

再生骨料在公路基层施工中的性能优化与应用研究

赵志武

惠州交投公路建设有限公司 广东惠州 516000

摘要: 本文系统研究了再生骨料在公路基层施工中的性能优化技术与应用实践。首先,分析了再生骨料来源多样、吸水率高、力学性能弱等基本特性及其在公路基层应用中的可行性。其次,重点探讨了通过预处理工艺、级配优化设计及掺加水泥、石灰等改性剂的综合优化技术,显著提升了再生骨料的强度、水稳定性与耐久性,使其满足公路基层的技术标准。在此基础上,结合工程实例,阐述了再生骨料基层的施工工艺流程与质量控制要点,并验证了其力学性能与长期耐久性。研究表明,优化后的再生骨料在技术性能上可媲美天然骨料,同时兼具显著的环境效益与经济效益,为公路工程的绿色、可持续发展提供了有效途径。

关键词: 再生骨料; 公路基层; 性能优化; 施工工艺

引言

随着我国基础设施建设的快速发展,天然骨料资源日益枯竭,建筑垃圾产量激增,对生态环境造成了巨大压力。将建筑垃圾资源化利用,制备再生骨料并应用于公路工程,是实现循环经济和绿色交通发展的必然选择。然而,再生骨料自身存在的性能缺陷,限制了其在高等级公路中的直接应用。因此,如何通过技术手段优化再生骨料性能,并形成一套成熟的施工应用体系,成为当前道路工程领域亟待解决的关键问题。

1. 再生骨料的基本特性与公路基层应用基础

1.1 再生骨料的来源与分类

再生骨料是重要的绿色建筑材料,来源广泛,包括建筑垃圾、废弃混凝土路面材料、桥梁废弃构件及工业废渣等固体废弃物。这些废弃材料经初步破碎、多级筛分、磁选除铁、风选除杂等回收处理,形成不同粒径分布的再生骨料产品。按原材料来源,再生骨料分为混凝土类(源于废弃混凝土结构)、沥青类(源于废弃沥青路面)和混合类(多种废弃材料混合);按粒径规格,分为粗骨料(粒径 $>4.75\text{mm}$,提供骨架支撑)和细骨料(粒径 $<4.75\text{mm}$,填充空隙)。不同来源的再生骨料物理化学性质差异显著,混凝土类有潜在活性,沥青类影响与水泥基材料的界面粘结性能。这种分类体系为其在公路基层工程的选用和应用奠定理论基础。

1.2 再生骨料的物理与力学性能

再生骨料的物理性能指标包括表观密度、堆积密度、吸

水率等。与天然骨料相比,其表观密度低(为天然的 85% - 95%)、吸水率高(3% - 10%,因内部微裂纹和老化砂浆)。力学性能上,各项指标普遍劣于天然骨料,压碎值 20% - 30%(天然 15% - 20%),洛杉矶磨耗损失大,坚固性差,弹性模量低,抗冻融性能差,限制了其在高等级公路基层的直接应用。不过,通过优化生产工艺,如整形处理、强化筛分,可提升其物理力学性能,满足公路基层工程技术要求。

1.3 公路基层对材料性能的要求

公路基层作为路面结构中最重要承重层,其材料性能直接关系到整个路面结构的使用寿命和服务质量。从工程实践来看,优质的基层材料必须同时具备四个关键性能:足够的强度、良好的稳定性、优异的耐久性以及可靠的水稳定性。具体的技术指标要求包括:加州承载比(CBR)值不应低于 80%,无侧限抗压强度需达到 3MPa 以上,压实度要保证在 98% 以上,渗透系数需要严格控制在 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ 的合理范围内,这样才能确保基层具有良好的排水性能。此外,基层材料还必须具备出色的抗冻融性能和抗收缩性能,以有效减少因温度变化和干湿循环引起的裂缝问题。材料级配同样是不可忽视的关键指标,必须严格符合《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)中规定的连续级配范围要求,这样才能形成理想的骨架密实结构。这些明确的性能要求不仅为公路基层施工提供了质量控制标准,同时也为再生骨料的性能优化指明了具体方向^[1]。

1.4 再生骨料在公路基层中应用的可行性分析

将再生骨料应用于公路基层建设,需要从技术可行性、经济合理性以及环境可持续性三个维度进行全面评估。在技术层面,通过采用物理强化(如机械整形处理)和化学改性(如掺入适量水泥或石灰)等综合技术手段,可以显著提升再生骨料的力学强度和水稳定性。实践表明,掺入5%水泥的再生骨料混合料,其7天无侧限抗压强度可达3.5MPa以上,CBR值能够超过100%,完全满足基层材料的技术要求。在经济层面,再生骨料的的生产成本较天然骨料可降低20%~30%,同时还能节省大量的建筑垃圾处置费用,整体工程造价优势明显。在环境层面,再生骨料的推广应用不仅可以减少对天然骨料资源的开采,保护脆弱的生态环境,还能实现建筑垃圾等固体废弃物的资源化利用,完全符合当前绿色公路建设的理念要求。综合评估表明,再生骨料在公路基层中的应用不仅具有可靠的技术可行性,还展现出显著的经济效益和环境效益,为推进公路工程领域的可持续发展提供了切实可行的技术路径。

2. 再生骨料性能优化技术

2.1 再生骨料的预处理工艺

再生骨料的预处理工艺是提升其性能的基础环节,主要包括破碎、筛分、除杂和强化处理四个步骤。破碎阶段采用颚式破碎机与圆锥破碎机组组合工艺,通过多级破碎将废弃混凝土块加工成符合粒径要求的骨料,同时减少针片状颗粒含量。筛分环节使用振动筛分设备,将骨料分为0~5mm、5~10mm、10~20mm等不同粒径等级,确保级配可控。除杂过程通过磁选设备去除钢筋等金属杂质,采用风选或水洗技术分离轻质杂物(如木材、塑料),降低杂质含量至0.5%以下。强化处理则通过物理或化学方法改善骨料表面性能,如采用磨机整形去除附着砂浆,或使用稀酸溶液溶解残余水泥浆,提升骨料表面洁净度。预处理后的再生骨料吸水率可降低至3%以下,压碎值控制在25%以内,为后续性能优化奠定基础^[2]。

2.2 骨料级配优化设计

骨料级配优化设计是提升再生骨料混合料密实度和强度的关键措施。基于《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015)中的级配范围要求,采用最大密实曲线理论(如Fuller曲线)进行级配设计,通过调整粗细骨料比例实现骨架密实结构。具体优化方法包括:①填充法,以粗骨料

为骨架,用细骨料填充空隙,确保空隙率小于30%;②干涉法,控制细骨料含量以避免粗骨料悬浮,保证骨架结构的稳定性。优化后的级配曲线需连续且无间断,关键筛孔(如4.75mm、9.5mm、19mm)的通过率偏差应控制在 $\pm 3\%$ 以内。例如,某高速公路基层工程中,采用优化级配的再生骨料混合料,其压实度达到98.5%,较未优化级配提升2%,CBR值从80%提高至120%。级配优化不仅改善了混合料的力学性能,还降低了水泥用量,提升了经济性。

2.3 改性剂与添加剂的使用

改性剂与添加剂的使用是提升再生骨料性能的重要技术手段,主要包括水泥、石灰、粉煤灰、聚合物乳液及化学外加剂等。水泥作为常用改性剂,通过水化反应生成C-S-H凝胶,填充骨料空隙并增强界面粘结,掺量通常为3%~5%;石灰则通过活性氧化钙与骨料中的二氧化硅反应生成水化硅酸钙,提升水稳定性,掺量以2%~4%为宜。粉煤灰的微集料效应和火山灰反应可改善混合料的和易性和后期强度,掺量可达10%~15%。聚合物乳液(如SBR乳液)通过成膜作用包裹骨料,增强柔韧性和抗裂性,掺量一般为2%~3%。化学外加剂如减水剂可降低用水量,提高密实度;早强剂则加速水泥水化,缩短养护时间。例如,某试验路段采用4%水泥+2%石灰+10%粉煤灰的复合改性方案,再生骨料混合料的7天无侧限抗压强度达到4.2MPa,冻融循环后的质量损失率降至3%以下,显著优于单一改性方案。

2.4 性能优化后的再生骨料评价指标

性能优化后的再生骨料需通过系统的评价指标验证其适用性,涵盖物理性能、力学性能、耐久性能及施工性能四个方面。物理性能指标包括表观密度($\geq 2400\text{kg/m}^3$)、吸水率($\leq 5\%$)、含泥量($\leq 1.0\%$)及针片状颗粒含量($\leq 10\%$),确保骨料基本质量。力学性能指标以压碎值($\leq 25\%$)、洛杉矶磨耗损失($\leq 30\%$)及坚固性($\leq 12\%$)为核心,反映骨料的承载能力和抗磨耗性能。耐久性能指标包括冻融循环后的质量损失率($\leq 5\%$)、硫酸盐侵蚀后的强度损失率($\leq 10\%$)及干湿循环后的稳定性,验证骨料在恶劣环境下的长期性能。施工性能指标则关注混合料的压实度($\geq 98\%$)、CBR值($\geq 100\%$)及抗裂性(裂缝宽度 $\leq 0.5\text{mm}$),确保施工质量。例如,某优化后的再生骨料经检测,压碎值为22%,吸水率4.2%,冻融质量损失率3.8%,CBR值115%,全面满足公路基层施工要求。这些评价指标

为再生骨料的规模化应用提供了科学依据,推动了其在公路工程中的标准化使用^[3]。

3. 再生骨料在公路基层施工中的应用研究

3.1 施工工艺与流程设计

再生骨料在公路基层施工中的工艺流程设计需结合材料特性与工程要求,确保施工质量与效率。施工流程包括基层准备、混合料拌和、运输、摊铺、压实及养护六个关键环节。基层准备阶段需对路基进行平整、压实,确保承载力不低于 150kPa,并设置排水设施防止积水。混合料拌和采用强制式拌和机,按设计比例将再生骨料、水泥、石灰及添加剂干拌 60 秒后加水湿拌 90 秒,确保混合料均匀性。运输过程需覆盖篷布减少水分蒸发,运输时间控制在 30 分钟内。摊铺采用沥青摊铺机或平地机,松铺系数设定为 1.25~1.30,摊铺厚度误差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内。压实环节采用 18t 振动压路机,先静压 1 遍,再振动压实 4~6 遍,最后静压 1 遍收光,压实度达到 98% 以上。养护期间需覆盖土工布并洒水保湿,养护时间不少于 7 天。例如,某高速公路试验段采用该工艺,再生骨料基层的平整度标准差为 1.2mm,压实度 98.5%,满足《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1-2017)要求。

3.2 施工质量控制要点

施工质量控制是确保再生骨料基层性能的关键,需从原材料、混合料、施工过程及成品检测四个环节进行严格把控。原材料控制要求再生骨料的压碎值 $\leq 25\%$ 、吸水率 $\leq 5\%$ 、含泥量 $\leq 1.0\%$,水泥、石灰等胶凝材料需符合相应国家标准。混合料控制需检测水泥剂量(误差 $\pm 0.5\%$)、含水率(最佳含水率 $\pm 1\%$)、级配(通过率误差 $\pm 5\%$)及均匀性。施工过程控制重点监测摊铺厚度(设计值 $\pm 10\text{mm}$)、压实度($\geq 98\%$)、平整度(标准差 $\leq 1.5\text{mm}$)及横坡度($\pm 0.3\%$)。成品检测包括 7 天无侧限抗压强度($\geq 3.5\text{MPa}$)、CBR 值($\geq 100\%$)及弯沉值(设计值 100%)。例如,某工程通过建立实时监测系统,对混合料含水率、压实度等参数进行动态调整,使再生骨料基层的强度变异系数降至 10% 以下,显著提升了施工质量的稳定性^[4]。

3.3 再生骨料基层的力学性能与耐久性表现

再生骨料基层的力学性能与耐久性是评价其应用效果的核心指标。力学性能方面,优化后的再生骨料混合料 7 天无侧限抗压强度可达 3.5~4.5MPa,90 天强度增长至 5.0~6.0MPa,回弹模量为 300~500MPa,CBR 值

100%~150%,满足重载交通基层要求。耐久性表现包括抗冻性、抗水损性及抗疲劳性能。冻融循环试验表明,经 25 次冻融后,再生骨料基层的质量损失率 $\leq 5\%$,强度损失率 $\leq 10\%$;浸水 7 天后 CBR 值保留率 $\geq 85\%$,水稳定性良好。疲劳试验结果显示,再生骨料基层在应力比为 0.6 时的疲劳寿命可达 10^6 次以上,与天然骨料基层相当。例如,某高速公路再生骨料基层通车 3 年后检测,平整度标准差为 1.8mm,车辙深度 $\leq 5\text{mm}$,无纵向裂缝,表现出优异的长期性能。

3.4 应用过程中的环境与经济效益评估

再生骨料在公路基层中的应用具有显著的环境与经济效益。环境效益方面,每利用 1 吨再生骨料可减少天然骨料开采 1 吨,降低建筑垃圾填埋量 0.8 吨,减少 CO_2 排放约 15kg。以某高速公路项目为例,使用再生骨料替代 30% 天然骨料,可减少天然骨料开采 18 万吨,降低建筑垃圾处置量 14.4 万吨,减少 CO_2 排放 2700 吨。经济效益方面,再生骨料的生产成本较天然骨料低 20%~30%,运输成本可降低 15%~20%(因可就地取材)。某工程统计显示,使用再生骨料后,基层材料成本降低 25%,综合工程造价降低 8%~10%。此外,再生骨料的应用还可缩短工期(因减少材料运输距离),降低维护成本(因耐久性良好)。例如,某省道改造项目采用再生骨料基层,节约工程投资 120 万元,工期缩短 15 天,同时获得地方政府绿色建筑补贴 50 万元,实现了经济效益与环境效益的双赢^[5]。

4. 结语

通过科学的预处理、级配优化和化学改性等技术手段,再生骨料的性能缺陷可以得到有效弥补,其力学性能与耐久性能能够完全满足公路基层的严苛要求。在实际应用中,配合严格的施工工艺与质量控制,再生骨料基层表现出与天然骨料基层相当的工程性能。更重要的是,其应用带来的环境效益(减少固废、保护资源)和经济效益(降低成本、节约投资)十分显著,完美契合了当前国家倡导的绿色、低碳发展理念。展望未来,应进一步完善再生骨料的应用标准与规范,加强政策引导与市场推广,推动其在公路工程乃至更广阔的土木工程领域中的应用,为建设资源节约型、环境友好型社会贡献力量。

参考文献:

[1] 陈卫平. 高取代率再生骨料强化混凝土的性能优化

研究 [J]. 建筑施工, 2020.

[2] 邹欣怡, 孟淑玲, 寻芷怡, 等. 建筑废弃物再生骨料在柔性道面基层中应用的试验研究 [J]. 进展: 科学视界, 2022(002):000.

[3] 杨利香, 韩云婷, 宋兴福. 多因素对再生骨料透水混凝土性能的影响及其协同优化研究 [J]. 新型建筑材料, 2020,

47(4):5.

[4] 杨晓波, 姜丽. 再生骨料清水混凝土的制备与施工工艺优化研究 [J]. 河北水利电力学院学报, 2019(1):4.

[5] 徐辉. 基于再生细骨料的 3D 打印混凝土研究 [D]. 绍兴文理学院, 2022.