

分档掺配水泥稳定再生集料性能研究

Performance of Cement – stabilized Recycled Aggregates with Size – fraction Replacement

王稷良^{1,2}, 韩彬^{1,2}

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 采用分档替代法, 在固定级配和水泥掺量下以再生集料等质量替代同档天然集料, 研究了不同粒径再生集料对混合料路用性能的影响。结果表明: 各粒径再生集料分别替代天然集料后的再生混合料最佳含水率均大于天然混合料, 最大干密度均小于天然混合料; 再生混合料 7、28 d 无侧限抗压强度及劈裂抗拉强度与天然混合料相近, 但 90 d 龄期增长幅度明显小于天然混合料; 与天然混合料相比, 再生混合料 90 d 抗压回弹模量降低 10.9%~38.6%; 各粒径替换后的再生混合料干缩系数及温缩系数随着替换粒径的减小逐渐变大, 其中 ≤ 2.36 mm 粒径替换后, 再生混合料 28 d 累计干缩应变约为天然混合料的 1.68 倍, 总温缩系数为全天然混合料的 1.53 倍。研究成果可为再生集料在道路基层中的精细化利用提供参考。

关键词: 道路工程; 分档掺配; 无侧限抗压强度; 劈裂抗拉强度; 干燥收缩; 温度收缩

中图分类号: U416.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0103-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.018

WANG Jiliang^{1,2}, HAN Bin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: This study employed the sub-grade blending method to investigate the differential influences of various particle sizes of recycled aggregates on the performance of cement-stabilized mixtures. Under fixed gradation and cement content, recycled aggregates were used to replace natural aggregates of corresponding size fractions at equal mass. The results indicate that the optimum moisture content of the recycled mixtures was higher than that of the natural mixture, while the maximum dry density was lower. The 7 and 28-day unconfined compressive strength and splitting tensile strength of the recycled mixtures were comparable to those of the natural mixture. However, the strength increment at the long-term age of 90-day was significantly lower. The 90-day compressive resilient modulus of the recycled mixtures decreased by 10.9% to 38.6% compared to that of the natural mixture. Both the drying shrinkage coefficient and the temperature shrinkage coefficient of the recycled mixtures gradually increased with a decrease in the particle size of the replaced aggregates. In particular, when the ≤ 2.36 mm fraction was replaced, the 28-day cumulative drying shrinkage strain of the recycled mixture was about 1.68 times that of the natural mixture, and the total temperature shrinkage coefficient reached 1.53 times that of the fully natural mixture. The research findings can provide reference for the precision application of recycled aggregates in road base courses.

Key words: road engineering; sub-grade blending; unconfined compressive strength; splitting strength; drying shrinkage; temperature shrinkage

基金项目: 内蒙古自治区交通运输科技项目 (NJ-2020-28, NJ-2022-13)。

作者简介: 王稷良 (1978—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 高性能水泥基材料。

通信作者: 韩彬 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 道路工程材料。

收稿日期: 2025-01-21

道桥技术

0 引言

随着城市更新和基础设施的持续升级,旧建筑物及构筑物的拆除与改造活动日益频繁,随之产生了大量的建筑垃圾^[1]。建筑垃圾的大量堆积不仅占用了土地资源,而且随意堆放填埋,还可能对土壤、水源等生态环境造成严重污染^[2]。将建筑垃圾破碎加工成再生集料应用于集料需求量巨大且强度要求较低的道路基层中,可消耗大量再生集料,实现资源的循环利用^[3-5]。

目前,再生集料的利用问题已经引发了众多学者的广泛关注。杨三强等^[6]发现随着再生集料掺量的增加,混合料各龄期无侧限抗压强度均呈现先增大后减小的变化趋势,而劈裂抗拉强度则线性降低。Zhi 等^[7]发现随着再生集料掺量增加,混合料抗压回弹模量逐渐降低。辛懿韬等^[8]的研究表明,再生集料的掺入并没有缩短混合料的疲劳寿命,反而略微提高了混合料的疲劳性能。李强等^[9]对比了不同再生强化方式及再生集料掺量对混合料的性能影响,结果表明,相比于再生集料强化,再生集料的掺量对混合料的性能影响更为突出。对于水泥稳定再生集料的研究多采用整体掺配方式,这种方式虽然简化了试验流程,却无法准确反映不同粒径再生集料对混合料性能的具体影响。相比之下,分档掺配能够更精确地控制再生集料在混合料中的比例和分布,有助于探究不同粒径再生集料对水泥稳定碎石性能的影响规律^[10]。然而目前再生集料分档掺配基本集中在再生混凝土研究领域,在水泥稳定再生集料中的应用研究则相对不足^[11-13]。水稳再生集料是一种

与再生混凝土具有相似性能的水泥基材料,但不同粒径的再生集料对水稳再生碎石物理力学性能的影响不明确,相关研究较匮乏^[14],且为数不多的研究也多侧重于大范围粒径的影响,对各档粒径的分别研究不足,导致再生集料粒径对混合料性能的影响规律尚不明确^[15]。

为此,采用再生集料同粒径等质量替代天然集料的分档掺配方法,测试并分析再生集料分档掺配对水稳混合料击实特性、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量、干缩性能、温缩性能的影响规律,旨在为再生集料在道路基层中的精细化利用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥为P·C 42.5复合硅酸盐水泥,具体性能见表1。再生集料由废旧混凝土破碎加工而成,2.36~≤26.5 mm天然集料为石灰岩碎石,≤2.36 mm天然集料为铁尾矿砂。再生集料与天然集料均按≤2.36 mm、2.36~≤4.75 mm、4.75~≤9.5 mm、9.5~≤19 mm、19~≤26.5 mm五个粒径档位筛分备用。按JTG 3432—2024《公路工程集料试验规程》中的试验方法,对天然集料和再生集料各粒径物理性能进行测试,结果见表2。

表1 水泥性能指标

Table 1 Performance index of cement

标准稠度 用水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
28	196	275	4.8	8.7	24.8	56.4

表2 集料的物理性能
Table 2 Physical properties of aggregates

集料种类	粒径/mm	密度/(g/cm ³)			吸水率/%	压碎值/%	针片状含量/%	含水率/%
		表观密度	表干密度	毛体积密度				
天然集料	19~≤26.5	2.831	2.815	2.806	0.3	20.1	7.4	0.09
	9.5~≤19	2.828	2.804	2.791	0.5	19.8	9.3	0.06
	4.75~≤9.5	2.824	2.789	2.769	0.7	18.2	8.8	0.23
	2.36~≤4.75	2.835	2.782	2.754	1.0			0.39
	≤2.36	3.068	3.067	3.039	0.9			0.34
再生集料	19~≤26.5	2.678	2.491	2.380	4.7	25.5	6.5	1.42
	9.5~≤19	2.660	2.468	2.353	4.9	23.7	6.1	1.95
	4.75~≤9.5	2.718	2.449	2.292	6.8	20.4	5.6	2.27
	2.36~≤4.75	2.772	2.503	2.352	6.6			2.00
	≤2.36	2.694	2.587	2.587	6.2			2.91

1.2 试验方案

试验采用 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》推荐骨架密实型级配 C-B-3 中值, 即各粒径质量占比为 $\leq 2.36 \text{ mm} : 2.36 \sim \leq 4.75 \text{ mm} : 4.75 \sim \leq 9.5 \text{ mm} : 9.5 \sim \leq 19 \text{ mm} : 19 \sim \leq 26.5 \text{ mm} = 22 : 5 : 21 : 29 : 23$, 水泥掺量固定为 5%。以全天然集料为基准, 再生集料对天然集料进行同档粒径等质量替代, 替代比例为 100%, 且每次仅替换天然集料其中一档。

混合料最佳含水率、最大干密度采用重型击实方法测试, 无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量测试均采用直径 150 mm、径高比为 1:1 的圆柱形试件, 干燥收缩及温度收缩性能试验均采用 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 中梁试件。参照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》测试混合料击实特性, 7、28、90 d 无侧限抗压强度及劈裂抗拉强度, 90 d 抗压回弹模量, 28 d 干缩性能, 28 d 温缩性能。

2 结果与分析

2.1 分档掺配对击实特性影响

对天然混合料及各粒径分别替代后的再生混合料进行击实试验, 测试结果如图 1 所示。各粒径再生集料分别替代天然集料后, 再生混合料的最佳含水率均大于天然混合料, 最大干密度均小于天然混合料。这归因于与天然集料相比, 再生集料吸水率较大, 且表观密度较低。再生混合料的最佳含水率显著增加, 最大增量达 53.0%, 而最大干密度的降低幅度相对较小, 仅为 0.3%~1.2%。

当再生集料替代 $2.36 \sim \leq 4.75 \text{ mm}$ 粒径的天然集料时, 所得再生混合料的击实特性与天然混合料最为接近。主要原因在于该粒径范围的集料在混合料中所占比例仅 5% (质量分数), 而其他粒径范围的集料替代比例均超过 20%。因此, $\leq 2.36 \text{ mm}$ 以及 $>4.75 \text{ mm}$ 粒径的再生集料替代对混合料击实特性的影响更为明显。其中 $\leq 2.36 \text{ mm}$ 粒径范围内的再生集料含有较高比例的砂浆粉末, 需要更多的水分达到混合料的最大密实状态。此外, 对于粗集料的替代, 混合料的最大干密度并非随着粒径的增大而减小, 这是因为随着替代粒径的增大, 集料在击实锤

的冲击下破碎概率随之增加, 为混合料的进一步填充提供了额外空间, 进而增大了最大干密度, 所以 $19 \sim \leq 26.5 \text{ mm}$ 粒径替换的再生混合料最大干密度略大于 $4.5 \sim \leq 9.5 \text{ mm}$ 、 $9.5 \sim \leq 19 \text{ mm}$ 粒径替换的再生混合料。因此再生集料的粒径对混合料的击实特性有显著影响, 且不同粒径范围的再生集料对混合料性能的影响机制存在差异。

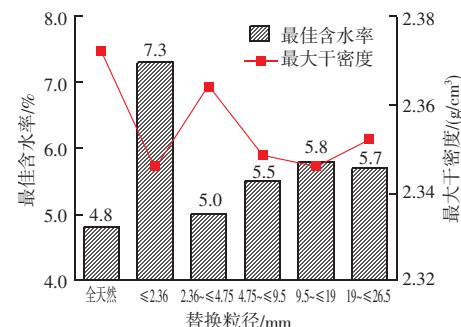


图 1 分档掺配对击实特性影响

Fig. 1 The influence of grading blending on compaction characteristics

再生混合料击实特性不仅受再生集料基本物理性能影响, 还与再生集料掺量密切相关, 为此分别采用各粒径再生集料的吸水率与替换粒径在集料中的含量作比。如图 2 (a) 所示, 该比值与再生混合料最佳含水率呈相反的变化趋势, 这是因为吸水率与掺量比值反映了每单位掺量的再生集料对水分的需求。若比值较高, 意味着即使掺量较少, 也需要较多的水分来满足再生集料的吸水需求。若比值较低, 即使掺量较多, 所需的额外水分也较少。

采用各粒径再生集料的表观密度与替换粒径在集料中的含量作比。如图 2 (b) 所示, 该比值与再生混合料最大干密度呈相同变化趋势, 即混合料的最大干密度与再生集料的表观密度正相关, 与替换粒径在集料中所占比例负相关。表观密度反映了集料的致密程度, 当再生集料的表观密度相对较高时, 意味着其颗粒更为致密, 且能更有效地填充空间, 减少孔隙, 从而在相同的体积下提供更多的质量, 导致混合料的最大干密度增加。而掺量较高的再生集料在混合料中占据了较大的比例, 其不规则形状影响了颗粒间的相互作用和整体的密实度。因此, 再生集料的表观密度与掺量的比值实际上是反映了再生集料在混合料中填充空间和形成结构的能力。这种能力不仅取决于集料的物理特性, 还会受到其

道桥技术

在混合料中所占比例的影响。

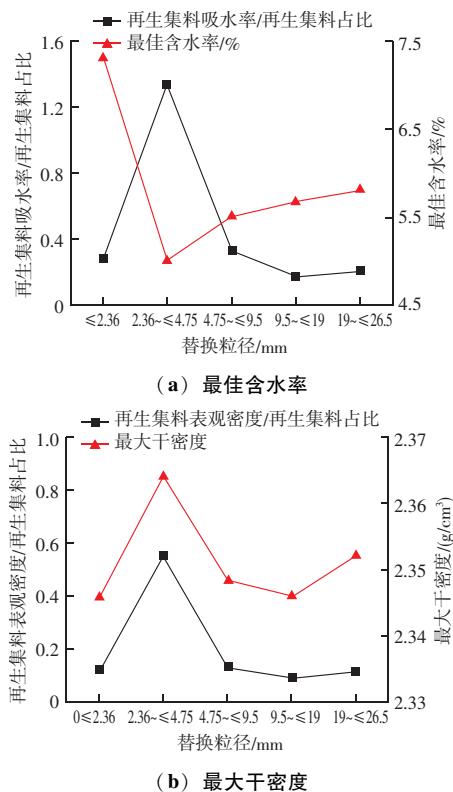


图 2 再生混合料击实特性与再生集料特性关系

Fig. 2 Relationship between compaction characteristics of recycled mixture and characteristics of recycled aggregate

2.2 分档掺配对力学性能影响

2.2.1 无侧限抗压强度

由图 3 可以看出部分粒径替换后, 再生混合料强度高于全天然混合料, 但 28、90 d 强度增长幅度均远小于天然混合料, 这说明再生混合料长龄期强度增长潜力不及天然混合料。

除 ≤ 2.36 mm 粒径替代的再生混合料外, 再生混合料 7 d 强度变化趋势与最大干密度变化趋势相似。随着龄期的增长, 混合料强度逐渐稳定, 各粒径替换后的再生混合料抗压强度劣势逐步显现, 呈现出随着替代粒径增大混合料无侧限抗压强度逐渐降低的趋势。这主要是由于在短龄期内, 水泥水化并不完全, 混合料强度主要依赖于其密实程度; 且再生集料的粗糙表面和不规则粒型有助于增强集料与水泥砂浆之间的黏结力以及集料间的嵌挤效果, 进而提高了混合料的整体性。然而, 随着养护时间的增长, 混合料强度趋于稳定, 再生集料自身劣势逐渐显现。在混合料中粒径越大的集料所起到的骨架支

撑作用越重要, 而再生集料压碎值较大, 且在成型过程中粒径越大的再生集料被压裂挤碎概率越大, 从而增加了混合料受到外力作用时的薄弱部位, 进而降低了混合料抗压强度。与此相反, ≤ 2.36 mm 粒径的再生集料活性物质较多, 促进了水泥的水化反应, 且水化产物进一步填补了混合料空隙, 使得混合料更为致密, 从而提高了混合料强度。

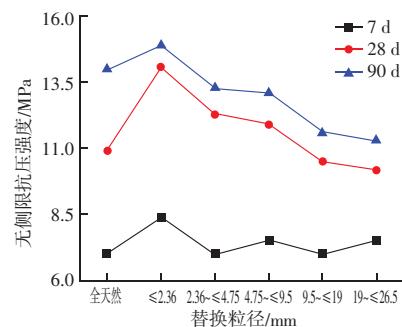


图 3 分档掺配对无侧限抗压强度影响

Fig. 3 Effect of grading on unconfined compressive strength

2.2.2 剥裂抗拉强度

由图 4 混合料剥裂抗拉强度测试结果可以看出, 混合料的剥裂抗拉强度变化趋势与无侧限抗压强度变化趋势相似, 但在各龄期的剥裂抗拉强度值相差不大。各混合料 7 d 剥裂抗拉强度相差不大, 基本稳定在 0.57 MPa 左右, 这主要是由于再生集料的粗糙表面在早期有助于提高集料与水泥浆体之间的黏结力, 使得早期剥裂抗拉强度与天然混合料相近。到了 28 d 龄期, 除 9.5~19 mm 及 19~26.5 mm 粒径替代的再生混合料外, 其余再生混合料的剥裂抗拉强度增长幅度均大于天然混合料。这一优势可能源于再生集料中的活性成分, 如未完全水化的水泥颗粒和其他活性物质, 这些成分在水稳基层中继续参与水化反应, 可进一步提高材料的剥裂抗拉强度, 且粒径越小的再生集料所含活性粉末越多。

然而, 随着龄期增长至 90 d, 天然集料混合料的剥裂抗拉强度高于除 ≤ 2.36 mm 粒径替代的再生混合料以外的其他再生混合料, 增幅达到了 46.0%, 而再生集料混合料的剥裂抗拉强度增长幅度则稳定在 20% 左右。这一差异表明, 天然集料与水泥浆体之间的黏结更为稳定, 且天然集料的物理特性在长期养护过程中更有利水化和强度的持续发展。相比之下, 再生集料的掺入限制了混合料的剥

裂抗拉强度增长潜力, 这可能与再生集料的内部损伤裂纹和较高的压碎值有关, 这些因素在长期养护过程中影响了再生混合料劈裂抗拉强度的增长。因此, 再生集料在 7 和 28 d 龄期能够提供与天然集料相近甚至更高的劈裂抗拉强度, 但天然集料在 90 d 龄期展现出更强的劈裂抗拉强度增长潜力。

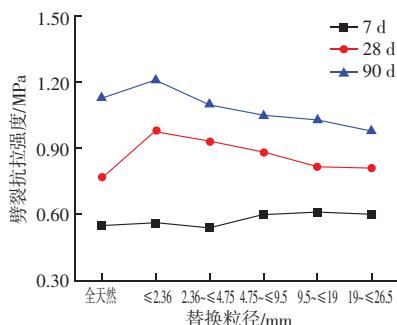


图 4 分档掺配对劈裂抗拉强度影响

Fig. 4 The influence of blending on splitting strength

2.2.3 抗压回弹模量

从图 5 混合料 90 d 抗压回弹模量的测试结果可以看出, 全天然混合料的抗压回弹模量为 2 188 MPa, ≤ 2.36 mm 粒径替换后的混合料抗压回弹模量为 2 195 MPa, 略高于全天然混合料。 $2.36 \sim \leq 4.75$ mm、 $4.75 \sim \leq 9.5$ mm、 $9.5 \sim \leq 19$ mm、 $19 \sim \leq 26.5$ mm 粒径替换后的混合料抗压回弹模量分别为 1 949、1 871、1 554、1 343 MPa, 与全天然混合料抗压回弹模量相比分别下降了 10.9%、14.5%、29.0%、38.6%。由此可以看出, 随着再生集料替换粒径的增大, 混合料抗压回弹模量逐渐降低, 这可能是由于大粒径再生集料在混合料成型过程中更容易被挤压, 导致集料内部缺陷增加, 颗粒间的接触和支撑作用减弱, 从而降低了混合料在受压时的弹性恢复能力。

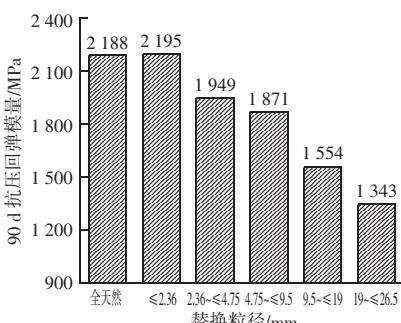


图 5 分档掺配对抗压回弹模量影响

Fig. 5 Effect of graded blending on compressive resilient modulus

2.3 分档掺配对收缩性能影响

2.3.1 干燥收缩

由表 3 可以看出, 再生集料的掺入对水稳混合料的干燥收缩性能均产生了不利影响, 再生混合料的失水率、干缩应变和干缩系数相比于天然混合料均有不同程度的增加, 尤其被 ≤ 2.36 mm 粒径再生集料替代的混合料干燥收缩性能表现最差。

在失水率方面, 被 ≤ 2.36 mm 粒径再生集料替代后, 混合料的 28 d 累计失水率最大, 比天然混合料增加了近 42%; 被 4.75 mm 以上粒径再生集料替换后, 混合料的 28 d 累计失水率均在 4.8% 附近, 与天然混合料相比平均增加了约 16%, 这表明较大粒径再生集料对混合料失水率的影响较小。干缩应变和干缩系数趋势基本相似, 其中被 ≤ 2.36 mm 粒径再生集料替代后, 混合料的 28 d 累计干缩应变约为天然混合料的 1.68 倍, 同时干缩系数也相应增加。对于被 4.75 mm 以上粒径再生集料替代后, 混合料的干缩应变和干缩系数虽逐渐降低, 但仍高于天然混合料。这是由于粒径越小的再生集料, 其比表面积越大, 吸水性越强, 干燥环境下水分蒸发速度更快, 导致混合料在干燥过程中体积变化增大, 进而增大了混合料的干缩应变及干缩系数。因此, 小粒径再生集料因其较高的吸水性, 对混合料的失水率和干缩应变的影响更为显著。

表 3 分档掺配对 28 d 干缩性能影响

Table 3 Effect of sub-grade blending on 28-day drying shrinkage performance

替换粒径/mm	累计失水率/%	累计干缩应变/ $\mu\epsilon$	总干缩系数
全天然	4.1	231	54.7
≤ 2.36	5.8	389	66.5
$2.36 \sim \leq 4.75$	4.4	242	55.6
$4.75 \sim \leq 9.5$	4.7	302	63.8
$9.5 \sim \leq 19$	4.9	284	58.1
$19 \sim \leq 26.5$	4.8	262	55.6

2.3.2 温度收缩

混合料各温度区间 28 d 平均温缩系数如图 6 所示, 总温缩系数如图 7 所示。由图 6 可以看出, 随着温度的降低, 所有混合料的温缩系数均呈先降低后增大趋势, 在 $40 \sim 0$ °C 温度区间逐渐降低, 在 $0 \sim -20$ °C 温度区间再次增大。这是由于混合料中的孔隙水和部分结合水在 0 °C 以下会发生结冰冻胀而使得温缩系数变大。全天然混合料总温缩系数最低,

道桥技术

为 $4.82 \mu\epsilon/\text{°C}$ ，而且在各个温度区间的温缩系数均低于再生集料各粒径替换后的混合料。 $\leq 2.36 \text{ mm}$ 粒径替换后的再生混合料总温缩系数最高，为 $7.37 \mu\epsilon/\text{°C}$ ，是全天然混合料的 1.53 倍。而 $4.75 \sim \leq 9.5 \text{ mm}$ 、 $9.5 \sim \leq 19 \text{ mm}$ 、 $19 \sim \leq 26.5 \text{ mm}$ 这三个粒径替换后的混合料，各温度区间的平均温缩系数相差较小，总温缩系数随替换粒径的增大逐渐减小。

因此，再生集料的掺入总体上不利于混合料的温缩性能，再生粗集料对混合料温缩性能的影响相对较小。这可能是由于再生集料粗糙的表面增强了集料间的嵌锁效果，从而在一定程度上抵消了因温度变化引起的体积变化，进而减缓了温缩系数的增长。

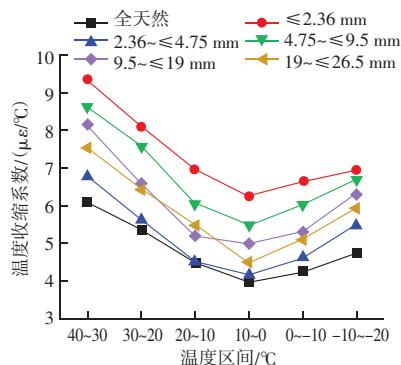


图 6 分档掺配对温缩性能影响

Fig. 6 Effect of blending on temperature shrinkage performance

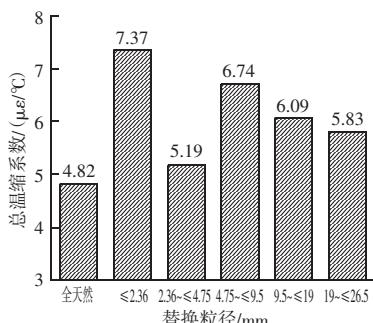


图 7 总温缩系数

Fig. 7 Total temperature shrinkage coefficient

3 结论

基于分档掺配方法，测试混合料击实特性、力学性能及收缩行为，揭示再生集料粒径对混合料性能的影响规律，得到以下主要结论：

(1) 再生集料的高吸水率和较低的表观密度显著影响了混合料的击实特性，再生集料替换同粒径天然集料后，混合料最佳含水率增加了 $4.1\% \sim 53.0\%$ ，

最大干密度下降了 $0.3\% \sim 1.2\%$ 。

(2) 不同粒径再生集料替代天然集料制备水稳混合料在不同龄期呈现不同规律，早龄期 7 d 无侧限抗压强度再生集料的替代均超过天然集料，但到 90 d 时，再生集料替代的水稳混合料强度明显低于天然混合料，且替代粒径越大降低幅度越大。

(3) 7 d 再生集料替代天然集料制备的水稳混合料劈裂抗拉强度无明显差异，但劈裂抗拉强度后期增长率出现明显差异，90 d 天然集料混合料的劈裂抗拉强度增长了 46.0%，而再生集料混合料的劈裂抗拉强度平均增长率约为 20%。

(4) 再生集料替换天然集料后，混合料的抗压回弹模量普遍降低，且降低幅度随替换粒径增大而增大，最高降幅为 38.6%。

(5) 再生粗集料粗糙表面增强了集料间的嵌锁效果，一定程度上抵消了因水分蒸发及温度变化所引起的体积变化，减缓了干缩应变及温缩系数的增长。随着再生集料替换粒径的减小，混合料干燥收缩和温度收缩性能逐渐变差。其中被 $\leq 2.36 \text{ mm}$ 粒径替换的混合料总干缩应变和总温缩系数分别达到了全天然混合料的 1.68 倍和 1.53 倍。

基于以上研究成果，在实际工程中，可根据具体需求灵活调整再生集料的粒径配比。适当减小 $\leq 2.36 \text{ mm}$ 粒径再生集料的比例，以平衡其对早期强度的提升和对收缩性能的不利影响； $2.36 \sim \leq 4.75 \text{ mm}$ 粒径的再生集料对混合料性能影响较小，可适量增加该粒径所占比例；而 4.75 mm 以上的粗集料，鉴于其在混合料中所起到的骨架支撑作用，应谨慎替换或经强化处理后使用，以保证混合料的承载能力及稳定性。

参 考 文 献

- [1] 孙智伟. 再生骨料碳化强化及其沥青混合料性能试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
- [2] 田雨林. 建筑垃圾再生微粉活化重构与水化机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [3] 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.
- [4] 万暑, 吴超凡, 向水生, 等. 不同搅拌方式水泥稳定再生集料的性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (4): 61-65.

(下转第 139 页)

- [14] 高润东, 张永群, 李向民. 砖砌体结构耐久性劣化与加固修复的抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (16): 151-158.
- [15] 张倚天, 解圆聪, 张望喜, 等. 考虑现浇楼板影响的砖砌墙体抗震性能研究 [J]. 重庆大学学报, 2023, 46 (4): 64-77.

(上接第 108 页)

- [5] 邹桂莲, 王华新, 方帅. 水泥稳定再生碎石路用性能研究 [J]. 公路工程, 2018, 43 (5): 28-32.
- [6] 杨三强, 陈康康, 全刚. 低等级道路建筑垃圾再生料力学性能研究 [J]. 公路, 2023, 68 (10): 300-306.
- [7] ZHI X, YANG T, ZHANG X, et al. Experimental study on the mechanical properties and permeability of cement - stabilized permeable recycle aggregate materials [J]. Sustainability, 2023, 15 (19): 14062.
- [8] 辛懿韬, 刘学义. 废旧无机水泥混合料再生利用性能研究 [J]. 公路, 2024, 69 (1): 329-335.
- [9] 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.
- [10] 田源, 牛冬瑜. 铣刨料掺量及掺配方式对再生水稳碎石路用性

能的影响 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2020, 40 (4): 39-49.

- [11] 安新正, 郭永民, 张龙娇, 等. 再生粗骨料取代率及粒径对混凝土抗压性能影响试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (2): 30-35.
- [12] 刘慈军, 吴子杨, 程书凯, 等. 再生细骨料对超高性能混凝土的力学与自收缩性能影响 [J]. 无机盐工业, 2024, 56 (9): 75-81.
- [13] 汪京. 废旧基层材料水泥稳定再生利用技术研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [14] 郑甲佳, 张来君, 王曦辉, 等. 水泥稳定建筑固废再生集料抗冻性能研究 [J]. 中外公路, 2024, 44 (3): 95-103.
- [15] 兰雪江, 张翛, 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.

(上接第 134 页)

参 考 文 献

- [1] 梁新亚, 何飞龙, 李相坡, 等. 锈蚀钢筋强度及粘结性能研究进展 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊1): 1571-1575.
- [2] 莫齐伟, 商怀帅, 徐芹文. 加速锈蚀与持续荷载对钢筋混凝土粘结性能的影响 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (14): 112-116, 93.
- [3] 陈宝春, 杨简, 吴香国, 等. UHPC 力学性能的多指标分级 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (8): 23-34.
- [4] 毛达岭, 刘立新, 范丽. HRB500 级钢筋粘结锚固性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2004 (12): 67-69, 90.
- [5] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1994 (3): 26-37.
- [6] 宋泽鹏, 陆春华, 宣广宇, 等. 螺纹 CFRP 筋与混凝土粘结性能试验与理论计算 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 8-16.
- [7] 付瑞佳, 刘璐, 王亚楠, 等. 不锈钢筋混凝土粘结锚固性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (11): 72-77, 142.
- [8] KHAKEFIDI S, GHALEHNOVI M, DEBRITO J. Bond behaviour of high - strength steel rebars in normal (NSC) and ultra - high performance concrete (UHPC) [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101592.
- [9] 侍刚, 邵旭东, 高立强, 等. HRB400 钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究 [J]. 桥梁建设, 2021, 51 (6): 61-67.

- [10] LAW D W, TANG D, MOLYNEAUX T K C, et al. Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar [J]. Materials and structures, 2011, 44: 1287-1296.
- [11] TARIQ F, BHARGAVA P. Post corrosion bond - slip models for super ductile steel with concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122836.
- [12] ELIGEHHAUS R, POPOV E P, BETERO V V. Local bond stress - slip relationships of deformed bars under generalized excitations [J]. Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering, 1982, 4: 69-80.
- [13] HE Z J, CHEN Y, MA Y N, et al. The study on bond - slip constitutive model of steel - fiber high - strength recycled concrete [J]. Structures, 2021, 34: 2134-2150.
- [14] 李晓琴, 陈建飞, 陆勇, 等. 基于局部损伤混凝土模型的 FRP - 混凝土界面有限元分析研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2015, 47 (1): 62-65.
- [15] 袁晓辉, 卢哲安, 任志刚, 等. 无机聚合物混凝土 - 钢筋拉拔有限元分析 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2013, 45 (2): 209-215.
- [16] FU J Y, GE X, CHEN L, et al. Low - cycle fatigue behaviour of ribbed 1.4362 duplex stainless steel reinforcement [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03218.