

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i04.29-33

亮点:

- 研究了灌区工程 8% 中等掺量水泥土碾压工艺。
- 确定了 12 遍为压实达标与均匀性较优的临界遍数。
- 揭示了水泥土的压实效率衰减与均匀性演变规律。

*通讯作者邮箱:

2302781814@qq.com

英文引用: Tian Li, 2026. Experimental Study on Rolling Process and Performance of Cement-Soil Filling in Irrigation District Projects. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 29-33.

中文引用: 田丽, 2026. 灌区工程水泥土填筑碾压工艺及性能试验研究. 工程科学与实践, 2 (04), 29-33.

稿件处理节点:

接收	2026 年 10 月 18 日
修订	2026 年 10 月 23 日
接受	2026 年 10 月 25 日
发表	2026 年 10 月 27 日

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

灌区工程水泥土填筑碾压工艺及性能试验研究

田丽^{1,*}¹ 河南省水利第一工程局集团有限公司, 郑州 450000

摘要: 为优化灌区渠道工程中水泥土填筑的碾压施工工艺, 本研究通过现场试验, 系统探讨了不同碾压遍数对 8% 水泥土性能的影响。试验采用 23t 振动碾, 在 30cm 固定摊铺厚度下, 分别进行了静压 2 遍后振动碾压 8、10、12 遍 (总遍数 10、12、14 遍) 的工艺组合, 并通过环刀法与沉降监测获取了干密度、压实度及沉降量等关键指标。结果表明: 随着碾压遍数增加, 水泥土干密度与压实度显著提升, 平均干密度由 10 遍时的 $1.80\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 增至 14 遍时的 $1.86\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 平均压实度由 96.37% 提升至 99.20%; 当碾压 12 遍时, 所有样本压实度均满足设计值 ($\geq 97\%$), 合格率达 100%, 且数据离散性最小, 均匀性最优; 采用“静压 2 遍+振动碾压 10 遍” (总 12 遍) 为本工程条件下最优工艺, 能在保证压实质量与均匀性的同时兼顾经济性。本研究可为类似灌区工程的水泥土填筑施工提供关键参数与理论依据。

关键词: 水泥土; 碾压工艺; 压实度; 干密度; 沉降量; 灌区工程

Experimental Study on Rolling Process and Performance of Cement-Soil Filling in Irrigation District Projects

Tian Li^{1,*}¹ Henan Provincial Water Conservancy First Engineering Bureau Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

Abstract To optimize the rolling construction process of cement-soil filling in irrigation district channel projects, this study systematically investigates the effects of different rolling passes on the performance of 8% cement-soil through field tests. Using a 23-ton vibratory roller and maintaining a fixed paving thickness of 30 cm, the tests were conducted with combinations of static rolling for 2 passes followed by vibratory rolling for 8, 10, and 12 passes (total passes of 10, 12, and 14). Key indicators such as dry density, compaction degree, and settlement were obtained using the ring-knife method and settlement monitoring. The results indicate that as the number of rolling passes increases, the dry density and compaction degree of the cement-soil significantly improve. The average dry density increased from $1.80\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ at 10 passes to $1.86\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ at 14 passes, while the average compaction degree rose from 96.37% to 99.20%. At 12 passes, all samples met the design compaction degree requirement ($\geq 97\%$), achieving a 100% compliance rate with minimal data dispersion and optimal uniformity. The combination of “2 passes of static rolling + 10 passes of vibratory rolling” (total 12 passes) was identified as the optimal scheme under the given project conditions, ensuring both compaction quality and uniformity while maintaining cost-effectiveness. This study provides critical parameters and a theoretical basis for cement-soil filling construction in similar irrigation district projects.

Keywords: Cement-soil; Rolling process; Compaction degree; Dry density; Settlement; Irrigation district projects

1. 引言

灌区工程作为国家粮食安全与农业可持续发展的关键基础设施，其工程质量直接关系到水资源的有效利用与长期运行安全。在灌区建设中，渠道防渗与填筑工程是控制渗漏、提升输水效率的核心环节。在我国广大灌区工程中，粘性土料是常见的填筑材料之一。由于其颗粒细、含水率敏感，在实际施工中常出现压实不均匀、干密度不达标、压实度波动大等问题，进而影响整体结构的稳定性和防渗效果。水泥土作为一种经济、环保的填筑材料，因其具有良好的强度、抗渗性与耐久性^[1-3]，在灌区渠道衬砌与基础填筑中得到了广泛应用。然而，水泥土的工程性能在很大程度上依赖于其压实质量，而压实质量又受到材料配比、摊铺厚度、碾压工艺等多种因素的共同影响。因此，科学合理地确定水泥土填筑的碾压工艺参数，对于保障工程质量、提高施工效率、降低工程成本具有重要的理论意义与工程价值。

在水泥土压实工艺的相关研究领域，已有研究围绕不同工程场景开展了大量试验与探索，为后续研究奠定了坚实基础。例如，在公路路基工程中，杨铁军^[4]针对 3% 水泥土的研究表明，不同土质需通过标准击实试验确定最大干密度，且碾压参数（如静压 2 遍+振压 6 遍、松铺厚度 30cm）对压实度达标至关重要；刘路^[5]则通过“路拌法”试验发现，水泥延迟击实时间超过 3h 会导致最大干密度显著下降，且碾压机械组合（如 22t 弱振+26t 弱振+胶轮收面）直接影响收面效果与裂缝控制。在水利工程领域，路立新^[6]对 15% 水泥土的碾压试验显示，铺土厚度 20-25cm 时碾压 6 遍即可接近最大干密度，而 30cm 厚土料需碾压 8 遍才能达标；曹倩^[7]针对倒虹吸基底 15% 水泥土换填工程，通过对比单位压实遍数的压实厚度，最终确定 30cm 铺土厚度+10 遍碾压（静碾 2 遍+动碾 8 遍）为最优参数，兼顾了压实质量与经济性；李伟光^[8]在调蓄水池 10% 水泥土垫层施工中，进一步验证了分层摊铺（25cm/层）与边坡专用碾压设备（10t 斜坡碾）对压实均匀性的提升作用。此外，郁亮^[9]针对吹填土地场的研究揭示，延迟击实时间超过 4h 会使水泥土 7d 无侧限抗压强度降低 44.3%-47.1%，且胶轮压路机收面相较于普通压路机，能有效减少裂纹、提升压实度稳定性；陈柯^[10]则从拌和与成型方式入手，证明振动拌和与碾压成型可显著降低水泥土干缩系数与温缩系数，增强抗裂性能。然而，现有研究仍存在一定的局限性，难以完全适配灌区渠道工程的实际需求，水泥掺量研究多集中于低掺

量或高掺量^[4, 7, 11]，针对灌区渠道防渗与填筑常用的中等掺量水泥土，缺乏系统的碾压工艺参数研究，无法直接为工程提供精准指导。

为此，本文以某灌区工程为背景，围绕水泥土填筑的碾压工艺开展现场试验研究。试验采用渠道开挖的粘性土料，水泥掺量为 8%，通过设置不同的碾压遍数（10 遍、12 遍、14 遍），系统分析碾压工艺对水泥土干密度、压实度、沉降量等关键性能指标的影响规律。此外，通过对沉降量的系统监测与分析，进一步验证碾压工艺对土体压缩行为的控制效果，为工程中合理确定碾压遍数提供数据支持。本研究旨在提出适用于该灌区工程的水泥土填筑碾压工艺参数，为类似工程的施工质量控制提供参考。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验原材料

试验填筑土料选取渠道开挖的可用粘性土料，粒径不大于 15mm。水泥采用天瑞集团河南永安水泥有限责任公司 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其掺量为 8%。8% 水泥土的最大干密度为 $1.87\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、最优含水率为 11.2%。

2.2. 试验流程

水泥土的碾压试验流程为：（1）对铺料基面进行定点高程测量，以计算并控制辅料厚度；（2）按设计水泥含量 8%（质量比）进行配比，每立方米土中水泥用量为 121.16kg，土料用量为 1514.38kg；（3）采用人工配合挖掘机对水泥与土料进行拌和，反复搅拌 5~6 遍，确保掺合料混合均匀；（4）使用人工配合挖掘机进行摊铺与整平，严格控制摊铺厚度；（5）采用 23t 振动碾进行碾压，先静压 2 遍，再分别进行振动碾压 8 遍、10 遍及 12 遍的对比试验，碾压过程中采用搭接法施工，碾迹搭接宽度不小于 30cm，机械行进速度控制在 3km/h 以内；（6）压实度控制指标为不小于 0.97，采用环刀法对土料填筑干密度进行检测，每个碾压组合取样 12 组，取样位置位于压实层厚下部，同步进行含水率与干密度检测。

2.3. 试验参数设置

本次共设置 3 组碾压工况，具体参数设置见表 1。

表 1 碾压试验参数组合

试验材料	摊铺厚度 (cm)	总碾压遍数	碾压机具	碾压遍数	检测项目
8% 水泥土	30	10	23t 振动碾	静压 2 遍, 振动 8 遍	干密度、含水率、压实度、沉降量
		12		静压 2 遍, 振动 10 遍	
		14		静压 2 遍, 振动 12 遍	

3. 讨论

3.1. 碾压遍数对干密度及均匀性的影响分析

干密度是评价填筑体压实效果的关键指标。图 1 为不同碾压遍数下水泥土的干密度。由图可知, 水泥土的干密度均值随碾压遍数增加呈持续增长趋势, 具体数值从 $1.80\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (10 遍) 增至 $1.84\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (12 遍), 最终稳定在 $1.86\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (14 遍)。分析其增长过程, 10 遍至 12 遍阶段的增幅为 2.22%, 而 12 遍至 14 遍阶段的增幅收窄至 1.09%, 表明增长速率显著放缓。为量化压实效率, 计算了单位碾压遍数干密度增量。结果显示, 10~12 遍阶段的增量为 $0.020\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}/\text{遍}$, 而 12~14 遍阶段降至 $0.010\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}/\text{遍}$, 效率衰减达 50%。这一定量结果证实, 碾压能量的投入产出效益在后期大幅降低。在均匀性方面, 干密度的标准差由 10 遍时的 $0.012\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 减小至 14 遍时的 $0.009\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。同时, 箱线图 (图 2) 显示数据的四分位距由 $0.025\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (10 遍) 缩窄至 $0.018\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (14 遍)。这两个指标的一致性变化表明, 增加碾压遍数能有效降低样本间的波动, 显著提升填筑体密实度的均匀性, 减少局部薄弱区域, 有利于提升工程结构的整体稳定性。上述定量规律符合土体压实的宏观力学行为: 初期碾压能量主要用于克服颗粒间较大孔隙, 密实效果显著; 后期土体骨架趋于稳定, 颗粒间摩擦与咬合作用增强, 导致压缩效率下降^[12-14]。

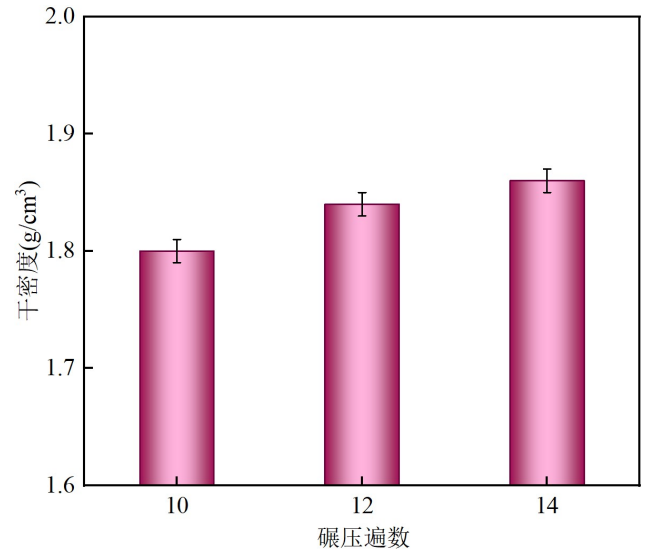


图 1 不同碾压遍数下水泥土的干密度

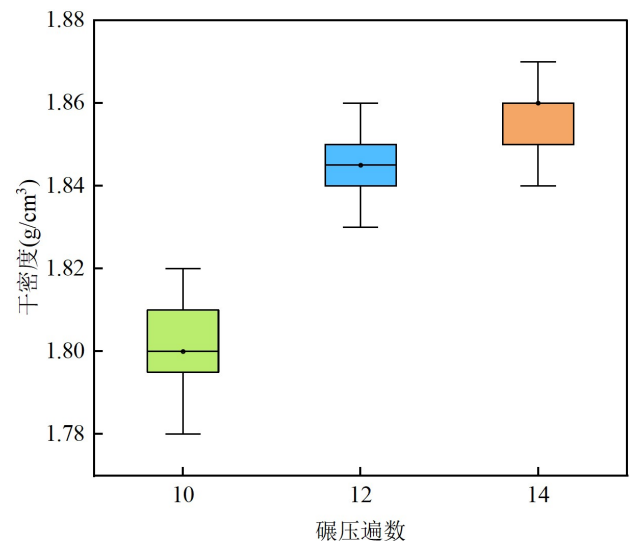


图 2 不同碾压遍数下水泥土干密度的箱线图

3.2. 碾压遍数对压实度的影响分析

压实度是工程质量的直接控制标准。图 3 和图 4 分别为不同碾压遍数下水泥土的压实度及其箱线图。由图可知, 水泥土的压实度均值随碾压遍数增加而逐步提升, 从 10 遍时的 96.3% 增至 12 遍时的 98.6%, 14 遍时达到 99.2%。从质量达标性看, 碾压 10 遍时, 所有样本均未达到 97% 的设计标准, 达标率为 0%。当碾压遍数增至 12 遍时, 所有 12 个样本的压实度均 $\geq 97\%$, 达标率达到 100%。继续碾压至 14 遍, 平均压实度仅微增 0.6%, 提升幅度有限。数据的离散程度也随碾压遍数增加而减小, 标准差从 10 遍时的 0.65% 降至 14 遍时的 0.45%, 说明压实质量的均匀性得到改善。从质量控制与施工经济性角度综合判断, 碾压 12 遍是实现设计标准的明确阈值。此后继续增

加碾压遍数, 虽能小幅提升平均压实度, 但单位遍数的效益极低。

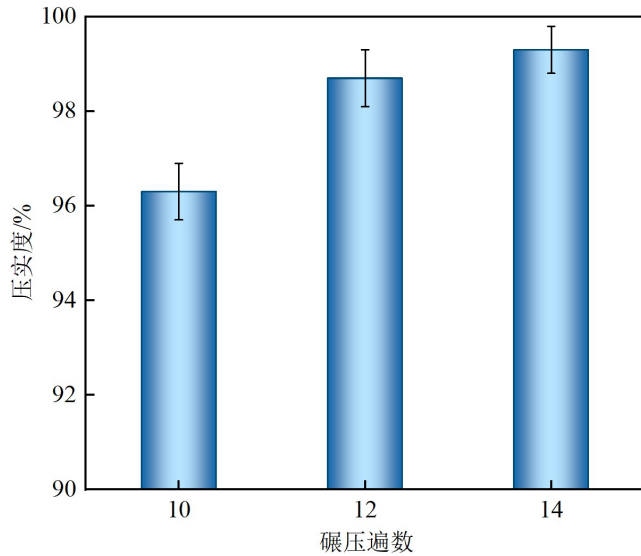


图3 不同碾压遍数下水泥土的压实度

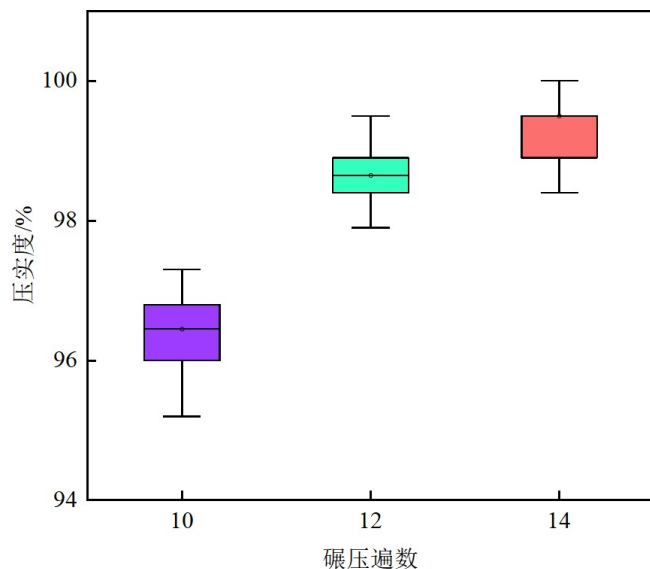


图4 不同碾压遍数下水泥土压实度的箱线图

3.3. 碾压遍数对沉降量的影响规律

图5为不同碾压遍数对沉降量的影响。由图可知, 随着碾压遍数的增加, 各测点沉降量呈现系统性增长: 其平均值从碾压10遍时的36 mm显著上升至12遍时的46 mm, 并进一步增至14遍时的52 mm。这一单调递增趋势揭示了碾压遍数与沉降量之间存在显著的正相关关系。此外, 表2还展示了不同碾压遍数下的沉降量描述性统计。由表可知, 随着碾压遍数的增加, 水泥土沉降量的变异系数从10遍时的9.39%逐步下降至12遍的6.37%和14遍的5.42%。该统计特征表明, 在更高遍数的碾压作用下, 不仅整体沉降水平提高, 而且各测点间沉降值的离散程度减小, 反映了压实过程的均匀性与稳定性得到了

有效提升。单因素重复测量方差分析结果 ($F(2, 36) = 370.57, p < 0.001$) 从统计学上严格验证了碾压遍数对沉降量产生的极显著主效应。该现象可能归因于在初始压实后, 持续增加的碾压能量输入导致了水泥土内部结构的进一步调整^[15]。因此, 在实际工程应用中, 碾压遍数并非越多越好, 在达到预期密实度的同时, 避免因过度碾压可能引发的非预期沉降增大, 从而实现工程质量与经济效益的最佳平衡。

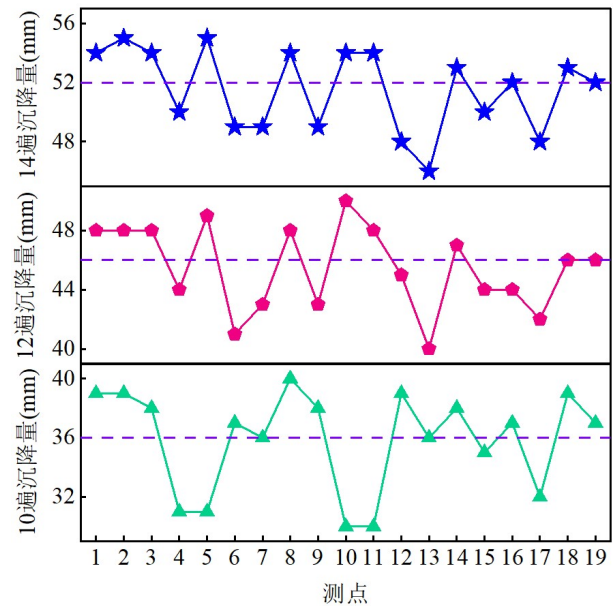


图5 不同碾压遍数下的沉降量

表2 不同碾压遍数下的沉降量描述性统计

碾压遍数	平均值 (mm)	标准差 (mm)
10 遍	36	3.38
12 遍	46	2.93
14 遍	52	2.82

3.4. 基于压实效率的碾压参数优化分析

图6为不同碾压阶段水泥土的沉降增量。由图可知, 水泥土后期碾压的效率明显低于前期。这一趋势与干密度和压实度的变化规律相互印证, 共同表明碾压12遍后, 填筑体已基本达到稳定压实状态。综合对干密度、压实度、沉降量等多个指标的分析, 在本试验设定的材料与工艺参数下, 推荐采用“静压2遍+振动碾压10遍”(总12遍)的施工方案。该方案能够满足工程质量要求, 且具有较好的施工效率。需要说明的是, 本研究的结论基于特定的试验条件。在实际工程应用中, 如土料性质、含水率

等关键参数发生变化, 建议通过现场试验对碾压参数进行验证和调整。

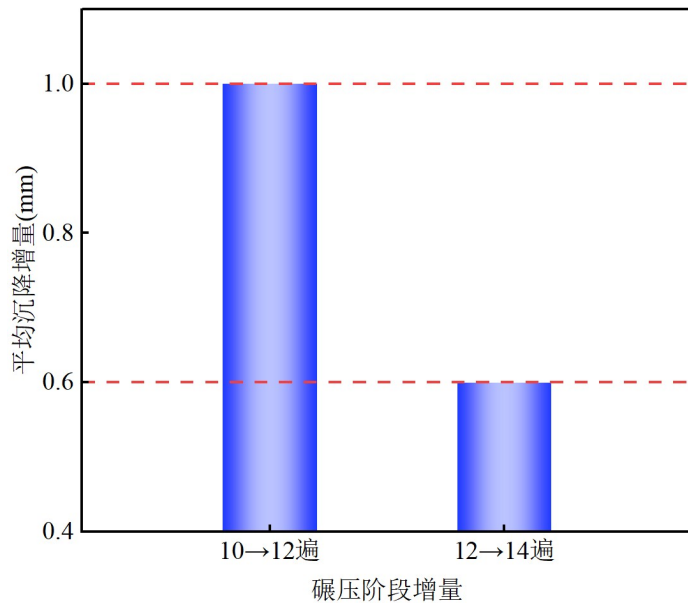


图6 不同碾压阶段水泥土的沉降增量

4. 结论

本研究通过现场碾压试验, 系统分析了碾压遍数对 8%水泥土干密度、压实度及沉降量等性能的影响, 得到主要结论如下:

(1) 碾压遍数是控制压实质量的关键。随碾压遍数从 10 遍增至 14 遍, 填筑体平均干密度由 $1.80\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 显著提升至 $1.86\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 平均压实度由 96.3% 增长至 99.2%; 增长速率随遍数增加而衰减, 符合土体压实的“颗粒重组-孔隙填充”规律。

(2) 确定最优碾压遍数为 12 遍。此遍数下, 压实度样本合格率达到 100%, 满足设计值 ($\geq 97\%$) 要求, 且干密度与压实度的离散性最小, 填筑体均匀性最优; 继续增加遍数对压实度的提升效益显著降低。

参考文献

- [1] Zhiliang Wang, Jiangpeng Cai, Miao Li, et al. Upcycling rice husk biowaste to improve cement-based peat soil stabilization[J]. Soils and Foundations, 2025, 65, 101685.
- [2] Mostafa Zamanian, Meghdad Payan, Mahdi Salimi, et al. Comparative efficacy of grouting and mixing methods for stabilizing collapsible soils with nano-clay and cement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 23, e05159.
- [3] Svetlana Melentijevic, Adilson Cameia, Fernando Garcia Bano, et al. Application of cement kiln dust for the stabilization of expansive soils in the region of Murcia (Spain)[J]. Construction and Building Materials, 2025, 491, 142743.
- [4] 杨铁军. 公路路基水泥土压实度试验控制[J]. 江苏建材, 2025, (02): 62- 64.
- [5] 刘路, 武智飞, 邵成龙. 水泥土“路拌法”施工技术研究与应[J]. 公路, 2020, 65(06): 121- 125.
- [6] 路立新. 某工程水泥土碾压试验与成果分析[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2012, 29(03): 17- 19.
- [7] 曹倩, 耿晋, 佟红丽. 15%水泥土碾压试验施工参数的选择[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(01): 119- 121.
- [8] 李伟光. 浅谈调蓄水池 10%水泥土垫层试验段施工[J]. 农业科技与信息, 2021, (03): 104- 106.
- [9] 郁亮, 吴文虎, 孙常海. 吹填土地地加固中水泥土施工技术试验研究[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(03): 75- 79.
- [10] 陈柯, 梁爽, 赵振国, 等. 水泥土抗裂性能的影响因素分析[J]. 中外公路, 2023, 43(05): 194- 197.
- [11] 胡文星. 浅谈 4%水泥土施工技术[J]. 山东工业技术, 2017, (15): 89.
- [12] 郭华杰, 江辉煌, 刘向明. 基于 MFCC 的路基土密实度识别技术研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(11): 8- 16.
- [13] 董卫军, 沈林栋, 陈凤振, 等. 填筑土体压实度快速检测试验[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(02): 34- 36+ 39.
- [14] 庄艳峰, 王钊. 土体的压实能耗和合理压实度要求[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, (01): 133- 136.
- [15] 蒋育红, 黄宝涛. 压实对土体空间结构影响的分形描述[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(08): 1265- 1269.