆起量增加,超过 1.87 倍坑深后,隆起量逐渐降低,直至趋于 0。坑外土体的最大沉降位移通常出现在某一深度范围内,而非地表处,随深度加深,呈先增后减趋势,所处位置由 1 倍坑深处向紧邻围护墙体一侧发展。此外,土体沉降主要影响区域随深度的加深,由“凹槽形”渐变为“三角形”直至发展为趋于 0,且

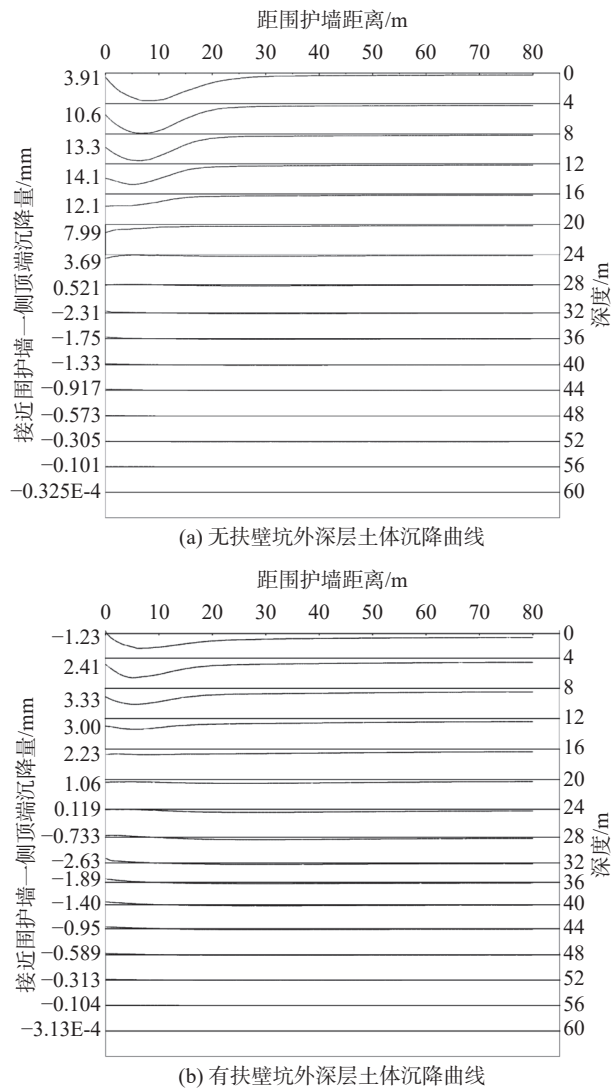


图8 坑外土体深层沉降曲线

Fig. 8 Deep settlement curve of soil outside the pit

垂直于纵轴的一条直线。

图8(b)为基坑开挖至底部后不同深度下有泥浆扶壁时坑外土体沉降曲线。可见,紧邻围护墙体的地表竖向位移表现为隆起现象,其余不同深度处,接近围护墙体一侧的土体沉降值在墙体埋深4~24m范围内为正值,且0.23~0.47倍坑深范围内,土体沉降值增大,0.47~1.41倍坑深范围内,逐渐趋于0;在1.64倍坑深处为负值,产生土体隆起现象,在1.64~1.87倍坑深范围内土体隆起量增加,超过1.87倍坑深后,隆起量渐渐降低,直至趋于0,同无扶壁方案趋势基本一致。坑外土体沉降位移最大值及主要影响区域的变形趋势同样与无扶壁方案保持一致。

综上所述:对于不同工况下坑外地表沉降,随基坑开挖深度的加深,预埋泥浆扶壁墙体能够在每一工况下发挥重要作用,可预先抑制坑外土地地表沉降扩

增,最危险工况下降幅可达73.3%;对于坑外深层土体沉降而言,预埋扶壁墙并未改变土体竖向位移的大体变形趋势,但扶壁墙可对围护墙体提供支撑力,使得围护墙朝坑内的侧向变形受到约束,进而使得坑外深层土体沉降大幅度降低,朝有效控制坑外土体沉降方向发展。

2.2 坑外土体水平位移

图9(a)为不同工况下无泥浆扶壁时坑外地表水平位移曲线。可以看出,随基坑开挖深度加深,工况I—工况V坑外地表水平最大位移值呈1.35mm→11.37mm→12.96mm→15.38mm→16.8mm变化,主要影响区域“凹槽形”特征愈加显著,工况I—工况II水平位移变化速率尤为显著,系因两工况区间土体水平约束不足所致。图9(b)为不同工况下有泥浆扶壁时坑外地表水平位移曲线。可以看出,随基坑开挖深度加深,工况I—工况V坑外地表沉降最大位移值呈0.66mm→3.96mm→4.56mm→5.41mm→6.03mm变化,相较无扶壁方案下坑外地表水平位移

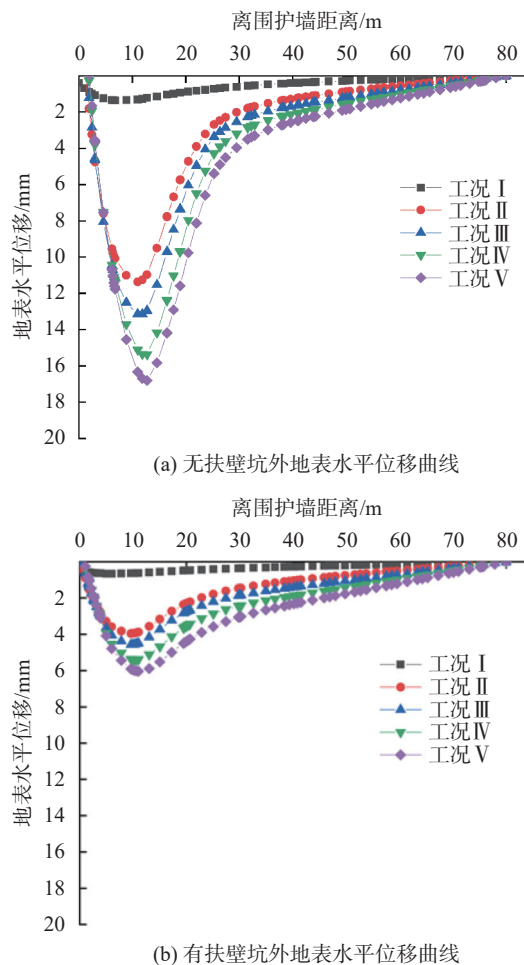


图9 不同工况下坑外地表水平变形曲线

Fig. 9 Horizontal deformation curve of ground surface outside the pit under different working conditions

值有大幅降低,但变形趋势并无相异之处。

为更直观地对抗外不同位置处的深层水平位移变化进行分析,以距围护墙体 10 m 为间隔,绘制坑外相应位置处土体深层水平位移曲线,如图 10 所示。

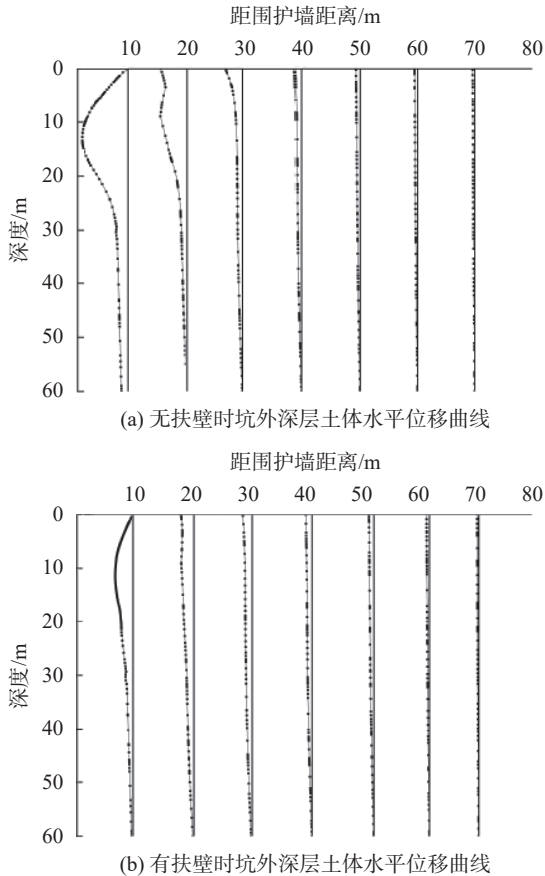


图 10 坑外土体深层水平位移曲线
Fig. 10 Deep horizontal displacement curve of soil outside the pit

图 10(a)为不同位置处无泥浆扶壁时坑外土体深层水平位移曲线。可以看出,当距围护墙体距离为 0 时,土体深层水平位移类似于复合型围护墙体的变形特征,呈弓形,这可能由于紧邻围护墙体,内支撑支顶作用较强所致。随距围护墙体距离增加,其变形特征渐趋于悬臂型,顶部水平位移为位移最大值,距围护墙体 3.5 倍坑深处,水平最大位移为 1.25 mm,变形几乎可忽略不计。最终发展为一条位移值趋于 0 mm 且垂直于横轴的直线;最大位移值由 30.77 mm 向 0 mm 发展,且最大位移值所处位置由埋深 12.76 m 向地表靠近。

图 10(b)为不同位置处有泥浆扶壁时坑外土体深层水平位移曲线。可以看出,位移曲线变形趋势同无扶壁方案下的深层水平位移曲线,仍为由复合型向悬臂型发展,直至趋于一条位移趋于 0 mm 且垂直

于横轴的直线。其位移最大值由 10.34 mm 向 0 mm 发展,相较于无扶壁方案,紧邻围护墙体的深层土体最大水平位移降幅可达 66.4%。

综上所述,可得:对于不同工况下坑外地表水平位移,随基坑开挖深度的加深,有无泥浆扶壁作用,并不影响曲线发展的大致趋势,均为“凹槽形”,且同地表沉降位移曲线趋势一致,但扶壁墙的存在能够显著约束坑外地表水平位移;对于坑外土体深层水平位移而言,预埋扶壁墙影响范围主要集中在距围护墙体距离 1.75 倍坑深范围内,大幅度地限制土体的水平位移。

2.3 土体应变

坑外土体水平变形与不均匀沉降所产生的水平应变(拉应变)及角应变是造成坑边既有建(构)筑物破坏的主要因素,为进一步应对两因素对构筑物的影响,罗阳洋^[20]首先假设土体为连续性介质,线弹性体,进而提出下列应变公式:

$$\text{角应变: } \beta_{12} = \frac{\delta_{sv1} - \delta_{sv2}}{L_{12}} \quad (1)$$

$$\text{水平应变: } \varepsilon_{12} = \frac{\delta_{sh1} - \delta_{sh2}}{L_{12}} \quad (2)$$

式中: β_{12} , ε_{12} 分别为地表土体两点的角应变、水平应变; δ_{sv1} , δ_{sv2} 为地表沉降位移曲线中两点位移值; δ_{sh1} , δ_{sh2} 为地表水平位移曲线两点位移值; L_{12} 为两点位移值间距。应变计算求取可参考图 11 坑外土体位移曲线。

2.3.1 土体角应变

坑外地表土体水平及竖向位移曲线如图 11 所示。为避免不均匀沉降导致土体产生角应变对抗边既有构筑物损害,基于式(1)和图 11(a),分析不同工况下,坑外地表土体角应变影响范围,并就有无扶壁作用时,土体角应变的变化历程进行探讨。

图 12(a)为无扶壁时不同工况下的角应变曲线。以最大沉降点所处位置为界,可以看出,随坑深增加,工况 I—工况 V 靠近墙体一侧的最大角应变呈 0.35%→4.84%→5.25%→5.91%→6.5% 变化,远离基坑一侧的最大角应变呈 -0.8%→-1.72%→-2.07%→-2.53%→-2.55% 变化。由于工况 I 下基坑开挖深度较浅,坑外土体地表角应变及影响范围较小。工况 II—工况 V 下的角应变影响范围趋于一致,在 2.2 倍坑深内。

图 12(b)为有扶壁时不同工况下的角应变曲线,角应变影响范围为 1.6 倍坑深处,相较无扶壁方案时的角应变影响范围缩小了 0.6 倍坑深,且角应变最大

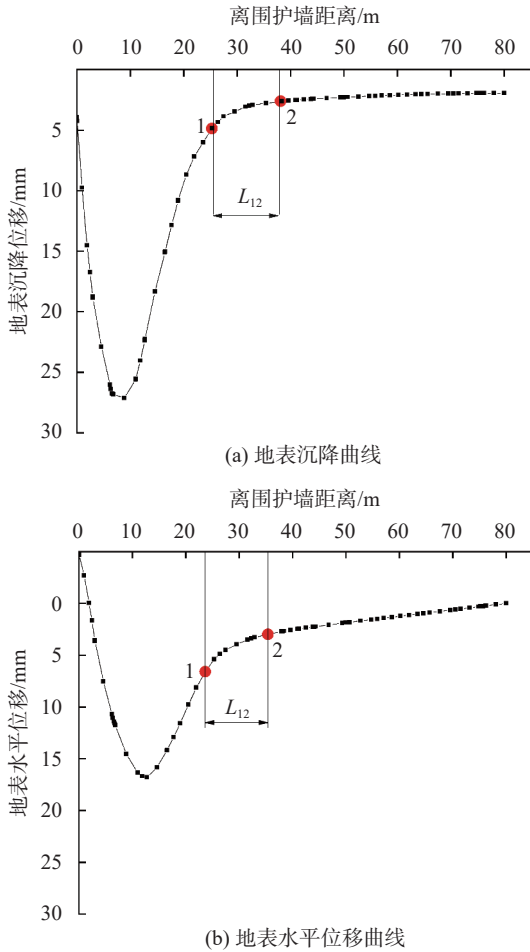


图 11 坑外地表土体位移曲线

Fig. 11 Displacement curve of surface soil outside the pit

值也大幅降低。图 12(c)展示了基坑开挖至底部时,有无扶壁时坑外地表角应变的对比情况,以地表沉降最大点为界可以发现,预埋扶壁墙使得靠近基坑一侧最大角应变相较无扶壁方案降幅达 16.4%,远离基坑一侧降幅达 81.6%,角应变影响范围降幅达 27%。

综上可见:预埋泥浆扶壁墙不仅能够对坑外土体沉降所产生的角应变的最大值进行约束,同时能够降低角应变的影响范围,进而一定程度上减少角应变对坑边既有建(构)筑物的剪切破坏。

2.3.2 土体水平应变

相同深度处土体不同水平位移将导致水平应变的产生,基于式(2)和图 11(b),分析不同工况下,坑外地表土体水平应变影响范围,并就有无扶壁作用时,土体水平应变的变化历程进行探讨。

图 13(a)为无扶壁时不同工况下的水平应变曲线。以水平位移最大点为界,基坑近侧土体以受压为主,表现为压应变;远侧区域则因拉伸作用显著,呈现出拉应变特征,可以看出,随坑深增加,工况 I—工况 V 靠近墙体一侧的最大压应变呈 0.3%→2.69%→

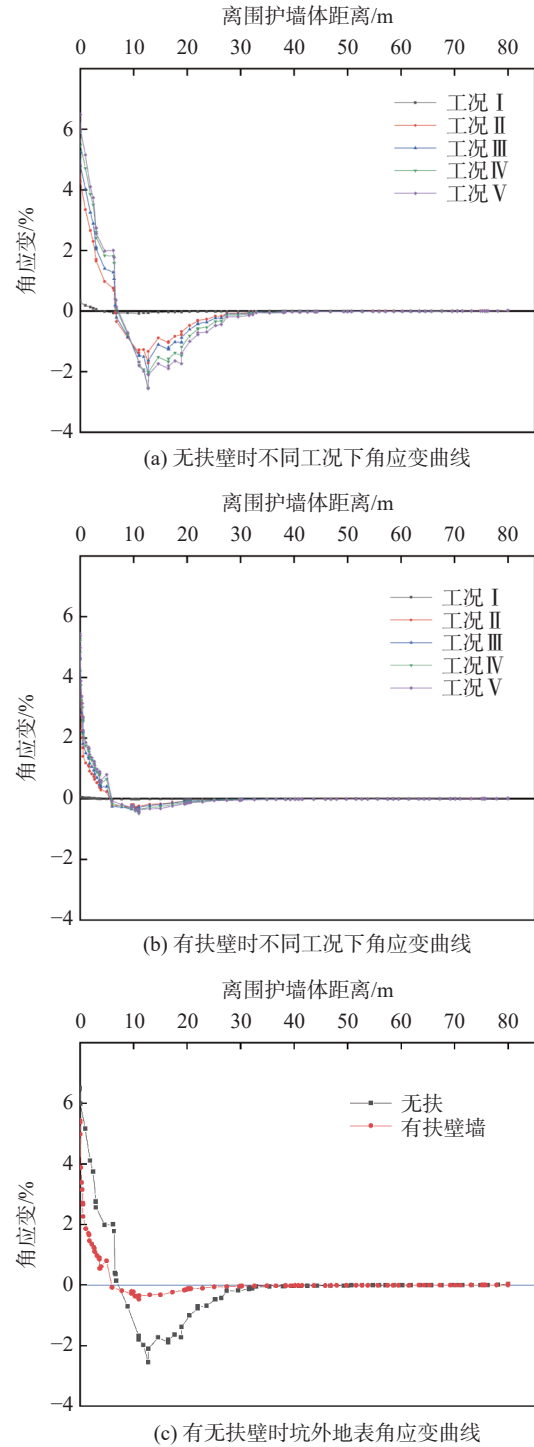


图 12 坑外土体角应变

Fig. 12 Angular strain of soil outside the pit

3.18%→3.36%→3.51% 变化,远离基坑一侧的最大压应变呈 -0.05%→-1.02%→-1.1%→-1.11%→-1.2% 变化。由于工况 I 下基坑开挖深度较浅,坑外土体地表水平应变及影响范围较小。工况 II—工况 V 下的水平应变影响范围趋于一致,在 2.8 倍的坑深内。图 13(b)为有扶壁时不同工况下的水平应变曲线,水平应变影响范围为 2.2 倍坑深内,相较无扶壁方案时

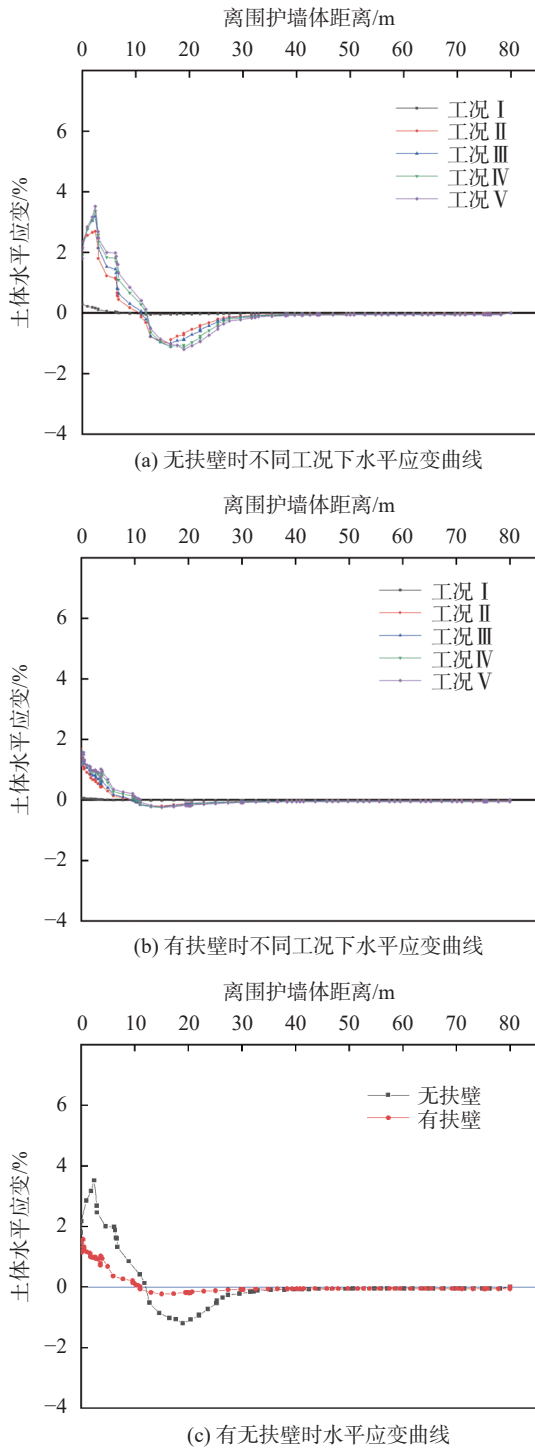


图 13 坑外土体水平应变

Fig. 13 Horizontal strain of soil outside the pit

的水平应变影响范围缩小了 0.6 倍坑深,且水平应变最大值也大幅降低。图 13(c)为基坑开挖至底部时,有无扶壁时坑外地表水平应变的对比。可以看出,预埋扶壁墙使得靠近基坑一侧最大压应变相较无扶壁方案降幅达 57.5%,远离基坑一侧降幅可达 78%,水平应变影响范围降幅可达 21.4%。

综上所述:预埋泥浆扶壁墙不仅能够对抗外土

体水平位移所产生的压应变及拉应变最大值进行约束,同时能够降低水平应变的影响范围,进而一定程度上减少水平应变对围护结构的拉压破坏。

3 结论

依托天津市某地铁车站基坑工程,研发一种预埋泥浆扶壁墙,并与无扶壁工况做对比,进行开挖前后支护结构及周边土体的变形研究。得出以下结论:

(1)预埋泥浆扶壁墙可以提高被动区土体的强度,提升支护体系的受力性能,减少围护结构侧向位移,同时也减小了坑外地层的变形和影响范围。

(2)相较原支护体系,支护体系中预埋泥浆扶壁墙可在每一工况下均能发挥重要作用,优先控制坑外土体不利变形,最不利工况下地表沉降变形降幅可达 73.3%,紧邻围护墙体的深层土体最大水平位移降幅可达 66.4%。

(3)预埋泥浆扶壁墙能够对抗外土体变形所产生的角应变和拉应变最大值及影响范围产生约束,进而对周边建筑物的受力变形起到一定控制作用。

参考文献

- [1] 李丙坤. 深基坑桩墩扶壁式复合土钉墙支护结构数值模拟分析与研究 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011. (LI B K. Study on numerical simulation analysis of pile-anchored and soil nailed-wall in deep excavation[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- [2] HSIEH P G, OU C Y, HSIEH W H. Efficiency of excavations with buttress walls in reducing the deflection of the diaphragm wall[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(5): 1087-1102.
- [3] LIM A, HSIEH P G, OU C Y. Evaluation of buttress wall shapes to limit movements induced by deep excavation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 78: 155-170.
- [4] HSIEH P G, OU C Y. Mechanism of buttress walls in restraining the wall deflection caused by deep excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 82: 542-553.
- [5] 李森坤. 横隔墙布置方式对开挖前降水引发基坑变形影响规律研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019. (LI M K. Effect of cross wall layout on foundation deformation caused by dewatering before soil excavation[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019. (in Chinese))
- [6] 曾超峰, 廖欢, 李森坤, 等. 内隔墙长度对抽水引发基坑围挡侧移的影响 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(12): 2252-2259. (ZENG C F, LIAO H, LI M K, et al.

- Effect of buttress wall length on retaining wall deflection induced by dewatering[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(12): 2252-2259. (in Chinese))
- [7] OU C Y, HSIEH P G, LIN Y L. Performance of excavations with cross walls[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(1): 94-104.
- [8] TAN Y, LI X, KANG Z J, et al. Zoned excavation of an oversized pit close to an existing metro line in stiff clay: case study[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(6): 1-19.
- [9] LI M G, ZHANG Z J, CHEN J J, et al. Zoned and staged construction of an underground complex in Shanghai soft clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 67: 187-200.
- [10] 吴忠, 王海鹏, 何勇, 等. 扶壁间距对T型地下连续墙开挖稳定性影响研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(S2): 850-853. (WU Z, WANG H P, HE Y, et al. Study on the effect of buttress spacing for T-type diaphragm wall on the stability of excavation[J]. *Building Structure*, 2019, 49(S2): 850-853. (in Chinese))
- [11] 葛梁, 冯龙飞. T型地连墙基坑支护结构的有限元分析[J]. *广东土木与建筑*, 2013, 20(11): 17-20. (GE L, FENG L F. Numerical simulation analysis of T-type diaphragm wall supporting system in a foundation pit[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2013, 20(11): 17-20. (in Chinese))
- [12] 殷俊鹏, 张啸, 阮怀宁, 等. 基坑开挖对T型地下连续墙水平位移的影响[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(7): 232-236. (YIN J P, ZHANG X, RUAN H N, et al. Effect of excavation on horizontal displacement of t-type diaphragm wall[J]. *Science and Technology and Engineering*, 2017, 17(7): 232-236. (in Chinese))
- [13] HSU C F, KUAN C F, CHEN S L. Three-dimensional numerical analysis on the Influence of buttress wall removal timing on the lateral deformation of diaphragm walls during deep excavation[J]. *Buildings*, 2023, 13(11): 2678.
- [14] 武峰, 刘永超, 王洪磊, 等. 废弃泥浆配置膏状浆液的研究及应用//中国建筑学会地基基础学术大会论文集(2022). 北京: 中国建筑学会地基基础分会, 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京金山基础工程咨询有限公司, 2023: 561-567. (WU F, LIU Y C, WANG H L, et al. Research and application of paste grout in waste mud[C]//Proceedings of the Collection of Papers of Foundation Academic Conference of China Academy of Architecture (2022). Beijing: Institute of Soil and Foundation Engineering-ASC, Institute of Foundation Engineering of China Academy of Building Research, Beijing Jinshan Foundation Engineering Consulting Co., Ltd., 2023: 561-567. (in Chinese))
- [15] 曹宝飞. 水泥土变形模量及弹性模量试验研究[J]. *中国西部科技*, 2006(34): 18-19. (CAO B F. Experimental study on deformation modulus and elastic modulus of cemented soil[J]. *Science and Technology of West China*, 2006(34): 18-19. (in Chinese))
- [16] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Z H. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))
- [17] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [18] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [19] 天津市住房和城乡建设委员会. 天津市建筑基坑工程技术规程: DB/T 29—202—2022[S]. 天津: 天津建委, 2022. (Tianjin Housing and Urban-Rural Construction Commission. Tianjin technical specification for retaining and protection of building foundation excavation: DB/T 29—202—2022[S]. Tianjin: Tianjin Construction Commission, 2022. (in Chinese))
- [20] 罗阳洋. 软土地区深基坑的过大变形分析[D]. 天津: 天津大学, 2012. (LUO Y Y. Analysis on excessive deformation during deep foundation excavation in soft soil area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))

收稿日期: 2024-11-30