

硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环条件下的力学特性分析

李伟 刘海旭

沈阳建筑大学

DOI:10.12238/btr.v8i2.4678

[摘要] 研究硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环条件下的力学特性,分析不同循环次数下土体物理性质与力学性能的变化。通过宏观特性观察与微观结构分析,探讨冻融作用对土体结构损伤及力学性能衰减的影响机制。建立力学模型,验证其预测准确性,为寒区工程建设提供理论支持。结果表明,合理水泥掺量可缓解冻融循环对土体力学性能的负面影响。

[关键词] 硅酸盐水泥; 改良袋装土; 冻融循环; 力学特性; 物理性质

中图分类号: TV42+1.5 **文献标识码:** A

Mechanical characterization of silicate cement modified bagged soil under freeze-thaw cycle conditions

Wei Li Haixu Liu

Shenyang Jianzhu University

[Abstract] To study the mechanical properties of silicate cement-improved bagged soil under freeze-thaw cycles, and to analyze the changes of physical properties and mechanical properties of soil under different cycle times. Through the observation of macroscopic characteristics and microstructure analysis, the influence mechanism of freeze-thaw action on the structural damage and mechanical property attenuation of the soil body is explored. Mechanical models are established to verify the prediction accuracy and provide theoretical support for the engineering construction in cold regions. The results show that reasonable cement dosage can alleviate the negative impact of freeze-thaw cycle on the mechanical properties of soil, and optimizing the design and construction scheme is crucial.

[Key words] silicate cement; improved bagged soil; freeze-thaw cycle; mechanical properties; physical properties

在全球气候变化的背景下,寒区工程建设面临着诸多挑战,其中冻融循环对土体力学特性的影响尤为显著。为了确保工程安全与稳定,深入研究硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环条件下的力学特性显得尤为重要。本文旨在探讨冻融循环对硅酸盐水泥改良袋装土力学性能的影响规律,为寒区工程建设提供科学依据。通过对不同冻融循环次数下改良袋装土的力学性能进行分析,揭示冻融作用对土体性能的影响,以为优化寒区工程设计和施工提供理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用42.5级P·I型硅酸盐水泥,密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$,比表面积 $350\text{m}^2/\text{kg}$,主要成分为硅酸三钙(50%~60%),赋予早期高强度和水化活性。其水化产物能胶结土颗粒,提升袋装土强度与稳定性,尤其在冻融循环下,可填充孔隙,改善土体结构,增强抗冻融性能。土样为寒区黏性土,富含粉粒、黏粒,具可塑性和亲水性,

但工程性质欠佳。使用0.15mm厚聚乙烯(PE)袋材,透水系数 $1\times 10^{-12}\text{m}/\text{s}$,既允许水分交换,又限制土颗粒流失,保障整体性和稳定性。袋材的物理性能直接影响力学行为,其约束作用有助于提高袋装土在冻融循环下的抗冻融性能。

1.2 试验方法

试样制备过程精细而有序:先将黏性土样自然风干、去杂、筛分,确保均匀性。接着,依据前期试验和经验,选定5%、8%、10%三个水泥掺量水平,与土样充分拌合后装入PE袋材,分层压实至 $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 的立方体。冻融循环试验在可编程高低温箱中进行,模拟寒区环境,温度 -20°C 至 20°C ,变化速率 $2^\circ\text{C}/\text{h}$,循环0至20次,研究冻融影响。力学性能测试采用YE-200A液压机和ZJ直剪仪,通过单轴压缩和直剪试验,严格控制加载速率,测定冻融循环下袋装土的抗压强度、弹性模量、内摩擦角及黏聚力等数据^[1]。

2 硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环前后的宏观特性变化

2. 1物理性质变化

2. 1. 1冻融循环下改良袋装土物理性质演变

冻融循环考验下, 硅酸盐水泥改良袋装土的密度与含水率均呈现显著变化。初期, 干密度微增, 暗示土体紧实; 但随着循环深入, 干密度渐降, 揭示结构趋松。湿密度则迅速下降后趋于稳定, 反映出土体含水状态对抵抗力的影响。具体而言, 3次循环后, 干密度由1.68升至1.72g/cm³, 湿密度从1.85降至1.80g/cm³; 至10次循环, 干密度稳定于1.69g/cm³, 湿密度则维持在1.78g/cm³左右(见图1)。含水率方面, 初期波动后趋于稳定, 前3次循环中, 温度在-10℃至5℃间变化, 含水率从18%降至约15%。随后7次循环, 含水率稳定在14%-16%之间。这种变化调节土体强度, 初期可能增强, 但随着含水率下降, 结构疏松, 强度降低, 潜在影响工程安全。

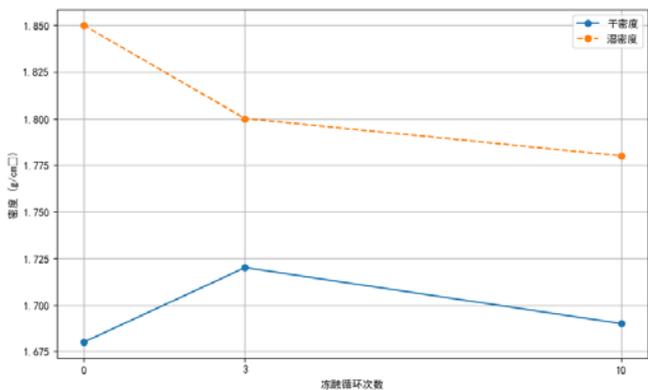


图1 冻融循环下改良袋装土密度变化

2. 1. 2体积变化

在冻融循环的历练下, 改良袋装土的体积变化如同呼吸般微妙。初期, 土体膨胀, 膨胀率可达3%至5%。然而, 随着循环次数的增加, 这股膨胀之力逐渐减弱, 每次循环递减约1%, 直至第10次循环时, 膨胀率稳定在1%左右, 部分试样甚至开始微缩0.5%。这样的体积变迁, 对土体稳定性影响深远。膨胀时, 内部应力积聚, 一旦超过土体强度, 裂缝和变形便随之而来, 威胁整体性和稳定性。收缩时, 孔隙和空洞的形成, 降低了密实度和承载能力, 为工程应用埋下不均匀沉降、塌陷等隐患^[2]。

2. 2力学性质变化

在冻融循环的考验下, 改良袋装土的力学性质经历了显著变化。抗压强度随着循环次数的增加而总体下滑, 水泥掺量成为调控强度的关键。低掺量时, 强度迅速下降后趋于平稳; 高掺量时, 初期强度提升后却更显著下跌。黏结力的减弱, 逐渐显现, 成为强度下降的幕后推手。弹性模量则呈现出阶段性的变化, 起初因水泥水化反应而提升, 随后逐渐回落。反复的冻融削弱了水泥与土颗粒间的黏结, 孔隙率增大, 刚度特性悄然下降。微观层面, 矿物颗粒的重排与破碎, 亦动摇了弹性模量的稳定性。抗剪强度方面, 内摩擦角在冻融初期略有提升, 随后逐渐减小; 黏聚力则持续降低, 直接削弱了土体的抗滑移能力^[3]。这些变化增加了工程发生滑移、崩塌等病害的风险, 为工程结构的稳定性埋下隐忧。

3 硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环下的微观结构分析

3. 1扫描电镜(SEM)观察

未受冻融循环影响时, 硅酸盐水泥改良袋装土微观结构致密, 土颗粒被水化产物如氢氧化钙和钙矾石紧密胶结, 形成低孔隙率均匀基质, 赋予土体良好强度和稳定性。但随着冻融循环推进, 微观结构逐渐劣化: 初期出现微小孔隙和裂纹, 冰晶膨胀导致水化产物位移或破裂; 循环次数增加, 孔隙增多、孔径增大, 出现大孔隙和贯通裂纹, 破坏土体完整性, 加剧水分侵入和冰晶膨胀力, 加速土体破坏。至后期, 微观结构疏松, 孔隙裂纹遍布, 土体强度和稳定性大幅降低。适当增加水泥掺量可改善微观结构, 减少孔隙裂纹, 增强抗冻融能力, 使水化产物分布更均匀, 缓解冻融循环破坏^[4]。

3. 2能谱分析(EDS)

利用EDS技术, 我们精确检测了硅酸盐水泥改良袋装土的元素成分, 展现了冻融循环下的微观演变。初始时, 钙、硅、铝等元素均匀分布, 与土体颗粒紧密结合。但随着冻融循环, 水分相变和冻融应力导致颗粒松动、孔隙扩大, 元素发生迁移和富集。钙元素在某些区域富集, 而硅、铝元素则重新分布, 破坏了原有均匀性。同时, 水泥与土体的化学反应受冻融环境影响, 水化产物的生成与分解影响土体微观结构和力学性质。循环次数增加, 微观结构劣化, 化学反应持续, 土体宏观力学性能逐渐下降。这一过程在EDS元素分布图(图2)中直观展现。

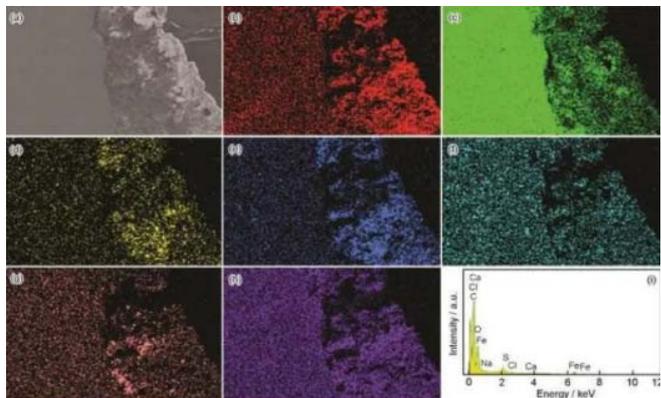


图2 EDS元素分布图

4 硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环下的力学模型建立

4. 1硅酸盐水泥改良袋装土力学模型构建与深度探究

在冻融循环的复杂环境中, 为精准捕捉硅酸盐水泥改良袋装土的力学演变, 初期采用弹性模型作为基础, 随后融入弹塑性及黏弹性模型, 以适应土体内部结构的显著变化。通过回归分析与遗传算法等优化手段, 结合多次重复试验确保数据可靠性, 进而确定最佳模型参数, 并进行敏感性分析以持续优化。模型验证环节, 将预测结果与实际试验数据细致对比, 计算误差、图像分析直观展示契合度, 确保模型在不同冻融条件下的适用性与预测能力。研究发现, 随着冻融次数增加, 弹性模型在反映刚度退

化上逐渐受限,而弹塑性模型则精准捕捉塑性变形与损伤累积,黏弹性模型更展现出土体力学的时间依赖性。同时,水泥掺量的微妙变化对土体强度和刚度产生直接影响,为确定合理掺量提供有力理论支撑,助力改良袋装土在工程应用中的优化升级^[5]。

4.2 力学模型分析与结果讨论

对比分析表明,不同水泥掺量对改良袋装土的力学性能影响显著,呈现出先升后降的趋势,其中8%掺量达到最佳强度。过多掺量反而降低强度,揭示了适中的平衡点。相较于石灰、粉煤灰等,硅酸盐水泥在提升抗压、抗剪强度方面更具优势,尤其在早期强度和冻融循环稳定性上表现突出,更适合恶劣环境。改良后的土体力学性能大幅提升,尤其在抗冻融性能上显著减少了工程隐患。深入研究显示,土体力学性能与微观结构密切相关,颗粒紧密结合和较低孔隙率是保障高强度重要基础,为从微观角度预测宏观力学表现提供了理论依据。此外,冻融循环显著影响土体力学性能,随循环次数增加,抗压强度和弹性模量逐步衰减,且衰减速率呈非线性变化,进一步阐明了土体在复杂环境中的力学演变规律。

5 结论

研究表明,硅酸盐水泥改良袋装土在冻融循环下力学性能

呈现规律性变化。合理掺量水泥有效减缓了冻融损伤,优化了土体结构。微观分析与力学模型验证了冻融作用对土体内部结构的负面影响及力学性能的衰减机制。结果表明,改良土在寒区工程中具有应用潜力,但需重视冻融循环的影响。未来设计施工应综合考虑水泥掺量、冻融次数等因素,以实现工程稳定与安全。

[参考文献]

[1]蒋婷婷,潘华利,艾一帆,等.冻融循环及含水率对冰渍土力学特性影响[J].地质科技通报,2024,43(2):238-252.

[2]李黎,赵林毅,王金华,等.我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2120-2127.

[3]康宇,李仕群,翟国芳,等.改性硅酸盐复合水泥早期力学性能的初探及机理分析[J].水泥,2005(3):1-4.

[4]狄娜.水泥砂浆抗冻融性能研究[D].吉林:长春理工大学,2014.

[5]刘洪珠.冻融及硫酸盐作用对水泥砂浆损伤影响研究[D].山东:青岛理工大学,2015.

作者简介:

李伟(1968—),男,蒙古族,辽宁朝阳人,三级教授,博士,主要从事地基处理、岩土数值分析等方面研究。