材料科学

粉煤灰-水泥稳定全再生碎石高速公路基层性能分析

胡淑婷，石振武

（东北林业大学，哈尔滨 150040）

摘 要：为提升水泥稳定再生碎石在高速公路基层中的应用性能，探讨了掺入粉煤灰与水泥协同作用的增强效果。通过系统测试不同粉煤灰掺量下再生碎石混合料的路用性能，分析了粉煤灰掺量对再生碎石混合料强度性能、干缩变形、抗冻性能、疲劳寿命的影响规律。结果表明：随粉煤灰掺量增加，再生碎石混合料的各项路用性能指标均呈先增强后减弱趋势；粉煤灰掺量为 12%～16%范围时，各项路用指标均优于 6%水泥稳定再生碎石；粉煤灰掺量为 16%时，7 d 无侧限抗压强度、抗压回弹模量、干缩性能、抗冻性能达到最优，掺量从 12%增加至 16%性能增幅显著减缓；粉煤灰掺量为 12%时，弯拉强度、疲劳寿命表现最佳；采用 12%粉煤灰+4%水泥稳定再生碎石可满足高度公路基层技术指标要求，且具备良好的经济性。研究成果可为再生碎石作为高速公路基层材料推广提供理论依据。

关键词：粉煤灰；水泥；再生碎石；高速公路基层；强度性能，耐久性能

中图分类号：U416 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-8249（2026）05-0001-07

DOI：10. 19860/j. cnki. issn1005-8249. 2026. 05. 001

Performance Analysis of Fully Recycled Crushed Stone Road Base Stabilized with Fly Ash and Cement

HU Shuting，SHI Zhenwu

（Northeast Forestry University，Harbin 150040，China）

Abstract：To enhance the performance of cement-stabilized recycled crushed stone in road subbases，the reinforcing effect of fly ash synergistically interacting with cement was investigated. Through systematic testing of the road performance of recycled aggregate mixtures at different fly ash dosages，the influence patterns of fly ash dosage on the strength performance，dry shrinkage deformation，freeze-thaw resistance，and fatigue life of the recycled aggregate mixtures were analyzed. Results indicate：As fly ash content increases，all road performance indicators of recycled aggregate mixtures first enhance then weaken；within the 12%-16% fly ash range，all performance metrics surpass those of cement-stabilized recycled aggregate with 6% cement content. At 16% fly ash content，the 7-day unconfined compressive strength，compressive rebound modulus，dry shrinkage performance，and freeze-thaw resistance reached optimal values，with performance gains significantly slowing when the fly ash content increased from 12% to 16%. At 12% fly ash content，flexural strength and fatigue life exhibited the best performance. The combination of 12% fly ash and 4% cement-stabilized recycled crushed stone meets the technical requirements for highway base

项目来源：黑龙江省交通运输厅重点科技项目（J-20181215；HX-FW-20120100）。

作者简介：胡淑婷（1999—），女，硕士研究生，研究方向：高速公路混凝土。

通信作者：石振武（1963—），男，博士，教授，博士生导师，研究方向：工程项目管理。

收稿日期：2025-12-01

材料科学

layers while offering favorable economic benefits. These findings provide a theoretical basis for promoting recycled crushed stone as a base layer material for expressways.

Key words: fly ash; cement; recycled crushed stone; expressway grassroots; strength performance, durability performance

0 引言

随着城市更新工程高质量发展，废弃建筑混凝土数量与日俱增，其占用大量土地并带来严重环境污染问题；将废弃混凝土加工为再生碎石二次利用，已成为交通设施建设领域的热点问题[1]。水泥稳定碎石是高速公路中应用最广泛的基层材料，但随着国家推动“碳中和、碳达峰”战略，天然砂石资源日趋紧缺；将再生碎石经一定工艺处理，可以替代天然砂石用于道路基层中，不仅降低了不可再生砂石资源利用，还消纳了大量废弃混凝土，具有较高的经济与社会价值[2]。

然而，再生碎石因孔隙率高、强度低等固有缺陷[3]，在常规水泥掺量下仅能用于低等级公路基层；若将其用于高速公路基层，则必须增加水泥用量以提升性能[4]。但水泥本身属于高碳排放的不可再生资源，此举不仅会提高生产成本，且违背了绿色再生资源利用的初衷。此外，高水泥掺量还会引发干缩变形大、易开裂、抗冻性差等一系列问题[5-6]。因此，采用补充性胶凝材料与水泥协同稳定再生碎石，成为提升其路用性能的有效途径。李艳丽[7] 基于规划求解法，研究粉煤灰、水泥稳定碎石的最佳配比，认为掺 11% 粉煤灰 + 5.5% 水泥时效果最优；姚明等[8]、韩洪宇等[9] 采用改性胶粉复合水泥稳定建筑垃圾材料，结果表明活化胶粉提高了再生骨料表面黏结强度，提高基层材料的抗裂和抗冻性能；彭艳周等[10] 研究了石灰、粉煤灰比例对再生集料性能影响，获得了二者最佳配比，石灰、粉煤灰稳定再生集料只能用于二级及以下公路基层；曲继元[11] 研究了粉煤灰、钢渣对再生集料路用性能影响，结果表明掺 15%粉煤灰+5%水泥，钢渣与再生集料质量比为 3 ∶ 1 时路用性能最佳，粉煤灰掺量不宜超过 20%；王冬魁等[12] 引入粉煤灰、钢渣协同水泥增强再生碎石基层性能，钢渣和粉煤灰可显著降低基层的干缩性能，掺量 16%粉煤灰、50%钢渣，7 d 无侧限抗压强度可提高 25.2%；程银银等[13] 开展了水泥、粉煤灰稳定钢渣-再生碎石混合料干湿循环试验，获得了钢渣与再生碎石的最佳配比为 3 ∶ 1，掺 16%粉煤灰、5%水泥时混合料力学性能最优；宋亮[14] 研究粉煤灰等质量替代水泥对再生集料的强度和干缩性能影响，粉煤灰掺量为 1.05%时抑制干缩效果最佳；李曙龙等[15] 研究表明，采用碱激发粉煤灰、水泥稳定再生集料具有良好路用效果，掺入粉煤灰可提高再生集料路用性能，掺 25%粉煤灰效果最佳。

综上，利用粉煤灰-水泥稳定再生碎石，是提升其路用性能的有效途径。然而，既有研究多未采用全再生碎石作为骨料，且存在水泥掺量偏高的问题。为此，固定 4%的水泥掺量，系统分析了不同粉煤灰掺量对全再生碎石基层路用性能的影响规律，以期为再生碎石在高速公路基层中的规模化应用提供科学依据。

1 试验材料及方法

1.1 材料

细骨料采用机制砂，密度为 2.63 g/cm^3；粗集料采用再生碎石，由废弃混凝土破碎、筛分而成，密度为 2.42 g/cm^3，技术指标见表 1；混合料级配采用 JTG/TF20—2015《公路路面基层施工技术细则》中 CF-A-1S 级配，集料级配曲线如图 1 所示。

表 1 再生碎石技术指标

Table 1 Technical indicators of recycled crushed stone /%

吸水率	压碎值	针片状含量	洛杉矶磨耗值	杂物含量
5.4	22.6	6.7	19.6	0.06

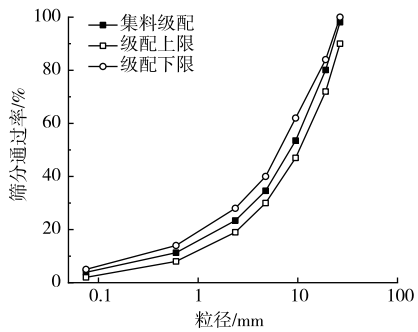


图 1 CF-A-1S 集料级配曲线

Fig. 1 CF-A-1S aggregate gradation curve

采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，比表面积为 385 m^2/kg；采用Ⅱ级低钙粉煤灰，比表面积 563 m^2/kg；水泥、粉煤灰主要化学成分见表 2。

表 2　水泥、粉煤灰主要化学成分

Table 2　Main chemical components of cement and fly ash　/%

化学成分	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	MgO
水泥	67.5	19.7	4.3	2.8	0.8	3.8
粉煤灰	2.7	64.5	22.5	5.9	1.4	0.9

1.2　试验方案

基准组采用水泥稳定再生碎石，水泥掺量为 6%，记为 OPC；对照组水泥掺量均为 4%，粉煤灰掺量分别为 0、4%、8%、12%、16%、20%，分别记为 F00、F04、F08、F12、F16、F20；共设计 7 组水泥、粉煤灰稳定再生碎石基层混合料试件。

1.3　试件制备

粉煤灰、水泥稳定再生碎石混合料试件制备和试验方法均按照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行。对不同配合比的混合料进行重型击实试验，获得各组试件的最佳需水量。将再生碎石、机制砂混合，加入 60%拌合水闷料 2 h，再加入水泥、粉煤灰和剩余拌合水搅拌均匀。采用静压法制备再生碎石混合料试件，将混合料倒入模具中静压成型，脱模后采用保鲜膜封闭，放置于温度 25±1 ℃、相对湿度≥95%的养护室养护。

1.4　试验方法

无侧限抗压强度、抗压回弹模量试验采用直径、高度均为 150 mm 的圆柱体试件，试验仪器为路面强度试验仪；试验前将试件浸水养护 24 h，分别进行 7、14、28、60、90 d 抗压强度测试，以及 7、28、90 d 回弹模量测试，试验加载速率为 1 mm/min。

弯拉强度试验采用 100 mm×100 mm×400 mm 中梁试件，分别进行 7、28、90 d 弯拉抗压强度测试。

干缩试验试件尺寸同弯拉强度，标准养护 7 d 后进行 0~90 d 干缩变形测试，采用千分表测量试件变形。

冻融循环试验采用直径、高度均为 150 mm 的圆柱体试件，先将养护 180 d 的试件浸水饱和 24 h，取出后在-18 ℃冷冻箱冻 16 h，然后在 20 ℃恒温水槽融化 8 h，为一次冻融循环；共进行 10 次冻融循环，每两次冻融循环测量一次试件质量，10 次冻融循环完成后进行抗压强度试验，计算试件的残余抗压强度比。

采用三分点加载法进行纯弯受力状态下疲劳试验，试验施加荷载与弯拉强度之比（应力强度比）分别为 0.65、0.70、0.75，0.80，以试件断裂时的加载次数作为试件的疲劳寿命；试件尺寸同弯拉强度，养护龄期为 90 d。

2　结果分析

2.1　无侧限抗压强度

由图 2 可知，OPC、F00 试件 7 d 无侧限抗压强度分别为 4.46、2.75 MPa；随粉煤灰掺量增加，粉煤灰-水泥稳定再生碎石的无侧限抗压强度先增大后减小，粉煤灰掺量为 4%、8%、12%、16%、20%的试件 7 d 无侧限抗压强度分别为 3.24、3.97、4.78、5.21、4.34 MPa，相比 F00 试件分别增长了 17.8%、44.5%、73.8%、89.4%、57.8%，可见，粉煤灰掺量大于 12%后强度增幅显著减小，掺量为 16%强度达到最大，继续增加掺量无侧限抗压强度显著降低。

随养护龄期增加，再生碎石混合料的无侧限抗压强度呈增大趋势，掺入粉煤灰的混合料无侧限抗压强度增长速度和增幅与仅掺水泥的试件显著不同；OPC、F00 试件无侧限抗压强度曲线斜率在 28 d 后接近为 0，说明 28 d 时抗压强度增长基本完成；掺入粉煤灰的试件抗压强度增长曲线斜率显著增大，粉煤灰掺量为 8%的 F08 试件 7 d 无侧限抗压强度低于 OPC 试件 10.9%，至 90 d 时已略高于 OPC 试件。与 7 d 相比，90 d 时 OPC、F00、F04、F08、F12、F16、F20 无侧限抗压强度分别增长了 14.4%、12.0%、22.5%、29.2%、31.4%、35.5%、31.1%。从 7、90 d 的无侧限抗压强度增长规律可以看出，粉煤灰-水泥稳定再生碎石混合料的无侧限抗压强度增幅显著高于水泥稳定再生碎石，延长养护龄期强度增幅更为显著，粉煤灰掺量为 16%时增幅最大，养护龄期对粉煤灰-水泥稳定再生碎石混合料无侧限抗压强度影响显著。

综上，水泥稳定再生碎石混合料的无侧限抗压强度早龄期增长速率较快，7 d 无侧限抗压强度可达 85%，28 d 强度增长基本完成。掺入粉煤灰后不仅可显著提高再生碎石混合料 7 d 无侧限抗压强度，且

材料科学

90 d 无侧限抗压强度仍具有较大增幅，这源于粉煤灰是良好的火山灰材料，且具有微集料效应，掺入适量粉煤灰后可填充混合料中的孔隙，提高其密实程度；另外，粉煤灰中的 Al_2O_3 活性成分可参与水泥水化反应，生成的水化硅酸钙凝胶可增强骨料的嵌锁效应，使基层结构更加致密，提高了再生碎石混合料 7 d 无侧限抗压强度；随养护龄期增长，粉煤灰的中 SiO_2 可与水泥水化产生的氢氧化钙进行二次水化反应，将强度较低的氢氧化钙转化成强度更高的 C-A-S-H、C-S-H 凝胶，进一步提高骨料之间的黏结强度，故 28～90 d 无侧限抗压强度仍具有较大增幅。高粉煤灰掺量时混合料由嵌锁结构向悬浮结构转变，由于未水化的粉煤灰自身强度低于再生碎石，导致无侧限抗压强度减小。

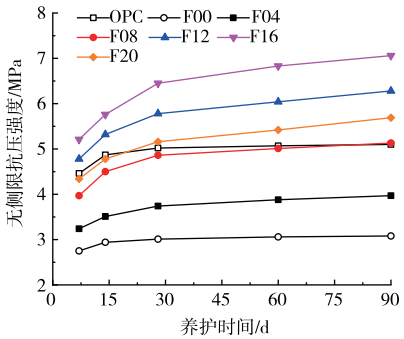


图 2　无侧限抗压强度随养护龄期变化曲线

Fig. 2　Unconfined compressive strength variation curve with curing age

2.2　弯拉强度

由图 3 可知，仅掺水泥的 OPC、F00 试件弯拉强度增长主要集中于 28 d 内，与 7 d 相比，28 d 弯拉强度分别增长了 14.0%、11.0%，90 d 弯拉强度分别增长了 17.8%、14.3%，弯拉强度值分别为 1.26、1.04 MPa；水泥掺量为 6%的再生碎石混合料 90 d 的弯拉强度仍小于规范 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中高速路公路基层 1.5 MPa 的限值。掺入粉煤灰后，随粉煤灰掺量增加弯拉强度呈先增大后减小趋势，粉煤灰掺量为 4%、8%、12%、16%、20%的试件 90 d 弯拉强度分别为 1.16、1.39、1.55、1.41、1.21 MPa，与 F00 相比分别增长了 11.5%、33.7%、49.0%、35.6%、16.3%；粉煤灰掺量为 12%的 F12 试件弯拉强度最大，相比基准组 OPC 试件增长了 23.0%，且满足规范中 1.5 MPa 限值要求。粉煤灰掺量为 12%时弯拉强度最高，这与无侧限抗压强度增长规律有所不同。这是由于混合料的弯拉强度主要取决水泥砂浆的黏结强度，粉煤灰掺量不高于 12%时，其通过填充作用一方面填充混合料中的孔隙提高密实度，另一方面也可填充再生骨料表面的微孔隙，增强骨料表面旧砂浆的强度，这是 7 d 弯拉强度增长的主要因素；随着水泥水化反应完成，其创造的碱性环境可激发粉煤灰中 SiO_2、Al_2O_3 活性，消耗水泥水化氢氧化钙生成大量 C-A-S-H、C-S-H 胶凝物质，也可与骨料表面旧砂浆中残留氢氧化钙进行二次水化反应新的胶凝物质，改善界面过渡区黏结性能，由此增强混合料的弯拉强度，故 90 d 弯拉强度仍具有较大增幅。粉煤掺量大于 12%后，因水泥产生的碱性环境有限，多出的粉煤灰无法参与水化反应，仅能发挥填充效应，不能增强混合料的黏结强度，由此导致弯拉强度降低。

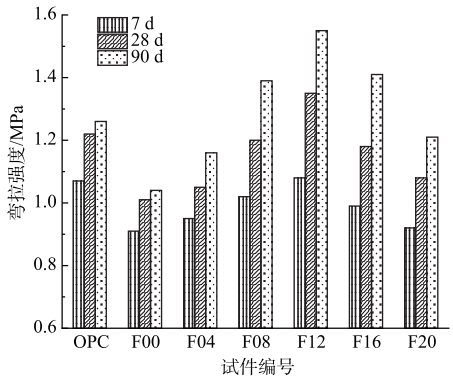


图 3　不同龄期再生碎石混合料弯拉强度

Fig. 3　Bending and tensile strength of recycled crushed stone mixtures at different ages

2.3　抗压回弹模量

由图 4 可知，6%水泥掺量的 OPC 试件抗压回弹模量显著高于 4%水泥掺量的 F00 试件；随粉煤灰掺量增加再生碎石混合料的抗压回弹模量先增大后减小，粉煤灰掺量为 16%时抗压回弹模量最大。OPC、F00 试件抗压回弹模量增长集中 28 d 内，掺入粉煤灰的各组试件 28～90 d 仍具有较大增幅。90 d 时，OPC 试件抗压回弹模量为 18.8 GPa，F00、F04、F08、F12、F16、F20 试件抗压回弹模量分别为 15.6、16.5、19.1、21.8、22.7、19.8 GPa，相比 OPC 试件分别增长−17.0%、−12.2%、1.6、16.0%、20.7%、5.3%；可见粉煤灰掺量为 4%时抗压回弹模

量仅略有增长，掺量为 8%的试件抗压回弹模量略高于基准组 OPC 试件，掺量为 12%时抗压回弹模量增幅达到最大，掺量为 16%时增幅趋缓；规范 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》规定 90 d 抗压回弹模量不应小于 18 GPa，粉煤灰掺量超过 8%后均可满足规范要求，这表明粉煤灰-水泥对再生碎石的抗压回弹模量具有较高的增强作用。掺入粉煤灰提高再生碎石混合料的抗压回弹模量同样源于粉煤灰的集料填充效应和与水泥协同二次水化效应提高混合料的密实程度；由粉煤灰的水化反应历程可知，其水化反应开始于水泥水化反应后期，通过消耗水泥水化产生的氧化钙提高混合料强度。因水泥掺量固定，过量的粉煤灰无法参与水化反应，其失水收缩容易诱发裂缝产生，导致抗压回弹模量降低，故粉煤灰掺量不宜超过 16%。

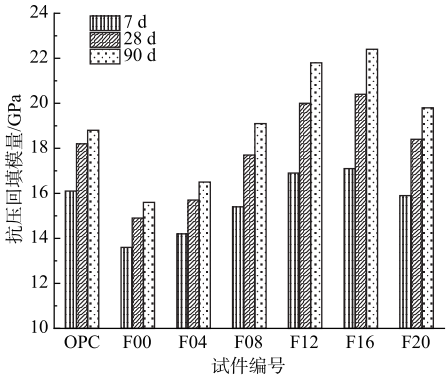


图 4　不同龄期再生碎石混合料抗压回弹模量

Fig. 4　Compressive rebound modulus of recycled crushed stone mixtures at different ages

2.4　干缩性能

由图 5 可知，各组再生碎石混合料试件的干缩变形在 0~7 d 为快速增长期，干缩变形增速显著，7~14 d 干缩变形增速有所减缓，14~28 d 干缩变形发展逐渐趋于稳定，28 d 后干缩变形仅略有增长。再生碎石混合料干缩变形随水泥掺量增加而增大，仅掺水泥的试件干缩变形增速显著高于掺粉煤灰的试件，14 d 时干缩变形已完成 95%；掺入粉煤灰后可减小混合料的干缩变形，随粉煤灰掺量增加先增大后减小，粉煤灰掺量为 16%时干缩变形最小。90 d 的 OPC、F00、F04、F08、F12、F16、F20 试件干缩应变分别为 156.9×10^{-6}、140.8×10^{-6}、130.1×10^{-6}、115.0×10^{-6}、99.0×10^{-6}、93.6×10^{-6}、102.9×10^{-6}；相比基准组 OPC 试件，其他各组试件干缩变形分别降低了 10.2%、17.1%、26.7%、36.9%、40.4%、34.4%。由于再生碎石吸水率高于天然碎石，高水泥掺量时因水化反应速率快而使水分快速蒸发，导致干缩变形增大；掺入粉煤灰可减小再生碎石混合料的干缩变形，粉煤灰掺量为 12%时降幅较大，掺量增加至 16%干缩变形降幅显著减小，再增加粉煤灰掺量会导致干缩变形增大。粉煤灰可有效抑制再生碎石混合料的干缩变形，这得益于其球形玻璃微珠具有的滚珠效应，可充分分散于水泥浆体中，避免水泥颗粒初始团聚，确保其充分水化，增强浆体强度，减少收缩来源；粉煤灰颗粒还可充填混合料中各类空隙，并紧密吸附在集料表面，强化了最薄弱的界面过渡区，抑制干缩变形的发展。高粉煤灰掺量会导致混合料最佳含水量提高，未参与水化反应的水分增多，因多余水分蒸发而导致干缩变形增大。

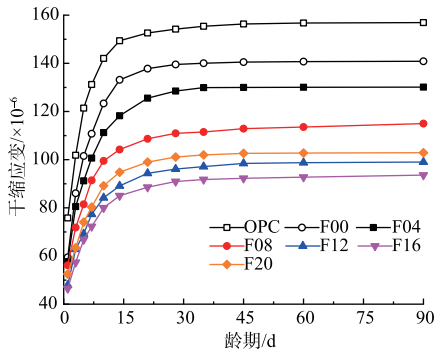


图 5　再生碎石混合料干缩应变随龄期变化曲线

Fig. 5　Dry shrinkage strain curve of recycled crushed stone mixture with age

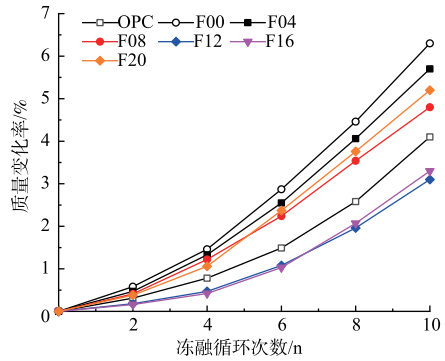
2.5　抗冻性能

由图 6（a）可知，随冻融循环次数增加各组试件的质量变化率逐渐增大，这是由于再生骨料吸水率高，经冻融循环作用，骨料内部产生较大的冻胀力而破坏了骨料与表层浆体的黏结作用，导致浆体脱落而引起质量损失。10 次冻融循环时，掺 6%水泥的 OPC 试件质量变化率为 4.1%，而水泥掺量为 4%的 F00 质量变化率达到 6.3%，超过了规范要求 5%限值；随粉煤灰掺量增加，质量变化率先减小后增大，10 次冻融循环时 F04、F08、F12、F16、F20 试件质量变化率分别为 5.7%、4.8%、3.1%、3.3%、5.2%；相比 OPC 试件，分别变化了 39.0%、

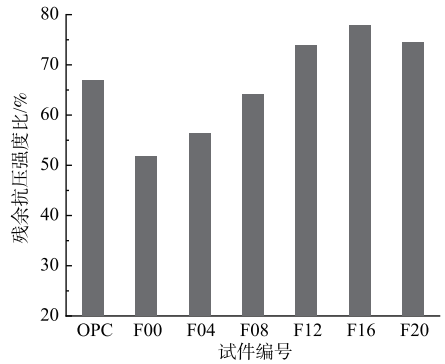
材料科学

17.1%、−24.4%、−19.5%，26.8%。粉煤灰掺量为8%~16%时质量变化率均小于5%，掺量为12%~16%范围时小于OPC试件，具有较好的抗冻性能。

由图6（b）可知，10次冻融循环时OPC、F00、F04、F08、F12、F16、F20试件的残余抗压强度比分别为66.8%、51.7%、56.4%、64.2%、73.8%、77.9%、71.5%。可见，残余抗压强度比随粉煤灰掺量增加先增大后减小，掺量不小于12%时均高于基准组OPC试件；F20试件残余抗压强度比高于F12试件，这与质量变化率并不一致，这表明高粉煤灰掺量时，过量的粉煤灰仅能发挥填充作用，并不能参与水化反应，受冻融循环作用后该部分粉煤灰剥离而导致质量损失增大，而经水化反应产生的胶凝材料骨架仍发挥黏结骨料的效应，混合料仍具有较高的残余抗压强度。根据规范JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中重冻地区基层的残余抗压强度不应小于70%，建议水泥再生碎石混合料中粉煤灰掺量宜为12%~16%。



（a）质量变化率



（b）残余抗压强度比

图6 粉煤灰掺量对再生碎石混合料抗冻性能影响

Fig. 6 The influence of fly ash content on the frost resistance of recycled crushed stone mixture

2.6 疲劳性能

对OPC、F08、F12、F16试件进行重复荷载下疲劳寿命研究，将不同应力强度比下的疲劳寿命取对数后进行线性拟合，拟合曲线如图7所示，拟合公式见表3。不同再生碎石混合料的疲劳寿命均随应力强度比增加而显著减小，疲劳寿命非线性方程相关性系数R^2均大于0.95，表明疲劳寿命的lg$N$与应力强度比的lg$x$存在显著线性相关性变化。掺6%的OPC试件疲劳寿命最小，水泥稳定再生碎石中添加适量粉煤灰可提高混合料的疲劳寿命，随粉煤灰掺量增加再生碎石混合料的疲劳寿命先增大后减小。应力强度比为0.80时，OPC、F08、F12、F16试件的疲劳寿命分别为3 516、7 513、11 432、9 121次，这表明，粉煤灰-水泥稳定再生碎石的疲劳寿命显著高于水泥稳定再生碎石。再生骨料表面旧砂浆与新砂浆之间的界面过渡区强度薄弱，仅掺水泥时难以强化界面过渡区的强度，在疲劳荷载作用下促进了裂纹的早期萌生和扩展；掺入粉煤灰提高再生碎石混合料的密实程度，优化了新旧砂浆之间界面过渡区的黏结强度，相对致密的界面过渡区可阻碍由重复循环荷载引起的内部微裂纹的初始发展和扩展，由此提高混合料的疲劳寿命。

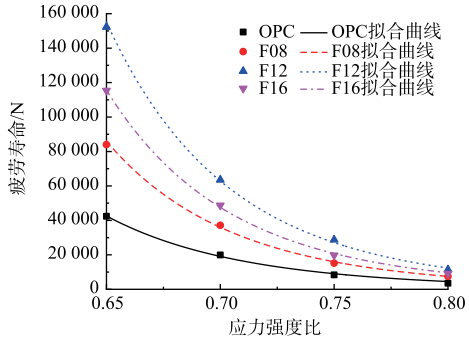


图7 再生碎石混合料疲劳寿命拟合曲线

Fig. 7 Fatigue life fitting curve of recycled crushed stone mixture

表3 疲劳寿命拟合方程

Table 3 Fatigue life fitting equation /%

试件编号	拟合方程	R^2
OPC	lg$N$=2.614−10.815lg$x$	0.989
F08	lg$N$=2.735−11.762lg$x$	0.994
F12	lg$N$=2.911−12.189lg$x$	0.988
F16	lg$N$=2.820−11.986lg$x$	0.995

2.7 经济性分析

通过对不同掺量粉煤灰协同4%水泥稳定再生碎

石混合料路用性能分析，粉煤灰掺量为 12%时再生碎石混合料各项性能均能满足高速路公路基层性能指标要求，对比掺 12%粉煤灰+4%水泥 F12 试件与掺 6%水泥 OPC 试件的经济性。查询黑龙江省哈尔滨市建设标准定额信息，粉煤灰单价 75.2 元/t，水泥 398.7 元/t，再生集料 115 元/t。F12 试件：12%×75.2+4%×398.7+84%×115=121.5 元/t，OPC 试件：6%×398.7+94%×115=132.0 元/t，F12 试件相比 OPC 试件每吨材料价降低 10.5 元，再生碎石混合料每吨节约成本约 7.9%，具有较好的经济性，可在高速公路工程推广应用。

3　结论

通过开展粉煤灰-水泥稳定全再生碎石用作高速公路基层路用性能的试验，固定水泥掺量为 4%，研究了不同粉煤灰掺量对全再生碎石基层路用性能的影响规律，得出以下结论：

（1）掺 6%水泥稳定再生碎石的 7 d 无侧限抗压强度、抗压回弹模量均满足高速公路基层的要求；随粉煤灰掺量增加，粉煤灰-水泥稳定再生碎石的无侧限抗压强度、抗压回弹模量先增大后减小，12%~16%粉煤灰协同 4%水泥稳定再生碎石均可满足高速公路基层的要求；粉煤灰-水泥稳定再生碎石混合料随养护龄期增长，无侧限抗压强度、抗压回弹模增幅均高于水泥稳定再生碎石混合料。

（2）随粉煤灰掺量增加，粉煤灰-水泥稳定再生碎石的弯拉强度先增加后减小，12%粉煤灰掺量效果最佳，12%粉煤灰协同 4%水泥稳定再生碎石混合料 90 d 弯拉强度相比 6%水泥稳定再生碎石混合料提高了 23%，且满足规范弯拉强度不小于 1.5 MPa 要求。

（3）水泥稳定再生碎石混合料干缩变形主要发生在 14 d 内，掺入粉煤灰后再生碎石混合料干缩变形周期略有延长，28 d 基本完成；随粉煤灰掺量增加，再生碎石混合料干缩变形量先增加后减小，12%~16%粉煤灰掺量时干缩变形显著低于其他各组，相比 6%水泥掺量试件降低了 36.9%~40.4%。

（4）掺入适量粉煤灰可增强再生碎石混合料的抗冻性能，10 次冻融循环时，12%~16%粉煤灰+4%水泥稳定再生碎石混合料质量变化率为 3.1%~3.3%，相比 6%水泥稳定再生碎石混合料降低了 19.5%~24.4%，残余抗压强度比均高于 70%，满足重冻地区高速公路基层要求。

（5）建立粉粉煤灰-水泥稳定再生碎石混合料的疲劳寿命与应力强度比拟合方程，自变量对数方程存在显著线性相关性；疲劳寿命均随应力强度比增加而减小，随粉煤灰掺量增加先增大后减小，粉煤灰掺量为 12%时再生碎石混合料疲劳寿命最大。

参　考　文　献

[1] 陈义国，齐仕杰，纪续，等. 粉煤灰再生骨料混凝土力学性能及微结构演变［J］. 粉煤灰综合利用，2025，39（1）：13-17，23.

[2] 兰雪江，张翕，王永宝，等. 水泥稳定再生碎石物理力学性能研究进展［J］. 材料导报，2024，38（2）：69-80.

[3] 李强，温华梦，李国芬，等. 再生集料强化方法和掺量对水泥稳定碎石性能的影响［J］. 铁道科学与工程学报，2021，18（5）：1188-1195.

[4] 雷蕾，姜慧，顾万，等. 外掺剂改良再生水泥稳定碎石基层材料试验研究［J］. 公路，2022，67（2）：31-37.

[5] 张立群，张学峰，崔宏环，等. 双掺再生水泥稳定碎石干缩性能研究［J］. 森林工程，2022，38（5）：128-136.

[6] 单社，郭海贞，魏定邦，等. 水泥稳定再生骨料混合料力学性能和抗冻性能研究［J］. 硅酸盐通报，2024，43（2）：774-780.

[7] 李艳丽. 基于规划求解的水泥粉煤灰混合料配合比设计方法［J］. 粉煤灰综合利用，2023，37（1）：90-93，101.

[8] 姚明，蔡东波，韩洪宇，等. 改性胶粉与水泥复合稳定建筑垃圾半刚性基层材料路用性能研究［J］. 公路，2024，69（8）：87-93.

[9] 韩洪宇，李少秋，魏武巍，等. 改性橡胶粉水泥稳定碎石抗裂性能研究［J］. 硅酸盐通报，2024，43（11）：4254-4260.

[10] 彭艳周，王华锋，史宏宇，等. 石灰粉煤灰稳定混凝土再生集料最优配合比的试验研究［J］. 三峡大学学报（自然科学版），2020，42（2）：52-57.

[11] 曲继元. 公路基层水泥粉煤灰-钢渣混合料路用性能评价［J］. 当代化工，2025，54（4）：768-773.

[12] 王冬魁，陈学武，席爽，等. 钢渣、粉煤灰协同增效下水泥稳定再生碎石基层性能研究［J］. 硅酸盐通报，2025，44（5）：1957-1966.

[13] 程银银，李宏波，康鑫睿，等. 水泥和粉煤灰稳定钢渣-砼再生碎石路基混合料的制备及其性能［J］. 中国粉体技术，2023，29（4）：11-21.

[14] 宋亮. 粉煤灰掺量对水泥稳定路面回收料强度和干缩性能的影响［J］. 中外公路，2017，37（4）：266-269.

[15] 李曙龙，吴晚良，万暑，等. 碱激发粉煤灰水泥稳定再生集料性能的研究［J］. 公路工程，2020，45（5）：197-202，233.