

DOI: 10.7672/sgjs2024210041

废弃泥浆改性机理与工程应用研究*

张慧乐¹, 丁显坤², 杨发¹, 吴丹¹, 王述红²

(1. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

[摘要] 为妥善处理并利用岩土工程施工产生的废弃泥浆, 首先完成原材料选取和材料基本性能测试, 然后进行多因素试验设计, 通过无侧限抗压强度试验研究不同水泥和玄武岩纤维掺量对废弃泥浆改性材料力学性能的影响, 并利用扫描电镜(SEM)试验从微观角度分析废弃泥浆改性机理, 最后依据试验结果开展实际工程应用研究, 验证废弃泥浆应用效果。试验结果表明, 掺加水泥和玄武岩纤维可有效改善废弃泥浆改性材料力学性能, 掺加玄武岩纤维后改性材料压缩变形阶段有效缩短; 微观上, 水泥与泥浆颗粒形成胶结团粒, 玄武岩纤维将胶结团粒和泥浆颗粒更有效地连接, 形成更紧密的整体结构单元。

[关键词] 泥浆; 改性材料; 水泥; 玄武岩纤维; 力学性能

[中图分类号] TU44

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0041-05

Study on Modification Mechanism and Engineering Application of Waste Mud

ZHANG Huile¹, DING Xiankun², YANG Fa¹, WU Dan¹, WANG Shuhong²

(1. China Jingye Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: In order to properly deal with and utilize the waste mud produced by geotechnical engineering construction, the selection of raw materials and the basic performance test of materials are first completed, and then the multi-factor test design is carried out. The influence of different cement and basalt fiber content on the mechanical properties of waste mud modified materials is studied by unconfined compressive strength tests, and the modification mechanism of waste mud is analyzed from the microscopic point of view by scanning electron microscope (SEM) tests. Finally, the practical engineering application research is carried out according to the test results, and the application effect is verified. The test results show that the addition of cement and basalt fiber can effectively improve the mechanical properties of waste mud modified materials, and the compression deformation stage of modified materials is effectively shortened after adding basalt fiber. Microscopically, cement and mud particles form cemented agglomerates, and basalt fiber connects cemented agglomerates and mud particles more effectively to form a closer overall structural unit.

Keywords: mud; modified materials; cement; basalt fiber; mechanical property

1 无侧限抗压强度室内试验

1.1 原材料

以工程现场常见的黏性土泥浆为基础材料, 其相对密度为 2.55, 液限为 42.5%, 塑限为 21.1%, 塑性指数为 19.4, 含水率为 100%。

试验采用混凝土外加剂检验专用基准水泥, 即

P·I 42.5 水泥, 其比表面积为 358m²/kg, 初凝、终凝时间分别为 172, 234min, 3, 7, 28d 抗压强度分别为 26.45, 33.09, 46.85MPa。

试验用玄武岩纤维直径 17μm, 长度 6mm, 密度 2.8 ~ 3.3g/cm³, 抗拉强度 4 100MPa, 弹性模量 100GPa。

1.2 试验设计

无侧限抗压强度室内试验主要考虑水泥掺量及玄武岩纤维掺量对废弃泥浆力学性能的影响, 分

* 辽宁省重点研发计划(2019JH2/10100035)

[作者简介] 张慧乐, 高级工程师, E-mail: zhanghuile@cribc.com

[收稿日期] 2024-05-15

析水泥掺量的影响时,玄武岩纤维掺量设为 0,水泥掺量分别设为 5%,10%,15%,20%,25%,共制作 90 个泥浆试件,养护龄期为 28d;分析玄武岩纤维掺量的影响时,水泥掺量设为 20%,玄武岩纤维掺量分别设为 0.25%,0.50%,0.75%,1.00%,共制作 72 个泥浆试件,养护龄期为 28d。

依据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》,制作尺寸为 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的立方体泥浆试件。试验设备采用电子万能试验机,以位移控制方式加载,加载速度为 1mm/min,试验过程中可自动绘制应力-应变关系曲线。

1.3 试件破坏形态

未参加玄武岩纤维和参加玄武岩纤维的泥浆试件养护 28d 后无侧限抗压典型破坏形态分别如图 1,2 所示。由图 1,2 可知,未参加玄武岩纤维时泥浆试件属于直观的脆性破坏,参加玄武岩纤维后泥浆试件破坏形态类似低强度混凝土试件,裂缝处纤维有一定的拉结作用,对脆性破坏有一定的改善。

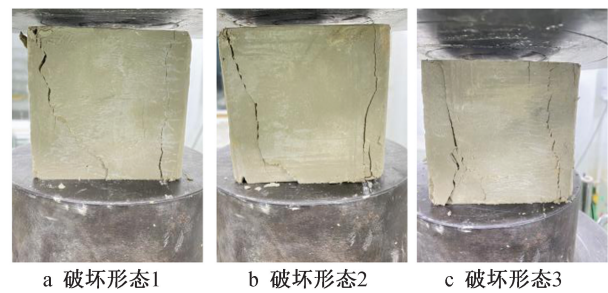


图 1 未参加纤维试件典型破坏形态

Fig. 1 Typical failure modes of specimens without fiber

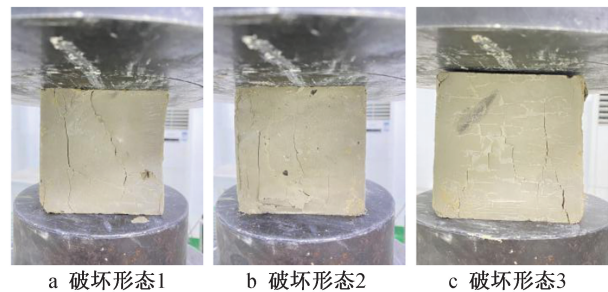


图 2 参加纤维试件典型破坏形态

Fig. 2 Typical failure modes of added fiber specimens

1.4 水泥掺量的影响

水泥掺量 5%,10%,15%,20%,25% 对应的泥浆试件 28d 无侧限抗压强度分别为 419.8,479.7,431.8,503.7,575.7kPa,泥浆试件应力-应变关系曲线如图 3 所示,水泥掺量-抗压强度关系曲线如图 4 所示。由图 3,4 可知,泥浆试件初期压缩变形较大,约为总变形的 0.8%,说明试件内部孔隙相对较多,

密实度欠佳;去除前期压缩变形后,掺加水泥的泥浆试件线弹性变形为总变形的 1%~1.5%,达到极限强度后应力-应变关系曲线快速下降,属于典型脆性材料破坏特征;随着水泥掺量的增加,泥浆试件抗压强度由 419.8kPa 稳步增至 575.7kPa,水泥掺量-抗压强度关系曲线近似呈线性。

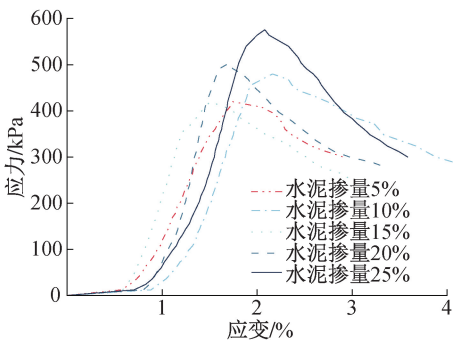


图 3 不同水泥掺量下养护 28d 时泥浆试件应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress and strain relationship curves of slurry specimens cured for 28d under different cement contents

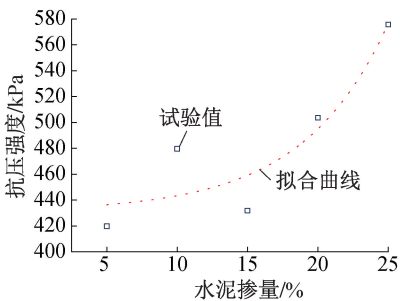


图 4 养护 28d 时泥浆试件水泥掺量-抗压强度关系曲线

Fig. 4 Cement content and compressive strength relationship curves of slurry specimens cured for 28d

1.5 玄武岩纤维掺量的影响

玄武岩纤维掺量 0.25%,0.50%,0.75%,1.00% 对应的泥浆试件 28d 无侧限抗压强度分别为 743.6,707.6,995.4,1 043.4kPa,泥浆试件应力-应变关系曲线如图 5 所示,玄武岩纤维掺量-抗压强度关系曲线如图 6 所示。由图 5,6 可知,当养护条件与水泥掺量相同时,参加玄武岩纤维后泥浆试件抗压强度较未参加玄武岩纤维时增大 48%~107%;参加玄武岩纤维后泥浆试件压缩变形较未参加玄武岩纤维时明显改善,压缩变形约为总变形的 0.3%,说明参加玄武岩纤维能够有效改善材料颗粒间的孔隙和密实性;去除前期压缩变形后,参加玄武岩纤维的泥浆试件线弹性变形为总变形的 1%~1.5%,达到极限强度后应力-应变关系曲线同样下

降,但下降趋势变缓,说明掺加玄武岩纤维对试件破坏形态具有一定影响,但试件仍表现出典型脆性破坏特征;随着玄武岩纤维掺量的增加,泥浆试件抗压强度由 743. 6kPa 稳步增至 1 043. 4kPa,玄武岩纤维掺量-抗压强度关系曲线同样近似呈线性。

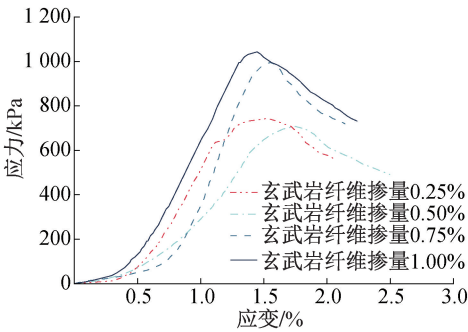


图5 不同玄武岩纤维掺量下养护 28d 时泥浆试件应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress and strain relationship curves of slurry specimens cured for 28d under different basalt fiber contents

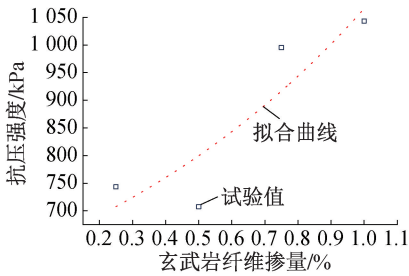


图6 养护 28d 时泥浆试件玄武岩纤维掺量-抗压强度关系曲线

Fig. 6 Basalt fiber content and compressive strength relationship curves of slurry specimens cured for 28d

2 SEM 微观试验

2.1 试验设计

为更好地从微观角度探讨水泥和玄武岩纤维对废弃泥浆的改性机理,从破坏处取样,将样品切成 1cm×1cm×1cm 的微观试件,使用 SEM 试验分析技术,测试改性泥浆微观形态,试验方案如表 1 所示。

表 1 微观试验设计方案

Table 1 Microscopic test design scheme			
试件类别	水泥掺量/%	玄武岩纤维掺量/%	养护龄期/d
纯泥浆	0	0	7(烘干)
仅掺加水泥	20	0	7,28
掺加水泥和玄武岩纤维	20	0.5	7,28

2.2 纯泥浆试件测试结果

将纯泥浆试件烘干处理后进行微观测试,结果

如图 7 所示。由图 7 可知,纯泥浆试件固结体颗粒大小较均匀,类似级配均匀的细骨料,且颗粒之间较松散地叠合,孔隙较大。

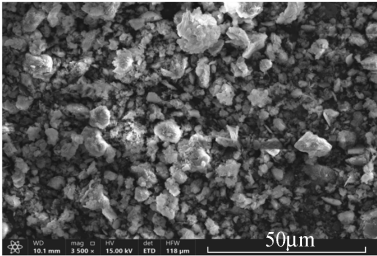
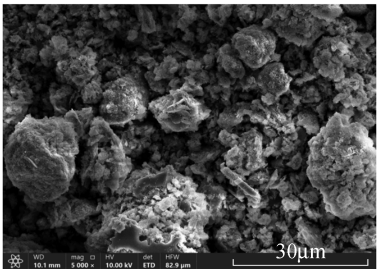


图7 纯泥浆试件 SEM 测试结果

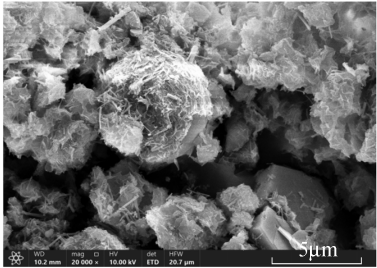
Fig. 7 SEM test results of pure mud specimens

2.3 仅掺加水泥试件测试结果

当水泥掺量为 20%时,试件养护 7,28d 的 SEM 测试结果如图 8 所示。由图 8 可知,仅掺加水泥试件固结体颗粒大小不一,在局部水泥和泥浆颗粒逐步形成胶结团粒,该团粒与泥浆颗粒之间形成级配良好的骨料,且可相互较好地咬合。随着养护龄期的增加,胶结团粒逐渐增多,孔隙逐步被胶结团粒和泥浆颗粒填充。



a 养护7d



b 养护28d

图8 仅掺加水泥试件 SEM 测试结果

Fig. 8 SEM test results of specimens added cement

2.4 掺加水泥和玄武岩纤维试件测试结果

当水泥掺量为 20%、玄武岩纤维掺量为 0.5%时,试件养护 7,28d 的 SEM 测试结果如图 9 所示。由图 9 可知,掺加玄武岩纤维后,在胶结团粒和泥浆颗粒上类似设置了锚固筋,玄武岩纤维将胶结团粒和泥浆颗粒连接,形成更大的稳定结构单元。随着养护龄期的增加,各骨料之间更紧密地咬合、连接。

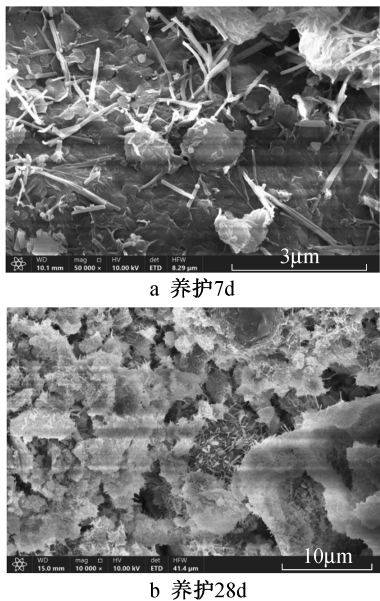


图 9 掺加水泥和玄武岩纤维试件 SEM 测试结果

Fig. 9 SEM test results of specimens added cement and basalt fiber

3 工程应用

3.1 应用依据

由试验研究结果可知,在废弃泥浆中掺加水泥可提高材料抗压强度,在相同条件下掺加玄武岩纤维后抗压强度会显著提高。由应力-应变关系曲线可知,改性材料呈典型的脆性材料破坏形态,前期存在较明显的压缩变形,仅掺加水泥时压缩变形阶段较长,掺加玄武岩纤维后可有效缩短压缩变形阶段。由 SEM 微观测试结果可知,掺加水泥后泥浆中的胶结团粒与土颗粒间的胶结、咬合作用增强,形成较大的结构单元,随着养护龄期的增加,颗粒间的孔隙被逐步填充,整个结构更紧密;掺加玄武岩纤维后,纤维将胶结团粒和黏土颗粒连接,随着养护龄期的增加,各骨料被更紧密地胶结、咬合、连接,形成了更致密的整体结构单元,对材料密实性和力学性能改善显著。

综上所述,掺加水泥和玄武岩纤维可有效改善废弃泥浆力学性能,为工程现场应用和材料开发提供了理论依据。但掺加水泥和玄武岩纤维后改性材料力学性能受多种因素影响,实际工程中废弃泥浆成分复杂多变,且 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》明确指出水泥强度直接影响水泥土强度,水泥强度提高 10MPa,水泥土强度增大 20%~30%。为此,本文使用特定原材料得出的试验结果无法对实际应用进行定量指导,可进行定性化利用。

掺加水泥后改性材料前期压缩变形较大,这说明水泥土类复合地基前期变形较大。为研究龄期

对压缩变形的影响,进行不同水泥掺量下养护龄期为 90d 的无侧限抗压强度试验,得到的泥浆试件应力-应变关系曲线如图 10 所示。对比图 3,10 可知,随着养护龄期的增加,改性材料抗压强度有所增大,前期压缩变形也有一定的改善,但不显著,因此对于变形控制要求严格的建(构)筑物,建议谨慎采用水泥土类复合地基。

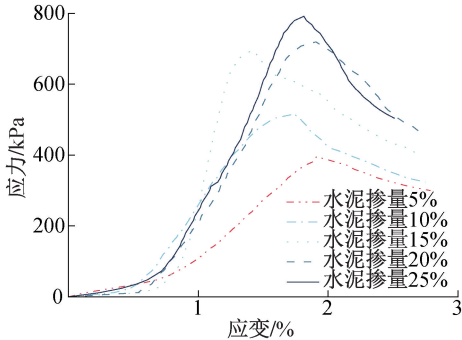


图 10 不同水泥掺量下养护 90d 时泥浆试件应力-应变关系曲线

Fig. 10 Stress and strain relationship curves of slurry specimens cured for 90d under different cement contents

3.2 废弃泥浆直接利用

某建筑基坑开挖深度 16.5m,支护边坡紧邻市政主干道且存在燃气、电信光缆等多条管线,支护设计采用上部混凝土挡墙+下部双排桩,桩间止水采用旋喷桩帷幕方案。由于上部混凝土挡墙基坑开挖深度范围内均为回填土层且坡顶附近存在多条重要管线,故先行施工微型钢管桩对土体进行初步加固,然后进行土钉墙喷锚处理,分段挖至护坡桩作业面,最后施工护坡桩、冠梁和混凝土挡墙等。如果混凝土挡墙无法与其后方土体形成有效整体,混凝土挡墙失效且众多管线存在挤压移位、破损风险。考虑到旋喷桩废弃泥浆中含有水泥,其硬化后的固体有一定强度,故在混凝土挡墙与其后部土体空隙内填充部分轻质陶粒和废弃旋喷桩泥浆(见图 11),实际变形监测结果表明该方式处理效果良好。

3.3 废弃泥浆掺加水泥应用效果

某建筑基坑开挖深度 12.1m,坡顶紧邻多条重要市政管线和新施市政道路,基坑开挖深度 1 倍影响范围内存在老旧住宅楼,设计采用上部混凝土挡墙+下部双排桩方案,桩间止水采用旋喷桩帷幕。工程正式实施前建设单位在坡顶增设了箱式变电站,且在支护桩施工期间发现箱式变电站下存在大型废弃洞室。鉴于箱式变电站的重要性和地下洞

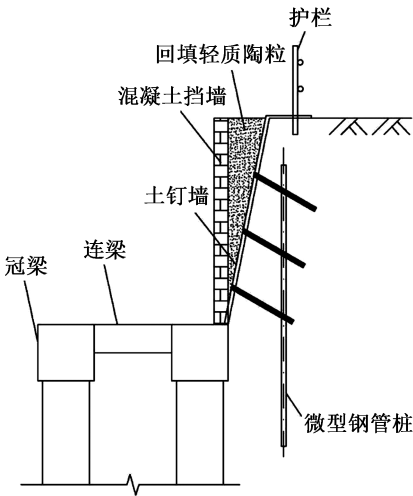


图 11 狭小空隙填充废弃泥浆

Fig. 11 Narrow gap filling waste mud

室如不处理可能带来的风险,在探明洞室与周边管道等无直接联系后,首先测量废弃泥浆相对密度,然后掺加约 10%的 P · O 42.5 水泥,将水泥土浆液填充至地下洞室内(见图 12),实际变形监测结果表明该处理方式较好地保证了箱式变电站的安全和支护体系的稳定。

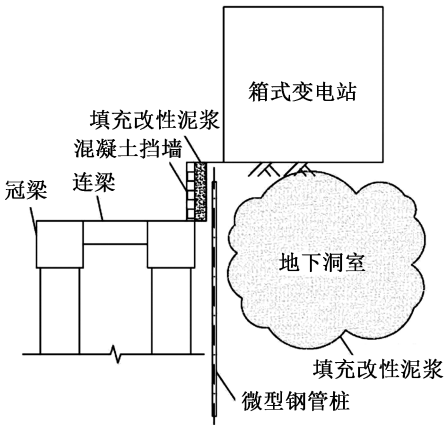


图 12 地下洞室填充掺加水泥的废弃泥浆

Fig. 12 Underground caverns filling waste mud added cement

3.4 废弃泥浆掺加水泥和玄武岩纤维应用效果

因特殊原因,某工程局部围墙需重新砌筑,考虑到现场施工旋喷桩时产生了大量废弃泥浆,在泥浆中掺加水泥和玄武岩纤维制成砌块,用于围墙砌筑。首先测量废弃泥浆相对密度,按 P · O 42.5 水泥掺量约 20%、玄武岩纤维掺量约 0.5% 进行控制,现场利用竹胶板制作尺寸为 240mm×240mm×10mm 砌块,待其固结硬化后用于围墙砌筑,该工程完工后围墙仍处于安全可控状态,可知在废弃泥浆中掺加水泥和玄武岩纤维具有良好的工程应用效果。

4 结语

本文利用工程中常见的废弃泥浆,研究了特定情况下掺加水泥和玄武岩纤维后,改性材料无侧限抗压强度、应力-应变关系曲线,通过 SEM 微观测试探讨其改性机理,并进行了工程应用,主要得出以下结论。

1) 掺加水泥可有效改善改性材料强度,掺加玄武岩纤维可有效缩短材料压缩变形阶段。

2) 微观上,水泥与泥浆颗粒胶结形成较大胶结团粒,与泥浆颗粒之间形成良好级配。掺加玄武岩纤维后,纤维将胶结团粒和泥浆颗粒连接,形成更大的稳定结构单元,随着养护龄期的增加,各骨料之间更紧密地胶结、咬合、连接,有效提高了固结体密实度和强度。

3) 工程实践表明,掺加水泥和玄武岩纤维的废弃泥浆重复利用效果较好,需对水泥和玄武岩纤维掺量、其他外加剂掺加效果及其他改性方法等进行进一步研究。

参考文献:

[1] 陕西省建筑科学研究院. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑业出版社,2009.
SCEGC Scientific Research Institute. Standard for test method of performance on building mortar; JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

[2] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012 [S]. 北京:中国建筑业出版社, 2013.
China Academy of Building Research. Technical code for ground treatment of buildings; JGJ 79—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[3] 北京波森特岩土工程有限公司,建研地基基础工程有限责任公司. 预拌流态固化土填筑技术标准: T/CECS 1037—2022 [S]. 北京:中国建筑业出版社,2022.
Beijing Puissant Geotechnical Engineering Co., Ltd., CABR Foundation Engineering Co., Ltd. Technical standard for backfilling project by using premixed fluid solidifying soil; T/CECS 1037—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.

[4] 中国建筑科学研究院. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012 [S]. 北京:中国建筑业出版社, 2012.
China Academy of Building Research. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations; JGJ 120—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[5] 张慧乐,李书伟,张慧东,等. 后插笼二次高压注浆微型桩加固狭小基坑肥槽软基 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (6): 175-177.
ZHANG H L, LI S W, ZHANG H D, et al. Backfill improvement of foundation trench by post-grouting [J]. Industrial construction, 2018, 48 (6): 175-177.

渐增大,基坑底部隆起增大。

2)随着砂卵石土层渗透系数的增大,地表竖向和水平位移及围护结构水平位移均逐渐增大,而基坑底部隆起逐渐减小。相对于基坑边缘,基坑中心区域受渗流的影响较大,渗流作用的增大可抑制基坑底部的隆起。

3)随着围护结构厚度的增大,地表竖向和水平位移、围护结构水平位移及基坑底部隆起均逐渐减小。基坑中心区域底部隆起最大,围护结构厚度增大可有效控制基坑底部隆起,并减小围护结构水平位移,但当围护结构厚度增至一定程度时,围护结构水平位移减幅降低。

4)实际基坑开挖过程中,建议重点关注地层渗透系数,对于渗透系数大的地层,应采取措施减小基坑变形,在考虑施工成本的前提下,适当增大围护结构厚度,可控制基坑底部隆起,减小围护结构水平位移。

参考文献:

[1] 何华飞,王富强,郭飞,等. 多层承压水地层盖挖基坑钢管柱竖向变形和对结构影响的研究[J]. 市政技术,2024,42(5): 63-68.

HE H F, WANG F Q, GUO F, et al. Study on vertical deformation of steel pipe columns in multi-story pressure water ground cover excavation and its impact on structures [J]. Journal of municipal technology, 2024, 42 (5): 63-68.

[2] 刘怀宇. 基坑底板施作后降水渗流对基坑变形影响规律[J]. 市政技术,2024,42(5):123-128.

(上接第 45 页)

[6] 房凯,张忠苗,刘兴旺,等. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S2):238-241.

FANG K, ZHANG Z M, LIU X W, et al. Pollution of construction waste slurry and prevention measures[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(S2):238-241.

[7] 吕林海,谢开仲,王炳华,等. 基于正交设计试验的地铁施工废弃泥浆分离影响因素研究[J]. 施工技术, 2022, 51(4): 123-127.

LÜ L H, XIE K Z, WANG B H, et al. Research on influencing factors of subway construction waste slurry separation based on orthogonal design test[J]. Construction technology, 2022, 51 (4):123-127.

[8] 杨爱武,王韬,许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23 (5): 996-1004.

YANG A W, WANG T, XU Z L. Experimental study on lime

LIU H Y. Influence law of precipitation seepage on deformation after construction of foundation excavation bottom plate [J]. Journal of municipal technology, 2024, 42 (5): 123-128.

[3] 朱宇. 基于变形控制的基坑开挖与邻近运营铁路相互影响分析[J]. 甘肃科学学报,2024,36(2):110-116.

ZHU Y. Analysis of mutual influence between excavation for foundation excavation and adjacent operating railways based on deformation control [J]. Journal of Gansu sciences, 2024, 36 (2): 110-116.

[4] 邓晨. 深基坑降水方案设计及沉降变形规律分析[J]. 江西建材,2024(3):139-141.

DENG C. Design of deep foundation excavation dewatering scheme and analysis of settlement deformation law [J]. Jiangxi building materials, 2024 (3): 139-141.

[5] 黄帅. 基于数值模拟的超深基坑降水技术及变形研究[J]. 地下水,2024,46(2):47-49.

HUANG S. Research on dewatering technology and deformation of ultra-deep foundation excavation based on numerical simulation [J]. Ground water, 2024, 46 (2): 47-49.

[6] 马玉飞,刘焕玉,熊辉,等. 深基坑开挖降水对周边环境的影响分析[J]. 水利技术监督, 2022(7): 250-255.

MA Y F, LIU H Y, XIONG H, et al. Analysis of the impact of deep foundation pit excavation and dewatering on the surrounding environment[J]. Technical supervision in water resources, 2022 (7): 250-255.

[7] 雷华. 不同初始水头下基坑降水对开挖影响研究[J]. 低温建筑技术,2018,40(3):150-152,157.

LEI H. Study on influence of foundation pit dewatering on excavation under different initial water head[J]. Low temperature architecture technology,2018,40(3):150-152,157.

and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil [J]. Journal of engineering geology, 2015, 23(5):996-1004.

[9] 赵玉波,代跃强,卢守龙,等. 狭小场地条件下深基坑建筑废弃泥浆固化回填施工技术[J]. 施工技术, 2023, 52(10): 95-98.

ZHAO Y B, DAI Y Q, LU S L, et al. Construction technology for curing backfill of construction waste mud in deep foundation excavation under narrow site conditions [J]. Construction technology, 2023, 52(10):95-98.

[10] 王峻,李海涛,吴东阳,等. 泥水盾构废弃泥浆无害化处理技术及资源化处置分析[J]. 施工技术, 2023, 52(23): 27-35.

WANG J, LI H T, WU D Y, et al. Analysis on zero discharge treatment technology and resource disposal of waste slurry[J]. Construction technology, 2023, 52(23):27-35.