

山区高速公路路堤填筑材料击实试验研究

王信琨¹ 张欣伟²

1 广深铁路股份有限公司广州工务段 2 中科(湖南)先进轨道交通研究院有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i2.12927

[摘要] 为提高高速公路路基的智能化施工质量控制水平,揭示含水率与击实功耦合作用对填料压实特性的影响机制,本研究以成南扩容高速段样土填料为研究对象,基于智能压实技术背景开展精细化室内试验。采用全自动振动击实仪,设计正交试验,系统控制含水率(梯度设置为2%、4%、6%、8%、10%)及碾压遍数(78次、88次、98次、108次和118次)等参数,实时采集击实过程中的动态响应信号。研究成果可为智能压路机的激振力参数优化、含水率实时调控提供理论依据,推动基于数字孪生的路基压实质量闭环控制技术发展。

[关键词] 高速公路路基; 击实试验; 成南高速; 含水率; 击实功

中图分类号: U412.36+6 **文献标识码:** A

Study on Compaction Test of Embankment Fill Materials for Mountainous Expressways

Jikun Wang¹ Xinwei Zhang²

1 Guangzhou-Shenzhen Railway Co., LTD. Gu

2 Zhongke (Hunan) Advanced Rail Transit Research Institute Co., LTD.

[Abstract] To improve the intelligent construction quality control of expressway subgrades and reveal the coupling mechanism of moisture content and compaction energy on the compaction characteristics of fill materials, this study focuses on soil samples from the Chengnan Expressway Expansion Section. Under the framework of intelligent compaction technology, refined laboratory experiments were conducted using a fully automatic vibrating compactor. An orthogonal experimental design was implemented to systematically control parameters such as moisture content (graded at 2%, 10%, 12%, 14%, and 16%) and compaction passes (78, 88, 98, 108, and 118 times), while dynamically acquiring real-time response signals during the compaction process. The research outcomes provide theoretical support for optimizing excitation force parameters of intelligent rollers and enabling real-time moisture content regulation. Additionally, this study advances the development of closed-loop control technology for subgrade compaction quality based on digital twin systems.

[Key words] Expressway subgrade; Compaction test; Chengnan Expressway; Moisture content; Compaction energy

前言

随着高速公路网络的快速建设,我国高速公路营业里程稳居世界第一^[1]。路基压实质量作为保障道路长期服役性能的核心环节,其智能化施工控制技术已成为行业研究热点^[2]。尤其在山区高速公路建设中,复杂地质条件与高填方路堤的普遍性对填料压实特性提出了更高要求。传统压实质量控制主要依赖经验性参数(如碾压遍数)与事后检测,难以动态响应填料含水率波动、击实功传递效率等关键变量的耦合影响,导致压实不均匀、后期沉降等问题频发^[3]。因此,深入研究振动压实过程中击实功和含水率对填料动力响应特性的影响机理,对优化施工工艺、提升路基服役性能具有重要意义。

近年来,智能压实技术通过集成传感器、实时反馈与数字孪生系统,为路基施工质量的精准调控提供了新途径^[4-6]。然而,现有研究多聚焦于振动参数优化^[7],对含水率-击实功动态耦合机制的理论解析仍存在不足,制约了智能压实模型在复杂工况下的适应性。为此,本研究以成南扩容高速典型山区填料为对象,基于全自动振动击实仪与正交试验设计,系统探究不同含水率梯度(2%~10%)与击实能量输入(78~118次碾压)对压实特性的协同作用规律。通过实时采集动态响应信号,揭示填料压实抗力、能量耗散与含水状态的关联机制,旨在构建面向压路机的激振力-含水率协同调控模型,推动路基压实闭环控制技术发展。

本研究不仅为山区高速公路填筑工艺优化提供数据支撑,亦为交通基础设施智能化转型的技术链条奠定理论基础,为工程应用与行业推广提供有力参考。

1 实验设计

多功能电动击实仪如图1所示。根据《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020)和现场实际情况,土样尺寸取为4cm。击实仪的锤底直径为5cm,锤重4.5kg,落高45cm。试筒内径为15.2cm,高度为17cm,垫块高度5cm。试样高度为12cm,体积为2177cm³。

进行土样筛分后,将筛分好的土样在105℃下烘干10小时。然后取6kg干土放入钢托盘和钢盆中,按照规定的含水率逐步添加纯净水,每次加入后搅拌均匀,用保鲜膜包裹土样和容器,浸润超过6小时。浸润后,低含水率(6%以下)的土样色泽均匀,水分渗透性良好;高含水率时,部分土体表现出黏性。选择的含水率为2%、4%、6%、8%和10%,每层的击实次数分别为78次、88次、98次、108次和118次。



图1 多功能电动击实仪

2 测试结果

2.1 测试数据分析

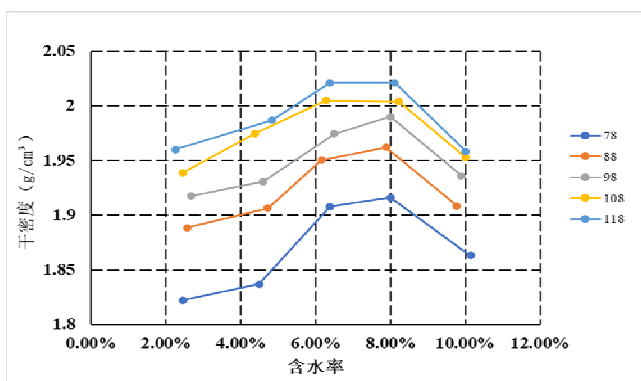


图2 单层不同击实次数下土样干密度

基于成南扩容高速公路路基填土(以下简称路基填土)在不同工况条件下的击实试验数据,本研究构建了单层压实过程中击实次数与土体干密度相关曲线(见图2)。试验结果表明:在固定击实功作用下,路基填土的干密度随含水率变化呈现显著的非线性特征。具体而言,当含水率由2%增至8%时,土体干密度呈

现递增趋势;而当含水率继续增至10%时,干密度则出现递减现象。该抛物线型变化规律表明,试验条件下路基填土的最优含水率区间为6%~10%。值得注意的是,土体干密度与击实功之间呈现正相关关系,即随着击实次数的增加(击实功累积增强),干密度值相应增大。这一现象证实了击实功对土体压实效果的显著影响。

2.2 击实功对路堤压实度的影响规律

基于压实度(即实际干密度与最大干密度之比值)的物理定义,本研究采用干密度作为该路基填土压实度的表征参数(最大干密度为恒定值)。鉴于击实次数与击实功具有等效表征关系,通过绘制单层不同击实功作用下土体干密度变化曲线(图3)可得如下压实度演化规律:

(1) 土体压实度与击实功呈显著正相关性,其值随击实功的增强呈单调递增特征;

(2) 当单层击实次数由78次增至118次时,压实度增长率呈现非线性衰减趋势。其机理在于:当击实功达到临界阈值后,土体颗粒骨架结构趋于密实化,此时表现为轴向压缩应变增速放缓,而弹性模量持续递增,导致应力-应变响应进入非线性强化阶段。在此状态下,单位击实功增量所引发的压实度提升效应显著弱化,从而形成增幅递减的压实特性。

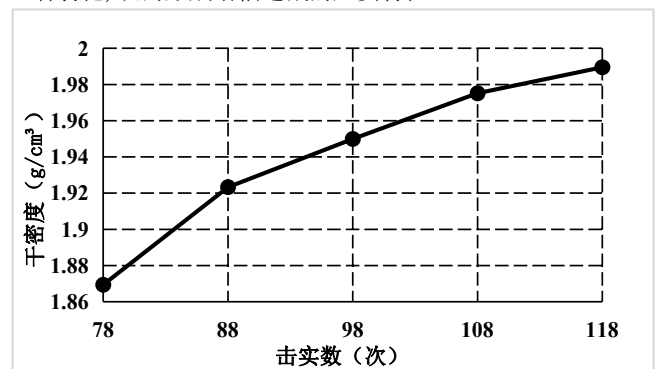


图3 单层不同击实次数下土样干密度

2.3 含水率对路堤压实度的影响规律

试验过程中,受岩土介质的非均质特性影响,土体实测含水率与预设含水率存在显著偏差。尽管如此,预设含水率仍为压实度控制的核心参数,而干密度计算结果已涵盖实测含水率的影响效应。通过建立不同预设含水率条件下土体干密度变化曲线(见图4),可揭示含水率对压实特性的作用规律:

(1) 当含水率从2%增至10%时,土体压实度呈现先增后减的非线性响应特征,其变化趋势符合典型抛物线模型。

(2) 根据曲线峰值区域分析,该填土材料的最优含水率区间为6%~8%。此现象可归因于水分润滑效应与孔隙水压力演变的双重作用机制:低含水率阶段(<6%),水分对颗粒间摩擦力的削弱效应主导压实效果提升;而当含水率超过阈值(>8%)时,过饱和状态引发孔隙水压力积聚,导致有效应力降低,进而抑制压实度增长。试验数据表明,最优含水率区间内土体可实现颗粒重排效率与抗变形能力的动态平衡,从而获得最大干密度值。

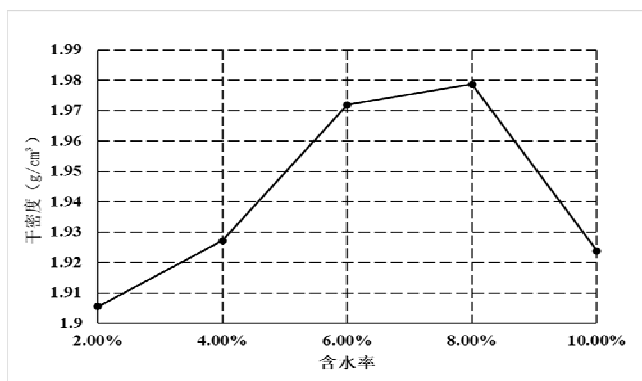


图4 不同振动能量干密度变化规律

3 结论和建议

(1) 路基土样的压实度与击实功呈正相关关系, 当单层击实次数增幅达到20%时, 其压实度增长率呈现边际递减现象。含水率在2%-10%区间变化时, 土体压实度呈现先升后降的二次曲线特征, 最优含水率区间为6%-8%。

(2) 在含水率2%步长变化与击实功10%步长变化的对比研究中, 两者对土体击实效果的影响程度具有近似性。特别当施加击实功低于基准值时, 击实功步长增加对压实度提升具有显著效应。

(3) 建议将击实功设计值提升至基准值的120%以实现充分压实; 建议将含水率严格控制在6%-8%最优区间, 并通过施工监

测确保其不超过临界值10%。

[参考文献]

- [1]王彤.基于雷视数据融合的高速公路风险识别算法研究与实现[D].北方工业大学,2024.
- [2]顾黎敏.智能高速公路路基路面施工安全管理策略[J].智能建筑与智慧城市,2025,(01):174-176.
- [3]王鹏.基于静载试验的高速公路土质路基压实度测定方法[J].中国勘察设计,2021,(10):85-88.
- [4]钱劲松,庞劲松,费伦林,等.路基智能压实评价指标研究进展综述[J].同济大学学报(自然科学版),2024,52(03):388-397.
- [5]陈嘉锡,张勇,卢吉,等.基于Hilbert-Huang变换的机场路基智能压实振动信号分析[J].土木工程与管理学报,2022,39(3):133-139.
- [6]廖天亮.智能压实路基压实质量的影响因素及解决方案[J].工程技术研究,2022,7(04):66-67+89.
- [7]马源,方周,韩涛,等.路基智能压实关键控制参数动态仿真及演变规律[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(07):2246-2257.

作者简介:

王信琨(1990--),男,汉族,江西省吉安市人,学士工程师,研究方向:从事铁路路基防洪工程管理工作。