

填石路基压实检测管控难点及优化方案研讨

刘燕飞

内蒙古路桥集团有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要: 填石路基因其透水性强、沉降稳定性好而广泛应用于山区高等级公路与铁路工程,但其压实质量检测长期面临石料粒径离散性大、传统检测方法适用性差、压实机理复杂等管控难点。本文系统分析填石路基压实检测的技术瓶颈,包括灌砂法因粒径超限无法使用、沉降差法缺乏理论标定、动刚度与模量法受填料级配影响显著、压实度与变形指标关联性弱等核心问题。在此基础上,从检测方法改进、控制指标优化、过程管控强化及智能融合四个维度提出优化方案:构建以连续压实检测系统(CCDS)为主、多指标互补的分层检测架构;建立填石路基压实质量综合控制指标体系;完善填料级配与压实参数动态匹配机制;推进检测数据与数字化管理平台融合。研究成果旨在为填石路基压实质量管控提供系统化技术思路。

关键词: 填石路基; 压实检测; 管控难点; 连续压实检测; 多指标融合

引言

填石路基是利用开山石料或河滩卵石填筑而成的路基结构形式,在交通荷载传递、抗水毁及工后沉降控制方面具有独特优势。随着山区交通基础设施建设的加速,填石路基应用规模持续扩大,其压实质量直接关系路基整体稳定性与路面结构耐久性。然而,填石路基填料粒径大(常超过200mm)、级配差、颗粒间嵌锁效应强,常规用于土质路基的灌砂法、环刀法等压实度检测手段无法实施。工程实践中普遍采用沉降差法、孔隙率法或补充采用强振碾压后的轮迹判别,但这些方法存在物理意义不明确、干扰因素多、人与设备影响大等问题。压实检测数据失真或偏差不仅导致质量评定失准,更可能引发路基不均匀沉降、路面早期开裂等工程病害。因此,准确识别填石路基压实检测的技术难点,提出针对性强、可操作的优化方案,成为提升填石路基施工质量管控水平的关键命题。

1 填石路基压实特性与检测技术基础

1.1 填石路基填料的力学特性

填石路基填料以粗粒组(粒径>60mm)和巨粒组(粒径>200mm)为主体,细粒含量通常低于10%。其压实机理不同于粘性土或砂性土——不是依靠颗粒间水膜润滑与排气压实,而是通过振动碾压使大粒径石料重新排列、棱角破碎、小颗粒填充空隙,形成以颗粒嵌锁和摩擦咬合为主的结构强度。影响压实效果的关键因素包括:石料的单轴抗压强度(软岩易破碎过度导致细粒增多)、粒径级配(良好级配可降低孔隙率)、碾压机具参数(振幅、频率、激振力)及碾压层厚度(一般30~80cm)^[1]。由于石料间点接触而非面接触,压实后的回弹模量离散程

度远高于土质路基,给检测点位代表性带来挑战。

1.2 压实质量表征参数体系

压实质量的表征参数可分为物理参数(密度、孔隙率)、力学参数(变形模量、回弹模量、地基系数)和过程参数(沉降率、碾压遍数)。对于填石路基,干密度并非唯一核心指标,因为大粒径石料的密度测定受限于样品尺寸;孔隙率(或空隙率)更能反映颗粒排列密实程度,但现场测定同样困难。力学参数如K30(平板载荷试验获得的地基系数)、Evd(动态变形模量)、Ev2(静态变形模量)可间接评估压实后承载能力,但受测试深度影响(一般限于表层30~50cm)。过程参数如沉降差法——记录碾压前后各测点标高变化,计算沉降率或差异沉降——操作简便,但无法揭示深层压实均匀性。

1.3 现有检测方法的技术框架

目前填石路基压实检测主要采用以下方法。沉降差法:在碾压层表面布设网格测点,使用水准仪测量碾压前及终压后的标高,计算平均沉降率,辅以后两遍沉降差不超过控制值(如3mm)作为压实合格判据。孔隙率控制法:挖坑灌水测定坑体积,称量坑内石料质量并筛分,根据各级粒径质量计算孔隙率,要求不大于设计值(如23%~25%)。连续压实检测系统:安装在振动压路机上的加速度传感器采集压实轮与填料相互作用信号,实时输出压实值(CMV或CCV),用以表征压实度变化趋势。补充方法包括波速法、瑞利面波法、核子密度仪法等,但受限于石料粒径、含水量及安全要求,应用范围有限。

2 填石路基压实检测管控难点系统分析

2.1 检测方法的适用性边界不清

填石路基压实检测的首要难点在于：传统土工压实方法失效，替代方法各有严格适用条件，工程中常出现混用或误用。灌砂法因最大粒径超150mm时无法埋设砂筒且漏砂严重，不可采用。沉降差法的控制阈值缺乏理论推导，不同规范差异显著，且与碾压机具、松铺厚度、石料岩性强耦合，统一阈值易导致“过度碾压”或“欠压实”。孔隙率法需大规模挖坑（直径 $>1.5\text{m}$ ），破坏路基且费时费力，检测频率不足，无法反映局部软带。连续压实系统输出值（CMV）与刚度的线性关系在级配突变处畸变，需依赖传统点位试验进行现场标定。

2.2 粒径离散性导致代表性与重复性矛盾

填料最大与最小粒径相差两个数量级，检测结果呈现强尺度效应。沉降差法中，测点若位于大块石顶部则沉降小，位于细料区则沉降大，少量测点随机性大，重复测量因石料破碎或位移而产生偏差^[2]。孔隙率法挖坑时，若含特大粒径石料则孔隙率偏低，以细料为主则偏高。“点状代表而非区域整体”的矛盾使检测结果无法真实反映压实层均匀性。

2.3 压实度与力学指标的转化关系缺失

现有检测指标多为过程或状态指标，与长期性能缺乏定量模型。沉降率合格仅表明位移收敛，不直接等同于模量达标，如软岩过度碾压后细粉含量升高反而导致承载力下降。孔隙率与变形模量（如K30、Ev2）存在经验关系，但同一孔隙率下不同级配填料的模量可相差2~3倍。施工常以沉降差为主控，设计则要求力学指标，两者脱节引发验收争议。

2.4 碾压参数与检测条件的耦合干扰

检测结果受碾压机具、速度、层厚、级配及环境湿度等多因素交互影响。相同沉降差下，高频低幅与低频高幅振压的压实深度不同，浅层密实深层疏松时仍可合格。碾压速度提高会使CMV值显著下降，若不记录速度则无法横向比较。干燥状态碾压效果优于湿润状态，但雨水渗入后表面细料黏附可导致沉降差假性收敛，严重影响检测数据的可靠性。

2.5 深层压实质量检测手段匮乏

填石路基分层厚度30~80cm，现有方法（除沉降差法外）主要反映表层以下30cm范围。平板载荷试验影响深度不足以评价层底质量。灌水法全厚挖坑因作业量大、成本高，极少实施。连续压实系统的振动信号穿透深度有限，深层信息占比低。“表层合格、深层疏松”的隐蔽缺陷是后期差异沉降的重要原因，但缺乏经济有效的深层无损检测手段。

2.6 缺乏统一的检测规程与质量评定标准

现行规范分散于公路、铁路及地方标准中，对沉降差控制值、孔隙率限值、检测频率等要求不一，同一工程可能同时出现“合格”与“不合格”的冲突。软岩含量超30%的混合填石路基尚无专门标准，套用硬质岩指标易误判。检测仪器（如水准仪精度、连续压实系统标定程序）缺乏统一计量校准体系，设备间偏差未纳入考量。

3 填石路基压实检测优化方案构建

3.1 检测方法的优化组合策略

放弃单一方法定合格，建立分层、分阶段的多方法组合检测体系。过程快速筛查以连续压实检测系统为核心，碾压过程中实时输出压实值分布图，通过相对阈值（如试验段CMV目标值的90%）自动识别薄弱区域并报警，实现100%面域覆盖，仅需建立“CMV随遍数增长收敛”趋势基线，无需传统标定曲线^[3]。点位验证采用改进型沉降差法，利用激光扫描获取碾压前后高密度点云（间距 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ），计算面域沉降分布并引入不均匀系数（标准差/均值， >0.3 判定级配离析）；最后两遍沉降差阈值根据试验段碾压遍数-沉降收敛曲线动态设定，取拐点对应沉降差的1.2倍。力学验证对验收段落采用便携式落锤弯沉仪或动态变形模量仪，每 2000m^2 不少于6点， $E_{vd} \geq 40\text{MPa}$ 为合格，厚层填石可分层检测。深层抽检每填筑3~5层进行一次组合检验：地质雷达（400MHz天线）检测层间脱空或不密实区，对异常点挖坑验证（坑径 $\geq$ 最大粒径3倍，约1.2~1.5m，深度贯通至下层顶面），直接测定各层孔隙率，频率降至每 5000m^2 或每工点不少于2处。

3.2 多指标融合控制体系

构建由压实度表征指标、力学指标、均匀性指标与过程指标组成的四维控制体系。压实度表征采用表观孔隙率：挖坑灌水测定坑内石料堆积密度，根据石料母岩视密度换算空隙率；软硬混合填料分层筛分并分别测定不同粒级视密度，加权计算综合视密度。表观孔隙率控制目标：硬质岩 $\leq 23\%$ ，软硬混合料 $\leq 25\%$ 。力学指标采用K30与Evd双控， $K30 \geq 130\text{MPa/m}$ （高速与一级公路下路床）、 $E_{vd} \geq 50\text{MPa}$ ；K30无法开展时以Evd及Ev2替代， $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.2$ 。均匀性指标利用连续压实系统输出的压实值变异系数CV， $CV > 0.15$ 判定为不均匀，需补充碾压或调整级配；桥头、涵背等段落CV应 ≤ 0.10 。过程指标记录每层碾压遍数、激振力、频率、速度及搭接宽度，形成碾压作业数字日志，作为质量追溯与异常排查依据。

3.3 填料级配与压实参数动态匹配机制

试验段阶段：取代表性填料，设计三种级配曲

线(连续、间断、细粒偏多型),分别以不同振幅(1.5/1.8/2.0mm)、频率(28/32/35Hz)组合进行碾压试验,测定沉降收敛曲线、孔隙率、Evd及CMV终值,建立“填料—参数—指标”数据库,选定最优级配及匹配工艺。施工过程动态调整:每5000m³填料快速筛分一次,超出允许级配范围则调整碾压参数(如级配偏粗时增加振幅)或松铺厚度,每次调整后重新标定连续压实系统基线^[4]。检测阈值动态修订:根据最近10组验证点位的实测数据(孔隙率与Evd)反算沉降差控制阈值,取孔隙率达到设计值时对应碾压终了阶段沉降率统计值的下限,不再采用固定经验值。

3.4 连续压实检测系统深度优化与融合

双频或多频振动采集:在常规低频(30Hz左右)基础上增加低幅高频(50~60Hz),高频信号反映浅层密实度,低频信号反映深层;若高频CMV高而低频CMV低,提示“表面硬壳、下层疏松”,应增加低频大振幅碾压。与GPS/北斗定位结合:生成压实值等高线图,计算每1m×1m网格的压实值并与目标值对比,自动标识遍数不足或过压区域,叠加填料来源数据分析压实质量与料源关联性。自适应碾压反馈控制:将连续压实输出值作为反馈信号,实时计算压实效率指标,当连续两个碾压带压实指标增长速率低于预设阈值(如每遍增量<2%)时提示停止碾压,以压实指标收敛取代固定遍数控制。

3.5 检测数据管理与智能分析平台

集成四个模块:数据采集模块通过手持或车载终端自动录入连续压实数据、沉降差、力学测试及孔隙率数据,杜绝人工篡改。时空配准模块将所有检测结果统一至施工坐标系下的相同空间网格,实现多源数据交叉验证(如同一网格内展示CMV值、Evd值及沉降率)。异常诊断模块在指标超标时自动关联同位置其他指标及上游填料信息,给出可能原因(级配偏粗、速度过快、层厚过大等)及处理建议。统计报表模块按分项工程自动生成压实质量评定报告,含合格率、均匀性指标、超限点分布图及整改闭环记录。

3.6 标准规范与人员培训配套

建议编制《填石路基压实检测技术指南》,统一以下内容:不同岩性填石的孔隙率控制值分层表;连续压实系统的进场校验、过程核查及数据存储格式;沉降差法测点布置最小密度及激光扫描替代方案;多指标融合体系下的质量评定规则(所有指标合格为优良,力学及均匀性合格但压实度临界为合格,任一不合格返工)。同步开展检测人员技术培训,重点掌握连续压实系统参数设定、雷达图谱识别及多指标联合判读方法,改变“只会读沉降差”的单一能力结构。

4 结语

填石路基压实检测的难点源于填料巨粒性、离散性及传统方法的局限。本文分析了六大难点——方法适用性不清、粒径离散性矛盾、压实度-力学指标转化缺失、碾压参数耦合、深层检测匮乏、标准不统一,并提出四维优化方案:方法组合形成分层筛查验证;多指标融合(孔隙率、力学指标、均匀性、过程指标);级配与参数动态匹配;连续压实系统优化及数据平台管理。方案依赖方法协同、指标互补、过程联动与智能赋能。未来研究方向:基于机器学习的级配快速识别(图像+振动融合);三维连续检测模型(振动信号反演深度模量剖面);无人驾驶压路机群协同碾压与实时闭环控制。填石路基压实检测正从“经验判断、离散抽检”向“全断面连续感知、数据驱动评定”转型,本文框架可为这一转型提供参考。

参考文献

- [1]张荣,腊润涛,牛云霞.填石路基压实工艺与质量检测方法研究[J].公路,2020,65(10):90-93.
- [2]李艳清,任鸿昌,刘泽.山区填石路基振动压实质量检测与评价研究[J].建筑机械化,2025,46(8):113-116.
- [3]王惠惠.公路填石路基压实工艺优选及效果评价研究[J].江苏建筑职业技术学院学报,2024,24(3):19-24.
- [4]韩沛,李小勇,李梦娇.填石路基快速施工工艺与压实质量控制[J].山东交通学院学报,2024,32(1):29-36+42.