

DOI: 10.7672/sgjs2025220133

二灰稳定再生集料沥青路面力学性能试验研究

王立宇

(北京市兴昌市政工程有限责任公司,北京 102200)

[摘要] 为研究二灰(石灰与粉煤灰)稳定再生集料的路用性能,设计了6种配合比,通过室内试验系统分析了二灰掺量、再生集料组成及养护龄期等因素对混合料无侧限抗压强度、弯曲强度与回弹模量的影响。结果表明:随着面层或基层再生集料比例的增加,混合料的最大干密度有所降低,而最佳含水率则相应提高;延长养护龄期或提高二灰掺量,混合料的无侧限抗压强度、弯曲强度及回弹模量均显著增长;然而,升高养护温度会削弱其力学性能;掺入新碎石可明显改善二灰稳定再生混合料的力学性能与回弹模量,使其能够满足一般交通等级道路基层的使用要求。

[关键词] 沥青路面;再生集料;试验;力学性能

[中图分类号] U416

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0133-04

Experimental Study on Mechanical Properties of Lime-fly Ash Stabilized Recycled Aggregate Asphalt Pavement

WANG Liyu

(Beijing Xingchang Municipal Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: To investigate the road performance of lime-fly ash stabilized recycled aggregates, six mix proportions were designed. Through laboratory tests, the effects of lime-fly ash content, recycled aggregate composition, and curing period on the unconfined compressive strength, flexural strength, and resilient modulus of the mixture were systematically analyzed. The results showed that as the proportion of recycled aggregates in the surface layer or base layer increased, the maximum dry density of the mixture decreased, while the optimal moisture content increased accordingly. Extending the curing period or increasing the lime-fly ash content significantly improved the unconfined compressive strength, flexural strength, and resilient modulus of the mixture. However, increasing the curing temperature weakened its mechanical properties. The addition of new crushed stone significantly improved the mechanical properties and resilient modulus of the lime-fly ash stabilized recycled mixture, which meets the requirements for use in the base layer of general traffic grade roads.

Keywords: asphalt pavement; recycled aggregate test; mechanical properties

1 工程概况

本项目为北京市昌平区南丰东路公路改造工程,该工程分为中心路—南环南路段和景兴街—白浮泉路段,包括道路改造、场地平整及交通照明工程。由于该公路来往车辆频繁,路面发生结构性破坏,部分路段出现大面积裂缝,局部区域已出现坑槽,严重威胁交通安全。路面改造工程中,拟采用沥青混凝土铺设路面,因此,需采用抗压强度高的材料增强沥青路面结构抗剪强度和抗老化能力,提

高路面的使用性能。

2 试验研究

2.1 再生集料特性

本文将道路再生集料分为面层再生集料和基层再生集料。其中,面层再生集料主要是破碎的旧沥青混合料,基层再生集料是从原始路面上破碎下来的含有石灰稳定土的砂砾土壤。本文对再生集料进行干燥处理并粉碎,然后筛选分离。试验过程中使用的碎石来自某石材厂的石灰岩,其压碎率达到30%,符合规定要求,碎石与再生集料之间的级配关系如图1所示。

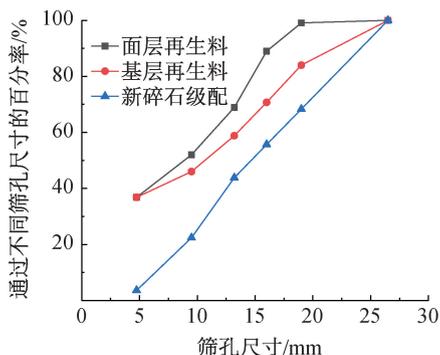


图1 再生集料和碎石的级配范围

Fig. 1 Gradation curves of recycled aggregates and crushed stone

2.2 再生沥青混合料配合比

道路再生集料由原始路面的沥青混凝土再利用材料和路面基层部分重新制成,并且添加新碎石以增强其特性。为了研究各组分掺量对混合料性能的影响,设计6组配合比,如表1所示。在分析养护龄期与温度对无侧限抗压强度、弯曲强度和回弹模量的影响时,所有混合料均采用固定的二灰用量,而在探讨二灰用量(1.5%, 2.5%, 3.5%和4.5%)的影响时,则采用变量设计。

表1 试验混合料配合比

Table 1 Test mixture proportion

混合料类型	面层再生集料含量/%	基层再生集料含量/%	新碎石含量/%
FC100	100	—	—
FC70	70	—	30
FC50	50	—	50
FC5S3	50	30	20
FC5S4	50	40	10
FC5S5	70	30	—

3 试验结果与讨论

3.1 二灰稳定沥青路面混合料的击实特性

不同混合料在1.5%, 2.5%, 3.5%和4.5%二灰用量下的最大干密度及最佳含水率如图2所示。由图2可知,在集料组成相同的条件下,随着二灰用量的增加,混合料的最佳含水率相应提高,最大干密度也随之增大。掺入新碎石后,混合料的最大干密度进一步提升,而最佳含水率则有所降低。当混合料中掺入过量基层再生集料时,其最大干密度略有下降,但变化并不显著;与此相反,最佳含水率显著提高,这主要是源于基层再生集料中细颗粒含量较高所致。

3.2 二灰稳定沥青混合料的力学特性

3.2.1 无侧限抗压强度

使用静压法制作15cm×15cm(直径×高)的圆柱

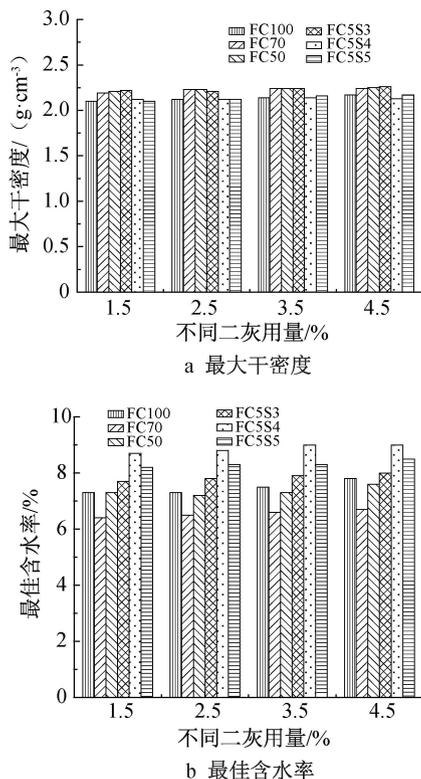
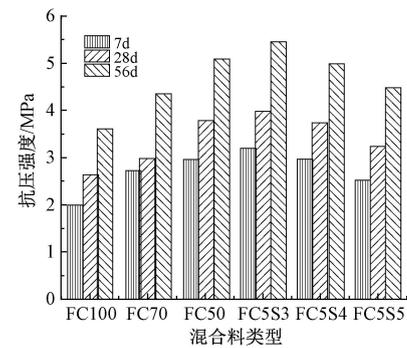


图2 混合料的最大干密度和最佳含水率

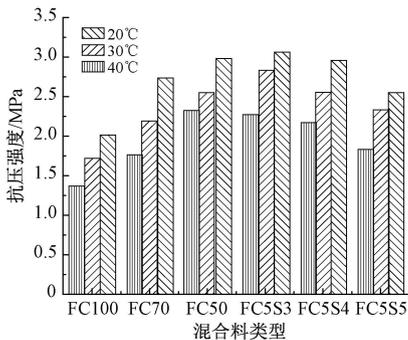
Fig. 2 Maximum dry density and optimum moisture content of the mixtures

体试件测定无侧限抗压强度,压实度为96%。每种工况制备6个试件,标准条件养护(温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$,湿度95%),按JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》测试各养护龄期的无侧限抗压强度。不同养护龄期、温度和二灰用量下再生集料的抗压强度如图3所示。

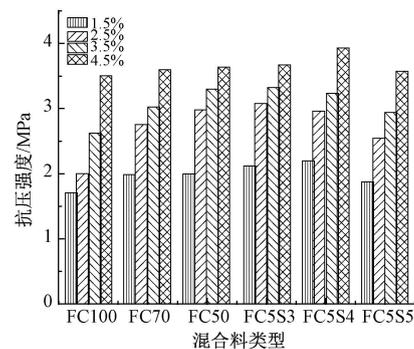
由图3可知,混合料FC100(仅含面层再生集料)的无侧限抗压强度最低,而掺入新碎石后,其强度得到明显改善。其中,由面层再生集料、新碎石和部分基层再生集料复配的混合料的无侧限抗压强度最大。与普通二灰稳定碎石相比,二灰稳定再生混合料的强度受温度影响显著。当试验温度从 20°C 上升至 40°C 时,所有混合料的7d无侧限抗压强度均出现下降,且铣削旧沥青混合料掺量较高时,强度衰减越明显,这主要是由于高温使混合料内的老化沥青软化,导致黏结作用减弱,集料间更易发生滑移。随着二灰用量的增加,所有混合料的7d无侧限抗压强度均有所提升。根据JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,当二灰用量为1.5%时,所有混合料均无法满足7d无侧限抗压强度要求,只适用于沥青路面基层。当二灰用量超过3.5%,并配合掺入新碎石与优化级配后,混合料强度可满足二级公路面层的应用要求。考



a 不同养护龄期



b 不同养护温度



c 不同二灰用量

图3 再生集料的无侧限抗压强度

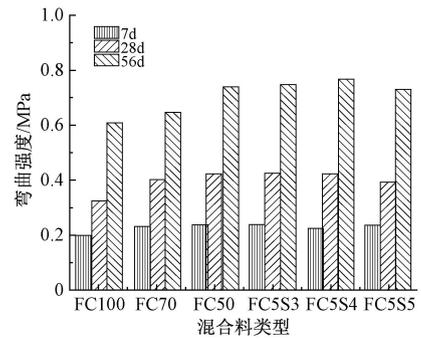
Fig. 3 Unconfined compressive strength of recycled materials

考虑温度波动对抗压强度的不利影响,建议实际工程中将二灰用量控制在 3.5% 以上,以保证路用性能的可靠性。

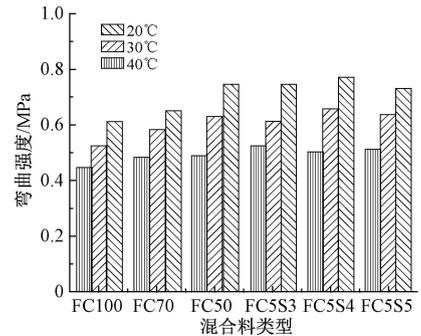
3.2.2 弯曲强度

制作长×宽×高为 40cm×10cm×10cm 的小梁试件,压实度为 96%,每种工况制备 4 个试件,标准条件养护(温度 20±2°C,湿度 95%)。依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行弯曲强度测试。不同养护龄期、温度和二灰用量下再生集料沥青混合料的抗压强度如图 4 所示。

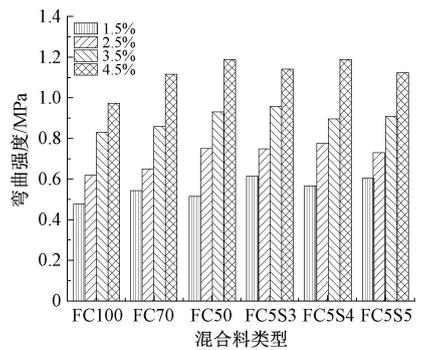
由图 4 可知,在 7d 龄期内,不同类型混合料的弯曲强度差异不大,但随着养护龄期的增加,各种



a 不同养护龄期



b 不同养护温度



c 不同二灰用量

图4 再生集料的弯曲强度

Fig. 4 Flexural strength of recycled materials

混合料的弯曲强度差距逐渐增加。随着面层再生集料含量减少,碎石含量的增大,混合料的弯曲强度快速增大,当混合料中面层再生集料含量为 50%、基层再生集料含量为 30% 时,混合料的弯曲强度增大趋势变缓,其弯曲强度略大于混合料 FC50,当养护龄期为 7d 和 28d 时,随着基层再生集料含量的增大,相比混合料 FC50,混合料 FC5S3, FC5S4 的弯曲强度略微减小,在养护龄期 56d 时,FC5S4 的弯曲强度明显增大,当面层再生集料含量增大到 70%、基层再生集料含量为 30% 时,混合料 FC5S5 的弯曲强度有所减小,因此,增加混合料的养护龄期,可提高混合料的弯曲强度,在养护龄期为 90d 条件下,面层再生集料含量为 50%,基层再生集料含量为 40%,新碎石含量为 10% 的混合料弯曲强度最

大。对于不同混合料,弯曲强度随着温度增加明显降低。然而,各种混合料的弯曲强度排序基本保持不变。二灰稳定沥青路面混合料对温度的敏感性也与其中的旧沥青有关联。随着二灰用量的增加,不同混合料弯曲强度均有所增大。

3.2.3 回弹模量

在3.5%二灰用量下,不同养护龄期和温度的混合料回弹模量变化如图5所示。

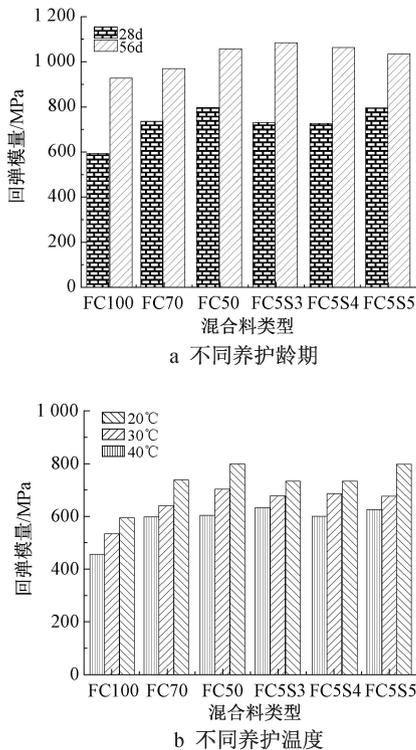


图5 不同养护龄期和温度再生集料的回弹模量

Fig. 5 Resilient modulus of recycled aggregates under different curing ages and temperatures

由图5可知,在28d和56d龄期下,再生沥青混合料掺量越高,混合料的回弹模量越低;而新碎石的掺入可有效提升其回弹模量。此外,掺加再生基层材料有助于改善混合料的级配组成,从而在一定程度上提高抗压弹性模量。

在28d龄期时,当面层再生集料含量为50%、新碎石含量为50%时,混合料的回弹模量达到最大值。当面层再生集料含量为50%、基层再生集料含量分别为30%和40%时,回弹模量值相近。当面层再生集料含量增至70%、基层再生集料含量为30%时,回弹模量呈回升趋势。至56d龄期时,当面层再生集料含量为50%、基层再生集料含量为30%、新碎石含量为20%的混合料回弹模量最高;当面层再生集料含量不变时,随着基层再生集料含量的增加和新碎石含量的降低,混合料回弹模量逐渐减小。

因此,面层再生集料不变时,增加一定含量的基层再生集料和新碎石有助于提高混合料的回弹模量。二灰稳定再生集料的回弹模量受温度影响显著,这主要源于沥青材料的热敏感性。随着养护温度的增加,不同混合料回弹模量均有所降低。

室温条件下,不同二灰用量对各混合料28d抗压回弹模量的影响如图6所示。由图6可知,随着二灰用量的增加,再生混合料回弹模量逐渐增大,这一变化规律与无侧限抗压强度和弯曲强度的变化趋势一致。掺加新碎石后,二灰稳定混合料的回弹模量得到一定改善。

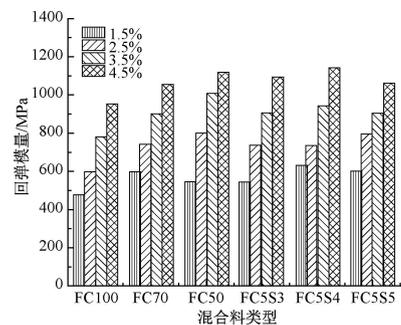


图6 不同二灰用量下再生集料的回弹模量

Fig. 6 Resilient modulus of recycled aggregates under different lime-sand dosages

4 结语

1) 二灰稳定沥青路面再生集料在混合料压实试验中,与普通二灰稳定碎石材料相似。在达到最佳含水率和最大干密度时,随着养护龄期和二灰用量的增加,无侧限抗压强度、弯曲强度以及回弹模量都会显著提高。

2) 养护温度的变化可显著影响二灰稳定沥青混合料的力学性质,随着养护温度的增加,再生混合料的无侧限抗压强度、弯曲强度及其回弹模量逐渐降低。

3) 与普通二灰稳定沥青混合料路面力学性能相比,二灰稳定沥青路面的再生集料可以在强度方面达到道路底层的需求,同时低模量的特点有助于降低底部结构的破损风险。

参考文献:

- [1] 边伟,李亚龙,高学凯,等. 二灰稳定再生集料混合料力学及疲劳性能研究[J]. 硅酸盐通报,2021,40(5):1638-1645.
BIAN W, LI Y L, GAO X K, et al. Mechanical and fatigue properties of lime-fly ash stabilized recycled concrete aggregate mixture[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2021, 40(5):1638-1645.
- [2] 胡志辉,贾致荣,张文刚,等. 水泥稳定再生集料基层性能试验研究与工程应用[J]. 施工技术,2016,45(7):126-129.

(下转第145页)

拉强度逐渐降低。通过再生细骨料对混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度影响结果得到再生细骨料最佳取代率为40%。

3)通过再生细骨料预处理形式及对混凝土扩展度和28d抗压强度影响,确定最佳预处理形式为预湿再生细骨料。

参考文献:

- [1] 孔琳洁. 利用建筑废弃物制备再生骨料混凝土的现状分析[J]. 江西建材, 2021(1):16-17.
KONG L J. Current situation analysis of recycled aggregate concrete prepared from construction waste[J]. Jiangxi building materials, 2021(1):16-17.
- [2] 宗振杰, 张璐, 张伟. 混合再生骨料混凝土强度性能的试验研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(4):20-26.
ZONG Z J, ZHANG L, ZHANG W. Experimental study of the strength properties of mixed recycled aggregate concrete[J]. Journal of Shandong University of Technology (natural science edition), 2024, 38(4):20-26.
- [3] 徐宝军, 赵欢, 刘海园, 等. 大流动性再生骨料混凝土试验研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(6):81-83.
XU B J, ZHAO H, LIU H Y, et al. Experimental study on high mobility recycled aggregate concrete[J]. Shanxi architecture, 2019, 45(6):81-83.
- [4] 张少峰, 杨凯, 郭俊珍, 等. 再生细骨料自密实混凝土试验研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(8):111-113.
ZHANG S F, YANG K, GUO J Z, et al. Experimental study on recycled fine aggregate self-compacting concrete[J]. Shanxi architecture, 2024, 50(8):111-113.
- [5] 张桂林, 孙江枫, 陈庞, 等. 再生粗细骨料混凝土受拉力学性

能研究[J]. 混凝土, 2024(3):131-135.

ZHANG G L, SUN J F, CHEN P, et al. Study on tensile properties of recycled coarse and fine aggregate concrete[J]. Concrete, 2024(3):131-135.

- [6] 潘祿. 房建隐蔽工程再生混凝土应用研究[J]. 砖瓦, 2025(8):67-70.

PAN L. Study on the application of recycled concrete in concealed engineering of housing construction[J]. Brick-tile, 2025(8):67-70.

- [7] 张建伟, 彭剑, 王飞, 等. 锈蚀箍筋约束再生混凝土压应力-应变关系研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(15):33-39.

ZHANG J W, PENG J, WANG F, et al. Study on compressive stress-strain relationship of recycled concrete confined by corroded stirrups[J]. Building structure, 2025, 55(15):33-39.

- [8] 罗佳乐, 马兵, 李坤鹏, 等. 再生混凝土抗冻融耐久性能改善措施研究现状分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22):1-9.

LUO J L, MA B, LI K P, et al. Research status analysis of resistance improvement measures of frost-shaw durability of recycled aggregate concrete[J]. Construction technology, 2024, 53(22):1-9.

- [9] 张建鹏. 再生混凝土力学性能及耐久性试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(14):125-130.

ZHANG J P. Experimental research on mechanical properties and durability of recycled concrete[J]. Construction technology, 2024, 53(14):125-130.

- [10] 王昌盛. 建筑工程施工中再生混凝土的应用探究[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(7):164-166.

WANG C S. Research on the application of recycled concrete in construction engineering[J]. Foshan ceramics, 2025, 35(7):164-166.

(上接第136页)

- HU Z H, JIA Z R, ZHANG W G, et al. Experimental study and engineering application of cement stabilized recycled aggregate pavement base course[J]. Construction technology, 2016, 45(7):126-129.
- [3] 舒明旺. 混合再生沥青混合料路基土工程特性研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(9):28-33.
SHU M W. Research on engineering properties of subgrade soil using mixtures of reclaimed asphalt pavement[J]. Construction technology, 2024, 53(9):28-33.
- [4] 王学银. 超载对公路沥青面层受力分布及稳定性的影响[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(10):115-119, 166.
WANG X Y. Influence of overload on stress distribution and

stability of expressway asphalt pavement[J]. Construction technology, 2024, 53(10):115-119, 166.

- [5] 冯云龙, 周振东, 张静晓, 等. 沥青混凝土路面施工质量监督系统的构建与实现[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(5):13-19.
FENG Y L, ZHOU Z D, ZHANG J X, et al. Construction and realization of construction quality monitoring system of asphalt concrete pavement[J]. Construction technology, 2023, 52(5):13-19.

- [6] 王铨. 车辆制动荷载对再生沥青混合料面层变形的影响[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(5):138-141, 146.

WANG A. Influence of vehicle braking load on deformation for recycled asphalt mixture surface layer[J]. Construction technology, 2025, 54(5):138-141, 146.