

水泥稳定建筑垃圾路用性能研究

林 通¹, 霍志强², 杨征勋^{1,2,3}, 文安飞², 努尔麦麦提·阿卜力米提²,
张 政², 吴绍龙¹

(1. 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 四川交通职业技术学院, 成都 611130;
3. 四川省交通运输绿色低碳建筑材料工程技术研究中心, 成都 611130)

摘 要: 为提高建筑垃圾在工程领域资源化利用率, 探究建筑垃圾在道路中应用的可行性。以不同集料类型, 水泥掺量作为试验变量, 研究不同集料类型对水泥稳定碎石无侧限抗压强度, 劈裂强度, 冻融性能的影响, 并分析集料类型对强度的影响顺序。考虑到由于天然集料的密度大于再生集料, 在替换过程中引起最大干密度的提高, 间接地影响水泥添加量增大, 将水泥等效转换, 分析集料类型对强度的影响顺序。在 3% 水泥掺量下, 全再生、半再生 7 d 无侧限抗压强度均可达到 3 MPa 以上, 28 d 劈裂强度达到 0.3 MPa 以上, 抗冻性指标达到 60% 以上, 可满足二级及二级以下公路重交通的标准。根据水泥平衡调整后的结果, 集料的影响程度顺序为砂 $\geq$ 碎石+米石 $>$ 米石 $>$ 碎石。研究成果可为建筑垃圾水泥稳定基层的设计提供参考。

关键词: 水泥稳定碎石; 建筑垃圾; 压碎值; 击实; 无侧限抗压强度; 劈裂; 冻融

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0084-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.014

Study on the Road Performance of Cement-Stabilized Construction Waste

LIN Tong¹, HUO Zhiqiang², YANG Zhengxun^{1,2,3}, WEN Anfei², NURMEMET · Abdulmetti²,
ZHANG Zheng², WU Shaolong¹

(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, China;
3. Sichuan Provincial Transportation Green and Low Carbon Building Materials
Engineering Technology Research Center, Chengdu 611130, China)

Abstract: To enhance the resource utilization rate of construction waste in engineering fields, the feasibility of applying construction waste in road construction is explored. Different aggregate types and cement dosage are taken as experimental variables to study the influence of different aggregate types on the unconfined compressive strength, splitting strength and freeze-thaw performance of cement-stabilized crushed stone. The influence sequence of aggregate types on strength is analyzed. Considering that the density of natural aggregates is greater than that of recycled aggregates, the maximum dry density increases

项目来源: 四川省自然科学基金面上项目 (24NSFSC0880); 四川省科技创新苗子工程资助项目 (MZGC20240125)。

作者简介: 林 通 (2000—) 男, 硕士研究生, 研究方向: 固体废弃物循环利用。

通信作者: 杨征勋 (1982—) 男, 博士, 教授, 研究方向: 无机非金属材料。

收稿日期: 2025-01-06

during the replacement process, which indirectly leads to an increase in the amount of cement added. The cement is equivalently converted to analyze the influence sequence of aggregate types on strength. Under a 3% cement dosage, the 7-day unconfined compressive strength of fully recycled and semi-recycled materials can both reach above 3 MPa, the 28-day splitting strength can reach above 0.3 MPa, and the freeze-thaw resistance index can reach above 60%, which can meet the standards for heavy traffic on secondary and lower-grade roads. According to the results of cement balance adjustment, the influence degree sequence of aggregates is sand $\geq$ crushed stone + gravel > gravel > crushed stone. The research results can provide a reference for the design of cement-stabilized base layers made from construction waste.

Key words: cement stabilized crushed stone; construction waste; crushing value; compaction; unconfined compressive strength; splitting; freeze thaw

0 引言

在公路建设不断扩展和完善的背景下,新建和待建的工程数量庞大,对建筑材料的需求也不断增长^[1-2]。然而,大量的土地被建筑垃圾占用,天然石料被开采,导致不可再生资源日益枯竭,也与绿色发展理念背道而驰^[3]。若能将建筑废弃物转化为性能优异的筑路材料,这将带来显著的经济和环保效益,建筑垃圾在道路工程中的潜在应用价值不容忽视^[4-5]。

目前,将建筑垃圾作为填筑路基已有工程应用,路基对筑路材料的要求低,可将建筑垃圾利用充分,但建筑垃圾材料离散性大、不稳定,因此对其性能研究十分重要^[6-8]。有学者在级配、压实度、建筑垃圾掺量对水泥稳定建筑垃圾的影响方面进行了研究。朱挺等^[9]以级配、压实度和水泥为研究变量,研究其对结合料的无侧限抗压强度的影响;杨宝帅等^[10]确定再生粗集料和天然细集料的级配以及骨架密实型水泥稳定再生粗集料的合理粒径分布区间;谢祥兵等^[11]以废弃混凝土与废弃砖制成再生砂粉,将其应用于水泥稳定碎石,并研究了对抗冻融性能以及干缩性能的影响;张宇等^[12]研究了再生集料掺量对水泥稳定碎石无侧限抗压强度及劈裂强度的影响;张沛^[13]研究了不同外加剂及掺量对再生集料的强化效果,发现再生集料水泥稳定碎石随着再生集料掺量的增加,无侧限抗压强度逐渐降低,劈裂强度逐渐提高;张金喜等^[14]开展了再生集料的半刚性道路基层中的应用研究,通过铺设全再生道路试验段,并进行了长期性能检测;梁行行等^[15]研究了再生集料含量对再生水泥稳定基层力学性能的影响,结果表明均可满足设计指标;樊兴华等^[16]通过不同配合

比验证再生路面基层具有足够的强度。道路基层大多是研究再生集料替代率对无机结合料稳定材料性能的影响,对集料类型研究较少。在大多情况下,研究者忽略了集料密度变化影响到水泥掺量的变化,进而影响到水泥稳定碎石的无侧限抗压强度。

上述研究主要集中在相同水泥掺量方面对水泥稳定碎石的影响因素,在相同水泥质量方面去分析影响因素的研究较少。再生集料与传统集料密度差异较大,所以采用相同水泥质量,剔除水泥对强度的影响。设计不同集料混合下的配合比,对各配比进行击实试验,确定最大干密度及最佳含水率。根据推荐级配,制作圆柱形试件测试无侧限抗压强度、劈裂强度、冻融性能,并观察试体微观结构。探究再生碎石、再生米石、再生砂对水泥稳定碎石路基的影响及可行性。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其技术性能指标见表1。集料分为再生集料、天然集料。再生集料为建筑垃圾中的混凝土经过破碎,分拣、筛分等流程处理后,生产的0~5、5~10、10~30 mm再生集料。天然集料为传统砂石料。

表1 水泥基本技术指标
Table 1 Basic technical indicators of cement

凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
265	360	34.7	54.2	5.1	7.2

按照JTG3432—2024《公路工程集料试验规程》对集料基本性能进行测试,压碎值如图1所示,再生集料与天然集料性能指标见表2,细集料的液塑限见表3。

材料科学

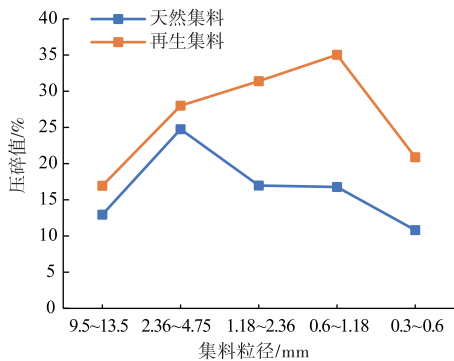


图1 再生集料与天然集料压碎值

Fig. 1 Crushing value of recycled aggregate and natural aggregate

表2 再生集料与天然集料性能指标
Table 2 Performance indicators of recycled aggregate and natural aggregate

集料类型	类别	表观密度 /(g/m ³)	吸水率 /%	含泥量 /%	泥块含量 /%	针片状 /%
再生	碎石	2.666	3.76	0.51	0.95	5.14
	米石	2.793	4.88	0.73	0.54	
	砂	2.660	9.48	15.06	6.36	
天然	碎石	2.823	1.86	0.20	0.52	0.70
	米石	2.809	3.93	1.01	0.27	
	砂	2.699	5.10	5.65	1.62	

表3 细集料液塑限
Table 3 Fine aggregate liquid plastic limit

集料类型	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
再生	34.53	26.05	8.48
天然	26.52		

1.2 试验方法

击实试验：参照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0804—1994 试验方法进行。

无侧限抗压强度试验：试件制备和养护参照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0843—2009 和 T0845—2009 进行。

劈裂抗拉强度试验：参照 JTG 3441—2024 T0806—1994《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中进行。

冻融强度试验：参照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》中 T0858—2009 进行。

SEM 分析：利用场发射扫描电镜分别对再生集料及天然集料的水泥稳定碎石进行微观形貌观察。

1.3 试验配合比

根据规范 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工

技术细则》进行集料的配合比设计，将配合比以 TTT、TTR、RTR、TRR、RRR 编号，其中 T 代表天然砂石料，R 代表再生砂石料，例如 TTR 代表天然碎石+天然米石+再生砂。采用骨架密实型，选用推荐级配 C-C-2 型级配，级配曲线如图 2 所示。

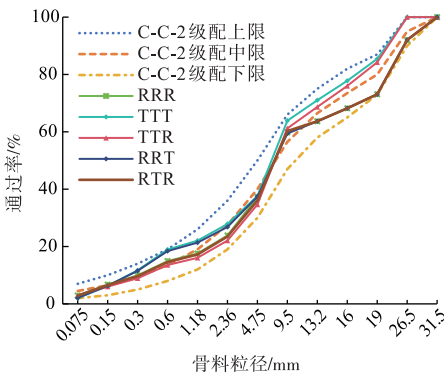


图2 级配曲线

Fig. 2 Grading curve

2 结果与分析

2.1 水泥掺量

对 RRR 配比进行在 3%、4%、5% 水泥掺量下的击实试验，每组设定 5 个不同含水率，确定不同水泥掺量下全再生水泥稳定碎石的最佳含水量及最大干密度，试验结果如图 3 所示。根据图 3 的击实试验最大干密度及最佳含水率制作水泥稳定碎石试件，通过全再生水泥稳定碎石 7 d 无侧限抗压强度试验，获得 7 d 无侧限抗压强度的试验值及标准值，如图 4 所示。

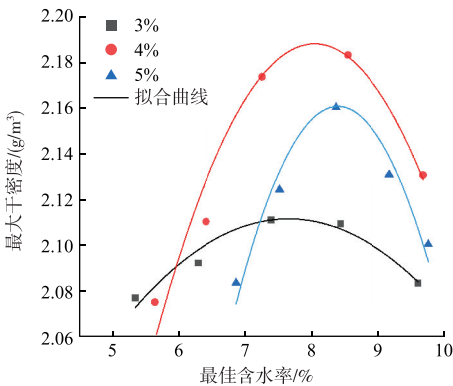


图3 全再生集料水泥稳定碎石最大干密度及最佳含水率

Fig. 3 Maximum dry density and optimal moisture content of fully recycled aggregate cement stabilized crushed stone

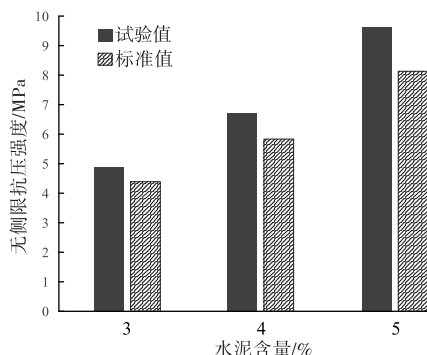


图4 全再生集料水泥稳定碎石7 d无侧限抗压强度
Fig. 4 7-day unconfined compressive strength of fully recycled aggregate cement stabilized crushed stone

随水泥掺量的增加, 7 d无侧限抗压强度呈增长趋势, 水泥掺量每增加1%, 7 d无侧限抗压强度增长大约35%。

根据《公路路面基层施工技术细则》, 二级及二级以下重交通公路7 d无侧限抗压强度设计值大于3 MPa。在3%水泥掺量的情况下, 试件7 d无侧限抗压强度已达到4.4 MPa。选用最佳水泥含量为3%进行后续的劈裂、冻融试验的研究。

2.2 最大干密度及最佳含水率

水泥掺量为3%的TTT、TTR、RTR、RRT四个配比的最佳含水率及最大干密度进行试验, 结果如图5所示。击实试验结果显示, 最大干密度主要受碎石及细砂的影响, 最佳含水率主要受细砂的影响。

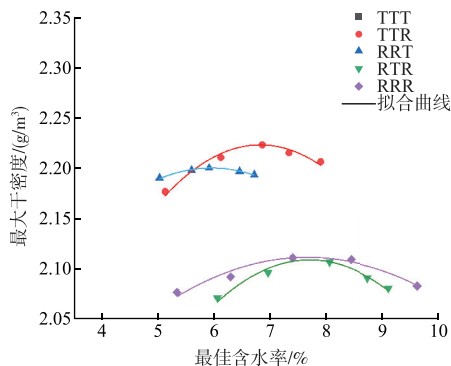


图5 水泥稳定碎石最大干密度及最佳含水率
Fig. 5 Maximum dry density and optimal moisture content of cement stabilized crushed stone

2.3 无侧限抗压强度

由图6可知, 水泥掺加比例以RRR配比为基数1, 根据试验实际水泥掺量获得。通过分析水泥掺量3%、4%在RRR配比下试验结果与水泥添加比例,

按式(1)计算, 获得水泥等效值。

$$P_{7c} = k_1 \times n \times \frac{P_{7d}}{4.7} - 0.018 \quad (1)$$

式中: P_{7c} 为RRR配比下7 d无侧限抗压强度水泥等效值; n 为水泥添加比例; P_{7d} 为配比下7 d无侧限抗压强度; k_1 为水泥添加比例强度增长系数。根据试验得出 $k_1 = 4.918$ 。

根据水泥实际添加量及最大干密度的关系, 在同为3%水泥掺量下, 最大干密度与水泥的掺量存在线性相关的关系, 水泥的实际掺加质量会随着最大干密度的增长而增长。相较RRR配比试件随着水泥掺加比例的变化, TTT配比试件强度提高0.54 MPa, TTR配比试件强度提高0.3 MPa, RRT试件强度提高0.15 MPa, RTR配比不受影响, RRR作为添加基准。试验结果表明, 再生砂相对于天然砂对7 d无侧限抗压强度存在着明显的提升作用, 天然碎石与天然米石相对于再生碎石与再生米石存在着一定的提升作用。本试验采用的是骨架密实型的级配设计, 考虑到集料之间的嵌挤作用对强度的影响, RRT配比的强度存在明显的下降, 这可能是由于天然砂表面本身较为光滑, 再生砂较为粗糙, 在最佳含水率的状态下, 再生砂形成的嵌挤结构相比天然砂形成的嵌挤结构作用更加充分, 天然砂与再生米石碎石不能充分的黏结及嵌挤造成。

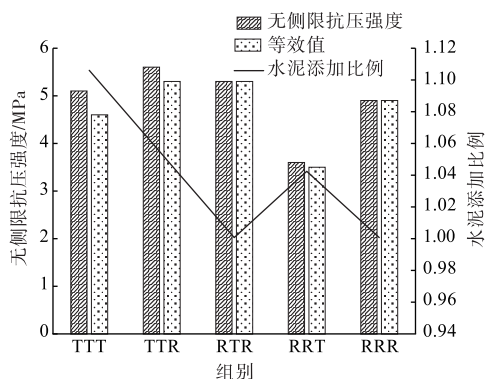


图6 无侧限抗压强度及水泥比例
Fig. 6 Unconfined compressive strength and cement ratio

将TTR、RTR、RRR实验结果对比, 发现天然碎石及天然米石相比再生碎石和再生米石有一定的提升作用, 提升程度与再生砂所带来的提升相近。再生集料表面存在老旧的水泥浆体, 再生集料的吸

材料科学

水量大都是对于水泥稳定基层长期使用的不利因素。根据实验结果分析认为，集料变化所带来的影响为：碎石+米石 $\geq$ 砂>碎石=米石。排除天然集料相对再生集料所带来水泥添加比例提升的影响后，集料变化所带来的影响为：砂 $\geq$ 碎石+米石>米石>碎石。

2.4 劈裂抗拉强度

针对 TTT、TTR、RRR 水泥掺量为 3% 的三个性能较好的配比试件进行劈裂试验，试验结果如图 7 所示。TTR 和 TTT 的劈裂强度 7、28 d 相比存在着明显的提升。全再生集料的配比，在 7 d 时能展现出较好的劈裂性能，但 28 d 的强度提升缓慢。

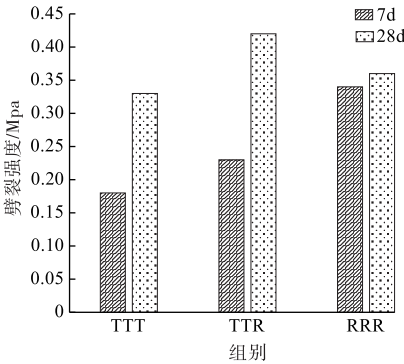
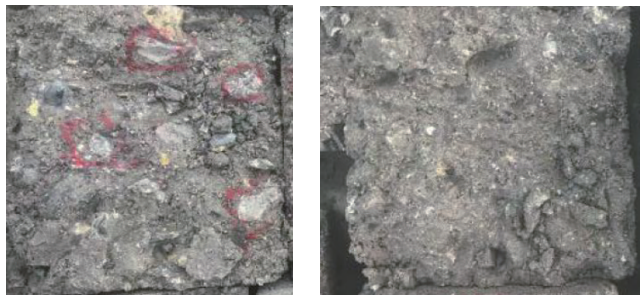


图 7 7、28 d 劈裂强度
Fig. 7 Splitting Strength at 7 and 28 d

通过对劈裂试验后的试件观察，28 d 全再生水泥稳定碎石断裂截面处出现再生粗集料表面的包浆断裂面，如图 8 所示。

再生粗集料表面的水泥浆体成为了劈裂试验中的薄弱面，进而成为 28 d 全再生水泥稳定建筑垃圾的劈裂强度难以提升的因素，但水泥浆体粗糙的表面及再生集料的较高含水率，使得全再生水泥稳定建筑垃圾 7 d 的劈裂强度得到了较好的效果。



(a) RRR (b) TTR



(c) TTT

图 8 水泥稳定碎石劈裂截面
Fig. 8 Splitting section of cement stabilized crushed stone

2.5 冻融性能

针对 TTT，TTR，RRR 三个配比，进行冻融试验。冻融循环采用 28 d 龄期，在 -18 ℃ 的环境中进行冰冻，在水浴箱中进行解冻，5 次循环。冻融循环实验结果如图 9 所示。

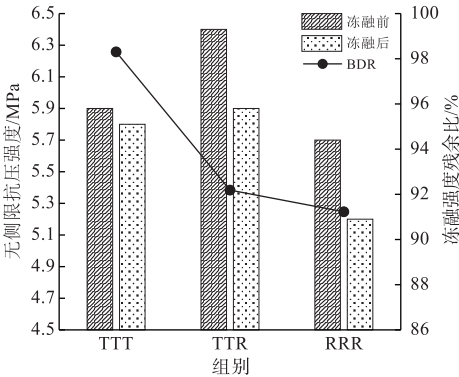


图 9 冻融前后强度
Fig. 9 Strength before and after freeze-thaw

随着再生碎石、米石和砂的加入，水泥稳定碎石的抗冻性指标逐渐降低。当温度低于 0 时，试件结构孔隙中的水会凝结而体积膨胀约 10%，形成微小裂缝，在反复冻融循环作用下，裂缝扩展造成强度下降。在不含再生集料的情况下，强度可达到 5.8 MPa，强度损失为 1.7%，在全再生参量下，强度可达 5.2 MPa，强度损失为 8.8%。各配比混合料的 BDR 均大于 60%，满足规范要求。

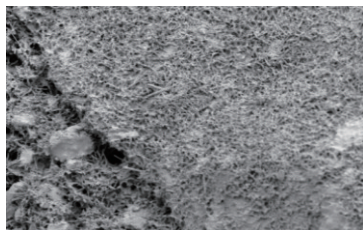
2.6 SEM

在 2 000 倍的图像中，发现 TTT 试样的表面相对规则。由于 RRR 的集料表面附着砂浆等问题，表面粗糙，导致水泥颗粒不能均匀分散开。TTT 的表面相对光滑平整，表面的自由水可以将水泥颗粒分散

开,形成相较规则的结构。再生集料不规则的表面
对骨架密实型的水泥稳定碎石强度上存在一定的帮
助作用,但水泥颗粒不均匀的分散,会使强度数值
存在较大的离散。



(a) RRR



(b) TTT

图 10 试样的 SEM 图

Fig. 10 SEM image of the sample

3 结论

为研究水泥稳定建筑垃圾路用性能,采用不同
集料混合下的配合比,对无侧限抗压强度,劈裂强
度,冻融性能 SEM 试验,并分析集料类型对强度的
影响顺序,得出以下主要结论:

(1) 各配比水泥稳定碎石基层的 7 d 无侧限抗压
强度均达到 3 MPa 以上,满足二级及以下公路的基
层和底基层的基层材料技术指标要求,可以作为二
级及以下公路的重交通的基层材料。冻融性能满足
中、重冻区规范要求。

(2) 3%水泥掺量的试验结果显示,集料的影响
大小顺序:碎石+米石 $\geq$ 砂>碎石=米石。根据水泥
平衡调整后的结果,集料的影响大小顺序为砂 $\geq$ 碎

石+米石>米石>碎石。

(3) 再生粗集料表面的水泥浆体,制约了水泥
稳定碎石劈裂抗拉强度后期的提升。

参 考 文 献

- [1] 肖前慧,刘书林,邱继生,等. 建筑垃圾在路基填筑中的应用综述 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (11): 4502-4513.
- [2] 刘建伟,赵高辉. 城市生活垃圾资源化综合处理技术研究和应用进展 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (34): 40-47.
- [3] “十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划 [J]. 安装, 2022, (5): 1-6.
- [4] 2021 年固体废物处理利用行业综述与 2022 年发展展望 [J]. 中国轮胎资源综合利用, 2022 (4): 10-18.
- [5] 魏英烁,姬国强,胡力群. 建筑垃圾回收再利用研究综述 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (9): 2842-2846.
- [6] 张军辉,丁乐,张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (10): 135-154.
- [7] 吴建超,程宇东,钟彤,等. 建筑垃圾再生骨料强化研究综述 [J]. 环境卫生工程, 2022, 30 (2): 53-62.
- [8] 兰雪江,张翥,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.
- [9] 朱挺,赵建明,陈晓清,等. 水泥稳定再生碎石无侧限抗压强度的正交试验研究 [J]. 公路, 2022, 67 (8): 77-81.
- [10] 杨宝帅,关博文,孙增智,等. 水泥稳定再生粗集料级配设计方法研究 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (2): 131-136.
- [11] 谢祥兵,司马笑情,张艺林,等. 混合型再生砂粉对水泥稳定碎石抗冻和干缩性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4051-4062.
- [12] 张宇,蒋应军,范江涛,等. 掺建筑垃圾水泥稳定碎石力学强度增长规律与预测模型 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3755-3764.
- [13] 张沛. 掺再生砖集料水泥稳定碎石力学性能研究 [J]. 科学技术创新, 2024 (16): 143-146.
- [14] 张金喜,张硕,苏词,等. 建筑垃圾全再生半刚性道路基层路用性能研究 [J]. 公路, 2023, 68 (10): 74-82.
- [15] 梁行行,李柏彤,侯文杰,等. 水泥稳定再生集料抗压强度试验研究 [J]. 公路, 2021, 66 (10): 325-330.
- [16] 樊兴华,薛振华. 建筑垃圾再生骨料路用性能研究 [J]. 公路, 2020, 65 (10): 40-45.