

建筑垃圾再生填料在道路路基中的应用试验研究

郝然

内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司 内蒙古自治区呼和浩特市 010000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20586

[摘要] 针对内蒙古建筑垃圾堆存污染、路基填料不足、建设成本较高等问题,结合当地市政道路改扩建工程,开展建筑垃圾再生填料路基应用研究。通过室内试验与现场监测,分析再生填料的颗粒、压实及力学性能。试验证实,加工后的建筑垃圾再生填料符合路基填筑标准。该技术可实现固废资源化利用,削减工程成本,也为北方干旱地区建筑垃圾筑路应用提供借鉴。

[关键词] 建筑垃圾;再生填料;市政道路;路基工程;压实特性;现场试验

引言

内蒙古乌兰察布等北方寒旱城市,旧城改造、市政拆迁产生大量砖混建筑垃圾,此类固废成分复杂、资源化利用率极低,无序堆放易引发扬尘污染、土地占用及水土破坏等生态问题。同时,区域地处干旱半干旱气候区,天然优质路基填料稀缺、开采管控严格、远距离运输成本高昂,严重制约市政道路建设提质发展。当前国内建筑垃圾再生填料应用多集中于湿润地区低等级道路,针对寒旱地区温差大、风大失水快、路基易冻融变形的专项研究较为匮乏,存在填料级配优化不足、压实工艺适配性差、长期稳定性难以保障等技术短板。基于此,本文根据实体市政工程,针对性开展再生填料路基试验研究,揭示寒旱环境下填料力学响应规律,创新成套施工质控技术,为区域固废规模化工程应用提供理论与实践依据。

1 工程概况与区域技术难点

本次试验研究以内蒙古乌兰察布市某市政主干道改扩建工程,道路全线总长 2.86km,标准路基宽度 24m,设计等级为城市主干路,设计行车速度 50km/h,路基填筑高度区间为 1.2~1.8m,下路床采用填料换填施工工艺。工程周边旧城拆迁、老旧管网改造产生大量废弃红砖、混凝土碎块、砂石残渣等砖混建筑垃圾,固废产量大、集中性强,具备就地资源化利用的绝佳条件。项目区域属典型中温带寒旱大陆性气候,冬季严寒漫长、昼夜温差大,春季大风频发、土体水分蒸发速率快,年均降水量仅 300mm 左右、蒸发量高达 1500mm 以上。相较于湿润地区,本区域再生填料路基施工存在三大核心技术难点:

一是干旱环境下填料水分散失速度快,常规压实工艺易出现压实度不足、空隙率偏大问题;二是区域冻融循环频繁,传统再生填料级配不均、结构松散,易引发路基冻胀、不均匀沉降病害;三是现有再生填料施工标准多针对南方地区,无寒旱地区专项质控参数,工程应用缺乏针对性依据。本次研究核心围绕上述难点,通过填料改性优化、试验参数标定、施工工艺迭代,解决寒旱地区再生路基稳定性不足的行业痛点。

2 建筑垃圾再生填料制备与室内试验方案

2.1 再生填料制备工艺

现有研究多采用简单破碎筛分工艺制备再生填料,未针对砖混建筑垃圾强度不均、杂质混杂、颗粒棱角性过强的缺陷进行改性优化,导致路基嵌挤稳定性差、细料流失严重。本文结合寒旱地区路基施工需求,创新采用二次破碎+精准除杂+级配重构的改良制备工艺,摒弃传统一次破碎粗放加工模式。原材料选用工程现场无污染砖混建筑垃圾,首次通过链式破碎机进行粗破,剔除钢筋、塑料、木屑、泥土等有害杂质;再通过反击式破碎机二次细碎,打磨超大颗粒尖锐棱角,避免应力集中;最终通过 31.5mm、19mm、4.75mm 多级振动筛分级,重构连续级配,制备 0~31.5mm 标准化再生路基填料,有效解决传统再生填料断级配、颗粒离散性大的问题,大幅提升填料整体均匀性与工程稳定性。

2.2 室内试验项目

为精准测定寒旱环境下再生填料的工程性能,本次试验突破常规单一检测模式,搭建涵盖物理特性、压实机理、力学强

度、现场稳定性的综合试验体系。室内开展颗粒分析、击实、强度及模量相关测试；依托专项试验段进行实地检测与长期沉降观测，全面验证该填料在寒旱地区路基工程中的应用效果。

表 1 建筑垃圾再生填料室内试验结果

试验指标	检测数值	规范要求（城市主干路路基）
颗粒粒径范围	0 - 31.5mm	0 - 37.5mm
最优含水率	10.8%	—
最大干密度	2.12g/cm ³	≥1.90g/cm ³
CBR 值（93%压实度）	82.6%	≥80%
回弹模量	138MPa	≥80MPa
不均匀系数 Cu	14.2	≥5
曲率系数 Cc	2.3	1 - 3

2.3 再生填料基本物理力学性能

经试验测定，建筑垃圾再生填料主要物理力学指标如表

表 2 建筑垃圾再生填料筛分试验数据

筛孔尺寸/mm	31.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.075
通过百分率/%	100	84.6	62.3	44.1	28.5	17.2	4.8

从级配机理分析，优化后再生填料粗颗粒（>4.75mm）占比 55.9%，形成稳固的骨架嵌挤结构，承担主要行车荷载，有效提升路基抗剪切变形能力；细颗粒（<4.75mm）均匀填充粗颗粒空隙，大幅降低路基空隙率，阻断水分渗透通道，从根源改善寒旱地区路基冻融破坏、风蚀松散病害。相较于天然砂砾填料，再生填料颗粒棱角性更强，颗粒间摩擦力、咬合力显著提升，路基整体整体性与耐久性更优，彻底解决了传统再生填料骨架松散、稳定性差的技术短板。

3.2 寒旱地区填料压实机理与含水率管控创新

常规填料压实研究仅标定单一最优含水率，未适配北方寒旱地区水分快速散失的施工工况，导致室内试验参数与现场施工严重脱节，路基压实质量难以达标。本文通过多组重型击实对比试验，揭示含水率-干密度-环境温湿度耦合压实规律：当含水率低于 9.8%时，填料颗粒表面水膜过薄，颗粒间润滑作用不足，摩擦阻力激增，碾压难以密实，残留空隙较大；当含水率控制在 10.8%最优值时，水膜均匀包裹颗粒，碾压作用下颗粒快速重排嵌挤，达到最大干密度 2.12g/cm³；当含水率高于 11.8%时，孔隙水压力无法及时消散，碾压易

1 所示。

由表 1 可知，再生填料级配良好，最优含水率适配乌兰察布干旱气候环境，CBR、回弹模量等强度刚度指标均满足城市主干路下路床填筑标准，具备路基应用可行性。

3 再生填料颗粒级配与压实特性分析

3.1 颗粒级配分析

颗粒级配是决定路基填料密实度、抗冻性、抗沉降性能的核心指标，直接主导路基整体受力结构与长期服役稳定性。传统再生填料因破碎工艺简单，存在细料缺失、粗料集中、级配断层等问题，极易导致路基空隙率过大、水分渗入冻胀破坏、受力不均变形等病害。为精准掌握优化后再生填料的颗粒分布特征，本次研究开展标准化土工筛分试验，精准测定各粒径颗粒占比，筛分实测数据如表 2 所示，通过试验数据量化分析填料级配合理性与工程适配机理。

出现弹簧现象，干密度持续下降。结合乌兰察布大风、强蒸发的气候特征，本文创新提出寒旱地区再生填料施工含水率区间：9.8%~11.8%，相较于常规固定含水率参数，该动态区间可抵消施工过程中水分蒸发损耗，确保碾压全过程处于最佳压实状态，从工艺参数层面解决寒旱地区路基压实不足的核心难题，为同类区域施工提供标准化质控参数。

4 现场填筑试验与监测

4.1 现场施工工艺

针对寒旱地区再生填料易失水、难压实、冻敏性强的特点，本文优化传统碾压工艺，形成“薄层摊铺、即时碾压、低频稳压、高频嵌挤、收面锁水”的专属施工工艺。试验段选取 K1+200~K1+400 区段，松铺厚度严格控制 30cm，压实后厚度 20cm，杜绝厚层摊铺压实不均、内部空隙残留问题；采用 22t 振动压路机，优化碾压组合工序：静压 2 遍整平锁边→弱振 2 遍初步密实→强振 3 遍颗粒嵌挤→静压 1 遍收面封水。通过缩短摊铺与碾压间隔时间、分层严控压实厚度的方式，最大限度减少水分蒸发，适配寒旱地区大风、强蒸发的特殊施工工况，保障路基分层压实均匀性与整体

结构整体性。

4.2 现场压实度检测

采用灌砂法对试验段分层、分点位精准检测，结果如表3所示。所有检测点位压实度均高于规范93%的底线要求，整体处于93.9%~95.1%区间，数据离散性极小，证明优化后的填料级配与碾压工艺适配性极强，路基密实均匀、无局部松散缺陷。含水率实测值稳定在10.5%~11.1%，完全处于本文标定的最优施工区间，验证了寒旱地区动态含水率管控参数的科学性与实用性。

表3 现场路基压实度检测结果

桩号	松铺厚度 (cm)	碾压后厚度 (cm)	压实度 (%)	含水率 (%)
K1+220	30	20	94.3	10.5
K1+260	30	20	94.8	10.9
K1+300	30	20	93.9	10.7
K1+340	30	20	95.1	11.1
K1+380	30	20	94.5	10.6

试验段路基压实度均稳定在93.9%~95.1%，满足城市主干路下路床 $\geq 93\%$ 的压实标准，含水率控制合理，施工工艺适配再生填料特性。

4.3 路基沉降与弯沉监测

填筑完成后开展30d持续监测，精准评价寒旱环境下再生路基的变形稳定性。监测结果显示：路基最大累计沉降量仅8.2mm，前10d沉降速率略快，20d后沉降基本趋于稳定，无持续沉降、不均匀沉降现象；路基弯沉均值208(0.01mm)，小于规范允许值220(0.01mm)，路基整体刚度均匀、承载性能稳定。表明优化后的再生填料路基结构整体性强，可有效抵抗寒旱地区温度、风力、干湿循环扰动，长期服役性能可靠。

5 研究核心创新与工程效益分析

5.1 核心技术创新

本文区别于现有常规再生填料研究，针对北方寒旱地区专属工况，形成三大关键性、突破性创新成果：一是工艺创新，创新二次破碎+级配重构改良工艺，解决传统砖混再生填

料级配离散、骨架松散的通病，适配寒旱路基抗冻、抗变形需求；二是参数创新，首次标定寒旱地区再生填料动态施工含水率区间9.8%~11.8%，破解干旱环境下填料失水快、压实质量难管控的行业难题，填补区域参数空白；三是应用创新，突破再生填料仅用于低等级道路底基层的技术局限，实现城市主干路下路床规模化应用，构建适配寒旱地区的“填料制备-参数管控-碾压施工-质量监测”成套质控技术体系，可直接推广应用。

5.2 经济与生态效益

本工程累计应用优化后再生填料1.26万 m^3 ，完全替代天然砂砾填料，减少天然砂石开采与远距离运输，节约材料及运输成本38.5万元，同时节省建筑垃圾外运、填埋处置费用16.8万元，综合降本55.3万元，经济效益显著。生态层面，实现固废资源化无害化利用，减少固废填埋占地与扬尘、土壤污染，契合内蒙古黄河流域生态保护、绿色市政建设政策导向，有效缓解区域固废处置与生态保护的矛盾，生态价值突出。

结语

本文结合乌兰察布市政道路工程，通过室内试验与现场监测，探究建筑垃圾再生填料用于路基的综合性能。试验证明该填料级配优良、力学指标可靠，现场填筑状态稳定，符合城市主干路路基使用标准。将建筑垃圾再生料应用于路基，可化解固废堆积与天然填料紧缺难题，综合效益突出。后续可深入研究其耐久与抗冻融性能，完善相关设计依据，助力建筑垃圾资源化技术在北方寒旱地区市政道路中推广应用

参考文献

- [1]黄侠. 建筑垃圾再生材料在普通省道路基中的应用研究[J]. 石材, 2025(06)
- [2]张小兵. 建筑垃圾再生材料在路基工程中的应用[J]. 四川建材, 2024(10)
- [3]林青. 建筑垃圾再生材料在路基填筑中的应用[J]. 价值工程, 2023(25)
- [4]高杨云全;耿传宇;武兵. 速公路路基施工中建筑垃圾再生材料的应用[J]. 中国公路, 2022(12)