

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.015

弱膨胀土宏-微观性能 主动调控方法

路德春¹, 蔡涛¹, 郭飞², 王国盛¹, 姜瑜², 杜修力¹

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;

2. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 膨胀土因蒙脱石等黏土矿物的水敏性及晶格吸胀特性, 易产生显著的胀缩变形, 严重威胁城市轨道交通隧道工程等结构的安全与稳定。针对传统凝胶材料固化技术的高能耗、高碳排放及耐久性不足等问题, 提出一种弱膨胀土的性能主动调控方法。通过研发新型环保型固化剂与水泥-石灰复合调控剂, 对弱膨胀土的宏-微观力学性能进行动态调控, 实现其力学性能、耐久性与环保性的全面提升。基于多尺度试验方法, 揭示固化剂通过离子交换、凝胶网络形成、物理填充及骨架强化等多重机制协同作用, 可主动调控土体微结构与力学性能。结果表明: 水泥-石灰-固化剂复合体系显著提升膨胀土的力学性能与耐久性能, 其核心在于微观层面胶凝物质对孔隙的定向填充及三维网络结构的构建; 推荐工程最佳改良配合比为水泥:石灰:固化剂为 3%:3%:0.02%。该配比在保证改良效果的同时, 可大幅减少水泥和石灰的用量, 有效控制工程成本。本研究从化学-物理协同调控角度, 为绿色高效改良膨胀土提供理论支撑与技术路径。

关键词: 城市轨道交通; 性能主动调控; 弱膨胀土; 力学性能; 耐久性能; 微观机理

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0131-10

Active Macro-Micro Performance Regulation Method for Weakly Expansive Soils

Lu Dechun¹, Cai Tao¹, Guo Fei², Wang Guosheng¹, Jiang Yu², Du Xiuli¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 2. Beijing Municipal Construction Group Co., Ltd., Beijing 100045)

Abstract: Expansive soils, due to the water sensitivity of clay minerals such as montmorillonite and their lattice swelling characteristics, are prone to significant swelling and shrinkage deformation, which seriously threatens the safety and stability of urban rail transit engineering structures such as tunnels and subgrades. In response to issues such as high energy consumption, high carbon emissions, and insufficient durability associated with traditional cementitious material stabilization techniques, this study proposes an active performance regulation method for weakly expansive soils. By developing a novel environmentally friendly stabilizer and a cement-lime composite regulating agent, the macro- and micro-mechanical properties of weakly expansive soils are dynamically regulated, achieving comprehensive improvements in their mechanical performance, durability, and environmental friendliness. Based on multi-scale testing methods, it is revealed that the stabilizer can actively regulate the soil microstructure and mechanical properties through the synergistic effects of multiple mechanisms, including ion exchange, gel network formation, physical filling, and skeleton reinforcement. The results indicate that the cement-lime-stabilizer composite

收稿日期: 2025-07-23 修回日期: 2026-03-06

第一作者: 路德春, 男, 博士, 教授, 主要从事岩土与城市地下工程领域研究, dechun@bjut.edu.cn

通信作者: 王国盛, 男, 博士, 教授, 主要从事岩土塑性力学与非连续计算领域研究, wangguosheng@bjut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52025084, 52378471, 52438005)

引用格式: 路德春, 蔡涛, 郭飞, 等. 弱膨胀土宏-微观性能主动调控方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 131-140.

system significantly enhances the mechanical properties and durability of expansive soil. The core mechanism lies in the targeted filling of pores by cementitious materials at the microscopic level and the construction of a three-dimensional network structure. The recommended optimal mix ratio for engineering improvement is cement : lime : stabilizer = 3% : 3% : 0.02%. This ratio ensures the effectiveness of improvement while substantially reducing the amounts of cement and lime used, effectively controlling engineering costs. From the perspective of chemical-physical synergistic regulation, this study provides theoretical support and a technical pathway for the green and efficient improvement of expansive soils.

Keywords: urban rail transit; active performance regulation; weakly expansive soils; mechanical properties; durability; microscopic mechanisms

在城市轨道交通建设中,弱膨胀土灾害对隧道等地下工程的结构安全与长期运营构成严重威胁。该类土体富含蒙脱石等亲水性黏土矿物,在水分子作用下产生显著胀缩变形,易引发路基沉陷、边坡失稳、隧道侧壁挤出与收敛变形及仰拱隆起与底鼓等工程灾害,据相关研究统计^[1-3],年均经济损失达数百亿元。在隧道工程中,土壤固化是一种高效、环保的地基处理与支护技术。传统方法主要依靠水泥、石灰等胶结材料,虽能提升土体强度,但普遍存在力学性能提升有限、耐久性不足及环境友好性差等问题^[4]。因此,研发高效、耐久且环境友好的膨胀土改良新技术是当前岩土工程领域的重要课题。

近年来,研究主要沿两个方向深入:一是传统材料的优化与固废资源化利用,如矿渣、电石渣及铁尾矿砂等的复合使用,揭示协同固化机制与粒料效应,提升土体强度与稳定性^[5];二是新型环保材料的开发,包括木质素、黄原胶等生物基添加剂^[6-7],以及橡胶颗粒、酶诱导碳酸盐沉淀、地聚合物和相变材料等,从不同机理层面拓展了改良途径^[8-9]。此外,土工格栅加筋、微波改性等工程技术也为宏观加固与物理场改良提供了补充^[10-11]。然而,现有改良多属于“被动式”,即采用固定配比一次性处理,缺乏根据土体特性与工程目标进行动态调整的机制,难以实现效果最优化与材料高效利用。尽管主动调控思想在冻结法、微生物加固等领域已有成效^[12],但在膨胀土化学固化中,系统性的性能主动调控方法研究仍较为欠缺。

针对上述不足,本文提出一种面向隧道工程的膨胀土性能主动调控方法。该方法首先系统识别土样的初始工程特性,结合具体工程对强度、变形与耐久性的要求,确立性能目标;进而以此为导向,靶向研发新型环保固化剂,并优化其与微量水泥、石灰构成的复合调控体系;通过引入调控剂并建立反馈机制,实现对改良土体宏-微观性能的动态、可调节干预。以典型弱膨胀土为例,开发新型环保固化材料,结合水泥-石灰形成复合体系,通过宏观力学试验、耐久性测试

及扫描电镜、X射线衍射等微观分析,系统揭示其强度增长、变形抑制与耐久性提升机理,验证所述主动调控方法的有效性与优势。本研究旨在以更低的材料与环境成本实现更精准的性能调控,为城市轨道交通隧道工程的膨胀土治理提供一种低碳、高效的新方法。

1 土体性能主动调控方法

通过化学-物理多重机制协同作用,主动干预土体微观结构与宏观力学性能,本文提出土体性能主动调控方法,包括性能主动调控目标、调控原理及调控流程。

1.1 性能主动调控目标

根据土体的工程应用场景,制定性能主动调控目标主要包括:①提高力学性能,在相对较低胶凝材料掺量条件下,通过固化剂与水泥、石灰的协同作用,实现土体强度、变形能力及加州承载比(California bearing ratio, CBR)等力学性能的显著提升,以满足工程规范要求;②增强耐久性,通过改善土体微结构,形成致密的胶结网络与骨架结构,使改良土在经历冻融循环与侵蚀环境等长期作用后仍能保持较高的耐久性和较低的质量损失率;③优化环境与经济效益,采用环保型固化剂替代部分传统材料,降低能耗和碳排放,从而在确保土体性能的同时实现成本效益的最大化;④推动工程从被动修复向主动调控转变,通过前期对土体特性精细的调控,实现工程中对膨胀土的预防性处理,不仅解决现有缺陷,还大幅降低后期维护成本,适应未来绿色可持续发展需求。

1.2 性能主动调控原理

传统的土体改良技术主要依赖于被动修复措施,虽然在一定程度上改善了土体的力学性能,但常因高能耗、高碳排放及耐久性不足等问题而难以满足现代工程对绿色环保和长效稳定的要求。鉴于此,提出一种性能主动调控方法,核心思想是通过分析预调控土体的宏微观组成与力学特性,根据工程应用场景的性能需求,针对性研发新型固化剂,利用化学和物理双重作用主动调节其微观结构和宏观性能,从而实现从“被

动修复”向“主动调控”的转变。其调控思想强调在改良过程中不再仅依赖传统胶结材料的单一作用，而是通过化学反应、物理填充及结构重构等多重机理，主动改善土体内部的微结构与颗粒连接状态。该方法不仅注重力学性能的提升，还将环保性、耐久性及经济性有机结合，实现对土体胀缩特性的精准调控。

1.3 性能主动调控流程

性能主动调控流程是一个系统性、分阶段实施的工程技术方案，如图 1 所示，主要包括 4 个步骤。

1) 土体特性分析与固化剂设计。首先是原位土样力学特性检测，对预改良的土样进行微观矿物组成分析、宏观物理力学特性测试，明确土体中主要矿物的含量及其结构特性，获得土体初始的物理力学指标；其次是固化剂研发，根据原位测试获得的土体结构特性与矿物成分等，针对性的研发能够与土体微观矿物发生物理-化学反应的环保型固化剂，改变土体微观结构特征，增强土体的工程适用性能。

2) 配合比确定与混合工艺。首先是材料成分配比设计与优化，基于固化剂与水泥、石灰对预改良土的协同作用机制，经过大量优化试验确定最佳改良配合比，以达到力学性能、耐久性与成本控制的平衡；其次

是混合与浇筑成型工艺，按照预先确定的添加物配比，测试拌合的先后顺序，再依次混合并制备内部结构质密、均一的试样，形成可复制推广工艺的流程。

3) 固化与养护阶段。该阶段分为初期结构成型与标准条件养护两部分，促进土体微观结构的重组与胶凝网络体系的构建。

4) 多尺度性能测试与反馈优化。首先是宏观力学特性测试，直观评价改良土的整体承载能力和抗裂性能；其次是耐久性测试，通过干湿循环、冻融循环以及离子侵蚀等试验，分析改良后土体在极端环境下的稳定性；然后是微观特性测试，根据所添加物质的基本组成，揭示其中的固化原理，并采用 SEM 测试、XRD 分析及核磁共振分析等对主动调控后试样的微观形貌进行观察，探究胶凝物质在孔隙内的定向填充和骨架结构的形成情况；最后是反馈优化，对比改良后土体测试结果与性能调控目标，如果土体性能没有达到预定目标，通过反复优化固化剂配比与混合工艺，直至土体性能达到性能目标的使用标准。

性能主动调控是一种从宏观到微观全方位优化土体性能的系统工程，通过对固化剂的创新研发、精细的材料配比以及科学的养护与检测流程，实现了土体性能的主动调控，为解决膨胀土工程问题提供了一条绿色、高效且经济的技术路径。

2 性能主动调控方法的应用

为了验证土体性能主动调控方法的有效性，以某工程提取的弱膨胀土为研究对象，开展全流程的应用研究及性能评估。

2.1 弱膨胀土物理力学特性测试

本研究采用的膨胀土材料取自中国安徽省某基础设施建设工程现场。对膨胀土开展 X 射线衍射分析，测试得到膨胀土的矿物组成主要由黏土矿物和碎屑矿物两大类构成，其中各矿物占比及其微观结构特征如图 2 所示。黏土矿物主要由蒙脱石、伊利石、高岭石三类层状硅酸盐组成；碎屑矿物则以石英、长石、方解石等粗颗粒硅酸盐及碳酸盐矿物为主体。

自由膨胀率为 40%~65% 的膨胀土可归类为弱膨胀性土壤^[2]。经检测，本研究使用的弱膨胀土基本物理指标如下：天然含水率 18.9%、比重 2.62、液限 47%、塑限 21.5%、pH 值 7.5、最大干密度 1.89 g/cm³、最佳含水率 1.89%、自由膨胀率 50%。弱膨胀土的粒径分布如下：小于 0.005 mm 的颗粒占 5.13%，粒径在 0.005~0.075 mm 之间的颗粒占 58.20%，大于 0.075 mm

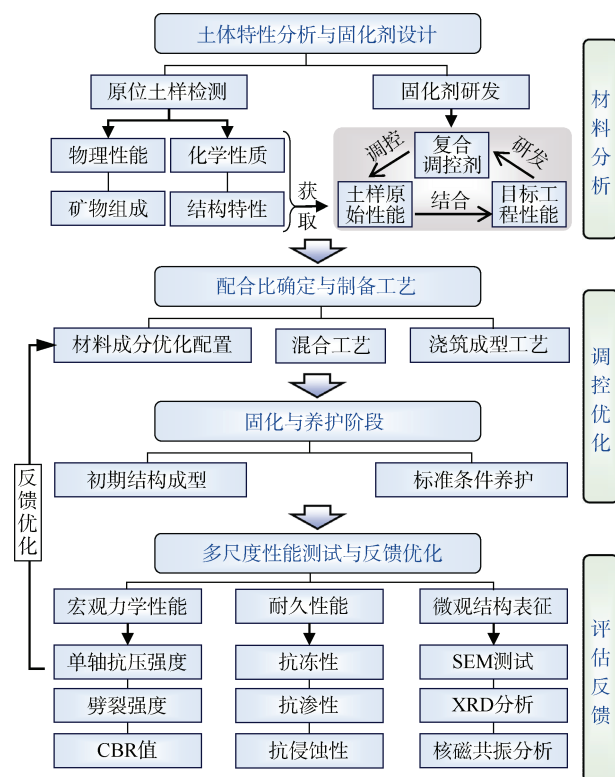


图 1 土体性能主动调控流程

Figure 1 Active performance regulation process for soil

的颗粒占比为 36.67%。试验用土的粒径集中分布在 0.005~0.075 mm, 同时其液限为 47.0%, 自由膨胀率为 50%, 符合弱膨胀土的参数要求。

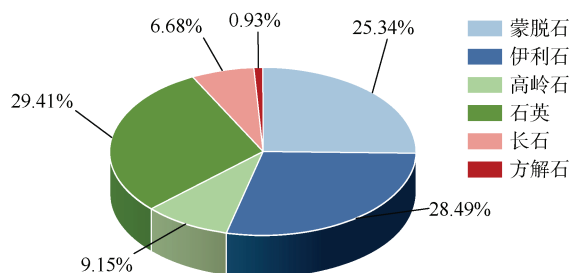


图2 弱膨胀土矿物占比

Figure 2 Mineral composition of the weakly expansive soils

2.2 固化剂设计

结合传统固化材料水泥、石灰与自主研发的新型固化剂, 对土体的宏观力学性能、耐久性能及微观结构开展调控研究。

2.2.1 水泥与石灰

本研究使用的胶凝材料为符合国家标准《通用硅酸盐水泥》GB175—2023^[13]的 II 型普通硅酸盐水泥 P.O 42.5R, 由硅酸盐水泥熟料、混合材料以及石膏制成的水硬性胶凝材料组成。其化学成分及占比为 SiO_2 : Al_2O_3 : Fe_2O_3 : CaO : MgO : SO_3 : 其他为 21.4: 4.36: 3.52: 64.48: 3.43: 2.20: 0.61。所使用的石灰是由石灰石高温煅烧而成的生石灰, 主要成分是 CaO , 遇水反应剧烈, 放热生成熟石灰, 具有强碱性。

2.2.2 固化剂制备

固化剂的研发与制备采用分步混合工艺, 其流程如图 3 所示。固化剂是主动调控的关键介质, 采用功能模块化设计方法, 各组调控性能分工明确。其中, 稳定剂与氯化物用于抑制黏土矿物层间吸水膨胀; 水性环氧树脂-偶联剂聚合作用与降低土体亲水性的分散剂共同生成空间凝胶网络, 增强土颗粒间胶结力; 碱激发剂激活黏土矿物表面活性, 并促进水泥水化反应。土体固化的具体流程如图 4 所示。所使用的固化剂可适配多种缺陷土样及废弃渣土, 但需根据土质差异调整最佳配比; 本研究聚焦弱膨胀土的应用优化,

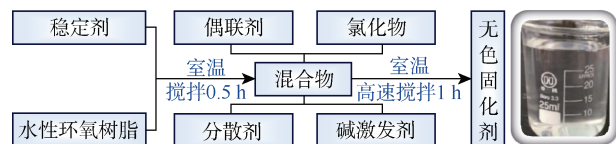


图3 新型固化剂制备流程

Figure 3 Preparation process of the novel stabilizer

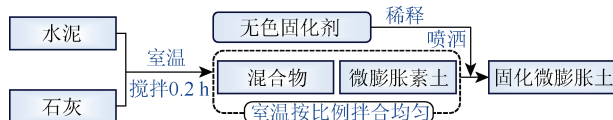


图4 固化土制备流程

Figure 4 Preparation process of stabilized soil

并通过第三方权威检测机构验证了其环保指标符合《土体固化外加剂》(CJ/T 486—2015)^[14]标准要求。目前该技术已成功应用于中国安徽省某道路的弱膨胀土路基处理工程, 展现出显著的经济效益与工程适用性。

2.3 试样制备

如图 5 所示, 获取相应的试验材料后, 将水泥与石灰置于容量为 60 L 的小型滚筒式搅拌机中干拌 5 min 实现初步混合; 随后将经过稀释且占混合料总质量 0.02% 的环保型新型液态固化剂喷洒在水泥、石灰与微膨胀素土混合物, 继续搅拌 10 min 至形成均匀的灰褐色复合土体。成型阶段采用分层压实工艺, 将混合料分两次装入 PVC 模具, 首次填入 80% 模具容积后转移至频率 50 Hz 的电磁式振动台, 施加垂直振动荷载持续 1 min 完成初次密实; 继而补充剩余混合料至满模状态, 重复振动直至密实。成型后的试件在常温、无扰动环境中静置 24 h 完成初期结构形成, 随后脱模编号, 转移至智能温控养护箱, 在温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$ 的标准养护条件下进行养护, 直至达到预设龄期后进行宏-微观性能测试。



图5 测试试样制备流程

Figure 5 Preparation process of test specimens

2.4 改良土体的多尺度性能测试

2.4.1 宏观力学性能测试

对于膨胀土试样的力学性能测试主要包括无侧限抗压强度、劈裂强度与 CBR 值, 用以综合评估固化剂对膨胀土的力学性能提升效果。采用图 6(a)所示的力学加载装置, 轴向最大加载达 500 kN, 用以测量膨胀

土试样的无侧限抗压强度。此外,该装置更换加持模具后,可以测量膨胀土试样的劈裂强度。为了减小加载速率对无侧限抗压强度和劈裂强度的影响,试验过程中,轴向作动器的加载速率均为 0.005 mm/s。

CBR 值测试是一种常用的评定基层材料承载能力的试验方法^[15]。承载能力以材料抵抗局部荷载压入变形的能力来表征,并采用标准碎石的承载能力为标准,以相对值的百分数表示 CBR 值。传统 CBR 值检测方法存在浸水方式不合理、制备试样的含水率不合理及浸水时的上覆压力不合理等诸多问题。为解决上述不足,新研制一种测试膨胀土 CBR 值的多功能 CBR 筒,如图 6(b)所示。试验过程如下:首先对第一层进行贯入试验,记录单位压力 P_1 ;然后拆除最上面试筒,削平上部试筒内的土体,继续对中部试筒进行贯入试验,记录单位压力 P_2 ;最后拆除第二层试筒,削平中部试筒内的土体,继续对下部试筒进行贯入试验,记录单位压力 P_3 。贯入量为 2.5 mm 时,每一层的 CBR 值为:

$$CBR_i = \frac{P_i}{P_{2.5}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, i 为层数; P_i 为每一层记录的单位压力, MPa; $P_{2.5}$ 为标准碎石贯入量为 2.5 mm 时的承载强度, MPa, 按照 CBR 试验的国际标准值 $P_{2.5}=7$ MPa。贯入量为 5 mm 时,标准碎石的承载强度 $P_{5.0}=10.5$ MPa,待检材料 CBR 值为:

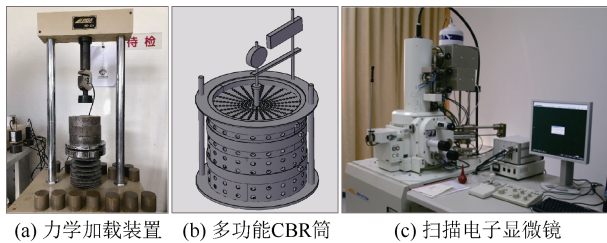


图 6 多尺度试验仪器

Figure 6 Multi-scale testing equipment

$$CBR_i = \frac{P_i}{P_{5.0}} \times 100\% \quad (2)$$

采用式(1)计算 CBR_1 、 CBR_2 、 CBR_3 。随后取三层 CBR 的均值作为整体 CBR 值,即:

$$CBR = \frac{CBR_1 + CBR_2 + CBR_3}{3} \times 100\% \quad (3)$$

2.4.2 耐久性测试

本研究通过冻融循环试验评估固化土的耐久性能,并探究极端气候条件下固化剂的稳定性特征。在冻融交替过程中,膨胀土内部不仅存在水-冰相变效

应,其独特的矿物晶格结构变化及颗粒表面吸附水膜厚度改变还会引发显著的胀缩变形。因此,一般黏土的冻融变形特性难以直接适用于膨胀土体系。试验采用标准方法制备试样后,将其置于冻融试验箱内进行循环处理,冻融循环过程如图 7 所示, -18°C 低温冻结阶段维持 16 h,随后转入 20°C 恒温水浴融化 8 h,构成完整冻融循环单元。基于国内外研究共识,膨胀土经 5 次冻融循环后其工程特性趋于稳定状态。故本文对经历 0~5 次冻融循环作用后的弱膨胀土试样进行工程特性的相关试验研究。

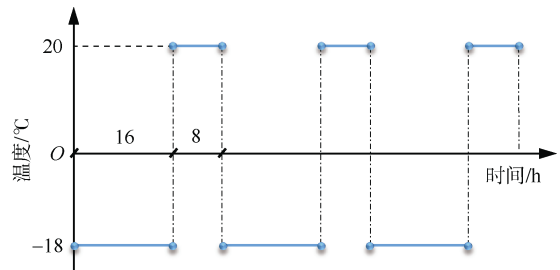


图 7 冻融循环过程示意

Figure 7 Schematic diagram of the freeze-thaw cycle process

2.4.3 微观结构测试

采用图 6(c)所示的扫描电子显微镜 SEM 对试样微观形貌进行表征分析^[16]。随机选取干燥后的试样敲击形成新鲜断面,截取 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 立方体检测单元,经离子溅射仪在断面表面蒸镀 10 nm 厚金膜以消除荷电效应。最终将导电处理后的样品置于 SEM 样品室,在加速电压 15 kV、工作距离 10 mm 条件下进行多尺度形貌观测。

3 测试结果与性能分析

基于扫描电镜试验、无侧限抗压强度、劈裂强度、改良 CBR 测试及冻融循环等多尺度试验,分析主动调控土体结构与性能的效果,揭示其性能调控机制。

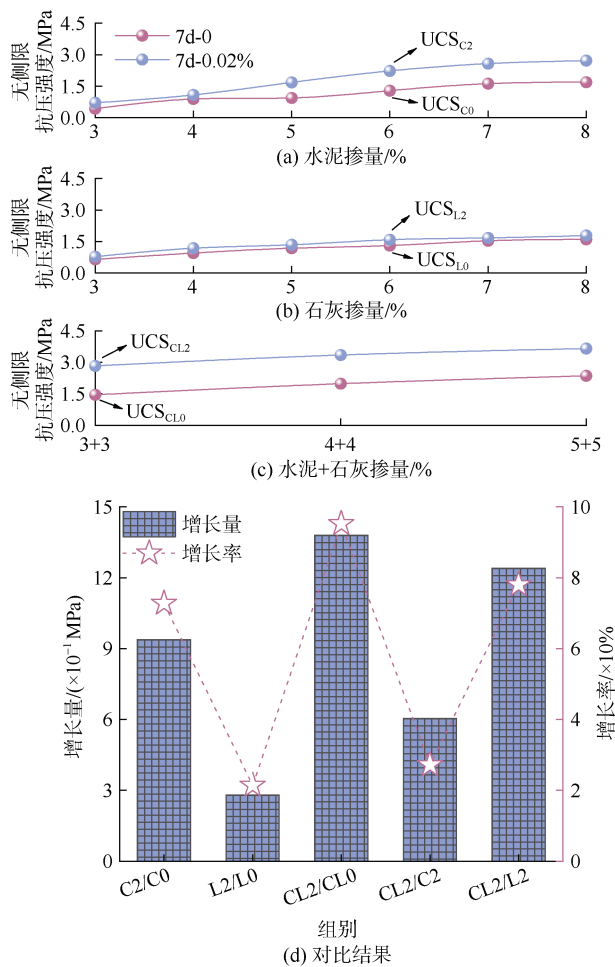
3.1 力学性能测试结果

3.1.1 无侧限抗压强度

图 8 展示了不同固化材料对膨胀土无侧限抗压强度(UCS)的影响规律。图 8(a)表明,7 天龄期时,水泥掺量增加使两种固化土的抗压强度逐步提高,但当水泥掺量达到一定比例后,增长趋于平稳。在相同水泥掺量下,固化剂显著改善了强度,尤其在水泥掺量较低时效果更加明显。随着石灰含量的增加,两种固化土的 UCS 均显著增加,同时石灰与 0.02% 固化剂共同固化效果优于仅石灰固化。随着石灰掺量增多,提升

效果均减缓。

图8(a)显示,水泥与石灰的组合显著提升了抗压强度。随着掺量的增加,固化剂的提升作用有所减弱,但整体强度仍处于较高水平。总体上,水泥石灰组合优于单一材料,固化剂进一步增强了力学性能。为了对比在相同胶凝材料掺量下固化剂对土体性能的改善效果,选取固定总掺量为6%,分别对比单一水泥、单一石灰以及水泥与石灰复合掺入3种情况,并分别考察添加与不添加固化剂时固化土的无侧限抗压强度变化,结果如图8(b)所示。可以看出,UCS_{C2}、UCS_{L2}与UCS_{CL2}相较于不添加固化剂的试样,无侧限抗压强



注:图8(b)中符号含义 C0:水泥掺量为6%时的无侧限抗压强度 USC_{C0}。C2:水泥掺量为6%且固化剂掺量为0.02%时的无侧限抗压强度 USC_{C2}。L0:石灰掺量为6%时的无侧限抗压强度 USC_{L0}。L2:石灰掺量为6%且固化剂掺量为0.02%时的无侧限抗压强度 USC_{L2}。CL0:水泥与石灰掺量均为3%时的无侧限抗压强度 USC_{CL0}。CL2:水泥与石灰掺量均为3%且固化剂掺量为0.02%时的无侧限抗压强度 USC_{CL2}。图9(b)与图10(b)亦同。

图8 无侧限抗压强度测试结果

Figure 8 Unconfined compressive strength test results

度分别提升72.7%、21.4%与95.2%,而在添加固化剂的情况下,UCS_{CL2}相较于UCS_{C2}增长了27.1%,而相较于UCS_{L2}提升了78.0%,原因在于水泥和膨胀土中的矿物发生反应,生成C-S-H、C-A-H等水化产物,达到有效充填孔隙、胶结土颗粒的作用。

3.1.2 劈裂强度

对于膨胀土等摩擦型岩土材料,其抗压强度主要来自土颗粒间的摩擦作用。通过掺入外加剂,可有效提升颗粒间的黏聚强度,使材料的抗压强度转变为摩擦强度与黏聚强度的共同贡献。为评估外加剂对黏聚强度的增强效果,本研究开展巴西劈裂试验。巴西劈裂试验测试的劈裂抗拉强度 σ_0 表示为:

$$\sigma_0 = \frac{2P_{\max}}{\pi Dt} \quad (4)$$

式中, $P_{\max}$ 为圆盘土样直径两端的峰值荷载; D 为混凝土圆盘试样的直径; t 为试样厚度。利用式(4)计算试验的劈裂强度(BX),如图9所示。

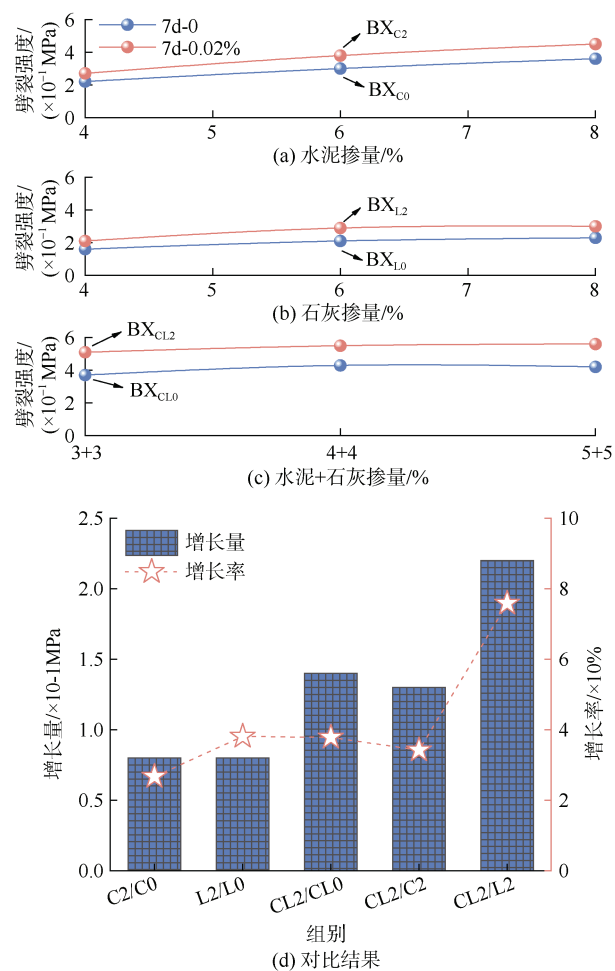


图9 劈裂强度测试结果

Figure 9 Splitting tensile strength test results

图 9(a)表明,随着水泥掺量增加,劈裂强度缓慢提高,添加固化剂后的试样表现出显著的强度提升,当石灰掺量达到 8%时,强度提升幅度减缓。添加固化剂时,劈裂强度随掺量增加而提升,而无固化剂时,劈裂强度先增大后减小。根据规范^[17]要求,水稳砂砾的劈裂强度应在 0.4~0.6 MPa 之间。使用 8%水泥与 0.02%固化剂协同改良的弱膨胀土,劈裂强度为 0.45 MPa,符合最低要求。石灰单独改良效果有限,即使加入固化剂也无法满足规范要求。而水泥石灰加固剂组合的劈裂强度最低为 0.51 MPa,符合规范要求,并优于水泥固化剂改良土,表现出更好的力学性能,同时能减少胶凝材料的用量,降低成本。不同固化土的劈裂强度对比结果如图 9(b)所示。可以看出, BX_{C2} 、 BX_{L2} 与 BX_{CL2} 相较于不添加固化剂的试样,分别提升 26.7%、38.1%与 37.8%,而在添加固化剂的情况下, BX_{CL2} 相较于 BX_{C2} 与 BX_{L2} 分别增长了 34.2%与 78.0%。

3.1.3 改良 CBR 测试

图 10 展示了不同固化材料对弱膨胀土 CBR 值的

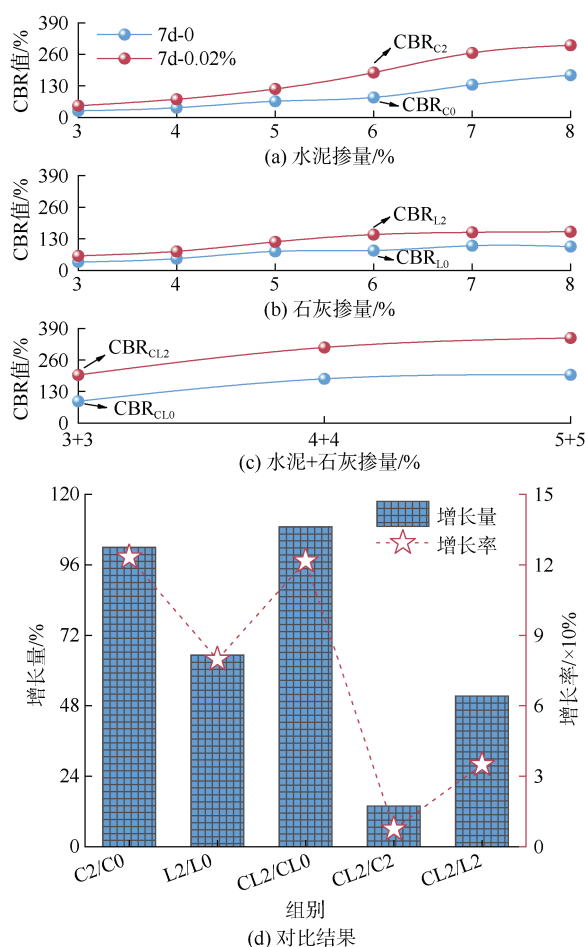


图 10 CBR 值测试结果

Figure 10 CBR value test results

影响规律。图 10(a)显示,随着水泥掺量增加, CBR 值显著提升,且在水泥掺量较低时,增长较慢。当水泥掺量增加到 6%时, CBR 值增长加速,且添加固化剂后,改良效果更加明显,说明固化剂增强了水泥对弱膨胀土的改良作用。石灰掺量单独增加时, CBR 值逐渐提升,但在掺量达到 6%时,增长幅度减缓。添加固化剂后,石灰固化土的 CBR 值显著提高,但改良效果弱于水泥。随着水泥与石灰共同掺量增加, CBR 值逐渐提高且增长较为平稳。相比单一材料,水泥与石灰的组合对膨胀土的改良效果更佳,固化剂的加入进一步提升了复合改良效果。尽管掺量持续增加后, CBR 值增速放缓,但整体强度较高,表现出优异的改良效果。不同固化土 CBR 值对比结果如图 10(b)所示。可以看出 CBR_{C2} 、 CBR_{L2} 与 CBR_{CL2} 相较于不添加固化剂的试样, CBR 值分别提升 123.2%、79.7%与 121.6%,而在添加固化剂的情况下, CBR_{CL2} 相较于 CBR_{C2} 增长了 7.5%,而相较于 CBR_{L2} 提升了 34.9%。

3.2 耐久性试验结果

由于水泥或石灰掺量较低时,试样在经历一次冻融循环后会完全解体,选择水泥和石灰含量分别为 4%和 5%进行单一添加剂的耐久性分析,在水泥与石灰共同使用时,两者含量均为 3%。不同冻融循环次数下膨胀土试样的破坏情况如图 11 所示。冻融循环后的试件表观形态显示,单一水泥或石灰改良试件出现明显裂纹甚至解体,而复合固化剂体系试件表面保持完整,表明固化剂显著提升了土体抗冻融剥蚀能力。水泥、石灰和固化剂的组合不仅提升了抗冻融性能,还减少了胶凝材料的使用,降低了成本,适合实际工程应用。

图 12 展示了经过 5 次冻融循环后试样的抗冻指数和质量损失率,其中抗冻指数为经 5 次快速冻融循环后膨胀土试样的动弹性模量与其初始值的比值;质量损失率为经 5 次快速冻融循环后膨胀土试样的质量变化量与初始试样质量的比值。由图 12(a)可以发现,水泥和石灰单一添加时,添加剂掺量对抗冻指数的影响相似,但水泥对于固化土的抗冻融效果提升更好;水泥石灰共同固化时,优于任一单一材料,同时固化剂的添加增强了固化土的抗冻融能力。基于试验结果的反馈,通过优化配比,并综合考虑改良效果与成本要求,针对试验用弱膨胀土,推荐工程最佳改良配合比为水泥:石灰:固化剂为 3%:3%:0.02%。

图 12(b)表明,随着水泥和石灰掺量的增加,质量损失率均呈现下降趋势,仅添加单一胶凝材料且胶凝

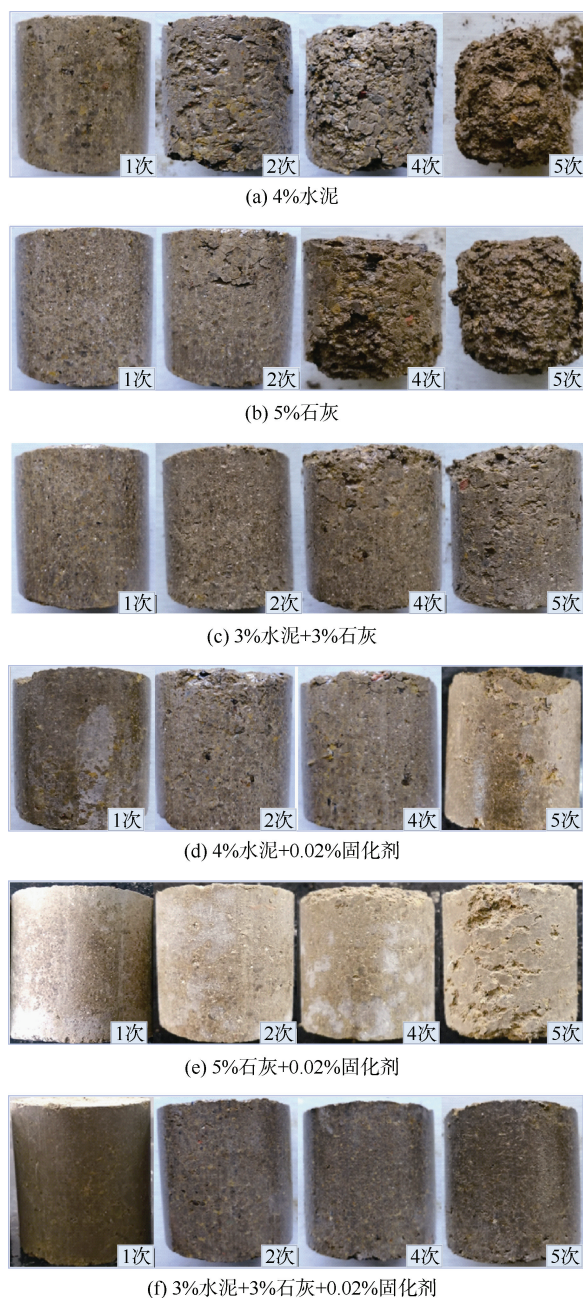


图 11 冻融循环后试样破坏情况

Figure 11 Failure condition of specimens after freeze-thaw cycling

材料含量较低时,质量损失率变化显著。膨胀土配合比为 3%水泥:3%石灰:0.02%固化剂时,试样的抗冻指数为 82%,质量损失率为 1.74%,满足《土体固化剂应用技术标准》(CJJ/T286—2018)^[18]对固化土 28 d 抗冻性能即抗冻指数 $\geq 80\%$,质量损失率 $\leq 5\%$ 的要求,大大节省单一胶凝材料的用量,降低了工程成本。

3.3 宏-微观性能主动调控机理

膨胀土的主要特性之一是在湿润和干燥条件下

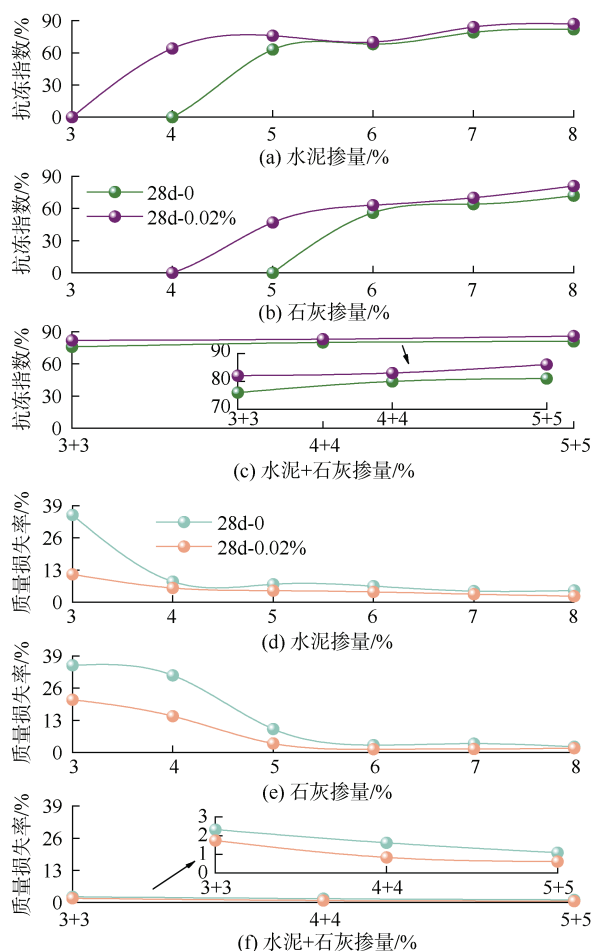


图 12 冻融循环测试结果

Figure 12 Freeze-thaw cycling test results

发生显著的膨胀和收缩现象。膨胀土的这种行为主要由其独特的矿物组成和结构特性决定,尤其是蒙脱石类矿物。蒙脱石具有较强的水合膨胀性,这使得膨胀土在吸水时,水分进入其晶格间隙,导致土颗粒间的距离增加,从而产生膨胀力。当水分子进入层间时,阳离子如 Na^+ 、 Ca^{2+} 易与水发生水合作用,形成水合阳离子。这一过程导致层间距离增大,晶层膨胀,从而引发土体的宏观膨胀。其胀缩机理如图 13 所示,主要包括:①晶格膨胀,膨胀土中的蒙脱石矿物具有活性较强的晶格结构,水分子可以进入其晶格间隙,引起晶格的膨胀,最终引起土体体积的增大,如图 13(a)所示;②粒间膨胀,当膨胀土接触水分时,土体颗粒表面形成水合层,水分子在电场力作用下定向排列,这种吸水现象导致土粒间距增大,从而表现为膨胀,如图 13(b)所示;③收缩机理,膨胀土的收缩机理与其膨胀机理相反,主要是由于土体中水分的蒸发导致失水收缩。随着水分的减少,吸附在土粒表面的水分膜

变薄, 粒间的吸引力增大, 土粒聚集, 最终表现为土体体积的减小。

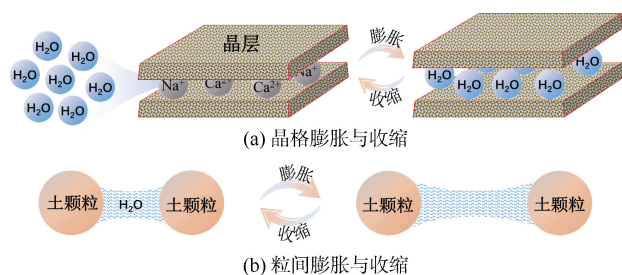
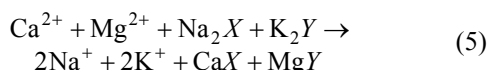


图 13 膨胀土胀缩机理

Figure 13 Swelling and shrinkage mechanism of expansive soils

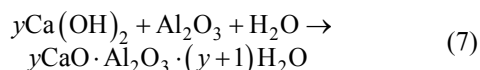
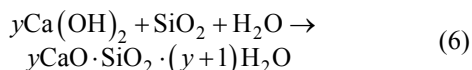
固化剂通过改变土体的微观结构, 抑制其膨胀和收缩的能力, 固化机理如下。

1) 离子交换作用。环保型固化剂如水性环氧树脂、碱激发剂等, 通过离子交换作用, 与膨胀土中的蒙脱石等矿物发生式(5)所示的反应, 置换土颗粒表面原有的 Na^+ 、 K^+ 等低价阳离子, 并用高价阳离子 Ca^{2+} 等替代。



式中, X 与 Y 为形式符号, 用以抽象地代表黏土颗粒表面可交换的负电荷吸附位点, 如 $[(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2]^{2-}$ 、 $[(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]^{2-}$ 等阴离子基团。此过程中, 结合水膜的厚度降低, 水分的吸附能力和膨胀性大大减少, 从而有效地抑制了膨胀土的膨胀行为。

2) 化学反应与凝胶网络结构的形成。固化剂中的成分如水性环氧树脂、氯化物和碱激发剂, 通过化学反应生成强度更高的水化产物, 形成网状的结构, 这种结构包裹在土颗粒表面, 有效减少了土粒之间的空隙, 增强了土体的整体强度。同时石灰、水泥与弱膨胀土中的黏土矿物发生式(6)~(7)所示的反应, 生成 C-S-H、C-A-H 等水化产物, 达到有效充填孔隙, 胶结土颗粒的作用。



3) 物理填充作用。固化剂中的物理填充剂如稳定剂等, 能够有效地填充土体中的孔隙, 减少土体的自由膨胀空间。

4) 骨架结构的形成与增强。环保固化剂通过与膨

胀土中的土粒进行相互作用, 形成了强度较高的骨架结构。通过固化剂的胶结作用, 增强了土粒之间的连接力, 显著提高了土体的抗变形能力。

素土骨架呈典型单粒结构特征, 颗粒间孔隙形态不规则且分布离散, 孔隙系统内缺乏胶结物质填充, 如图 14(a)所示。经固化剂处理后, 土体微观结构发生显著优化: 土颗粒由离散状态重组为团簇状集合体, 大孔隙内部出现胶凝物质充填现象。如图 14(b)所示, 固化产物以两种形式发挥结构强化作用: ①胶凝物质沿颗粒表面定向生长形成连续包裹层; ②纤维状结晶相在颗粒间隙内穿插发育。这种双重作用机制促使原本松散的土颗粒通过化学胶结和物理充填形成三维空间网络结构, 充分验证固化剂通过物理-化学协同作用实现土体结构致密化的改良机理。

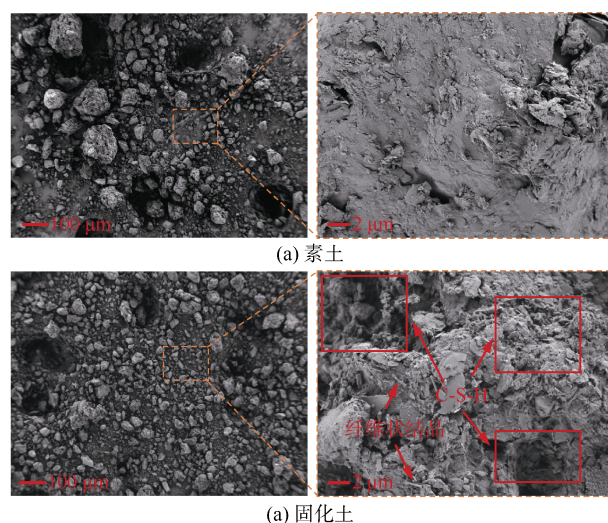


图 14 扫描电镜测试结果

Figure 14 SEM test results

土体性能主动调控方法显著提升了弱膨胀土的力学性能和耐久性, 同时优化了其微观结构, 有效抑制了土体膨胀性, 解决了传统方法中反复修复的难题。该方法兼具环境与经济效益, 降低修复成本的同时减少环境负担。尤其对于城市轨道交通隧道工程, 该方法能有效提升仰拱及边墙围岩的稳定性, 抑制膨胀变形, 保障施工与运营安全, 从而降低长期维护需求。

4 结论

本文针对弱膨胀土在城市轨道交通隧道工程中面临的强度不足、耐久性差及传统固化技术高碳排放等问题, 提出了一种基于化学-物理协同作用的性能主动调控方法, 采用宏-微观多尺度方法系统验证了其有效

性。该方法的核心在于突破被动式调控的局限,建立以“材料结构诊断—目标导向与材料定制—评估与动态反馈”为核心的主动调控流程,实现土体宏观力学性能与微观结构演化的协同设计与精准控制。研究结论如下。

1) 研发新型固化剂与微量水泥、石灰构成的复合调控体系,能够从微观层面主动重构土体结构。扫描电镜分析表明,固化剂通过离子交换、凝胶网络构建及物理填充等多重机制,显著优化了土体的孔隙结构,促使松散的单粒结构向团簇化、三维网络化的密实结构转变。这一微观结构的定向改良是宏观性能提升的根本原因。

2) 基于微观结构优化的判定,明确了材料组成与配合比的优化路径,并在力学与耐久性上获得显著的性能提升。针对弱膨胀土,推荐工程最佳改良配合比为水泥:石灰:固化剂为3%:3%:0.02%,优化配比后的弱膨胀土,其无侧限抗压强度、劈裂强度及CBR值相较于未改良土体分别提升了95.2%、37.8%与121.6%,增幅显著。在耐久性方面,改良土体经历5次冻融循环后,抗冻指数达82%,质量损失率仅为1.74%,优异的耐久性指标满足规范要求,证明了通过微观结构稳定化可实现长期性能的保障。

3) 提出的性能主动调控方法在确保工程安全与长期耐久的前提下,显著削减了传统胶凝材料的依赖,兼具低碳环保与经济高效双重效益,为城市轨道交通膨胀土治理工程的绿色建造与长效维护提供了新的技术支撑。

参考文献

- [1] 白玉霞,常顺,肖衡林,等.膨胀土生态治理研究进展[J].岩土工程学报,2024,46(增刊2):60-66.
Bai Yuxia, Chang Shun, Xiao Henglin, et al. Research progress in ecological treatment of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S2): 60-66.
- [2] 张玉华.富水软土地区矩形顶管弃壳接收关键技术研究[J].都市轨道交通,2025,38(1):136-141.
Zhang Yuhua. Research on the key technologies of rectangular pipe jacking shell abandonment reception in water-rich soft soil areas[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2025, 38(1): 136-141.
- [3] 凌玲.地铁隧道管片裂缝修复材料和技术研究[J].都市轨道交通,2016,29(2):118-121.
Ling Ling. Investigation on repair materials and technology for tunnel segment cracks of subway[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(2): 118-121.
- [4] Liu C, Lu K, Wu Z W, et al. Expansive soil improvement using industrial bagasse and low-alkali ecological cement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 423: 135806.
- [5] Shakil M, Nazar S, Ameen H F M, et al. A comparative study of ground granulated blast furnace slag and bagasse ash incorporation on enhancing mechanical properties of expansive soil[J]. Results in Engineering, 2025, 25: 103569.
- [6] Orlandi S, Taverna M E, Villada Y A, et al. Additives based on vegetable biomass to improve the stabilisation of expansive clay soil[J]. Environmental Geotechnics, 2024, 11(3): 217-234.
- [7] 白玉霞,牛旺金,肖衡林,等.黄原胶改性不同等级膨胀土胀缩性能研究[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(1):309-321.
Bai Yuxia, Niu Wangjin, Xiao Henglin, et al. Study on the expansion and contraction properties of xanthan gum-modified expansive soils of different grades[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025, 56(1): 309-321.
- [8] Fan K W, Shen Y, Han Z, et al. Impact of incorporating waste tire rubber particles into granular inclusion on reducing lateral swelling pressures of expansive soil against concrete retaining walls[J]. Construction and Building Materials, 2024, 457: 139462.
- [9] Mehmood M, Guo Y, Liu Y, et al. Experimental study on the engineering characteristics of expansive soil improved conjointly using enzyme induced carbonate precipitation and eggshell powder[J]. Soils and Foundations, 2025, 65(1): 101567.
- [10] Zou W L, Xie Y T, Han Z, et al. Hydromechanical behaviors of geogrids-reinforced expansive soil slopes: Case study and numerical simulation[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 174: 106626.
- [11] 汪鹏程,刘明.微波改良膨胀土冻融循环作用下的性能研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(1):119-126.
Wang Pengcheng, Liu Ming. Study on the performance of microwave modified expansive soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2025, 48(1): 119-126.
- [12] Pilecki Z, Krawiec K, Pilecka E, et al. Temperature anomaly as an indicator of groundwater flow prior to the shaft sinking with the use of artificial ground freezing[J]. Engineering Geology, 2025, 347: 107916.
- [13] 中华人民共和国国家市场监督管理总局.通用硅酸盐水泥:GB175—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土壤固化外加剂:CJ/T486—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [15] Ahmed S T, Kabir M U, Zahid C Z B, et al. Improvement of subgrade California Bearing Ratio (CBR) using recycled concrete aggregate and fly ash[J]. Hybrid Advances, 2024, 5: 100153.
- [16] Luo Z, Liu Z, Zhang C, et al. Study of multi-component solid waste synergistically solidified soil and its microscopic mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2025, 460: 139804.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土壤固化剂应用技术标准:CJJ/T286—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土壤固化剂应用技术标准:CJJ/T286—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

(编辑:傅依萱)