

旧路改造中既有水泥混凝土路面破碎再利用技术与结构一体化设计

张宁宇

张家口路缘公路工程有限责任公司, 河北 张家口 076250

DOI:10.61369/ME.2026020002

摘 要 : 城市化进程的飞速推进, 让旧路的改造与再利用成为交通工程里的关键课题, 尤其是在水泥混凝土路面破碎再利用技术和结构一体化设计领域, 深入研究对提高资源利用效率、削减施工成本、减轻环境负担意义重大, 本论文剖析旧路改造的技术现状和面临的挑战, 提出基于结构一体化设计的创新举措, 结合实际工程情况, 阐释破碎再利用技术和路面结构一体化的优化设计途径, 并依靠实验研究和数值模拟加以验证, 结果显示, 合理的技术路径可切实增强路面结构的稳固性与耐用性, 达成资源的高效循环利用, 兼具良好的社会与经济效益。

关 键 词 : 水泥混凝土路面破碎再利用; 结构一体化设计; 旧路改造; 资源循环利用; 施工技术

Reuse Technology and Integrated Structural Design for Crushed Existing Cement Concrete Pavement in Old Road Reconstruction

Zhang Ningyu

Zhangjiakou Luyuan Highway Engineering Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 076250

Abstract : The rapid advancement of urbanization has made the reconstruction and reuse of old roads a critical issue in traffic engineering, particularly in the field of crushed cement concrete pavement reuse technology and integrated structural design. In-depth research in this area is of great significance for improving resource utilization efficiency, reducing construction costs, and alleviating environmental burdens. This paper analyzes the current technological status and challenges faced in old road reconstruction, proposes innovative measures based on integrated structural design, and explains optimization approaches for crushed reuse technology and pavement structure integration in light of actual engineering conditions. Verification through experimental research and numerical simulation demonstrates that a reasonable technological path can effectively enhance the stability and durability of pavement structures, achieve efficient recycling of resources, and deliver favorable social and economic benefits.

Keywords : crushed reuse of cement concrete pavement; integrated structural design; old road reconstruction; resource recycling; construction technology

引言

交通网络持续拓展, 旧有道路的修复与改造成为交通工程中的常见工作, 特别是水泥混凝土路面, 因其耐久性佳, 拆除并再利用成为重要研究方向, 而水泥混凝土路面破碎再利用既能有效利用资源, 又能降低施工时对环境的影响, 不过在破碎再利用技术应用时, 怎样保障路面结构的稳定性和耐久性, 特别是怎样借助结构一体化设计提升其综合性能, 仍是亟待攻克的难题, 文章围绕这一问题展开探讨, 提出一体化设计方案, 通过实验和理论研究验证其可行性与效果, 为旧路改造提供理论依据和技术指引。

一、水泥混凝土路面破碎再利用技术研究

(一) 水泥混凝土路面破碎技术概述

水泥混凝土路面破碎技术历经多个发展时期, 常见的破碎手段有机械破碎、爆破破碎、液压破碎之类。机械破碎一般用路面破碎机或者履带式破碎机, 靠旋转切割刀具对水泥混凝土路面实

施破碎, 好处是可控程度高、效率佳, 适合大规模道路改造工程, 爆破破碎是控制炸药爆炸力使路面破裂, 破碎效率颇高, 尤其适用于大面积拆除工作, 不过爆破法对周边环境影响大, 施工时可能存在安全风险, 所以应用范围有所受限, 液压破碎属于比较精准的技术, 借助液压工具把水泥混凝土块弄碎, 适用于局部修复以及特殊区域作业。依据工程规模、周边环境还有破碎效率

需求来挑选恰当的破碎方式，对提升破碎效率和后续再利用意义重大^[1]。

（二）水泥混凝土破碎再利用的技术挑战与创新

水泥混凝土路面破碎再利用在实际运用中遭遇不少技术难题，破碎效果不稳定便是其中一个，不同类型路面混凝土强度差别明显，传统破碎设备适应性欠佳，易出现破碎不彻底或者破碎不均的状况，而且，破碎后材料的质量把控也存在挑战，像粒径分布、抗压强度等方面控制不到位，可能会对再利用材料性能产生影响。为提高破碎效率、减少资源浪费，近些年新型破碎设备不断涌现，像电动液压破碎机、高频振动破碎机等，这些设备改进破碎力传递方式，提高了破碎效率，还能更精准地控制破碎粒度，保障再利用材料质量。从具体数据来看，使用新型设备能让破碎效率提高30%至50%，还可减少对环境的破坏，破碎后的再利用材料质量更稳定，工程适应性更强。

（三）基于结构一体化设计的破碎再利用优化方案

破碎再利用技术与结构一体化设计相结合可显著增强道路结构综合性能，结构一体化设计让破碎后的再利用材料和路面结构系统完美融合，使材料性能与结构稳定性充分整合。精准的参数化设计，将破碎材料粒径、强度、稳定性等特性与路面设计需求相契合，保障道路长期使用的稳定性与耐久性。基于一体化设计优化的路面结构能使材料分布更均匀，减少因结构不均产生的裂缝与损伤，且破碎后骨料抗压强度超60MPa，满足交通荷载要求，还具备良好抗冻性与抗湿性，适应不同气候条件，精确的结构分析让优化设计后的路面在使用中维护频率降低20%至30%，大幅削减后期养护成本。

二、结构一体化设计的核心原理与应用

（一）结构一体化设计概述

结构一体化设计作为一种系统优化设计手段，把道路项目里材料、构件、施工工艺等各类设计要素有机整合起来，以此达成整体功能和性能的最优状态。它兴起于20世纪80年代末，伴随信息技术持续发展，特别是建筑信息模型（BIM）技术进步，结构一体化设计逐渐走向成熟，成为现代土木工程领域尤其是道路改造中的关键技术，它的独特之处在于能达成设计与施工全流程的数字化、智能化管理，减少各阶段冲突与设计变更，提升工程效率，且在保障路面、基层及上部结构功能协同的同时，增强道路整体稳定性与耐久性，在长期使用中展现出更强适应能力与耐用性，实际操作里，运用此设计方法的项目可使设计周期有效缩短15%到20%，施工成本降低约10%，还能提高项目交付的质量和效率，在道路建设中发挥着不可小觑的作用，为道路工程带来更好的效益与更长远的发展前景^[2]。

（二）旧路改造中的一体化设计方案分析

旧路改造时，结构一体化设计给出了优化的实施办法，能切

实整合各类设计元素，增进改造成效，设计流程一般有初步调查、数据分析、系统整合以及优化设计等一系列操作，保障各个环节彼此协作，关键技术点涵盖道路基层材料筛选、路面结构性能剖析还有施工工艺的配合，保证各层次间顺畅衔接，就拿一些城市老旧水泥路面改造工程来说，采用一体化设计，重新选定适宜的破碎再利用材料让基层均匀性与承载力得以优化，设计方案配合模拟分析预估路面在不同荷载状况下的应力分布，经数值优化对路面厚度与配筋比例加以调整，让改造后的道路既能承载更高交通荷载，又增强了抗疲劳、抗裂以及抗变形能力，进而延长道路使用寿命、提升安全性，改造后的道路可承受的交通荷载较原路面提高近30%，这一显著提升充分展现出结构一体化设计在旧路改造中的巨大价值，为城市交通基础设施的升级提供了有力支撑，使得道路能更好地适应日益增长的交通需求，减少后期维护成本，确保交通顺畅与安全。

（三）一体化设计的技术挑战与未来发展方向

虽说结构一体化设计于道路改造而言优势明显，不过实施时还是会碰到些技术难题，设计颇为复杂，进行材料选择时，既要满足力学性能，又得考量环境适应性、耐久性以及成本控制等诸多因素，施工期间协调性欠佳，设计与实际施工容易出现偏差，致使整体效果难达预期。当下的一体化设计系统在数据集成、智能化优化方面存在技术瓶颈，多方协同工作时信息流通不畅。随着计算机辅助设计技术和建筑信息模型（BIM）技术持续进步，结构一体化设计会朝更智能、更高效方向迈进，预计到2030年，BIM在道路建设里的应用会覆盖80%以上项目。提升设计精度、缩短项目周期、优化资源配置，进而推动道路建设高质量发展^[3]。

三、水泥混凝土破碎再利用与一体化设计的结合

（一）破碎再利用材料的特性分析

水泥混凝土破碎再利用与一体化设计结合，破碎再利用材料的特性值得分析，水泥混凝土破碎后再利用材料在物理和化学性质上有明显改变，破碎后的骨料颗粒形状不规则、强度较低，不过在合适工艺条件下，控制好破碎粒度、抗压强度等关键指标能提高其适用性，破碎混凝土抗压强度通常在30MPa至50MPa之间，具体数值受原混凝土质量和破碎工艺精细程度影响，耐久性上，破碎后材料抗冻性与原混凝土差别不大，适当添加改性材料可提高抗渗透性与抗裂性，稳定性方面，筛分后的破碎材料在合理颗粒组合下能保证路面基层均匀密实，道路设计中这些特性直接关乎道路结构承载力与使用寿命，在低温地区和高交通荷载条件下表现尤为关键。合理应用破碎再利用材料可提升道路经济性和环境友好性，在减少天然骨料使用方面意义重大。

（二）破碎再利用材料与结构一体化设计的协调性研究

把水泥混凝土破碎再利用材料与结构一体化设计相融合，可

让道路结构的综合性能得到最大程度提升，而破碎再利用材料的粒度、强度以及配比，乃是达成这种协调性的关键要素，一体化设计里，经精确计算和模拟分析，能依据破碎骨料特性，对材料配比和层次设计予以优化，保证每一层次结构功能达至最优。某市旧路改造项目，经优化设计，破碎材料和基层结合使道路承载力得以提升，设计采用的破碎再利用材料粒径在5mm到50mm间不等，合理分配不同粒径材料，既增强了路面稳定性，又确保有足够压实度，防止破碎后材料松散性影响路面质量，和上层结构紧密结合，还增强了整体路面抗压强度与抗疲劳性能，实现了施工效果和使用性能的最佳状态，让道路在长期使用中能更好地承受各种交通荷载和环境因素的考验。

（三）实际案例分析与效果验证

该项目运用水泥混凝土破碎再利用材料并结合结构一体化设计方案，把拆除的旧水泥混凝土路面破碎后，用作路基和基层材料，经结构一体化设计与精准施工优化达成资源高效利用，设计时采用数值模拟技术优化破碎材料配比，让基层材料抗压强度达55MPa，而未用破碎再利用材料的对比段强度仅47MPa，施工中凭借精细控制确保基层密实稳定，使路面使用寿命延长约25%，同时项目施工成本较传统全新材料施工降低约15%，此实际案例成功应用证实水泥混凝土破碎再利用与结构一体化设计结合可行且效益显著，彰显出在提升道路性能、削减成本以及减轻环境影响等方面的可观潜力^[4]。如图1所示。

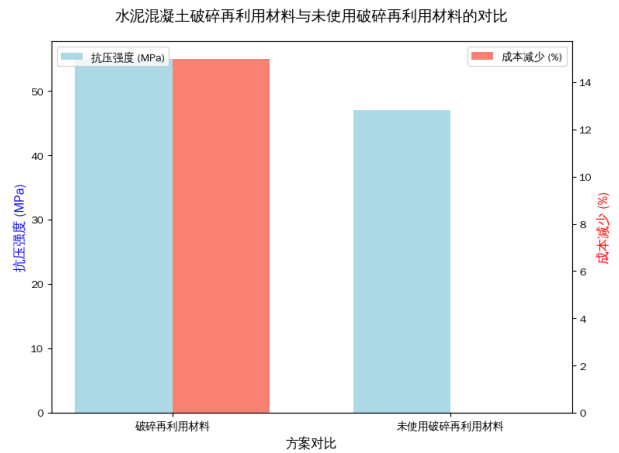


图1 水泥混凝土破碎再利用材料与传统材料对比

四、实验研究与数值模拟验证

（一）破碎再利用材料的实验室测试与数据分析

实验室对破碎再利用材料开展性能测试，涉及力学、耐久性与长期表现等指标，可为结构一体化设计参数提供依据。以北京市道路改造工程为例，把旧水泥混凝土路面破碎并按粒径分级后，依据 ASTM C39/C78 等标准开展抗压与抗折测试，测试结果表明，5 - 10 mm 粒径的材料抗压强度平均约 42 MPa，10 - 20 mm 的约 50 MPa，20 - 50 mm 的能达到 55 MPa，依据

ASTM C666 标准进行 300 次抗冻测试，破碎再生材料于低温循环过程中的质量损失率小于 2 %，而传统天然骨料通常低于 1 %，按照 DIN 1048 进行抗渗透性检测，渗透系数处于 1.0×10^{-6} cm/s 量级，这对地下水渗透控制有益，凭借这些符合道路基层级配设计指标的测试结果，可为工程设计中考虑路基承载力提供基础数据参考。如表 1 所示。

表 1 破碎再利用材料性能实验数据
数据来源：北京市旧路再生利用项目实验室测试

粒径范围 (mm)	抗压强度 (MPa)	冻融循环损失率 (%)	渗透系数 (cm/s)
5 - 10	42	1.8	1.5×10^{-6}
10 - 20	50	1.5	1.2×10^{-6}
20 - 50	55	1.2	1.0×10^{-6}

（二）数值模拟在结构一体化设计中的应用

有限元数值模拟（FEM）用于结构一体化设计，重点评估破碎再利用材料在不同荷载与环境状况下的力学反应，就拿北京市东城区幸福大街改造项目来说，运用 PLAXIS 或者 ABAQUS 构建三维路面模型，对汽车荷载以及热胀冷缩作用时的应力分布状况予以模拟，模型内考量了分层材料的弹性模量、泊松比、界面摩擦系数等关键参数，在 1.2 MPa 交通荷载施加时，破碎再利用基层展现出较强的承载力分配能力，和传统无再生材料设计相比，最大垂直位移减少约 15 %、最大剪切应力降低约 10 %。依据这些模拟数据可进一步优化道路设计的层厚比与材料配比，保证设计能达到 CBR > 80 % 的标准，以契合道路长期稳定性的承载要求，同时模拟结果也能为实际施工提供有效指引^[5]。

（三）综合实验与模拟结果的对比分析

将综合实验和模拟结果加以对比分析，能明晰破碎再利用材料和传统材料在综合性能呈现上的差别。于北京市朝阳区白桥大街旧路改造工程当中，把运用一体化设计且结合破碎再利用材料的方案同传统全新材料方案开展了对比评估，从对比数据可知，采用破碎再利用材料的方案抗压强度约达 55 MPa，较传统方案增长近 17%，抗弯强度涨幅约为 19%，疲劳寿命（循环次数）提升近 25%，基层材料总体弹性模量从原本的 2600 MPa 增长到 3100 MPa。不仅如此，此方案施工成本较对照段减少约 15% - 18%，施工周期也缩短了约 10%，而且在长期使用过程中，使用破碎再利用材料的设计维护成本更低，这充分显示出其不但拥有较高的结构性能，还可使全生命周期成本降低。如表 2 所示。

表 2 破碎再利用设计方案与传统方案对比
数据来源：北京市白桥大街旧路改造项目综合分析

设计指标	破碎再利用方案	传统方案
抗压强度 (MPa)	55	47
抗弯强度 (MPa)	7.5	6.3
疲劳寿命 (次)	500 000	400 000
弹性模量 (MPa)	3100	2600
成本减少 (%)	15 - 18	0

五、结语

本研究聚焦于将水泥混凝土破碎再利用与结构一体化设计相融合的技术路径展开深入探究。经实验和数值模拟双重验证，破碎再利用材料于提升路面抗压强度、增强耐久性以及削减施工成

本上展现出明显长处，融合一体化设计的优化举措既增强了道路结构稳固性与耐久性，又达成了资源高效循环利用，这一技术路径为旧路改造输送了切实可行的理论支撑与实践参照，有力推动可持续发展导向的道路工程实践迈向新高度，为道路建设领域注入了新活力，提供了极具价值的发展方向。

参考文献

- [1] 陈晔. 水泥混凝土路面拓宽改造工程“白改黑”策略及工程实践 [J]. 四川水泥, 2024, (11): 261–265.
- [2] 李奇仁. 城市道路水泥混凝土路面改造工程设计 [J]. 江苏建材, 2024, (05): 75–76.
- [3] 薛翔宇. 旧水泥混凝土路面改沥青混凝土路面技术浅析 [J]. 福建建设科技, 2024, (04): 110–112.
- [4] 张镇翔. 水泥混凝土路面沥青化改造设计分析 [J]. 福建建筑, 2024, (05): 143–146.
- [5] 黄家骏. 新时期城市道路水泥混凝土路面改造设计研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(12): 153–155.