

建筑垃圾再生骨料在铁路路基回填工程中的试验研究

罗杰添

中铁路安工程咨询有限公司 天津 528247

摘要：我国建筑垃圾年产量已突破30亿吨，资源化利用率不足10%，亟需拓展消纳渠道。本文以再生骨料为研究对象，通过室内试验与现场填筑试验，系统测试了其物理力学特性、水稳性能及抗变形能力，分析了其用作铁路路基填料的可行性。结果表明，经合理级配调配后，再生骨料压实性能良好，加州承载比达8%以上，水稳系数满足铁路路基非浸水部位填筑要求。据此提出了施工工艺参数与质量控制要点，可为建筑垃圾在铁路工程中的资源化利用提供技术参考。

关键词：建筑垃圾；再生骨料；铁路路基；回填工程；试验研究

引言：我国建筑垃圾年产量已突破30亿吨，资源化利用率尚不足一成，大量填埋或露天堆放不仅占用土地，还造成扬尘和水体污染。同时，铁路路基回填消耗大量天然砂石料，开山采石破坏生态环境，两者存在资源供需的结构性矛盾。将建筑垃圾加工为再生骨料用于铁路路基回填，既可消纳废弃物，又能缓解天然骨料短缺，兼具环境与经济效益。本文通过室内及现场试验，研究再生骨料的工程力学特性，验证其用于铁路路基回填的可行性，并提出施工工艺参数建议。

1 建筑垃圾再生骨料的基本特性

1.1 再生骨料的来源与制备

本试验所用再生骨料取自某市城中村拆迁产生的建筑垃圾，主要成分为废旧混凝土块（约65%）、废砖瓦（约25%）和少量废砂浆（约10%）。建筑垃圾经现场分类分拣后，剔除钢筋、木材、塑料等杂物，运往固定式再生骨料加工厂进行破碎、筛分和整形处理。加工流程为：颚式破碎机初破→反击式破碎机中破→振动筛筛分→风选除轻质杂物→成品料仓存放。经筛分分析，制备的再生骨料粒径分布范围为0.075mm~31.5mm，其中粗骨料（4.75mm~31.5mm）占比约62%，细骨料（0.075mm~4.75mm）占比约38%，细度模数为3.1。

1.2 再生骨料的物理力学性能

对制备的再生骨料进行了主要物理力学指标测试。表观密度测试结果为2460kg/m³，较天然碎石（约2700kg/m³）偏低约9%，这与再生骨料表面附着旧砂浆导致内部微裂纹较多、孔隙率较大有关。堆积密度为1380kg/m³，空隙率为44%，吸水率为4.7%，明显高于天然骨料的吸水率（约1%~2%）。压碎指标为19.5%，高于《铁路路基设计规范》中粗骨料压碎指标不大于18%的要求，但通过与天然粗骨料按一定比例掺配调整级配后，混合料的压

碎指标可降低至16%以下，满足规范要求。

1.3 再生骨料的微观结构特征

通过扫描电子显微镜观察，再生骨料表面粗糙，附着大量水泥微粉和微裂缝。这种表面特征导致再生骨料吸水率偏高，但也使其具有较高的摩擦角，有利于增强填料与土工格栅之间的界面咬合作用^[1]。X射线衍射分析显示，再生骨料中的活性成分主要包括SiO₂和CaCO₃，与天然骨料的主要化学成分基本一致，不具备碱活性风险，不会对路基长期稳定性造成不利影响。

2 再生骨料用于铁路路基填筑的技术要求与参数确定

2.1 铁路路基填料的技术标准

铁路路基填料的选择需满足《铁路路基设计规范》（TB 10001）和《高速铁路设计规范》（TB 10621）中关于填料类别、粒径级配、压实标准和力学强度的要求。根据铁路路基不同部位的受力特征，填料分为A、B、C三类：基床表层应采用A类填料，最大粒径不大于100mm，压实系数不低于0.95；基床底层可采用A、B类填料；路堤本体可采用C类及以上填料。再生骨料因含有一定量废砖瓦成分，水稳性能和抗风化能力较天然碎石略有不足，可用于路堤本体及基床底层等非浸水部位，但不建议用于基床表层及水位变动带。

2.2 再生骨料用于路基填筑的关键参数

再生骨料用于铁路路基填筑的核心控制参数包括粒径级配、含泥量、加州承载比（CBR）、压碎指标和水稳系数。通过前期探索性试验，确定再生骨料用于路基填筑的级配范围参照铁路路基填料B组料标准进行调配，含泥量控制在3%以内，CBR不低于6%，水稳系数不低于0.75，压碎指标不大于18%。当再生骨料单一材料的压碎指标或水稳系数不达标时，可通过掺入15%~30%的天然碎石进行综合调配^[2]。

3 试验材料与试验方法

3.1 试验材料

本试验采用的再生骨料分为粗骨料（4.75mm～31.5mm）和细骨料（0.075mm～4.75mm）两类，分别取自上述加工生产线。天然碎石选用某采石场生产的石灰岩碎石，粒径5mm～20mm。掺合料选用粉煤灰（F类Ⅱ级）和生石灰（有效CaO含量≥80%）。土工格栅选用双向拉伸聚丙烯土工格栅，抗拉强度≥30kN/m。按再生骨料与天然碎石的质量比（9：1、8：2、7：3）配制三种混合料，分别编号为R-90、R-80、R-70，另设天然碎石对照组R-0。

3.2 试验方法

室内试验按《铁路工程土工试验规程》（TB 10102-2023）执行，包括：（1）颗粒级配分析——采用筛分法；（2）击实试验——采用重型击实法，确定各混合料的最佳含水率和最大干密度；（3）加州承载比试验——最佳含水率下成型，测定浸水4昼夜后的贯入强度；（4）水稳性试验——测定浸水与不浸水条件下的无侧限抗压强度，计算水稳系数；（5）压缩试验——采用固结仪测定各级荷载下的压缩变形量，计算压缩模量。现

场试验选取某铁路专用线试验段，长度200m，填筑高度3.0m，采用综合性能最优的R-70混合料分层填筑，每层松铺厚度30cm，使用22t振动压路机碾压。现场检测按TB 10102-2023执行，通过平板载荷试验和动态变形模量测试验证填筑质量。

3.3 试验过程控制

室内试验环境温度控制在20℃±2℃，相对湿度不低于60%。每个试验项目按TB 10102-2023要求制备不少于3个平行试件，取平均值作为最终结果。现场施工期间记录天气状况、环境温度、填料含水率等参数，每层填筑完成后采用灌砂法检测压实度，每50m检测一个断面，检测操作按TB 10102-2023相关条文执行。

4 试验结果与分析

4.1 击实特性分析

击实试验结果如表1所示。R-90的最大干密度为1.87g/cm³，最佳含水率为10.2%；R-80的最大干密度为1.93g/cm³，最佳含水率为9.4%；R-70的最大干密度为1.98g/cm³，最佳含水率为8.7%。对照组R-0的最大干密度为2.09g/cm³，最佳含水率为7.2%。

表1 不同掺配比例混合料的击实试验结果

混合料编号	再生骨料掺量（%）	天然碎石掺量（%）	最大干密度（g/cm ³ ）	最佳含水率（%）
R-90	90	10	1.87	10.2
R-80	80	20	1.93	9.4
R-70	70	30	1.98	8.7
R-0	0	100	2.09	7.2

试验结果表明，随着天然碎石掺量的增加，混合料的最大干密度逐步提升，最佳含水率逐步降低。这主要是因为天然碎石的密度大于再生骨料，且吸水率远低于再生骨料。R-70的最大干密度为1.98g/cm³，已接近天然碎石填料的水平（约2.05g/cm³～2.10g/cm³），掺入30%天然碎石后混合料的压实性能可满足铁路路基填筑对干密度的基本要求。三种混合料的最佳含水率均处于8%～11%之间，与现场施工可实现的含水率控制范围相符。

4.2 加州承载比分析

不同掺配比例混合料的浸水CBR试验结果为：R-90为5.8%，R-80为7.2%，R-70为8.5%，对照组R-0为12.3%。R-70的CBR值达到8.5%，满足铁路路堤本体填料CBR≥6%的要求，但未达到基床底层CBR≥10%的要求。这表明再生骨料混合料可应用于铁路路堤本体填筑，用于基床底层时尚需进一步提高CBR值。分析CBR值随天然碎石掺量增加而提升的原因：天然碎石的粒型

规整、强度高，能够形成更稳定的骨架结构；天然碎石的掺入降低了混合料的整体吸水率，浸水条件下强度损失减小；天然碎石与再生骨料之间的嵌挤作用有利于提高混合料的整体抗剪强度^[3]。

4.3 水稳性能分析

水稳性能试验结果：R-90的水稳系数为0.68，R-80为0.76，R-70为0.82，对照组R-0为0.91。R-70的水稳系数达到0.82，满足铁路路基非浸水部位填料水稳系数≥0.75的要求。再生骨料混合料水稳系数偏低的根本原因在于再生骨料表面附着的水泥石具有较高的孔隙率和吸水率，浸水后水分侵入骨料内部，削弱了骨料颗粒本身的强度以及骨料与胶结物之间的界面粘结力。在冻融循环或干湿交替条件下，这种水稳性不足的问题会更加突出。因此，在北方季节性冻土区或南方多雨地区应用时，应适当提高天然碎石的掺配比例至30%～40%，或添加水泥、石灰等胶凝材料进行固化改良。

4.4 压缩变形特性分析

压缩试验结果：在200kPa荷载条件下，R-90的压缩应变为3.6%，R-80为2.9%，R-70为2.4%，R-0为1.6%。根据压缩应变与压缩模量的对应关系，R-70的压缩模量约为35MPa，接近铁路路基对填料压缩模量的要求下限（ $\geq 30\text{MPa}$ ）。三种混合料在400kPa荷载下的总压缩应变为5.2%~8.7%，呈应变硬化特征，未见明显的压缩破坏或剪切破坏迹象。从压缩曲线分析，混合料的压缩变形主要发生在加载初期的0~100kPa范围内，占总压缩应变的60%~70%。这主要是由于再生骨料表面的附着水泥石在外荷载作用下发生局部压碎和颗粒重排列所致。当荷载超过200kPa后，压缩曲线趋于平缓，表明混合料在较高应力水平下已形成稳定的骨架结构。

4.5 现场填筑验证结果

现场试验段（采用R-70混合料）填筑完成后，进行了平板载荷试验和动态变形模量测试。检测结果：地基系数 K_{30} 为105MPa/m，动态变形模量 E_v 为48MPa。两项指标均满足普通铁路路基本体的填筑质量验收标准（ $K_{30} \geq 90\text{MPa/m}$ ， $E_v \geq 40\text{MPa}$ ）。连续观测6个月，试验段路基累积沉降量为4.2mm~6.8mm，沉降速率趋于收敛，路基处于稳定状态。

5 施工工艺参数与质量控制

5.1 施工工艺参数

根据现场试验段不同碾压遍数下的压实度检测结果，并参考类似工程经验，提出再生骨料用于铁路路基回填的施工工艺参数如下：（1）填筑前对再生骨料进行洒水预处理，使含水率控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 范围内；（2）松铺厚度控制在30cm~35cm，采用推土机初平后以平地机精平；（3）采用22t振动压路机碾压，碾压遍数通过现场试验段确定。根据本试验段不同碾压遍数下的压实度检测结果，建议碾压组合为：先静压1遍，再弱振2遍，最后强振2~3遍，以最后两遍压实度增长量不大于1%作为控制标准，碾压速度2km/h~3km/h；（4）每层碾压完成后检测压实度，合格后方可进行上层填筑。当

环境温度低于5℃或遇降雨天气时，应停止填筑作业，已填筑层应采取覆盖保护措施^[4]。

5.2 质量控制要点

再生骨料路基填筑的质量控制应重点把握四个环节：（1）源头控制——每批进场的再生骨料均需进行级配筛分和压碎指标检测，不合格料严禁入场；（2）含水率控制——根据天气条件及时调整洒水量，避免填料过干导致压实不足或过湿导致碾压时翻浆；（3）压实度控制——每层压实度不低于93%（路堤本体）或95%（基床底层），检测不合格的区段须补压或返工处理；（4）沉降观测——填筑完成后设置沉降观测桩，定期观测路基沉降量，当沉降速率超过5mm/月时，应分析原因并采取补救措施。

结束语

本文通过室内与现场试验，系统研究了建筑垃圾再生骨料用于铁路路基回填的工程力学特性。结果表明，再生骨料中掺入30%天然碎石后，混合料最大干密度达1.98g/cm³，CBR为8.5%，水稳系数为0.82， K_{30} 达105MPa/m，各项指标均满足普通铁路路基本体填筑技术要求，证实再生骨料用于路基非浸水部位填筑具有技术可行性。实际工程中应重点关注骨料均质性波动及长期耐久性问题，建议结合具体项目和气候条件开展专项论证，优化配合比及施工参数。

参考文献

- [1]孔文亚,黎康,谢恺. 西南山区高速铁路车站桩板结构高填路基动力特性分析[J]. 高速铁路技术,2022,13(6):6-11.
- [2]张新波. 车辆段建筑垃圾再生填料特性试验研究[J]. 铁道建筑技术,2024(3):9-11,34.
- [3]卢安巩,母茂村. 再生建筑垃圾路基填料长期变形分析[J]. 西部交通科技,2024(10):41-44.
- [4]吴磊. 高速铁路路基与桥梁过渡段施工技术研究[J]. 铁道运营技术,2026,32(1):1-4.