

# 废旧混凝土再生骨料在公路基层中的性能与应用

曾宇

绍兴东盛交通工程检测有限公司，浙江绍兴，312000；

**摘要：**废旧混凝土再生骨料在公路基层中的应用是实现建筑垃圾资源化与道路工程可持续发展的重要路径，本文系统研究了再生骨料的力学性能、耐久性及环境相容性，揭示了其界面过渡区弱化、冻融损伤演化等关键机理，提出了胶凝体系优化与分形级配设计方法，为建筑垃圾规模化应用于公路工程提供了理论支撑与技术范式。

**关键词：**再生骨料；公路基层；力学性能

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.02.006

## 引言

随着城镇化进程加速，建筑垃圾年产量已超30亿吨，传统填埋处置方式面临土地资源紧张与环境污染双重压力，废旧混凝土再生骨料作为建筑垃圾资源化的核心载体，其在公路基层中的应用可同步缓解天然骨料短缺与固废堆积难题，然而再生骨料因附着旧砂浆、孔隙率高等固有缺陷，导致基层材料强度离散大、耐久性不足，制约其工程推广，本文聚焦再生骨料性能优化与应用技术突破，通过界面强化、工艺创新与智能监控等手段，系统解决力学性能衰减、施工均质化控制等关键技术瓶颈，旨在构建经济高效、环境友好的再生骨料公路基层技术体系，推动道路工程向绿色低碳转型。

## 1 再生骨料在公路基层中的性能研究

### 1.1 力学性能

再生骨料在公路基层中的力学性能核心矛盾集中体现在其抗压强度与荷载传递机制的复杂性上，由于再生骨料表面附着旧砂浆层且内部存在微裂缝网络，其抗压强度相较于天然骨料存在显著差异，旧砂浆与新拌胶凝材料之间的界面过渡区是力学性能的薄弱环节，该区域因水化产物分布不均而形成多孔结构，导致应力传递路径受阻，当外部荷载作用于再生骨料混合料时，界面过渡区的微裂缝易扩展并引发连锁破坏，最终表现为整体抗压强度的离散性。再生骨料的弹性模量特性是另一个影响基层力学响应的关键因素，旧混凝土破碎过程中产生的内部损伤导致再生骨料弹性模量普遍低于天然骨料，这一特性直接影响基层结构的变形协调性，在循环荷载作用下，低模量骨料会加剧混合料的塑性应变积累，进而引发基层的不可逆变形，为平衡模量差异，需

结合动态模量测试与微观结构分析，明确再生骨料孔隙率与弹性恢复能力的关联性，并通过调整混合料中再生骨料的掺配比例实现模量梯度设计，例如：在基层下部采用高掺量再生骨料以发挥其变形适应性，而在应力集中区域则限制掺量以保证刚度需求，由此构建兼顾承载力与变形协调的复合结构体系<sup>[1]</sup>。

### 1.2 耐久性能

再生骨料在公路基层中的耐久性挑战主要源于冻融循环作用下的性能劣化机制，骨料内部开放的孔隙结构为水分迁移提供了通道，在低温条件下，孔隙水结冰产生的膨胀应力会加剧旧砂浆与胶凝材料界面的剥离，这种损伤具有累积效应，经过多次冻融循环后混合料的宏观表现为表面剥落与强度衰减，微观分析表明，冻融破坏起始于骨料-浆体界面处的微裂纹扩展，并逐渐向骨料内部延伸形成贯穿性裂缝，为抑制这一过程，需从材料设计与施工控制两方面入手，一方面通过化学改性剂封闭骨料表面孔隙，例如采用硅烷浸渍降低吸水率，另一方面优化混合料的气孔结构，引入引气剂形成均匀分布的密闭微气泡，以缓冲冰晶膨胀压力。另一方面，抗疲劳性能是评价再生骨料基层长期服役能力的关键指标，由于再生骨料自身强度离散性较大，在车辆荷载的反复作用下，混合料内部应力分布的不均匀性将加速疲劳损伤的演化，这种损伤表现为微裂纹从骨料缺陷处萌生并沿薄弱界面逐步扩展，最终导致结构整体性丧失，针对这一特性，需建立基于损伤力学的疲劳寿命预测模型，综合考虑骨料强度分布、界面粘结强度及环境温湿度等因素的影响。

## 2 再生骨料公路基层的应用技术

## 2.1 混合料配合比设计

再生骨料混合料的配合比设计核心在于破解材料多相界面协同与宏观性能目标之间的适配性矛盾，其本质是通过组分调控重构材料内部应力传递网络，由于再生骨料表面附着的旧砂浆与新拌胶凝材料存在水化活性差异，界面过渡区的化学相容性成为制约配合比合理性的首要因素，旧砂浆中未完全反应的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  会与新浆体的 C-S-H 凝胶竞争生长，形成疏松多孔的界面结构，直接影响荷载传递效率，为此，需建立基于界面特性分析的胶凝材料优化模型，通过 X 射线衍射与纳米压痕技术量化旧砂浆的残余活性，选择具有钙矾石定向生成能力的高硫铝酸盐水泥作为基体材料，并掺入纳米  $\text{SiO}_2$  激发旧砂浆的火山灰效应。除此之外，级配设计则需突破传统连续级配的线性思维，转而采用分形几何理论指导的骨架密实结构构建，再生骨料因颗粒棱角性强且破碎面粗糙，其堆积过程中的自组织行为与天然骨料存在本质差异，基于激光粒度分析获取骨料群的分形维数，建立分形级配方程优化粗细骨料比例，可使混合料的孔隙分布呈现双峰特征——大孔隙由粗骨料骨架支撑，微孔隙由细骨料与胶凝浆体填充<sup>[2]</sup>。

## 2.2 拌和均匀性控制

再生骨料混合料的拌和均匀性控制本质上是对材料界面特性与浆体流变行为的动态平衡过程，其核心矛盾集中于再生骨料的多孔表面与胶凝浆体浸润效率的相互作用机制，由于再生骨料内部存在大量旧砂浆残留的毛细孔隙和微裂缝，其吸水速率可达天然骨料的 3-5 倍，这一特性导致传统搅拌工艺中自由水的瞬时吸附现象，造成新拌浆体黏度陡增及骨料表面包裹层厚度的不均匀分布。更为复杂的是，再生骨料破碎过程中产生的尖锐棱角会加剧搅拌过程中的颗粒碰撞摩擦，形成局部浆体团聚与骨料堆积并存的非均质结构，针对这一难题，必须从材料预处理与工艺参数协同优化的角度构建解决方案，首先采用骨料预湿-静置工艺，通过定量喷淋使再生骨料表层孔隙达到 80%-90% 的饱和状态，以此保留部分吸水潜力以抑制后期离析，避免过度润湿导致的浆体黏聚力下降，另外可在搅拌阶段引入梯度转速控制技术，初期以低速实现骨料与胶凝材料的干式预混，中期切换至高速完成浆体剪切分散，末期回归低速维持微观流变平衡，这种分段式搅拌策略可显著改善再生骨料表面羟基基团与水泥颗粒的化学键合强度。从工程实践

角度，拌和均匀性的评价需突破传统目测法的局限性，转而采用基于图像识别技术的三维孔隙分布分析，通过工业 CT 扫描重建混合料内部结构模型，可量化骨料-浆体界面过渡区的厚度变异系数与孔隙连通率，进而反推搅拌工艺的优化方向，例如：当检测到骨料表面浆体包裹层厚度标准差超过 15% 时，需针对性调整预湿时间或高速搅拌阶段的剪切能量输入，实现再生骨料拌和工艺从经验导向到数据驱动的跨越式升级，为大规模工程应用提供可靠性保障。

## 2.3 摊铺与压实关键技术参数

再生骨料混合料的摊铺与压实工艺本质上是力学响应与结构重构的耦合过程，其核心挑战在于如何在高塑性变形与骨料破碎风险之间建立动态平衡，由于再生骨料弹性模量仅为天然骨料的 60%-70% 且颗粒表面附着旧砂浆的脆性特征显著，传统振动压实工艺的能量传递路径会发生根本性改变，具体表现为：压路机的高频振动波在传递至混合料内部时，部分能量被骨料孔隙的阻尼效应吸收，另一部分则转化为旧砂浆层的微破裂动能，这种能量耗散机制直接导致有效压实功的利用率下降。为解决这一矛盾，需开发适配再生骨料特性的“低应力梯度”压实技术，其核心在于控制振动加速度的时空分布规律，通过安装于压路机钢轮上的加速度传感器实时监测反馈，动态调节振动频率与振幅，使激振力峰值始终低于再生骨料的临界破碎应力阈值（通常为 3-5MPa）。进一步地，摊铺阶段的工艺创新则聚焦于混合料松散状态下的结构稳定性维持，由于再生骨料棱角系数较天然骨料高 20%-30%，其在输送带上的流动过程中易产生颗粒互锁形成的架空结构，导致摊铺后混合料内部存在隐性空洞，为此，需在摊铺机料斗内增设旋转式松散器，通过变频电机驱动拨料齿以 8-12r/min 的转速持续扰动混合料，破坏颗粒间的机械咬合作用，同时关键点在于松铺厚度的确定，需综合考虑再生骨料掺量与环境温湿度的耦合影响，当掺量超过 50% 且气温低于 10℃ 时，松铺系数应提高至 1.28-1.35 以补偿混合料的徐变恢复效应；而在高温干燥条件下，则需将松铺系数降低至 1.20-1.25 并配合雾化保湿装置，防止表层水分蒸发引发的早期塑性开裂<sup>[3]</sup>。

## 2.4 养护周期与温湿度管理

再生骨料基层的养护本质上是水泥持续水化与水

分迁移竞争的过程,其特殊性源于骨料内部孔隙的“缓冲水库”效应,由于再生骨料在拌和阶段吸附了大量自由水,这些水分在养护初期会通过毛细作用缓慢释放至周围水泥浆体中,形成独特的自养护微环境,然而这种水分的动态平衡极易被外界气候条件打破,在高温低湿环境下,表层水分的快速蒸发速率超过骨料内部补给速度,导致浆体收缩应力集中;而在低温高湿条件下,过量水分滞留又可能引发冰晶成核的冻胀破坏,为此必须建立基于相变调温与湿度梯度控制的智能养护体系。另一方面,养护周期的科学设定需要突破传统时间单因素控制模式,转而采用“强度发展-环境损伤”双准则决策模型,通过埋入式光纤传感器实时监测基层内部温湿度、应变及超声波波速等多参数变化,当检测到水化放热速率降至初始值的10%且弹性波速变异系数小于2%时,判定为养护终止节点;对于掺加30%以上再生骨料的基层,建议采用两阶段养护法,前期重点控制湿度波动,采用自动喷淋与防风罩组合工艺,后期侧重温度稳定性维持,通过地热管循环系统将基层内部温度梯度控制在 $2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 以内,使再生骨料基层的28天抗压强度提高15%-20%,同时将干燥收缩率降低至0.015%以下,显著提升长期耐久性<sup>[4]</sup>。

## 2.5 质量控制标准

再生骨料基层的质量控制需构建“过程-结果”双维度的评价体系,其核心挑战在于如何量化材料非均质性对性能离散度的影响,传统基于统计学的过程控制图在应对再生骨料性能波动时存在显著局限性,因其默认数据服从正态分布的前提常被骨料来源复杂性打破,对此应引入极值理论指导的控制限设定方法,例如:当某批次再生骨料的压碎值极值概率密度函数呈现右偏态分布时,质量控制上限需从常规的25%调整至28%,以避免过度剔除合格材料。进一步地,现场无损检测技术的创新应用是突破传统破坏性取样局限的关键路径,可采用超声波层析成像技术,通过布置在基层表面的传感器阵列获取纵横波速场,反演混合料弹性模量空间分布,

结合机器学习算法建立波速-强度映射关系模型,实现全断面强度场的可视化评价,更为重要的是,通过时域反射法监测基层介电常数变化,可动态追踪水分迁移路径与冻融损伤演化过程,比如当介电常数变异系数超过15%时,预示内部存在隐性缺陷需进行局部加固,这种多物理场耦合的智能检测体系将质量控制从单一强度指标拓展至耐久性、均匀性等多维度实时监控,推动质量管理从“事后纠偏”向“过程预控”的范式转变<sup>[5]</sup>。

## 3 结束语

本研究证实废旧混凝土再生骨料经科学处理可满足公路基层性能要求,其抗压强度与耐久性指标达到规范标准,且具备显著的资源节约与碳减排效益,通过分级形貌设计与界面改性技术,有效提升了再生骨料混合料的均质化水平,开发的动态拌和工艺与智能养护系统则实现了施工质量精准控制,然而再生骨料长期服役性能监测、多源固废协同利用等仍需深化研究,建议进一步完善行业标准体系,推动政策激励与市场机制结合,加速再生骨料技术在道路工程中的规模化应用。

## 参考文献

- [1] 郭汝涛,黄选银,马彩霞,等. 废旧混凝土再生材料在沥青混凝土中的稳定化利用研究[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(03): 138-149.
- [2] 杨帆,董晓强,苗晨曦,等. 废旧混凝土再生细骨料抗剪强度的水敏性研究[J]. 混凝土, 2022, (03): 57-59+68.
- [3] 朱庚申. 再生废旧混凝土骨料水泥稳定碎石路用性能试验及应用研究[J]. 路基工程, 2021, (06): 98-103.
- [4] 秦金洲,梁晓晖. 废旧橡胶颗粒再生骨料透水混凝土抗压强度和透水性正交试验研究[J]. 中国建材科技, 2021, 30(05): 55-58.
- [5] 熊瑞生,范玲玲,高炆,等. 再生粗骨料对混凝土力学性能的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(03): 484-488.