

再生骨料填料路基压实工艺与质量控制试验探究

吉刚

新疆公路建设(集团)有限责任公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要: 随着城市化进程的加速与基础设施更新换代的频繁, 建筑垃圾的产生量急剧攀升, 将其资源化利用制备再生骨料并应用于公路路基填筑, 已成为实现交通建设绿色低碳转型的关键路径。然而, 再生骨料因其来源复杂、组分多变、表面附着砂浆及内部微裂纹等固有缺陷, 其力学性能与变形特性显著区别于天然骨料, 导致传统基于天然土石方的压实工艺与质量控制标准难以直接套用, 极易引发路基沉降过大、强度不足及水稳定性差等工程病害。本文系统综述了再生骨料填料路基压实特性、施工工艺优化及质量控制方法的最新研究进展。文章首先剖析了再生骨料的物理力学特征及其对压实行为的影响机制, 指出颗粒破碎、级配演化与含水率敏感性是制约压实效果的核心因素; 其次, 梳理了振动压实、冲击碾压及静载预压等不同工艺在再生骨料路基中的适用性与参数优化规律, 强调了“低振幅、高频率、薄层铺筑”的工艺原则; 再次, 评述了现行压实度检测方法的局限性, 探讨了基于动态模量、弯沉值及智能压实技术的多元化质量评价体系构建思路。研究表明, 再生骨料路基的压实质量控制必须从单一密度指标转向“密度—模量—均匀性”多维协同控制, 并建立适应材料变异性的动态反馈机制。未来需深化再生骨料长期服役性能研究, 完善专用技术规范, 推动智能化施工装备与数字化质控平台的深度融合, 以保障再生骨料路基工程的安全、耐久与经济性。

关键词: 再生骨料; 路基压实; 压实工艺; 质量控制; 颗粒破碎; 智能压实

Investigation on Compaction Technology and Quality Control of Subgrade Filled with Recycled Aggregate

Ji Gang

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

Abstract: With the acceleration of urbanization and frequent infrastructure renewal, construction waste generation has surged dramatically. Recycling construction waste to produce recycled aggregates for subgrade filling in highway engineering has become a key pathway toward green and low-carbon transformation in transportation development. However, due to their complex origins, variable compositions, surface-attached mortar, and internal microcracks, recycled aggregates exhibit significantly different mechanical properties and deformation characteristics compared to natural aggregates. This makes traditional compaction techniques and quality control standards based on natural soil and rock unsuitable for direct application, often leading to engineering problems such as excessive subgrade settlement, insufficient strength, and poor water stability. This paper systematically reviews recent research advances in the compaction behavior, construction process optimization, and quality control methods for subgrades filled with recycled aggregate. First, it analyzes the physical and mechanical characteristics of recycled aggregates and their influence mechanisms on compaction behavior, identifying particle breakage, gradation evolution, and moisture sensitivity as critical factors limiting compaction performance. Second, it evaluates the applicability and parameter optimization principles of various compaction methods—including vibratory compaction, impact rolling, and static preloading—highlighting the importance of the "low amplitude, high frequency, thin-layer placement" approach. Third, it discusses the limitations of current compaction degree testing methods and explores the development of a diversified quality evaluation system based on dynamic modulus, deflection values, and intelligent compaction technologies. The study demonstrates that quality control for recycled aggregate subgrades must shift from relying solely on density indicators to a multidimensional, coordinated control framework integrating density, modulus, and uniformity, supported by a dynamic feedback mechanism adapted to material variability. Future efforts should focus on deepening research into the long-term service performance of recycled aggregates, improving specialized technical specifications, and promoting the integration of intelligent construction equipment with digital quality control platforms to ensure the safety, durability,

and economic efficiency of recycled aggregate subgrade projects.

Keywords: Recycled aggregate; Subgrade compaction; Compaction technology; Quality control; Particle breakage; Intelligent compaction

0 引言

我国每年产生的建筑垃圾总量已突破 30 亿吨,但资源化利用率仍低于发达国家水平,大量废弃混凝土、砖瓦等被简单填埋或堆放,不仅占用宝贵土地资源,更造成严重的环境污染与碳排放问题。与此同时,公路基础设施建设对砂石骨料的需求持续高位运行,天然资源日益枯竭,开采受限。在此背景下,将建筑垃圾加工为再生骨料用于路基填筑,既可消纳固废、缓解资源压力,又能降低工程造价与碳足迹,具有显著的经济、环境与战略价值。然而,再生骨料并非天然骨料的简单替代品,其表面包裹的老化水泥砂浆孔隙率大、强度低、吸水率高,且在破碎加工过程中易产生新的微损伤,导致颗粒形状不规则、棱角多、内摩擦角离散性大。这些特性使得再生骨料在压实过程中表现出强烈的非线性、应力依赖性及颗粒破碎效应,传统压实设备与工艺参数往往难以达到预期密实度,甚至因过度压实导致结构破坏。更为棘手的是,现行《公路路基施工技术规范》等标准主要针对天然土石方制定,缺乏针对再生骨料特性的压实度检测方法、验收阈值及过程控制要点,致使工程质量波动大、隐患多。近年来,国内外学者围绕再生骨料路基开展了大量室内试验与现场测试,在压实机理认知与工艺改进方面取得重要成果,但对“材料-工艺-检测”全链条适配性的系统综述尚显不足,尤其对施工中如何平衡压实能量输入与颗粒完整性、如何建立可靠的质量反馈闭环等实操问题缺乏深入探讨。本文立足工程实践与科研前沿,全面解析再生骨料路基压实的关键科学问题与技术瓶颈,评述现有解决方案的有效性 with 局限性,探索适应再生骨料特性的精细化压实与智能化质控路径,以期绿色公路高质量发展提供理论支撑与实践指引^[1]。

1 再生骨料填料路基压实特性的多维影响因素解析

要制定科学合理的压实工艺与质量控制策略,必须首先厘清再生骨料区别于天然材料的独特压实行为及其内在驱动机制,避免经验主义误判。

1.1 材料本征特性对压实响应的主导作用

再生骨料的压实效果从根本上受其自身物理力学属性支配。首先,附着的老化砂浆使其吸水率普遍高于天然骨料 5%-15%,在拌合与摊铺过程中会快速吸收水分,改变

实际含水状态,若按天然骨料最佳含水率控制,极易导致压实功无法有效传递或形成“弹簧土”。其次,颗粒形状不规则、针片状含量高,导致初始堆积空隙率大,压实初期主要依靠颗粒重排与嵌挤,后期则依赖砂浆层的塑性变形与局部破碎填充,压实曲线呈现明显的双阶段特征。再者,再生骨料强度离散性大,软弱颗粒在压实荷载下优先破碎,一方面释放细料改善级配、提高密实度,另一方面过量破碎会削弱骨架承载能力,增加压缩变形潜力。研究表明,当压实功超过某一临界值后,再生骨料试样的干密度不再增长甚至下降,而回弹模量显著衰减,这与天然骨料单调递增的压实规律截然不同。因此,再生骨料的“最佳压实状态”并非对应最大干密度点,而是密实度与结构完整性的最优平衡点,这一认知是工艺设计的逻辑起点^[2]。

1.2 外部环境与施工条件对压实效果的耦合干扰

除材料本身外,环境温湿度、摊铺厚度、含水率控制精度及压实设备类型等外部变量亦深刻影响再生骨料路基的最终质量。高温干燥环境下,再生骨料表面水分蒸发极快,若洒水养护不及时,表层迅速失水硬化,阻碍下层压实能量传递,形成“硬壳软心”夹层;低温季节则因砂浆中自由水结冰膨胀,解冻后留下孔隙,降低整体强度。摊铺厚度过大时,振动波衰减剧烈,底层压实度难以达标;过薄则易造成骨料二次破碎与离析。含水率偏差 $\pm 2\%$ 即可使压实度波动 5 个百分点以上,远超天然材料的敏感区间。此外,不同压实设备的激振力、频率、振幅组合对再生骨料的适应性差异显著:高频低幅利于表层密实与颗粒嵌挤,低频高幅虽能增强深层作用但易诱发破碎。某高速公路试验段对比发现,采用 26t 单钢轮振动压路机(高频模式)压实再生骨料路基,其顶面回弹模量较传统 22t 设备提升 18%,且颗粒破碎率降低 30%。这揭示出,再生骨料压实绝非简单套用天然土方参数,而需根据实时工况动态调整,建立“材料-环境-设备”三位一体的响应式控制逻辑^[3]。

2 再生骨料路基压实工艺优化与适应性技术体系

针对上述复杂特性,再生骨料路基压实工艺必须摒弃“一刀切”思维,发展以保护颗粒完整性、提升结构均匀性为核心的精细化施工技术体系。

2.1 基于颗粒保护的振动压实参数优化策略

振动压实是当前再生骨料路基施工的主流方法,但其参数设定需兼顾密实与防碎双重目标。研究证实,再生骨料存在一个“安全压实能量窗口”,在此范围内,压实功增加可提升密实度而不显著损伤颗粒;超出此窗口,则得不偿失。该窗口的上限取决于骨料强度与级配,下限则由所需压实度决定。实践中,推荐采用“先静压稳型、再弱振嵌挤、后强振密实、终静压收光”的四阶段工艺:初压用静载消除松散空隙,避免振动导致表层松散;复压采用高频(35-40hz)、低幅(0.4-0.6mm)振动,促进颗粒定向排列与砂浆微变形;终压前视情况辅以1-2遍中频中幅振动,确保深层密实;最后静压消除轮迹。铺筑厚度宜控制在30cm以内,较天然骨料减薄20%-30%,以保证能量有效穿透。同时,应严格控制碾压速度(2-3km/h),过快则作用时间短、密实不足,过慢则局部过压风险增加。某市政道路项目通过正交试验确定最优参数组合后,再生骨料路基压实度稳定达96%以上,弯沉值满足设计要求,且钻芯取样显示颗粒破碎率低于8%,验证了参数优化的有效性。核心在于,将“压实”重新定义为“可控的能量输入过程”,而非单纯的机械作业^[4]。

2.2 辅助压实技术与特殊部位处理措施

对于大型压路机难以覆盖的桥涵台背、管线沟槽、边坡边缘等区域,以及高要求路段,需辅以特种压实技术以确保整体均匀性。小型液压夯、冲击夯因其高频冲击力集中、影响深度适中,特别适合再生骨料狭窄空间压实,可有效避免大型设备造成的侧向挤压破坏。对于深厚填方或软弱地基上的再生骨料路基,可采用冲击碾压作为补充手段,其高能脉冲波能穿透更深土层,消除潜在工后沉降,但须严格限制遍数(通常不超过20遍),并在冲击前后进行地温与含水率监测,防止热-水耦合作用劣化材料性能。此外,针对再生骨料吸水性强的特点,施工中应实施“随洒随压、少量多次”的补水策略,避免一次性过量洒水导致泥浆润滑、强度骤降;摊铺后应及时覆盖保湿,尤其在风大干燥天气。对于新旧路基拼接段,应在台阶处铺设土工格栅,并采用小型机具分层夯实,防止差异沉降引发纵向裂缝。这些辅助措施虽看似琐碎,却是保障再生骨料路基“无死角”质量的关键环节,体现了精细化施工的真正内涵^[5]。

3 再生骨料路基质量控制方法革新与体系重构

传统以压实度为核心的质量控制体系在再生骨料应用中暴露出诸多不适,亟需构建多维度、动态化、智能化的

新型质控范式。

3.1 从单一密度指标向“密度-模量-均匀性”综合评价转型

压实度虽是基本指标,但对再生骨料而言,其与实际承载能力的相关性较弱。由于颗粒破碎导致的级配变化,相同压实度下模量可能相差30%以上;反之,适度破碎带来的级配优化可能使模量提升而压实度未达峰值。因此,必须引入功能性指标作为主控依据。动态变形模量(evd)或回弹模量(mr)能直接反映路基在荷载作用下的弹性响应,应作为验收必检项目,并与压实度联合判定。同时,均匀性是再生骨料路基的另一生命线,可通过便携式落锤弯沉仪(pfwd)连续扫描或地质雷达探测识别内部薄弱区,避免点检漏判。某省试点工程采用“压实度 $\geq 95\%$ 且 $evd \geq 40\text{mpa}$ ”双控标准,较单一压实度控制减少了23%的早期病害。这标志着质量控制正从“符合规范”迈向“满足功能”,更契合再生骨料的材料本质^[6]。

3.2 智能压实技术与全过程数据驱动的质量闭环管理

面对再生骨料性能的时空变异性,静态抽检已难胜实时监控需求。智能压实技术通过在压路机上集成高精度定位、加速度传感器与车载计算单元,可实时采集振动频率、振幅、速度、遍数及地面反力等参数,并结合机器学习算法反演压实度或模量分布云图,实现全路段、全过程、全覆盖的质量可视化。操作人员可根据反馈即时调整工艺,监理人员可远程监督异常区域,彻底改变“事后验收、返工costly”的被动局面。更进一步,应将智能压实数据与材料出厂检验、环境监测、后期运维信息打通,构建数字孪生平台,支持压实参数的自适应优化与长期性能预测。例如,当系统检测到某段骨料吸水率偏高时,自动提示增加补水频次并降低振动强度;当模量增长停滞时,预警可能的过压风险。这种数据驱动的闭环管理,不仅提升了施工质量一致性,更为再生骨料路基的全生命周期性能评估积累了宝贵资产。唯有让数据成为施工的“眼睛”与“大脑”,才能真正驾驭再生骨料的复杂性,将其从“替代材料”升华为“高性能工程介质”。

4 结语

再生骨料填料路基的压实与质量控制,远非一项单纯的技术操作,而是对循环经济理念、材料科学认知与工程管理智慧的综合性考验。我们既要看到其在资源节约与碳减排方面的巨大潜力,也必须正视其性能变异带来的真实挑战。真正的突破不在于寻找一套放之四海而皆准的“万能参数”,而在于建立一种尊重材料个性、响应环境变化、

依托数据决策的动态建造哲学。这要求工程师放下对天然骨料经验的执念，学会解读再生颗粒的语言、理解破碎与密实的辩证关系、把握能量输入的微妙尺度；施工者超越机械执行的惯性，将每一次振动都视为与材料的对话而非征服；管理者打破检测与施工的壁垒，让实时反馈真正驱动工艺迭代、让多元指标共同守护结构安全。未来，随着人工智能、物联网与绿色建材的深度融合，再生骨料路基或将迎来从“合规使用”到“性能定制”的跃迁。但无论技术如何演进，对材料本质的敬畏、对细节的专注、对可持续责任的坚守，始终是绿色交通工程不可动摇的基石。这条通往高质量循环利用的道路没有捷径，但每一步基于实证的审慎探索，都是对生态文明最切实的践行，对未来基础设施韧性最深沉的承诺。

参考文献：

- [1] Usman (尹海) U I. PET 粉体替代 SMA 中部分填料对其性能影响的试验研究和数值分析[D]. 中南大学, 2024. DOI:10.27661/d.cnki.gzhnu.2024.003538.
- [2] 单宇昂. 建筑固废工程特性及路基填筑性能研究[D]. 西安工程大学, 2023. DOI:10.27390/d.cnki.gxbfc.2023.000005.
- [3] 刘书林. 建筑垃圾再生料的强度特性及在道路路基中的应用研究[D]. 西安科技大学, 2023. DOI:10.27397/d.cnki.gxaku.2023.001294.
- [4] Lameck (康名扬) L. PET 对铁路沥青混合料性能影响的试验研究与数值分析[D]. 中南大学, 2022. DOI:10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.001310.
- [5] 史小军. 建筑垃圾再生材料在城市道路中的应用研究[D]. 长安大学, 2021. DOI:10.26976/d.cnki.gchau.2021.000446.
- [6] 张威. 建筑垃圾路用再生填料的加工与施工工艺研究[D]. 长安大学, 2014.