

# 水泥改良膨胀土工程特性试验研究

## Experimental Research on Engineering Characteristics of Cement Modified Swelling Soil

李正印<sup>1</sup>, 张彬<sup>2</sup>, 赵伟<sup>3</sup>, 董斌<sup>1</sup>

(1. 山东省建筑设计研究院有限公司, 济南 250000; 2. 山东省水利勘测设计院有限公司, 济南 250000; 3. 山东省泰安市岱岳区小安门水库管理服务中心, 泰安 271034)

**摘要:** 为了研究水泥改良膨胀土的工程特性, 对掺加一定量水泥的膨胀土, 开展自由膨胀率、膨胀力、无荷膨胀率、有荷膨胀率、界限含水率、无侧限抗压强度、剪切强度以及渗透等一系列室内试验。结果表明: 其胀缩性受水泥掺量和龄期影响, 掺量一定时, 随着龄期的增加, 胀缩性降低, 7 d 龄期的胀缩性降低明显, 之后胀缩性降低不大; 改良土较素土液限降低, 塑限升高, 塑性指数呈减小趋势; 改良土的抗压强度、破坏应变均随龄期的增加而变大; 养护龄期 and 水泥掺量越高剪切强度越高; 渗透性基本没有变化, 改性土保持了较低的渗透性。掺加水泥改良后, 膨胀土可以作为一种较优良的填筑材料应用于大型输水及其他建筑工程中。

**关键词:** 水泥; 膨胀土; 胀缩性; 膨胀率; 抗压强度; 剪切强度

**中图分类号:** TU521.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 05-0097-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.018

LI Zhengyin<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>3</sup>, DONG Bin<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Ji'nan 250000, China;  
2. Shandong Provincial Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Ji'nan 250000, China;  
3. Xiao'anmen Reservoir Management Service Center, Tai'an 271034, China)

**Abstract:** In order to study the engineering characteristics of cement modified expansive soil, a series of indoor tests were conducted on expansive soil with a certain amount of cement added, including free expansion rate, expansion force, unloaded expansion rate, loaded expansion rate, boundary moisture content, unconfined compressive strength, direct shear strength, and permeability. The results showed that its swelling and shrinking properties were affected by the cement dosage and age. When the dosage was constant, the swelling and shrinking properties decreased with the increase of age. The swelling and shrinking properties decreased significantly at 7 days of age, and then did not decrease significantly; Improved soil has a lower liquid limit and higher plastic limit compared to plain soil, and the plasticity index shows a decreasing trend; The compressive strength and failure strain of improved soil increase with age; The higher the curing age and cement content, the higher the direct shear strength; The permeability remains basically unchanged, and the modified soil maintains a lower permeability.

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金项目 (YDZX2022019); 济南市数字孪生与智慧水利重点实验室开放研究基金 (37H2022kY0404114)。

作者简介: 李正印 (1989—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程生产及科研工作。

通信作者: 张彬 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程生产及科研工作。

收稿日期: 2024-07-03

岩土力学

After adding cement for improvement, expansive soil can be used as an excellent filling material in large - scale water conveyance and other construction projects.

**Key words:** cement; swelling soil; swelling and shrinkage properties; expansion rate; compressive strength; shear strength

0 引言

膨胀土是一种吸水膨胀、失水收缩的特殊土，主要由对湿热敏感的蒙脱石、伊利石组成，具有多裂隙结构和胀缩性等不稳定特征。膨胀土分布广泛，世界上高达 40 多个国家的干旱和半干旱地区均有分布<sup>[1-4]</sup>。在这些膨胀土地区，非膨胀黏性土料分布很少，而工程建设为了节约成本往往需要就地利用膨胀土作为填筑材料，但是由于膨胀土特殊的物理力学特性，易对地基、输水、道路等工程造成威胁，因此不能直接作为工程填筑材料，需要通过处理方可使用。

目前，常用的工程处理方法有物理改良方法、化学改良方法和生物改良方法三种<sup>[5]</sup>。物理改良法主要是采用铁尾矿砂、碎石或者钢渣等置换法和土工合成材料加筋法等，这类改性研究成果较多，应用较广泛。赵辉等<sup>[6]</sup>通过室内试验，对尾矿砂改良土的基本物理性质指标、膨胀性指标、强度指标以及微观结构进行了研究；陈雷等<sup>[7]</sup>通过在天然膨胀土进行石灰砂化的基础上，加入不同比例的纤维，制备不同纤维掺量石灰土土样，分别进行有荷膨胀试验、无侧限抗压强度试验；董柏林等<sup>[8]</sup>利用改进的大型固结仪对掺加碎石膨胀土的膨胀特性进行了试验研究，得出了无荷膨胀率和膨胀力的变化规律；吴燕开等<sup>[9]</sup>对膨胀土中掺量不同的钢渣粉开展了膨胀和抗压强度特性试验研究；袁明月等<sup>[10]</sup>对不同掺量钢渣微粉的膨胀土进行了直剪试验、干湿循环等试验研究，并与素土进行了比较分析；白银涌<sup>[11]</sup>利用生物酶对机油污染膨胀土进行改良，通过开展室内试验，获得了改良后膨胀土的物理力学和固结特性及其影响规律；曾娟娟等<sup>[12]</sup>采用一种新的生物酶固化方法，对益阳高速公路路基典型膨胀土开展了试验研究，探究了使用生物酶固化新技术后该膨胀土的胀缩和强度特性；潘兆远<sup>[13]</sup>采用室内试验和数值模拟的方法对生物炭改良膨胀土的工程特性及边坡稳定性进行了研究；孙乐乐等<sup>[14]</sup>采用工业废料粉煤灰作为改良剂，通过一系列的室内试验，探究了粉煤灰改良膨胀土影响

因素和效果分析；王顺等<sup>[15]</sup>选取南水北调中线工程段的膨胀土为研究对象，从微观角度，对离子土壤强化剂化学改性膨胀土的试验进行了分析研究；滕琴<sup>[16]</sup>为提升石灰改良膨胀土路基施工质量，结合某公路工程实例，提出了膨胀土对公路路基产生的危害与石灰改良膨胀土路基施工要点；刘鸣等<sup>[17]</sup>针对水泥改性膨胀土施工工艺，开展了进一步的试验研究，确定了膨胀土料最大土团级配和含水率控制标准，分析了现场施工采用的旋耕机和条筛碎土新工法的可行性。

综上所述，由于膨胀土的特殊性质，不宜直接用作建筑工程填料，需要进行改良。通过对膨胀土掺加水泥后，进行一系列物理力学试验全面系统研究了水泥对膨胀土胀缩性、裂隙性、强度衰减性以及渗透特性的改良效果。试验成果可为大型建筑工程中膨胀土的综合利用提供技术参考。

1 试验材料

选取河南某地膨胀土，风干碾碎后依据规范 GBT 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[18]</sup>开展试验，土样的基本物理性质和矿物成分，分别见表 1～表 2，水泥主要化学成分见表 3。

| 表 1 土样的物理指标                           |                          |         |                   |                      |                      |                     |
|---------------------------------------|--------------------------|---------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Table 1 Physical index of soil sample |                          |         |                   |                      |                      |                     |
| 天然含水率/%                               | 干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 自由膨胀率/% | 比重 G <sub>s</sub> | 液限 ω <sub>L</sub> /% | 塑限 ω <sub>p</sub> /% | 塑性指数 I <sub>p</sub> |
| 21.9                                  | 1.58                     | 51      | 2.70              | 51.4                 | 25.0                 | 26.4                |

| 表 2 土样的矿物成分                                 |      |     |     |     |     | /% |
|---------------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|----|
| Table 2 Mineral composition of soil samples |      |     |     |     |     | /% |
| 石英                                          | 碱性长石 | 斜长石 | 蒙脱石 | 伊利石 | 高岭石 |    |
| 62                                          | 6    | 8   | 13  | 7   | 4   |    |

| 表 3 水泥主要化学成分                               |      |                                |                  |                  |       |                                |
|--------------------------------------------|------|--------------------------------|------------------|------------------|-------|--------------------------------|
| Table 3 Main chemical components of cement |      |                                |                  |                  |       |                                |
| Na <sub>2</sub> O                          | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| 0.16                                       | 2.68 | 4.32                           | 22.31            | 0.53             | 62.16 | 4.06                           |

2 试验内容

试验方法依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》<sup>[19]</sup>分别对不同掺量和龄期的改良膨胀土进行了界限含水率、自由膨胀率、力学以及渗透特性试验研

究, 并与相应的素土试验结果进行对比, 确定水泥的最优掺和比, 同时分析膨胀土改良后物理力学等工程特性效果。

### 3 试验成果分析

#### 3.1 水泥改性土的物理特性

##### 3.1.1 改性土的界限含水率

由图 1 可知, 膨胀土的液限是 49.0%, 塑限是 21.7%, 塑性指数是 27.3%; 随着水泥掺量的增加, 与素土相比, 改性后膨胀土的液限略有下降, 下降趋势较缓, 而塑限增长较快, 增大趋势明显; 液限和塑限随着水泥掺量的增加, 差值逐渐变小, 即塑性指数逐渐减小。

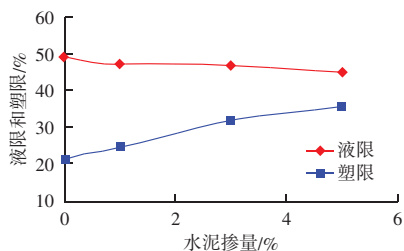


图 1 不同掺量水泥改性膨胀土的液塑性指标 (龄期 28 d)

Fig. 1 Liquid plastic index of cement modified expansive soil with different admixtures (28 d)

##### 3.1.2 改性土的击实特性

由图 2 可知, 膨胀土改性后, 最大干密度随着水泥掺量的增加而逐渐增大, 而最优含水率却逐渐减小。界限含水率和击实试验成果充分说明了改性后膨胀土的物理特性发生了良好地变化, 有利于将改性土当作填筑材料使用, 从而达到用于工程建设的目的。

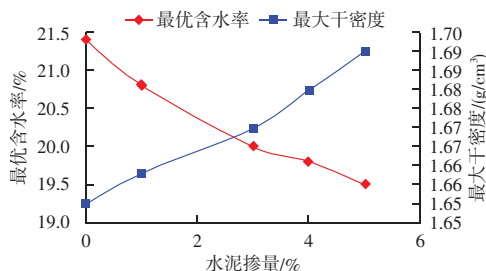


图 2 击实参数与水泥掺量关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between compaction parameters and cement content

#### 3.2 自由膨胀率

由图 3 可知, 与素土相比, 改性后膨胀土的自由膨胀率与水泥掺量和养护时间有关, 水泥掺量越多, 养护天数时间越长, 自由膨胀率下降越明显, 但是

当养护时间为 28 d 后, 改性膨胀土的自由膨胀率逐渐趋于稳定; 水泥掺量相同时, 养护龄期时间越长, 改性土自由膨胀率越低。

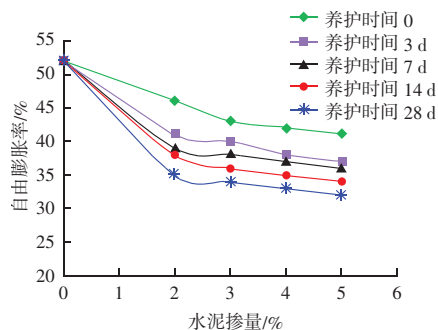


图 3 自由膨胀率与水泥掺量关系曲线

Fig. 3 Relation curve between free expansion rate and cement content

#### 3.3 膨胀力

图 4、5 可知, 水泥掺量越多, 改性后膨胀土的膨胀力减小; 随着压实度的提高, 改性后膨胀土的膨胀力变大; 随着养护龄期的增加, 改性后膨胀土的膨胀力变小。这主要是因为水泥进入土颗粒内部, 与亲水黏土矿物发生物理反应生产新的物质, 这种物质的亲水性变差, 从而使土体的水敏感性变弱,

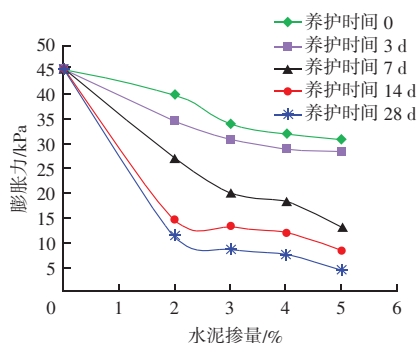


图 4 不同养护时间下膨胀力与水泥掺量的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between expansion force and cement content under variously curing time

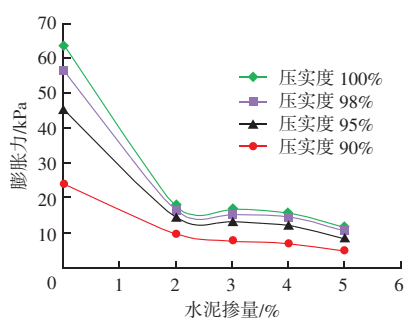


图 5 改性膨胀土不同压实度的膨胀力与水泥掺量的关系曲线 (14 d)

Fig. 5 The quantitative curve between swelling force of reformed swelling soil with variously compactness and cement content (14 d)

岩土力学

其内部遇水产生的应力也减小了。压实度越大，则土体内部孔隙越小，土体越密实，可与水泥发生反应的土颗粒较少，改性土的膨胀力相应降低较小。

3.4 无荷膨胀率

由图6可知，水泥掺量越大，改性土的无荷膨胀率变小；随着制样压实度的提高，改性土的无荷膨胀率变大；随着水泥改性土养护龄期的增加，改性膨胀土的无荷膨胀率逐渐变小。究其原因可能是膨胀土掺加水泥后，发生了水化和团粒作用，一方面生成的新物质吸水性变差，且吸水后膨胀性变差；另一方面生成的新物质包裹在亲水矿物表面，阻隔了亲水矿物和水的接触。

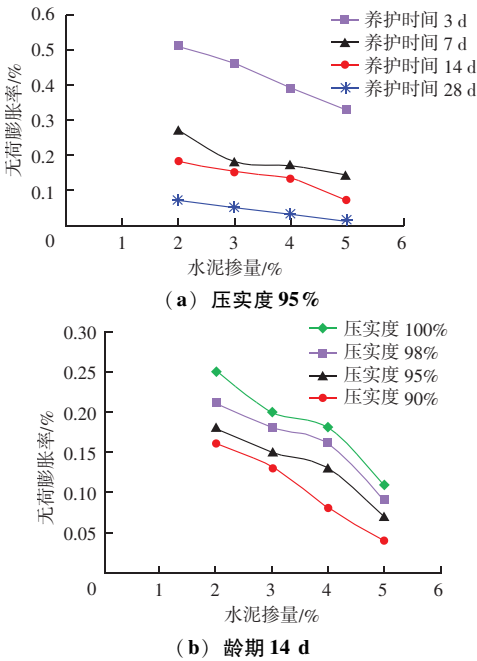


图6 改性膨胀土无荷膨胀率与水泥掺量的关系曲线  
Fig. 6 The relationship curve between cement content and unconfined swelling rate of modified expansive soil under different conditions.

3.5 有荷膨胀率

为了探究水泥掺量和养护时间对改性膨胀土的有荷膨胀率影响规律，选取水泥掺量分别为2%、3%和5%的膨胀土为研究对象，开展一系列的有荷膨胀率试验，结果如图7所示，并对3%水泥掺量的膨胀土进行了不同养护时间的有荷膨胀率试验，结果如图8所示。随着上覆压力的增大，素土的有荷膨胀率下降幅度很大，上覆压力为0时，相应素土的有荷膨胀率大约为7.0%，上覆压力25 kPa时，膨胀率降低了很多，只有0.55%，掺加水泥后，上覆压力

对改性土的有荷膨胀率影响较小；随着水泥掺量的增加，相同上覆荷载作用下，未养护改性土的有荷膨胀率逐渐减小，且降低幅度较大，甚至出现负值，表明掺加水泥后，膨胀土在较大外荷载作用下可能发生收缩；随着养护龄期的增长，由于水泥和土颗粒中矿物成分反应更加充分，改性土的膨胀率逐渐降低。

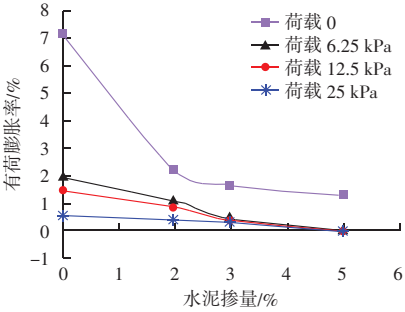


图7 改性膨胀土不同上覆荷载的有荷膨胀率与水泥掺量的关系曲线（未养护）  
Fig. 7 The relationship curve between the under load expansion rate and cement content of modified expansive soil under different overlying loads (without curing)

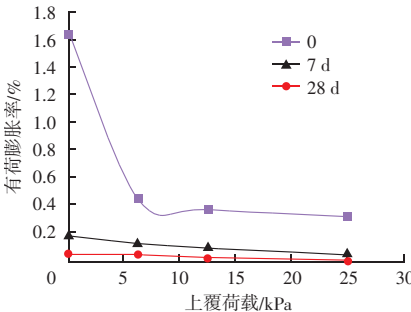


图8 不同养护时间下改性土的有荷膨胀率与上覆压力的变化曲线（水泥掺量为3%）  
Fig. 8 The curve between the under load expansion rate and the overlying load of modified expansive soil at different ages (with a cement content of 3%)

3.6 无侧限抗压强度

由图9、图10可知，素土的单轴抗压强度试验结果表明，随着轴向应变的增大，轴向应力也逐渐增大，增长趋势逐渐变缓，直到轴向应变达到15%时，相应的轴向应力为50 kPa，呈现应变硬化特性；改性土的轴向应力随着轴向应变的增大先增大后减小，均出现应力峰值，且对应的应变均小于1.0%，随着养护时间的增大，峰值应力也逐渐增大，表现出明显的应变软化型，养护时间1 d对应的峰值应力为138.9 kPa，7 d为265.6 kPa，28 d为368.4 kPa，是素土抗压强度的7.44倍，随着养护时间的增加，改性膨胀土破坏应变逐渐增大，但是仍然小于1.0%，

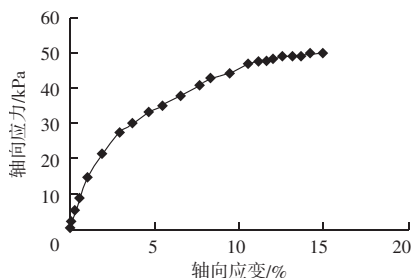


图9 素土的轴向应力应变关系曲线

Fig. 9 Axial stress-strain curves of plain soil

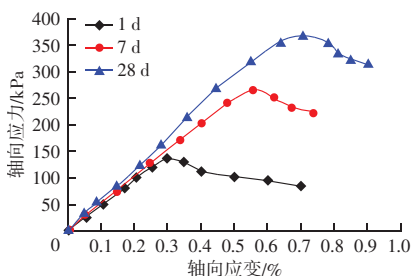


图10 水泥改性膨胀土后不同龄期的轴向应力应变曲线

Fig. 10 Axial stress-strain curves of cement modified expansive soil at different ages

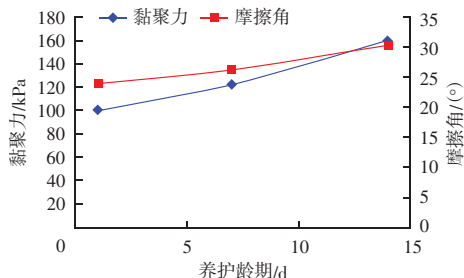
掺加水泥后膨胀土的抗压强度得到了显著提高。这主要是因为水泥中钙离子和氢氧根离子与土颗粒中矿物生成胶凝絮状物, 填充于土体孔隙, 提高了土体致密性, 从而提高了土体抵抗外界的压力。

### 3.7 直剪试验强度特性分析

试验结果如图 11 所示。随着水泥掺量的增加, 改性土的黏聚力和摩擦角逐渐增加; 改性土养护龄期越长, 直剪强度越高, 黏聚力和摩擦角越大。这主要是因为掺加水泥后, 膨胀土中的矿物颗粒与水泥发生水化反应, 生成凝胶物, 使改性土分子间胶结力增强, 并提高了土颗粒间的连接强度。

### 3.8 改性膨胀土的渗透性

由 12 可知, 随着掺量的增加, 渗透系数逐渐减小, 但是对膨胀土的渗透影响较小, 另外, 随着改



(b) 养护龄期

图11 不同条件下改性土抗剪强度指标关系曲线

Fig. 11 The relationship curve of shear strength parameters for modified soil under varying conditions

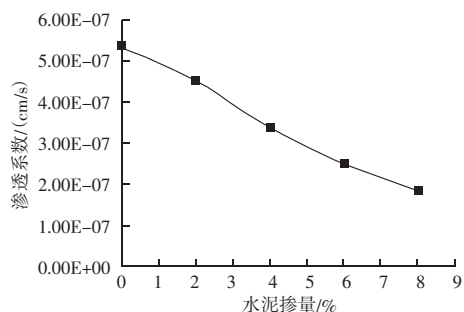


图12 改性膨胀土渗透性与水泥掺量关系曲线

Fig. 12 The curve between permeability of modified expansive soil and cement content

性土养护龄期的增长, 水泥化学成分和膨胀土矿物成分结合更加充分, 渗透系数有可能会减小, 但是变化幅度不大。

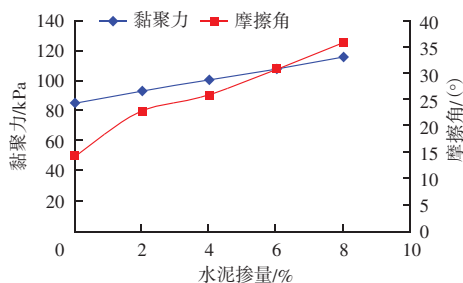
## 4 结论

通过上述掺加水泥改性膨胀土和素土开展一系列的室内试验, 并对试验结果进行综合比较分析, 可得出以下主要结论:

(1) 水泥改性膨胀土后, 膨胀土遇水的胀缩性得到有效改善, 自由膨胀率、有荷膨胀率和无荷膨胀率均有所降低, 液限和塑限指数也降低了, 可满足工程材料使用的要求。

(2) 掺加水泥后, 由于膨胀土的水敏感性变差, 膨胀土遇水的膨胀力降低了, 说明改性土的水稳性较好。

(3) 改性土中水泥与土颗粒矿物生成胶结物, 填充于土体内部, 使其更加密实坚硬, 土体的抗压性能变强, 剪切强度得到明显提高。改性土渗透性较低, 可作为输水渠道边坡的填筑材料。



(a) 水泥掺量

## 岩土力学

### 参 考 文 献

- [1] SAAD A, AIBAN. Compressibility and swelling characteristics of Al-Khobar palygorskite eastern saudi arabia [J]. Engineering Geology, 2006 (87): 205–219.
- [2] C. M. O. NWAIWU, I. NUHU. Evaluation and prediction of the swelling characteristics of nigerian black clays [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006 (24): 45–56.
- [3] PAUL F. Geologic controls on foundation damage in north central Texas [J]. GeoJournal, 1998 (45): 159–164.
- [4] ZEYNAL ABIDDIN ERGULER, RESAT ULUSAY. Engineering characteristics and environmental impacts of the expansive ankara clay, and swelling maps for SW and central parts of the Ankara (Turkey) metropolitan area [J]. Environmental Geology, 2003 (44): 979–992.
- [5] 邹维列, 蔺建国, 韩仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (1): 126–139.
- [6] 赵辉, 储诚富, 郭坤龙, 等. 铁尾矿砂改良膨胀土基本工程性质试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39 (6): 98–104.
- [7] 陈雷, 张福海, 李治朋. 纤维加筋石灰改良膨胀土工程性质试验研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2014, 46 (增刊 2): 65–69.
- [8] 董柏林, 黄华慧, 裴沛雯, 等. 碎石改良膨胀土膨胀特性实验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14 (5): 1213–1217.
- [9] 吴燕开, 胡锐, 赵位莹, 等. 钢渣粉掺合料改良膨胀土特性试验研究 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (1): 136–143.
- [10] 袁明月, 张福海, 陈翔, 等. 钢渣微粉改良膨胀土室内试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017 (2): 81–85.
- [11] 白银涌. 生物酶改良机油污染膨胀土压缩特性的试验研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [12] 曾娟娟, 文畅平, 苏伟, 等. 基于生物酶改良膨胀土的试验研究 [J]. 建筑科学, 2017, 33 (5): 69–73.
- [13] 潘兆远. 生物炭改良膨胀土的工程特性研究及边坡稳定性分析 [D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [14] 孙乐乐, 张文慧, 张福海, 等. 粉煤灰改良膨胀土不良工程特性试验研究 [J]. 河南科学, 2019, 37 (4): 588–593.
- [15] 王顺, 李涛涛, 王林. 离子土壤强化剂改性膨胀土的微结构试验研究 [J]. 安全与环境工程, 2011, 18 (4): 26–30.
- [16] 滕琴. 石灰改良膨胀土路基施工技术研究 [J]. 交通建设与管理, 2023 (3): 126–127.
- [17] 刘鸣, 宋建平, 刘军, 等. 膨胀土水泥改性施工均匀性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (增刊 1): 59–63.
- [18] 土工试验方法标准 GB/T 50123–2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [19] 公路土工试验规程 JTG E50—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [10] 陈宇, 张福海, 刘峥嵘, 等. 基质对杂填土力学性质的影响 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (7): 119–122, 150.
- [11] 徐嘉成, 张福海, 陈宇, 等. 软土粗颗粒含量对杂填土与软土地基互嵌沉降影响的试验分析 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2023, 40 (2): 27–35.
- [12] 张剑. 公路软土路基土工格栅复合碎石垫层的应用 [J]. 建筑机械化, 2025, 46 (7): 64–67.
- [13] 张福海, 陈良, 白岩辉, 等. 杂填土与软土互嵌变形特性试验法及适用性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (S1): 354–358, 396.
- [14] ZHANG F H, ZHANG L, ZHOU T B, et al. An Experimental Study on Settlement due to the Mutual Embedding of Miscellaneous Fill and Soft Soil [J]. advances in civil engineering, 2020, 2020 (1): 4819605.
- [15] 李颖喆. 黄土湿陷性的边界效应和尺寸效应研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2024.
- [16] 孔汉军, 朱聪, 张天赐, 等. 考虑瑞利分布和墙体应变的黏土基坑位移预测 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (34): 14193–14200.
- [17] 褚君达. 宾汉流体的触变性及球体绕流阻力 [J]. 水科学进展, 1995, 6 (1): 36–44.
- [18] 张福海, 崔赞, 薛浩宇, 等. 不同种类软土与杂填土互嵌沉降试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (5): 16–26.

(上接第 96 页)