

# 基于熵权 TOPSIS 的再生砖混水稳材料多指标综合性评价

曹芙波<sup>1</sup>, 肖胜先<sup>1</sup>, 王晨霞<sup>1</sup>, 郜德龙<sup>1</sup>, 李敦<sup>2</sup>, 苏天<sup>3</sup>, 秦士杰<sup>4</sup>, 王宇飞<sup>5\*</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 中建一局集团第五建筑有限公司, 北京 100020; 3. 山东理工大学建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博 255000; 4. 河海大学河海里尔学院, 江苏 南京 211100; 5. 天津市房屋质量安全鉴定检测中心有限公司, 天津 300060)

**摘要:**以强度最大、刚度适宜为原则确定水泥中粉煤灰最佳质量分数, 设置不同水泥和再生砖骨料质量分数以及养护龄期为控制参数, 对 15 种不同配合比下的再生砖混水稳材料(recycled brick mix water stabilizing material, RBSM)进行力学性能研究, 采用熵权 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)模型对 RBSM 的综合性性能进行评价, 并得出最优参数。结果显示, (1) 早期劈裂强度和无侧限抗压强度随着粉煤灰质量分数的增加呈先增后降趋势, 在质量分数为 10% 时达到峰值, 抗压回弹模量随着粉煤灰质量分数的增加而增加, 最终确定粉煤灰在水泥中的最佳质量分数为 10%; (2) RBSM 的最优含水率随再生砖骨料质量分数的增加逐渐增大, 最大干密度则随之降低; (3) 养护初期, RBSM 的劈裂强度随再生砖骨料质量分数的增加逐渐降低, 无侧限抗压强度则呈先增加后减小的趋势, 并在质量分数为 50% 时达到峰值, 随着养护龄期的增加, RBSM 的力学强度均有提升; (4) 通过熵权 TOPSIS 理论, 得到最佳水泥和再生砖骨料质量分数。最终推荐粉煤灰在水泥中的质量分数为 10%、水泥在再生砖混水稳材料中的质量分数为 7%、再生砖骨料在再生砖混骨料中的质量分数为 50% 作为再生砖混水稳材料最佳配比。

**关键词:**再生砖混水稳材料; 力学性能; 熵权 TOPSIS; 综合性性能评价; 最优质量分数

**中图分类号:** TU521 **文献标志码:** A

**引用格式:** 曹芙波, 肖胜先, 王晨霞, 等. 基于熵权 TOPSIS 的再生砖混水稳材料多指标综合性性能评价[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(6): 151-162.

CAO Fubo, XIAO Shengxian, WANG Chenxia, et al. Comprehensive performance evaluation of recycled brick mixed water stabilized material with multiple indicators based on entropy weight TOPSIS[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6): 151-162.

## Comprehensive performance evaluation of recycled brick mixed water stabilized material with multiple indicators based on entropy weight TOPSIS

CAO Fubo<sup>1</sup>, XIAO Shengxian<sup>1</sup>, WANG Chenxia<sup>1</sup>, GAO Delong<sup>1</sup>, LI Dun<sup>2</sup>, SU Tian<sup>3</sup>, QIN Shijie<sup>4</sup>, WANG Yufei<sup>5\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. China Construction First Group Fifth Engineering Construction Co., Ltd., Beijing 100020, China; 3. School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 4. Hohai-Lille College, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 5. Tianjin Inspection and Testing Center for Housing Quality & Safety Co., Ltd., Tianjin 300060, China)

**Abstract:** The optimal mass fraction of fly ash was determined based on the principles of maximum strength and appropriate stiffness, with cement and recycled brick aggregate mass fractions and curing age set as control parameters. Mechanical properties of

收稿日期: 2024-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868061, 52368024); 内蒙古自然科学基金资助项目(2022LHMS05011, 2024MS05028)

第一作者简介: 曹芙波(1976—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为固废资源化。E-mail: caofubo@139.com

\* 通信作者简介: 王宇飞(1993—), 男, 天津人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为房屋检测与鉴定。E-mail: wyfbear@163.com

15 recycled brick mix water stabilizing materials ( recycled brick mix water stabilizing material, RBSM) under different mix designs were investigated. The comprehensive performance of RBSM was evaluated using the entropy-weighted TOPSIS ( technique for order preference by similarity to ideal solution) model, yielding optimal values for each parameter. Results indicate, (1) Early-age splitting tensile strength and unconfined compressive strength first increase then decrease with rising fly ash content, peaking at 10% mass fraction. Compressive rebound modulus increases with fly ash content, confirming 10% as the optimal fly ash content in cement. (2) The optimum moisture content of RBSM gradually increases with the mass fraction of recycled brick aggregate, while the maximum dry density decreases accordingly. (3) During the early curing stage, the splitting strength of RBSM gradually decreases with increasing recycled brick aggregate mass fraction, while the unconfined compressive strength first increases and then decreases, peaking at a mass fraction of 50%. As the curing age increases, the mechanical strength of RBSM improves. (4) Through entropy-weighted TOPSIS theory, optimal mass fractions for cement and recycled brick aggregate were determined. The final recommended optimal mix design for recycled brick-based water-stabilized materials was 10% fly ash mass fraction in cement, 7% cement mass fraction in recycled brick-based water-stabilized material, and 50% recycled brick aggregate mass fraction in recycled brick aggregate.

**Keywords:** recycled brick-concrete water-stabilizing material; mechanical properties; entropy weight TOPSIS; comprehensive performance evaluation; optimal quality score

## 0 引言

随着我国城市化进程的快速推进,大量老旧建筑被拆除或改建。据统计,拆除旧建筑所产生的砖混废弃物在建筑固体废弃物中的占比巨大,综合利用率低<sup>[1-2]</sup>。将建筑拆除垃圾制作成再生骨料替代部分天然骨料,制作成各种再生产品可以有效解决这些问题<sup>[3]</sup>。由于再生混凝土骨料中附着的旧砂浆通常表现出劣于天然骨料的性能<sup>[4]</sup>,因此,研究人员采用各种方法改善再生骨料与再生骨料制品<sup>[5-6]</sup>。这些处理方法不可避免地会增加再生产品的成本,从而限制了其广泛应用。因此有必要寻找更经济的方法回收和利用再生砖混骨料。

水泥稳定碎石(cement-stabilized macadam, CSM)是一种强度、变形和耐久性符合一定要求的半刚性路面基层材料,它是由水泥作为胶结料,砂石作为骨料。研究表明,由建筑拆除垃圾生产的再生砖混骨料可以作为水稳材料中天然砂石的替代品<sup>[7-8]</sup>。采用再生砖混骨料制备的CSM,其强度、模量和变形虽不及采用天然或再生混凝土骨料制备的CSM,但均能满足路基工程应用要求<sup>[9]</sup>。文献[10]中使用再生砖混骨料替代天然骨料制备CSM,尽管在一定程度上降低了强度,但混合物在强度、收缩率和透水性方面均能满足现有路基材料的规范要求,并得出当再生砖骨料的质量分数为15%时,所得的混凝土适用于中等交通量路基的结论;文献[11]研究了再生砖混骨料质量分数对CSM力

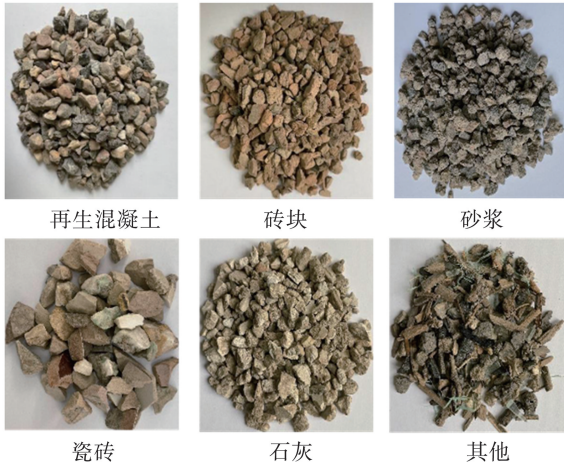
学性能的影响,确定了当再生砖混骨料最低质量分数为5%左右时,可以满足重型交通下二级及以下公路基强度4.0 MPa的要求。上述研究为再生砖混骨料在公路建设中的应用提供了理论依据。但大多数研究只关注精细分选后的再生骨料,很少涉及原始再生骨料。这是由于原始再生骨料具有高吸水性、低强度与低刚度的特点<sup>[12]</sup>,同时因建筑固废来源较为复杂,通常原始再生骨料中含有多种不同的组分,例如旧混凝土、砖瓦、砂浆、陶瓷和木屑等<sup>[13]</sup>。原始再生骨料中的复杂组分将增加工程性能的离散性,从而使科研人员难以准确预估工程材料的性能<sup>[14]</sup>,因而极大阻碍了建筑垃圾在公路建设中的大规模应用。

再生砖混骨料具有压碎值大、吸水率高等特点,必然会对再生砖混水稳材料(recycled brick mix water stabilizing material, RBSM)的力学性能产生影响<sup>[15]</sup>。鉴于此,本次研究RBSM中不同水泥质量分数、再生砖骨料质量分数及龄期等参数时的力学性能,并通过熵权TOPSIS模型建立RBSM的综合评价体系,选取最佳RBSM配合比,以期对后续基层建设提供一定的参考。

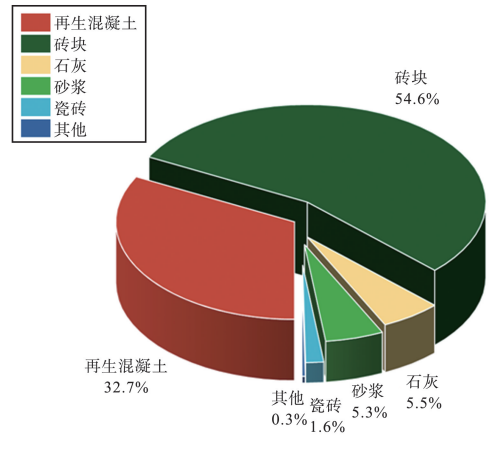
## 1 试验材料及方法

### 1.1 原材料

再生砖混骨料由包头市某公司提供,主要成分是废砖、混凝土和砂浆块,同时掺杂一定比例的石灰、瓷砖、木屑、碎玻璃、塑料片等杂质,砖混骨料中各组分及再生砖混骨料形态如图1所示。



(a) 再生砖混骨料形态



(b) 再生砖混骨料组分

图 1 再生砖混骨料形态及组分

Fig.1 Recycled brick mix aggregate morphology and components

水泥选用蒙西 P·O42.5 水泥,其性能指标如表 1 所示。试验采用石屑作为细骨料,相对于再生砖混细骨料以及沙子,水稳材料中加入石屑既可以有效保护内部骨料,也可以与砖混骨料形成良好的嵌

挤结构,从而阻断水分流失,有更好的水稳定性,石屑颗粒级配如表 2 所示。试验使用的粉煤灰由包头某电厂提供,理化参数如表 3 所示。拌合水为实验室自来水。

表 1 水泥性能指标  
Table1 Cement performance indicators

比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准用水 稠度/%	安定性	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
387	27.38	合格	118	224	25.5	50.4	3.9	8.1

表 2 石屑颗粒级配  
Table 2 Grading of stone chip particles

方孔筛尺寸/mm	9.500	4.750	2.360	0.600	0.075
通过率/%	100.0	91.5	60.4	27.4	7.0

表 3 粉煤灰理化参数表  
Table 3 Physicochemical parameters of fly ash

烧失量/%	含水率/%	SO <sub>3</sub> 质量分数/%	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	安定性雷氏法/%	活性指数/%
3.4	0.5	0.51	2.34	3.9	83.1

依据文献[16],针对混凝土骨料与砖骨料进行基本物理力学性能测试,并与再生粗骨料评级标准进行对比,如表 4 所示。再生砖骨料相较于再生混凝土骨料体现出吸水率高、易压碎、针片状质量分

数大等特点。

本研究采用文献[17]中骨架密实性级配进行设计,各筛孔和通过率见表 5。

表 4 骨料评级标准及物理性能  
Table 4 Aggregate rating criteria and physical properties

骨料类别	堆积密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	表观密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	针片状质量分数/%	压碎指标/%	吸水率/%	
					10 min	24 h
I 类		>2.450	<10.0	<12.0	<3.0	<3.0
II 类		>2.350	<10.0	<20.0	<5.0	<5.0
III 类		>2.250	<10.0	<30.0	<8.0	<8.0
混凝土骨料	1.305	2.515	5.8	29.3	4.1	5.3
砖骨料	1.544	2.333	20.1	41.5	4.5	16.8

表5 再生砖混骨料骨架密实级配  
Table 5 Recycled brick concrete aggregate skeleton dense grading

方孔筛尺寸/mm	31.500	19.000	9.500	4.750	2.360	0.600	0.075
筛孔通过率/%	100	75	54	27	20	14	2

## 1.2 试验方案

根据文献[18]中击实试验的方法确定混合料的最佳含水率和最大干密度。由于砖混骨料高吸水率的特殊性,根据砖混骨料质量分数不同,预设5个含水率,每个含水率相差0.5%;随后将一部分水加入骨料中混合后装入塑料袋闷料6 h,再将剩余的水加入骨料混合均匀,进行击实试验,得到最佳含水率与最大干密度。

根据击实试验结果,按最佳含水率和计算得到的最大干密度(压实度为98%)通过静压成型的方式制备高度、直径均为150 mm的圆柱体试件。对试件进行标准养护,并参照文献[18]推荐的无侧限抗压强度、劈裂强度、抗压回弹模量测试方法进行测试,压力机加载速率均为1 mm/min。

### 1.2.1 RBSM 粉煤灰最优质量分数研究

掺加粉煤灰是一种改善水泥路面基层开裂的有效技术途径,相较于内掺法,外掺粉煤灰水稳材料具有造价低、后期强度大、整体性能好、原材料蕴藏量大等特点,尤其适用于高等级公路基层的建设<sup>[19]</sup>。

本试验采用外掺法,粉煤灰在水泥中的质量分数分别为0、5%、10%、15%,再生砖骨料在再生砖混骨料中的质量分数为50%,水泥在再生砖混水稳材料中的质量分数为5%。以不同粉煤灰在水泥中的质量分数的测试样品的7 d无侧限抗压强度 $R_c$ 、劈裂强度 $R_s$ 和90 d抗压回弹模量作为评价标准,确定粉煤灰在水泥中的最优质量分数。

### 1.2.2 力学性能研究

基于粉煤灰的最佳质量分数,本研究以粒径为4.75~31.50 mm的再生砖骨料在再生砖混骨料中的质量分数0、25%、50%、75%、100%和水泥在再生砖混水稳材料中的质量分数3%、5%、7%为变量,对RBSM不同养护龄期7、28、90 d的力学性能( $R_c$ 、 $R_s$ )进行测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 再生砖混水稳材料粉煤灰最优质量分数

基层作为公路承重层并承受行车荷载重复作用,其强度与刚度两大要素必须满足一定要求才能

不发生过大变形与损伤。根据文献[18],将7 d无侧限抗压强度和7 d劈裂强度作为强度指标,水泥稳定类养生龄期为90 d,将90 d室内抗压回弹模量作为基层刚度的度量指标。

粉煤灰质量分数与无侧限抗压强度和劈裂强度的关系如图2所示。

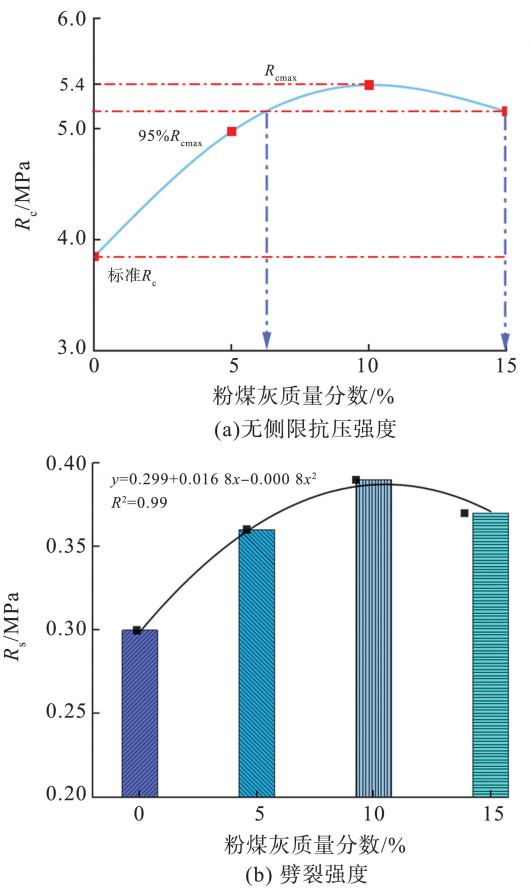


图2 粉煤灰质量分数与7 d无侧限抗压强度和7 d劈裂强度关系图

Fig.2 Relationship between fly ash mass fraction and 7-day unconfined compressive strength and 7-day splitting strength

由图2可知,随着粉煤灰质量分数的增加,RBSM的7 d无侧限抗压强度先增大后减小,当质量分数为10%时,抗压强度达到峰值,此时7 d $R_c$ 约为不掺粉煤灰时的1.39倍,继续增加粉煤灰,则强度逐渐降低;以95%强度峰值时的粉煤灰质量分数为推荐掺量,即6%~15%;随着粉煤灰质量分数的增加,RBSM的7 d $R_s$ 呈现出与7 d $R_c$ 一样的变化趋势,当粉煤灰质量分数为10%时,劈裂强度 $R_s$ 达到峰值。

当粉煤灰质量分数低于10%时,抗压强度逐渐

升高。这是由于 RBSM 早期强度主要依靠再生砖混骨料的嵌挤作用提供,而粉煤灰自身细度较高,外掺粉煤灰可以填补骨料间的间隙,从而增加 RBSM 的密实度。当粉煤灰质量分数高于 10% 时,将会影响 RBSM 的骨架结构,虽然整体更加密实,但削弱了再生砖混骨料间的嵌挤作用,同时过量的粉煤灰会附着到水泥颗粒上,其中的  $Al^{3+}$  溶解后阻碍水泥水化物 CH 及 C—S—H 成核<sup>[19]</sup>,在养护初期抑制了水泥水化反应,此时的抗压强度与劈裂强度随粉煤灰质量分数的增大而减小。

不同粉煤灰质量分数对 90 d 抗压回弹模量的影响如表 6 所示。

表 6 90 d 不同粉煤灰质量分数抗压回弹模量  
Table 6 90 d compressive resilient modulus of different fly ash content

粉煤灰质量分数/%	0	5	10	15
抗压回弹模量/MPa	961.0	1 226.7	1 353.3	1 393.1

由表 6 可知,RBSM 90 d 抗压回弹模量随着粉煤灰质量分数的升高而增大,且增长率也呈先高后低的规律。这是由于再生砖混骨料在生产过程中破碎方式为机械破碎,破碎过程会使再生骨料内部的细小裂缝增多,导致骨料孔隙率增大。而在 RBSM 中外掺粉煤灰后,粉煤灰浆体会填充细小裂缝并且使骨料间的黏结强度增强<sup>[20]</sup>,所以粉煤灰质量分数越高,RBSM 越密实,抗压回弹模量也越高。但是当粉煤灰质量分数过高时,虽然填充了再生骨料的微裂缝但同时削弱了骨料间的嵌挤作用<sup>[21]</sup>,导致粉煤灰质量分数为 15% 时 RBSM 的抗压回弹模量较 10% 时仅提升 2%。

综上所述,基于强度最大与刚度适宜原则,最终确定最优粉煤灰质量分数为 10%。

## 2.2 RBSM 力学性能研究

### 2.2.1 击实试验分析

当粉煤灰质量分数为 10% 时,研究水泥与再生砖骨料的质量分数对 RBSM 的力学性能的影响。水泥、再生砖骨料质量分数与 RBSM 的最大干密度和最优含水率的关系如图 3 所示。图 3 中  $P_c$  为水泥在再生砖混水稳材料中的质量分数。

由图 3 可知, $P_c$  相同时,由于再生砖骨料自身密度小,试样的最大干密度随着  $R_b$  的升高而减小,砖混再生水稳材料的最大干密度平均减少约 15%。同时,由于再生砖骨料的吸水率较大,导致试样的最佳含水率随着  $R_b$  的升高而增大,最佳含水率平均增大了约 46.2%。

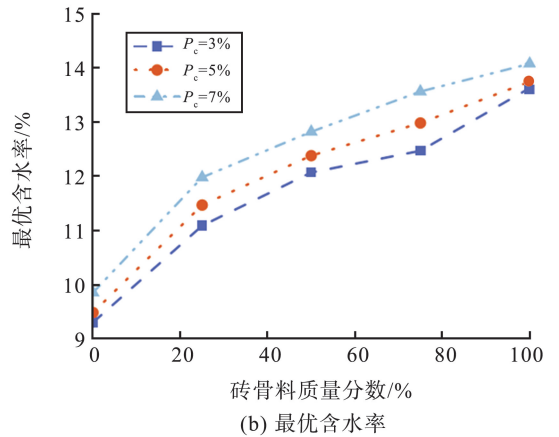
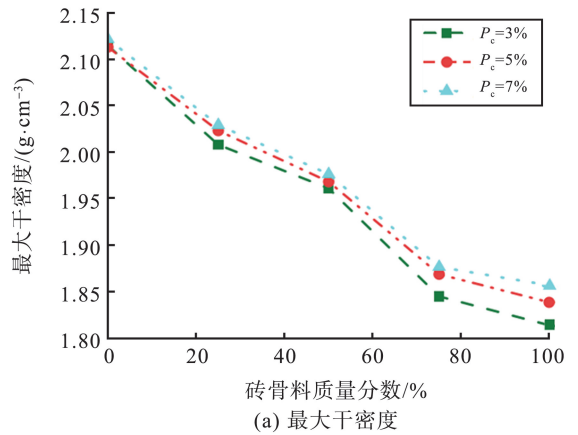


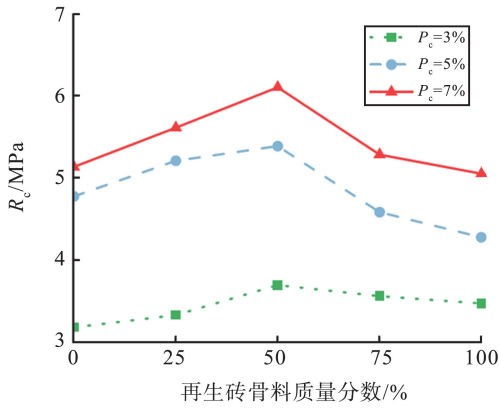
图 3 不同水泥及再生砖骨料质量分数下 RBSM 的最大干密度与最优含水率关系图  
Fig.3 Compaction test of recycled brick aggregate under different cement contents

### 2.2.2 无侧限抗压强度

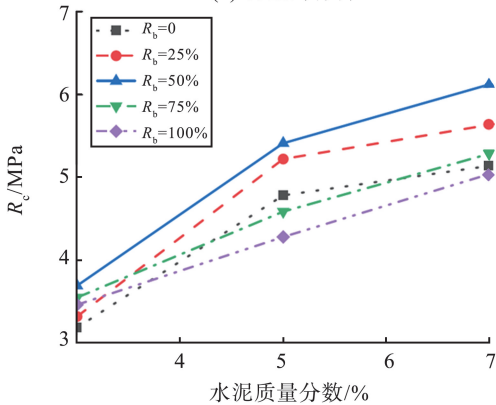
不同影响因素下 7 d 无侧限抗压强度如图 4 所示,图 4 中  $R_b$  为再生砖骨料在再生砖混骨料中的质量分数。

不同  $R_b$  下相对应的 RBSM 7 d 无侧限抗压强度如图 4(a) 所示。由图 4(a) 可知,在  $P_c$  分别为 3%、5%、7% 时,随着  $R_b$  的升高,RBSM 的 7 d 无侧限抗压强度呈现先增加后降低的规律。当  $R_b$  为 50% 时,RBSM 7 d 无侧限抗压强度达到峰值。这是由于 RBSM 养护阶段,水化反应导致水泥砂浆局部相对湿度下降。饱水砖骨料将自身水分释放到砂浆化学收缩形成的空间中<sup>[21]</sup>,促进界面区水泥浆体水化,起到内养护作用。胶凝材料生成的钙矾石 (Aft) 和水化硅酸钙 (C—S—H) 等水化产物多填充在砖混界面过渡区与砂浆的孔隙中<sup>[22]</sup>,提高了 RBSM 的初期强度。但再生砖骨料针片状含量与压碎指标均高于再生混凝土骨料,随着再生砖骨料逐渐取代再生混凝土骨料,RBSM 内部的裂缝增多,压碎值较高,削弱了骨架结构的整体强度,因此 RBSM 无侧限抗压强度逐渐降低。

不同  $P_c$  下对应的 7 d 无侧限抗压强度如图 4(b) 所示。由图 4(b) 可知, 相同砖骨料质量分数条件下, RBSM 7 d 无侧限抗压强度随着  $P_c$  的增加而逐渐升高。由于 RBSM 中含有大量如砖、石灰、旧砂浆等低强度的再生骨料, 且养护初期 RBSM 水泥水化反应不充分, 水泥砂浆没有形成较高的黏结强度, 水泥质量分数升高后 RBSM 的 7 d 无侧限抗压强度受自身骨料强度限制, 后期增幅减缓。



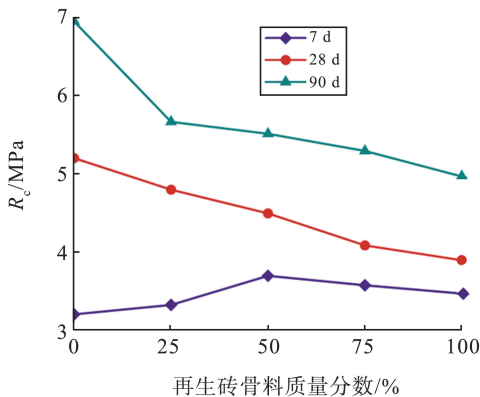
(a) 再生砖骨料



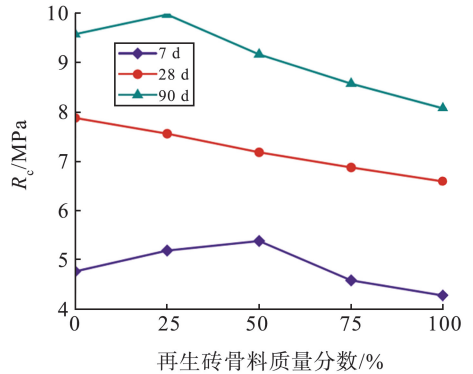
(b) 水泥

图 4 不同影响因素下 7 d 无侧限抗压强度  
Fig.4 7-day unconfined compressive strength under different influencing factors

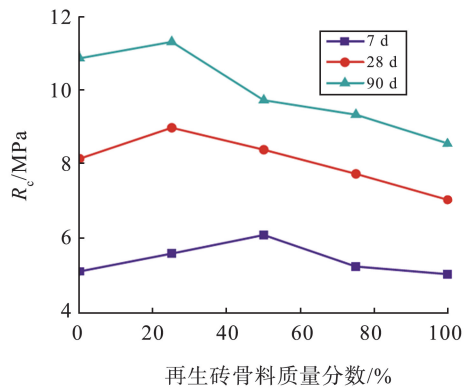
不同  $P_c$  下 RBSM 长龄期无侧限抗压强度如图 5 所示。



(a)  $P_c=3\%$



(b)  $P_c=5\%$



(c)  $P_c=7\%$

图 5 不同水泥质量分数长龄期无侧限抗压强度  
Fig.5 Unconfined compressive strength at different cement dosages for a long period of time

由图 5 可知, 由于粉煤灰与水泥的后期水化作用,  $R_b$  为 0~100% 的 RBSM 无侧限抗压强度会随着养护龄期的延长而增加。  $P_c$  为 5% 与 7% 时, RBSM 90 d 抗压强度呈现先上升后下降的趋势。上升是因为再生砖骨料的高吸水率使得 RBSM 水化充分, 水化产物增加, 但再生砖骨料自身强度低, 同时在试件压制成型过程中, 也会对再生砖骨料进行二次损伤, 因此过高的  $R_b$ , 最终导致无侧限抗压强度降低。

### 2.2.3 劈裂强度

不同影响因素下 7 d 劈裂强度如图 6 所示。不同  $R_b$  下 RBSM 7 d 劈裂强度如图 6(a) 所示, 不同  $P_c$  下 RBSM 的 7 d 劈裂强度如图 6(b) 所示。

由图 6(a) 可知, 相同  $P_c$  下, 随着再生砖骨料逐渐取代再生混凝土骨料, RBSM 劈裂强度下降较明显。当  $P_c$  为 7% 时,  $R_b$  为 100% 的组 7 d 劈裂强度相较于再生砖骨料质量分数为 0 的组降低了约 42%。这主要是由于再生砖骨料材料针片状含量较高, 当水稳材料中  $R_b$  上升时, RBSM 的劈裂破坏多数由再生砖骨料的受拉破坏导致<sup>[23]</sup>。

由图 6(b)可知,RBSM 的劈裂强度随  $P_c$  的增加逐渐升高。随着  $P_c$  的增加,生成的水化产物量增大,使 RBSM 强度提高。当  $P_c$  为 5%~7%时,7 d 劈裂强度增长率均低于  $P_c$  为 3%~5%时 7 d 劈裂强度增长率。这是由于前期水泥水化生成大量水化产物,这些水化产物填充试件内部空隙,增加了试件的密实度,进而提高了 RBSM 的强度。但随着水化反应的进行,试件开始了粉煤灰二次水化反应的进行,混合料中可以提供的水化物质已经消耗殆尽,导致试件劈裂强度增加放缓,致使劈裂强度增长速率下降。

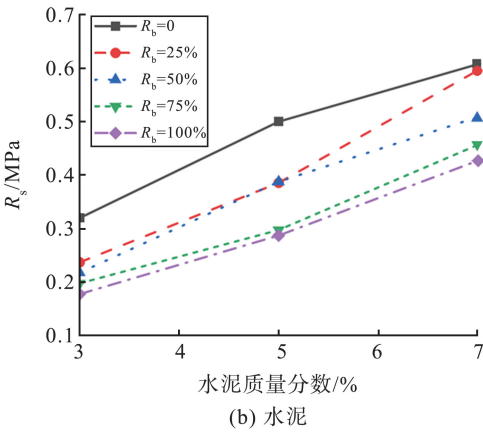
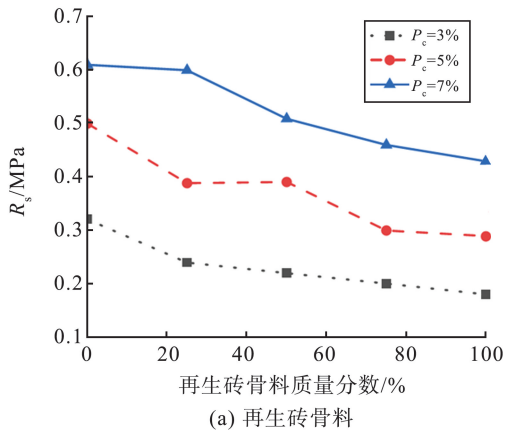


图 6 不同影响因素下 7 d 劈裂强度

Fig.6 7-day splitting strength under different influencing

不同  $P_c$  下 RBSM 长龄期劈裂强度如图 7 所示。由图 7 可知,随着养护龄期的增长,由于粉煤灰与水泥的后期水化作用, $R_b$  为 0~100%的 RBSM 劈裂强度随着养护龄期的增加而增大。再生砖骨料的质量分数也会影响 RBSM 的劈裂强度, $R_b$  越高,后期劈裂增长率越低。 $P_c$  为 7%时,与不添加再生砖骨料相比, $R_b$  为 25%、50%、75%、100%的 90 d 劈裂强度分别下降了 4.06%、21.90%、26.80%、33.30%。保持骨料类型与质量分数不变, $P_c$  为 5%时 RBSM 90 d 劈裂强度明显低于 7%时,平均降低率约为 18.5%。这说明 RBSM 在养护后期,水泥与

粉煤灰的质量分数对 RBSM 劈裂强度的影响减弱<sup>[22]</sup>,RBSM 中砖骨料的质量分数是限制它劈裂强度增长的主要因素<sup>[24]</sup>。

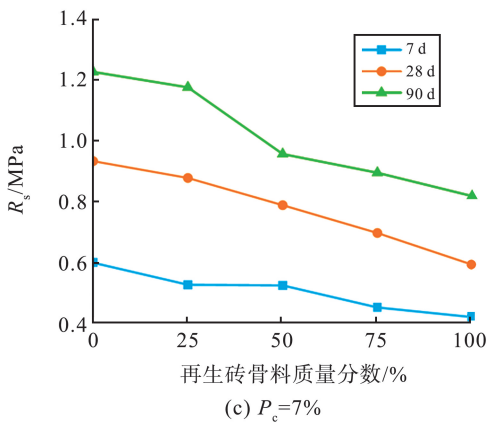
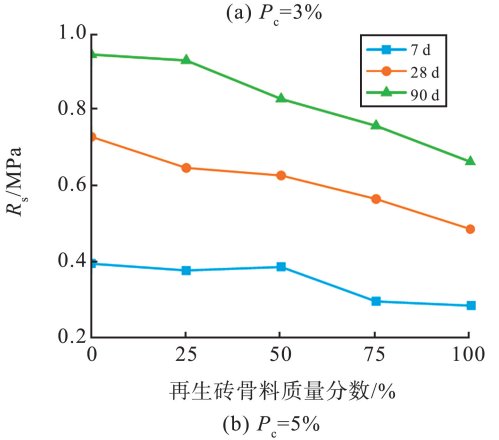
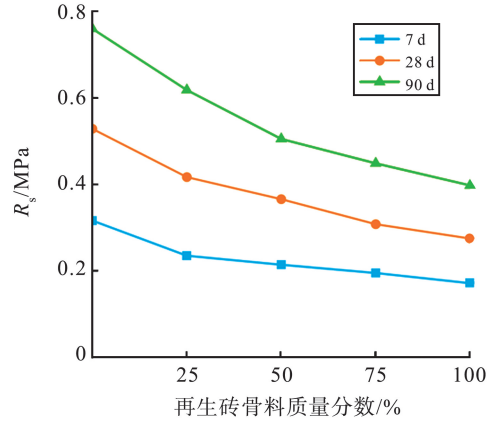


图 7 不同水泥质量分数长龄期劈裂强度

Fig.7 Splitting strength of different cement dosages at a long age

### 2.3 熵权 TOPSIS 评价体系

由于不同水泥及再生砖骨料的质量分数对再生砖混水泥稳定性材料的无侧限抗压强度及劈裂强度均会产生一定程度的影响,且不同水稳层力学性能存在不同的最优水泥与再生砖混骨料质量分数。上述试验结果在客观评价再生砖混水稳材料综合性能时,暂不能提供显著性的理论指导。为此,本研究采用熵权 TOPSIS 理论<sup>[25]</sup>,将再生砖混水稳材料的碳排放量与成本也作为评价指标,建立

基于多指标的再生砖混水稳材料综合性能的评价模型,并确定综合性能最优再生砖混质量分数。

根据文献[26]中提到的采用7 d无侧限抗压强度作为无机结合稳定材料施工质量控制的主要标准。本研究以不同水泥与再生砖混骨料质量分数的再生砖混水稳材料的7 d无侧限抗压强度、7 d劈裂强度、碳排放量与成本作为评价指标,建立熵权-TOPSIS理论的再生砖混水稳材料综合性能的评价模型,实现在确保水稳层强度符合设计要求的前提下,达到“全过程碳排放尽可能少,全过程经济成本尽可能低”的目标。

### 2.3.1 碳排放计算

依据文献[27],从建材的生产与运输两个阶段考虑碳排放量计算。

(1)建材生产阶段。提取并整合已有资料数据,得到建材碳排放因子,本研究主要建材生产阶段相应的碳排放因子见表7。

表7 各类建筑材料碳排放因子

Table 7 Carbon emission factors of various types of building materials

材料类别	碳排放因子/( $\text{kgCO}_2\text{e}\cdot\text{t}^{-1}$ )
P·O42.5 水泥	735.000
粉煤灰	8.770
石屑	41.700
再生砖骨料	2.616
自来水	0.168

表8 各类建筑材料成本

Table 8 Cost of various types of building materials

运输/ ( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ )	再生砖骨料/ ( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	石屑/ ( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	P·O42.5/ ( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	粉煤灰/ ( $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$ )	自来水/ ( $\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ )
3.36	20	42	361	100	3.58

生产成本与运输成本计算公式分别为

$$W_{\text{sc}} = \sum_{i=1}^n M_i U_i, \quad (4)$$

$$W_{\text{ys}} = \sum_{i=1}^n M_i D_i W_i, \quad (5)$$

式中: $W_{\text{sc}}$ 为材料生产成本,元; $U_i$ 为主要材料成本单价,元/t; $W_{\text{ys}}$ 为主要材料的运输阶段成本,元; $W_i$

建材生产阶段碳排放量计算公式为

$$C_{\text{sc}} = \sum_{i=1}^n M_i F_i, \quad (1)$$

式中, $C_{\text{sc}}$ 为建材生产阶段碳排放总量, $M_i$ 为第*i*种主要建材的消耗量, $F_i$ 为第*i*种主要建材的碳排放量。

(2)建材运输阶段。梳理并整合得到各交通运输方式合理的碳排放因子,高速公路运输碳排放因子为 $0.402 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{t}\cdot\text{km})^{-1}$ ,城市道路运输碳排放因子为 $0.810 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{t}\cdot\text{km})^{-1}$ 。

建筑运输阶段碳排放量计算公式为

$$C_{\text{ys}} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i, \quad (2)$$

式中, $C_{\text{ys}}$ 为建材运输过程中碳排放量, $M_i$ 为第*i*种主要建材的消耗量, $D_i$ 为第*i*种建材平均运输距离, $T_i$ 为第*i*种建材的运输方式下单位质量运输距离碳排放因子。

水稳材料设计中建筑材料生产与运输阶段的全过程碳排放总量计算公式为

$$C = C_{\text{sc}} + C_{\text{ys}}. \quad (3)$$

### 2.3.2 成本计算

再生砖混水稳材料全过程成本主要包括材料生产成本与材料运输成本,各材料的成本根据本地价格确定,取值如表8所示。

为主要材料单位质量、单位运输距离的单位成本, [ $\text{元}/(\text{t}\cdot\text{km})$ ]。最终得到的成本计算公式为

$$W_{\text{T}} = W_{\text{sc}} + W_{\text{ys}}. \quad (6)$$

根据上述碳排放量计算公式、成本计算公式及表9中的再生砖混水稳材料配合比,计算出不同 $P_c$ 、 $R_b$ 下的碳排放与成本,结果如表9所示。

表9 再生砖混水稳材料性能指标初始化评价

Table 9 Initial evaluation value of performance index of water-stabilized material of recycled brick

水泥 质量分数/%	再生砖骨料 质量分数/%	7 d 无侧限 抗压强度/MPa	7 d 劈裂强度/ MPa	碳排放量/ ( $\text{kgCO}_2\cdot\text{t}^{-1}$ )	成本/元
	0	3.2	0.32	89.4	143.7
	25	3.3	0.24	83.9	137.6
3	50	3.7	0.22	83.5	134.2
	75	3.6	0.20	79.1	127.4
	100	3.5	0.18	77.7	124.6

表 9(续)

水泥 质量分数/%	再生砖骨料 质量分数/%	7 d 无侧限 抗压强度/MPa	7 d 劈裂强度/ MPa	碳排放/ (kgCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> )	成本/元
5	0	4.80	0.50	119.1	156.5
	25	5.23	0.39	120.6	152.1
	50	5.41	0.39	110.7	145.7
	75	4.60	0.30	105.1	138.2
	100	4.30	0.27	103.3	136.1
7	0	5.20	0.61	146.1	167.6
	25	5.60	0.54	139.9	160.6
	50	6.10	0.53	136.5	156.7
	75	5.30	0.46	129.5	147.6

2.3.3 熵权 TOPSIS 模型构建

(1) 构建初始评价矩阵

将 15 种配合比优化方案记为  $N = (N_1, N_2, N_3, \dots, N_m)$ , 将不同配比下的各评价指标记为  $C_{ij} (i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n)$ , 由此形成初始决策矩阵  $C = (C_{ij})_{m \times n}$  ( $C_{ij}$  为第  $i$  个方案的第  $j$  项指标,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ), 如表 9 所示。

(2) 构建标准化决策矩阵

对矩阵  $C$  进行无量纲化处理, 将各指标归一化。各指标类型(7 d 无侧限抗压强度及劈裂强度为正向指标, 碳排放和成本为逆向指标)对应的无量纲公式如式(7)、(8)所示。

正向指标

$$b_{ij} = \frac{C_{ij} - C_{j \min}}{C_{j \max} - C_{j \min}}, \quad (7)$$

逆向指标

$$b_{ij} = \frac{C_{j \max} - C_{ij}}{C_{j \max} - C_{j \min}}, \quad (8)$$

式中,  $C_{j \max}$ 、 $C_{j \min}$  分别为同评价指标下所有样本的最大值与最小值。

(3) 确定评价指标的熵权

熵权计算公式为

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, \quad (0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \omega_j = 1), \quad (9)$$

$$e_j = -k \left[ \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right],$$

$$k = 1 / \ln m, \quad (m = 4),$$

$$f_{ij} = (1 + b_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1 + b_{ij}),$$

式中,  $\omega_j$  为第  $j$  个评价指标熵权,  $e_j$  为第  $j$  个评价指标信息熵,  $k$  为归一化因子,  $f_{ij}$  为第  $i$  个评价对象在第  $j$  个评价指标下的标准化值。计算得到各评价指

标的客观权重如表 10 所示。

表 10 各评价指标权重

Table 10 Weights of each evaluation index			
7 d 无侧限抗压 强度/MPa	7 d 劈裂 强度/MPa	碳排放量/ (kgCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup> )	成本/ 元
0.279	0.294	0.247	0.180

(4) 构建加权决策矩阵

加权决策矩阵计算公式为

$$a_{ij} = \omega_j \times b_{ij}, \quad (10)$$

式中  $a_{ij}$  为加权矩阵中的元素。

(5) 确定正负理想解

正负理想解集为

$$\begin{cases} A^+ = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+\} \\ A^- = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-\} \end{cases}, \quad (11)$$

式中,  $A^+$  与  $A^-$  分别表示正理想解集与负理想解集,  $a_n^+$  与  $a_n^-$  分别为正理想解与负理想解。

(6) 确定各配合比优化方案与正负理想解的欧式距离

正负理想解欧式距离的计算公式为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^i \omega_j (a_{ij} - a_j^+)^2}, \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^i \omega_j (a_{ij} - a_j^-)^2}, \quad (13)$$

式中,  $D_i^+$  和  $D_i^-$  分别为第  $i$  个配合比优化方案与正理想解和负理想解的距离。

(7) 确定各配合比优化方案对理想解的相对贴近度

理想解相对贴近度的计算公式为

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}, \quad (14)$$

式中:  $D_i$  为第  $i$  个配合比优化方案相对贴近度, 数值越接近 1, 表明该方案评价效果越优。最终确定不同水泥与再生砖混质量分数水稳层性能综合评价排序, 结果如表 11 所示。

表 11 再生砖混水稳材料综合性能评价排序  
Table 11 Ranking of comprehensive performance evaluation of water-stabilized materials for recycled bricks

$P_c/\%$	$R_b/\%$	正理想距离	负理想距离	相对贴近度	综合排序
3	0	0.358	0.355	0.498	9
	25	0.468	0.383	0.450	15
	50	0.452	0.391	0.464	14
	75	0.486	0.424	0.466	12
	100	0.501	0.435	0.465	13
5	0	0.300	0.312	0.510	8
	25	0.232	0.290	0.556	4
	50	0.275	0.340	0.553	5
	75	0.315	0.310	0.496	10
	100	0.335	0.304	0.477	11
7	0	0.308	0.348	0.530	7
	25	0.255	0.341	0.573	2
	50	0.250	0.374	0.600	1
	75	0.243	0.305	0.557	3
	100	0.237	0.279	0.541	6

相对贴近度综合考虑再生砖混水稳材料 7 d 无侧限抗压强度、28 d 劈裂强度、碳排放和成本,客观反映待评价方案与理想解相对接近程度。综合表 7、9 可知,当  $P_c$  为 7%、 $R_b$  为 50% 时,相对贴近度最大,更接近理想解,表明该方案的再生砖混水稳材料综合性能最优。因此推荐  $P_c$  为 7%、 $R_b$  为 50% 作为再生砖混水稳材料最佳质量分数。

### 3 结论

本研究针对再生砖骨料用于 RBSM,通过无侧限压缩试验、劈裂试验,探讨不同粉煤灰质量分数、水泥质量分数、再生砖骨料质量分数、龄期对 RBSM 力学强度的影响,主要结论如下。

(1) RBSM 力学强度随粉煤灰质量分数的增加先增大后减小,当粉煤灰质量分数为 10% 时,力学强度达到峰值;RBSM 最大干密度随再生砖骨料质量分数的升高呈现减小趋势,平均减少约 15.0%,最优含水率则呈现出增大趋势,平均增大约 46.2%。

(2) 养护初期,RBSM 无侧限抗压强度随再生砖骨料质量分数的增加先增大后减小,RBSM 劈裂强度逐渐减小,再生砖骨料质量分数为 50% 时,RBSM 的无侧限抗压强度达到峰值;相同砖骨料质量分数下,RBSM 力学强度随着水泥质量分数的增加而逐渐升高。

(3) 随着养护龄期的增加,不同再生砖骨料质量分数的 RBSM 力学强度逐渐增大;相同龄期下,

RBSM 力学强度随水泥质量分数的增加逐渐升高,随再生砖骨料质量分数的增加而降低。

(4) 将熵权 TOPSIS 理论引入再生砖混水稳材料综合性能评价中,建立再生砖混水稳材料综合性能评价体系,合理计算各评价指标的权重。根据权重进行计算与排名,最终推荐水泥质量分数  $P_c$  为 7%、再生砖骨料质量分数  $R_b$  为 50% 作为再生砖混水稳材料最佳质量分数。

#### 参考文献:

- [1] 段珍华,邓琪,肖建庄,等.再生混凝土冲击磨耗性能与调控方法[J].建筑材料学报,2022,25(11):1136-1142.  
DUAN Zhenhua, DENG Qi, XIAO Jianzhuang, et al. Abrasion resistance of recycled aggregate concrete and its control method[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1136-1142.
- [2] 高文昌,张欢,耿悦,等.再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型[J].建筑材料学报,2022,25(11):1121-1127.  
GAO Wenchang, ZHANG Huan, GENG Yue, et al. Model for the relationship between prism and cube compressive strengths of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1121-1127.
- [3] 李温,王海龙,张佳豪,等.研石混合骨料混凝土力学特性及孔隙结构试验研究[J].山东大学学报(工学版),2023,53(3):121-127.  
LI Wen, WANG Hailong, ZHANG Jiahao, et al. Experimental study on mechanical properties and pore structure of gangue mixed aggregate concrete[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(3): 121-127.
- [4] REVILLA-CUESTA V, FIOL F, PERTMAL P, et al. Using recycled aggregate concrete at a precast-concrete plant: a multi-criteria company-oriented feasibility study[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 373: 133873.
- [5] 钱如胜,叶志波,张云升,等.固碳强化再生粗骨料对其混凝土力学强度及体积稳定性的影响[J].材料导报,2025,39(9):97-102.  
QIAN Rusheng, YE Zhibo, ZHANG Yunsheng, et al. Effect of carbon-sequestration recycled coarse-aggregate on the mechanical strength of concrete and its volume stability[J]. Materials Reports, 2025, 39(9): 97-102.
- [6] 赵之仲,柳泓哲,唐亮,等.强化方式与材料对再生粗集料的性能规律分析[J].山东大学学报(工学版),2023,53(1):11-17.  
ZHAO Zhizhong, LIU Hongzhe, TANG Liang, et al.

- Analysis of the performance law of strengthening methods and materials on recycled coarse aggregate[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(1): 11-17.
- [7] SILETANI A H, ASAYESH S, JAVID A A S, et al. Influence of coating recycled aggregate surface with different pozzolanic slurries on mechanical performance, durability, and micro-structure properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 83: 108457.
- [8] 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.  
ZHANG Jinxi, ZHANG Shuo, SU Ci, et al. Research on performance of road pavement with recycled semi-rigid base course made of full construction waste material[J]. Highway, 2023, 68(10): 74-82.
- [9] 周震, 何庆宇, 肖源杰, 等. 建筑固废再生骨料及矿渣粉与水泥联合固化的淤泥强度及微观结构研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(2): 677-689.  
ZHOU Zhen, HE Qingyu, XIAO Yuanjie, et al. On shear strength and microstructure characteristics of dredged sludge treated synergistically by aggregates recycled from building demolition waste, blast furnace powder, and cement[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(2): 677-689.
- [10] CAI X, WU K, HUANG W, et al. Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(10): 2181-2196.
- [11] LUO X, LIU G, ZHANG Y, et al. Estimation of resilient modulus of cement-treated construction and demolition waste with performance-related properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122107.
- [12] ZHANG J, DING L, LI F, et al. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120223.
- [13] FATEMI S, IMANINASABI R. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 450-456.
- [14] 陈守开, 白卫峰, 郑永杰, 等. 再生骨料替代率对混凝土单轴压缩力学性能的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3): 764-775.  
CHEN Shoukai, BAI Weifeng, ZHENG Yongjie, et al. Effect of replacement rate of recycled aggregate on mechanical properties of concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(3): 764-775.
- [15] 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.  
ZHANG Yu, JIANG Yingjun, FAN Jiangtao, et al. Mechanical strength growth law and prediction model of cement stabilized macadam with construction waste mechanical strength growth law and prediction model of cement stabilized macadam with construction waste[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(10): 3755-3764.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土用再生粗骨料:GB/T 25177—2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程利用建筑垃圾技术规范:JTG/T2321—2021[S]. 北京:人民交通出版社, 2021.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合稳定材料试验规程:JTG 3441—2024[S]. 北京:人民交通出版社, 2024.
- [19] 张阳, 田绍强, 马涛, 等. 固废基地聚物稳定碎石力学性能和干燥收缩特性研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 120-130.  
ZHANG Yang, TIAN Shaoqiang, MA Tao, et al. Mechanical performance and drying shrinkage characteristics of solid waste based geopolymer-stabilized macadam[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(12): 120-130.
- [20] 陈祥花, 劳国威, 郑述芳, 等. 粉煤灰掺量对全再生粗骨料自密实混凝土工作性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(2): 531-539.  
CHEN Xianghua, LAO Guowei, ZHENG Shufang, et al. Effect of fly ash content on workability of fully recycled coarse aggregate self-compacting concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(2): 531-539.
- [21] BENTZ D P, SNYDER K A. Protected paste volume in concrete; extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(11): 1863-1867.
- [22] 刘超, 余伟航, 刘化威, 等. 再生砖骨料混凝土力学性能及破坏机理研究[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13025-13031.  
LIU Chao, YU Weihang, LIU Huawei, et al. Study on mechanical properties and failure mechanism of recycled brick aggregate concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(13): 13025-13031.

- [23] 孔德玉, 任佳栋, 沈海强, 等. 离散元设计嵌挤密实级配再生砖混骨料水稳料性能的影响[J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(1): 1-6.  
KONG Deyu, REN Jiadong, SHEN Haiqiang, et al. Influence of interlock-dense gradation designed by discrete element method on properties of cement stabilized recycled brick-concrete aggregates[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2023, 51(1): 1-6.
- [24] 朱超, 赵文韬, 余伟航, 等. 再生砖混骨料混凝土基本力学性能与本构模型[J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 898-910.  
ZHU Chao, ZHAO Wentao, YU Weihang, et al. Basic mechanical properties and constitutive model of recycled brick-concrete aggregate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 898-910.
- [25] 艾长发, 黄恒伟, RAHMAN A, 等. 基于熵权的TOPSIS钢桥面防水黏结材料组合体系优选分析[J]. 中国公路学, 2020, 33(3): 53-63.  
AI Changfa, HUANG Hengwei, RAHMAN A, et al. Optimum selection analysis of waterproof bonding materials for steel bridge deck based using entropy weight-TOPSIS[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 53-63.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术规范: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(编辑:郭少华)

(上接第150页)

- [15] 孙杰, 张宏博, 程钰, 等. 基于TDA填料的废旧轮胎条带加筋砂土边坡承载特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(1): 49-59.  
SUN Jie, ZHANG Hongbo, CHENG Yu, et al. Bearing characteristics of reinforced sand slope with scrap tire strips and TDA backfills[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2023, 53(1): 49-59.
- [16] 李晓亮, 刘源, 李玉鑫, 等. 砂土介质中废旧轮胎加筋条带拉拔特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(4): 54-60.  
LI Xiaoliang, LIU Yuan, LI Yuxin, et al. The pullout features of reinforced strips of waste tires in sandy media[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(4): 54-60.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [19] 郑光俊, 盛春花, 李振华, 等. CFG桩复合地基新型嵌入式褥垫层桩-土应力比改善特性[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 133-139.  
ZHENG Guangjun, SHENG Chunhua, LI Zhenhua, et al. Improvement effect of pile-soil stress ratio in CFG pile composite foundation with newly embedded cushion[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(12): 133-139.
- [20] TAVAKOLI MEHRJARDI G, KARGAR M. Experimental investigation on the applicability of a novel tire-grid used in slope stabilization under repeated loads[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2023, 9(6): 66.

(编辑:郭少华)