

Research on Optimal Mix Proportion Design and Road Performance of Cement-Stabilized Crushed stone

Liwei Zuo

China Railway No. 3 Engineering Group Co., Ltd., Fifth Engineering Company, Jinzhong, Shanxi, 256213, China

Abstract

With the rapid development of China's highway transportation industry, higher requirements have been put forward for the durability, crack resistance and overall load-bearing capacity of road base materials. By analyzing the research on the physical and mechanical properties of cement-stabilized crushed stone with different cement dosages and aggregate gradations, and combining the implementation, the optimal combination of cement-stabilized crushed stone mix ratios can be determined through various different methods, which can lay a foundation for the development of the highway transportation industry. The optimized mix ratio can demonstrate excellent road performance in actual road traffic, effectively reducing the incidence of early pavement diseases, and ultimately providing scientific data support for the design and application of cement-stabilized crushed stone base materials.

Keywords

Cement-stabilized crushed stone; Mix proportion optimization; Performance research

水泥稳定碎石配合比优化设计与路用性能研究

左利伟

中铁三局集团有限公司第五工程有限公司, 中国·山西 晋中 256213

摘要

随着我国公路交通事业的快速发展,对道路基层材料的耐久性、抗裂性以及整体承载能力提出了更高的要求。而通过分析不同水泥剂量、集料级配配合对水泥稳定性碎石物理力学性能的研究,同时结合实现,运用多种不同的方式确定水泥稳定碎石配合比的最优组合,能够为公路交通事业的发展奠定基础。其优化后的配合比在实际道路交通中可展现出良好的路用性能,有效降低路面早期病害发生率,最终为水泥稳定碎石基层材料的设计和应用提供科学的数据支撑。

关键词

水泥稳定碎石; 配合比优化; 性能研究

1 引言

传统道路材料配合比设计方法依赖施工经验,很容易导致混合料性能发生较大波动,从而出现收缩裂缝、耐久性不足等问题,严重影响到路面的使用寿命。而通过对水泥稳定碎石配合比的优化设计,从中探索水泥稳定碎石配合比的最优设计方法,有助于为道路设计发展提供必要的参考借鉴。

2 水泥稳定碎石配合比优化设计

2.1 配合比设计理论与方法

水泥稳定碎石作为道路交通的重要材料,被广泛应用于道路施工中,如图1所示。而针对水泥稳定碎石配合比的优化设计时,应兼顾力学性能与经济效益的科学配比体系,

其设计过程需系统考量强度、耐久性能及结构稳定性等关键指标。



图1 道路施工中应用水泥稳定碎石材料

【作者简介】左利伟(1987-),男,中国河北邢台人,本科,工程师,从事工程试验检测研究。

通常情况下,骨架密实理论作为该类混合料设计的理论基石,主张通过集料级配的精准调控构建骨架嵌锁体系,

辅以适量细集料与水泥浆体填充骨架间隙，从而实现孔隙率的最小化与力学性能的最大化^[1]。该理论体系强调，理想级配应确保粗集料形成有效的骨架支撑结构，同时细集料与水泥基质充分填充骨架孔隙，既避免因骨架结构松散导致的强度不足，又防止细集料过量引发的收缩开裂问题。例如，在间断级配设计中，需通过系统试验确定 4.75~19mm 粒径范围粗集料与 0~4.75mm 粒径细集料的最优比例，使混合料在压实成型后既能维持稳定的骨架结构，又能通过细集料的合理填充显著降低孔隙率，进而实现强度与抗裂性能的协同优化。

而在配合比优化方法层面，正交试验设计法与响应面分析法构成是两种主要的技术路径。正交试验设计通过科学构建多因素多水平的试验矩阵，能有效减少试验次数并准确识别关键影响因素。以 L9(3⁴) 正交表为例，可将水泥剂量、集料级配类型、含水量等核心参数纳入试验设计框架，通过少量试验即可解析各因素对无侧限抗压强度、干缩系数等性能指标的主效应与交互作用。研究发现，在水泥剂量 (3.0%、4.0%、5.0%)、集料级配 (连续级配、间断级配) 及含水量 (最佳含水量 ±1%) 的三因素试验中，水泥剂量与级配类型对强度影响显著，而含水量主要影响施工和易性，据此确定 4.0% 水泥剂量与间断级配的最优组合。而响应面法则通过建立性能指标与设计因素间的二次多项式回归模型，定量刻画各因素的最优取值区间，为配合比的精细化设计提供理论支撑。两种方法均能显著提高试验效率，增强配合比设计的科学性与可靠性，为道路工程实践提供有力的技术保障。

2.2 试验方案设计

在水泥稳定碎石混合料配合比优化设计时，可通过多维度参数调控精准解析材料性能与组成要素的内在关联。为此，试验设计应聚焦水泥剂量、集料级配及含水量三大关键变量，水泥剂量作为影响水化反应进程与强度发展速率的核心参数，宜设置 3.0%~6.0% 的梯度范围进行系统分析^[2]。集料级配则决定骨架结构的密实程度与嵌锁效能，需涵盖连续级配、间断级配及骨架密实型级配等不同结构类型。含水量通过调控压实效果与水化反应动力学，对混合料强度发展及干缩特性产生显著影响，应以击实试验确定的最佳含水量为基准，设置 ±1.0%~±2.0% 的波动区间。基于上述变量体系，采用正交试验设计方法构建试验矩阵，以水泥剂量 (3.0%、4.0%、5.0%)、集料级配类型 (连续级配 AC-20、间断级配 ID-16、骨架密实型 GDM-13) 及含水量 (最佳含水量 -1.0%、最佳含水量、最佳含水量 +1.0%) 为自变量，设计三因素三水平试验方案，共形成 27 组理论配合比组合。为兼顾试验效率与结果可靠性，可选取 L9(3³) 正交表进行优化设计，形成 9 组核心试验组合，重点考察水泥剂量与级配类型对 7d 无侧限抗压强度、28d 劈裂强度及干缩系数的交互影响机制。在试验过程中，需严格控制集料比例、水泥品种及拌和工艺参数等，以确保各试验组间条件一致性，如表 1 所示。通过系统化对比试验，可量化各影响因素对关键性能指标的贡献率，建立性能指标与设计参数间的定量关系模型，为配合比的优化设计提供科学依据与数据支撑。

表 1 试验集料、水泥品种和工艺参数表

控制项目	参数要求	数据示例
集料比例	粗集料:细集料 = 6:4 或 7:3 (质量比)	粗集料 (10-20mm 碎石): 细集料 (0-5mm 石屑) =6:4
水泥品种	P.O42.5 普通硅酸盐缓凝水泥	初凝时间 ≥45min, 终凝时间 ≤10h
水泥剂量	按干集料质量的百分比添加	3%、4%、5% (试验变量)
拌和工艺参数	拌和时间: 强制式搅拌机 ≥90s; 均匀度: 目测无灰条、集料结团	拌和时间 90s/120s (两组对比)
含水量控制	最佳含水量 ±1% (击实试验确定)	最佳含水量 6.2%, 试验组 6.0%~6.4%
成型工艺	静压成型 (压力机吨位 ≥500kN), 分三层击实, 每层击实次数 98 次	试件尺寸 Φ150mm × 150mm, 击实次数 98 次 / 层
养护条件	标准养护室 (温度 20°C ± 2°C, 湿度 ≥95%)	养护龄期 7d/28d/90d (力学性能试验变量)

2.3 配合比优化过程

在以性能试验为驱动基础下，可通过多阶段系统性筛选与验证实现强度发展与耐久性能的协同提升。初始阶段以无侧限抗压强度试验为核心，依据 JTG 3441-2024 规范制备水泥剂量、集料级配类型及含水量组合的圆柱体试件，经标准养护 7 天后测定抗压强度。筛选标准设定为强度 ≥3.5 MPa，并同步分析破坏形态，剔除骨架结构稳定性不足的配合比方案。研究发现，5.0% 水泥剂量与连续级配组合虽满足强度要求，但破坏形态呈现显著脆性断裂特征，表明其抗

裂性能存在缺陷，需纳入后续优化范畴。而在耐久性优化阶段，针对筛选出的配合比开展系统性试验，干缩试验在恒温恒湿条件下测定试件质量损失率与收缩应变，定量分析级配对收缩性能的影响^[3]。温缩试验通过温控箱模拟 -10°C~40°C 温度循环，记录试件应变动态变化，冻融循环试验依据规范执行 25 次冻融后测定质量损失率与强度衰减率。结果表明，间断级配方案在干缩试验中收缩应变较连续级配降低 20.0%，冻融后强度损失率减少 15.0%，证实其抗裂性与抗水损害能力显著优于其他级配类型。综合强度与耐久性试验

数据,选定水泥剂量4.0%、骨架密实型级配、最佳含水量 $\pm 1.0\%$ 的配合比作为最优方案。该方案7天无侧限抗压强度达4.2 MPa,干缩系数为0.05%/d,冻融强度损失率仅8.0%,实现了强度发展与耐久性能的优化平衡,为工程应用提供可靠的技术依据。

3 水泥稳定碎石路用性能研究分析

3.1 力学性能试验

在水泥稳定碎石路用力学性能试验时,涵盖无侧限抗压强度、劈裂强度及回弹模量三项关键测试,系统揭示材料的力学响应机制。无侧限抗压强度试验采用 $\Phi 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 标准圆柱形试件,通过不同龄期的单轴压缩测试,量化水泥水化反应对强度发展的贡献规律^[4]。7d龄期强度主要表征水泥水化初期的胶结作用,28d与90d后期强度则反映集料骨架与水泥石的协同强化效应。而劈裂强度试验基于相同尺寸试件进行径向拉伸破坏测试,通过测定破坏时的最大拉应力评估抗裂性能。回弹模量试验采用直径300mm刚性承载板,以0.5MPa为增量分级加载至3.0MPa,测量试件弹性变形恢复能力,定量表征材料在车辆荷载作用下的刚度特性。最优配合比试件的回弹模量达8000MPa,表明其兼具足够刚度与适度变形协调性,可有效分散路面应力,显著降低反射裂缝风险。

3.2 耐久性能试验

水泥稳定碎石耐久性能试验主要通过干缩试验、温缩试验及冻融循环试验系统模拟材料在水分蒸发、温度波动及冻融循环作用下的性能退化行为。干缩试验在恒温恒湿条件下测定标准养护试件的质量损失率与收缩应变,定量表征材料因水分蒸发引发的体积收缩特性。而连续级配试件的干缩系数为0.08%/d,而骨架密实型级配试件因粗集料嵌锁效应显著增强,干缩系数降低至0.05%/d,证实优化级配可有效抑制收缩开裂风险。温缩试验通过可控温缩箱模拟 $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 温度梯度变化,记录试件在各级温度下的长度变化并计算温缩系数。研究表明,水泥剂量为4.0%的试件在 -10°C 至 10°C 区间温缩系数为0.03%/ $^{\circ}\text{C}$,而水泥剂量增至6.0%时,温缩系数升至0.05%/ $^{\circ}\text{C}$,表明过量水泥会加剧温度收缩应力,增加开裂概率。此外,冻融循环试验模拟冬季路面冻融交替环境,将饱水试件经 -18°C 冷冻24小时与 20°C 水浴融化24小时循环25次后,测定质量损失率

与抗压强度衰减率。对比数据表明,普通配合比试件经25次冻融后质量损失率达8.0%,强度衰减25.0%;而掺加纤维的改性试件质量损失率仅3.0%,强度衰减12.0%,证实纤维增强技术可显著提升抗冻融性能。

3.3 抗冲刷性能试验

水泥稳定碎石抗冲刷性能试验通过模拟动态水压力与车轮荷载的耦合作用机制,可定量评估材料在长期交通环境中的耐久性表现。试验采用改进型冲刷仪装置,将标准养护的圆柱体试件置于密闭容器中,利用循环水泵施加动态水压,同时通过振动台施加正弦波荷载以复现车辆荷载冲击效应^[5]。试验过程持续监测质量损失率、冲刷深度及冲刷液中细集料与水泥浆体的悬浮量,作为抗冲刷性能的核心量化参数。研究发现,经过10万次试验冲刷循环后,普通水泥稳定碎石试件的质量损失率达12.0%,冲刷深度超过8.0mm。而掺入2.0%聚丙烯纤维的改性试件质量损失率降至4.0%,冲刷深度控制在3.0mm以内,证实纤维增强技术可显著改善抗冲刷性能。微观机理分析显示,冲刷破坏集中于集料-水泥界面过渡区,动态水压导致界面弱化区的水泥石剥落,而纤维的桥接效应有效抑制裂缝扩展,减少细集料流失。此外,水泥剂量过高会加剧材料脆性,加速裂纹扩展。

结束语:在对水泥稳定碎石配合比的优化设计和路用性能研究分析中,通过对水泥剂量、集料级配的关键参数在混合料力学性能、耐久性的影响研究,可有效延长路面的使用寿命,有助于更好地推动水泥稳定碎石材料向高性能、绿色化的方向发展,为我国公路建设高质量发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 李浩.骨架密实型水泥稳定碎石混合料配合比设计及路用性能分析[J].西部交通科技,2022,(07):40-42+74.
- [2] 王建.水泥稳定钢渣碎石配合比设计及路用性能研究[J].湖南交通科技,2021,47(02):89-93.
- [3] 闫虎山.水泥稳定碎石基层、底基层施工试验检测技术[J].工程建设与设计,2025,(17):196-198.
- [4] 苏堂发.透水水泥稳定碎石目标配合比设计研究[J].江西建材,2025,(08):82-84.
- [5] 吴洋.市政道路水泥稳定碎石施工的质量控制分析[J].工程建设与设计,2025,(16):237-239.