

文章编号: 1007-2993(2026)02-0287-10

再生土石混合绿色基层材料路用性能与工程应用

宣晓鑫¹ 刘伟² 要彦波³ 杨国巍² 叶梓⁴

(1. 绍兴市城市发展集团有限公司, 浙江绍兴 312099; 2. 绍兴市科技产业投资有限公司, 浙江绍兴 312099;
3. 绍兴市绿程新材料制造有限公司, 浙江绍兴 312066; 4. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,
江苏南京 210098)

【摘要】 在“双碳”目标和城镇化进程快速发展的背景下,一方面优质石料资源开采受到限制,导致产量削减;另一方面路用填料的需求增大,建筑废弃土、废弃混凝土石料的排放量仍保持高位增长。为解决优质石料紧缺与废弃土消纳困难两大工程问题,以高掺量改良废弃土与废石料替代水稳层中的骨料成分,制备路用性能良好的再生土石混合绿色基层材料。结合无侧限抗压强度(UCS)、弯拉强度、弹性模量、水稳定性试验,探究合适的土石混合配比以制备强度与耐久性良好的绿色基层材料。基于 Box-Behnken 响应面法,通过方差分析提出土石比 4:6、水泥掺量 6%、材料压实度为 98% 的优选应用方案。将室内试验结果推广应用大规模填料化改良工厂,实现基层材料集约化生产并在试验段应用,发现现场弯沉、取芯及 UCS 检测结果良好,满足设计要求,验证了再生土石混合绿色基层材料的可行性。

【关键词】 废弃土;资源化利用;再生骨料;服役性能;工程应用

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0069

Road performance and engineering application of recycled soil-aggregate mixed green base material

XUAN Xiaoxin¹ LIU Wei² YAO Yanbo³ YANG Guowei² YE Zi⁴

(1. Shaoxing City Development Group Co., Ltd., Shaoxing 312099, Zhejiang, China; 2. Shaoxing Science and Technology Industry Investment Co., Ltd., Shaoxing 312099, Zhejiang, China; 3. Shaoxing Lvcheng New Material Manufacturing Co., Ltd., Shaoxing 312066, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

【Abstract】 In the context of the rapid development of "Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals" and urbanization, on the one hand, the mining of high-quality stone resources is restricted, resulting in production cuts. On the other hand, the demand for road fillers increases, the emissions of construction waste soil and waste concrete stone will remain high. To address the two major engineering issues of the shortage of high-quality stone materials and the difficulty in disposing of waste soil, a high-volume mixture of improved waste soil and waste stone materials is used to replace the aggregate components in the cement stabilized layer, preparing a recycled soil-stone mixed green base material with excellent road performance. By combining unconfined compressive strength (UCS), flexural tensile strength, elastic modulus, and water stability tests, the appropriate soil-stone mixture ratio is explored to prepare green base materials with good strength and durability. Based on the Box-Behnken response surface method, through variance analysis, it is proposed that a soil-stone ratio of 4:6, a cement content of 6%, and a material compaction degree of 98% are the optimal application scheme. The results of indoor tests are extended to large-scale fill material improvement factories, achieving intensive production of base materials and application in test sections. It is found that the on-site flexural deflection, coring, and UCS testing results are good, meeting the design requirements, and verifying the feasibility of the recycled soil-stone mixed green base material.

【Key words】 waste soil; resource utilization; recycled aggregate; service performance; engineering application

基金项目: 国家自然科学基金(52308348); 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(B250201024); 浙江省建筑业技术创新协会科技项目(2023B105)

作者简介: 宣晓鑫,男,1978年生,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程领域研究工作。E-mail: 599207474@qq.com

通信作者: 叶梓,男,1995年生,博士,副研究员,主要从事固废资源化利用、岩土工程解析方法等领域的研究工作。E-mail: zeye_1995@163.com

0 引言

近年来,我国城镇化进程发展不断加快,建筑垃圾的年产量超 20 亿 t, 存量 2000 多亿 t, 而我国建筑垃圾资源化的综合利用率仅为 40%, 如何合理地消纳建筑废弃物已然成为需要重视的工程问题。2021 年 7 月国家发展改革委印发了《“十四五”循环经济发展规划》, 要求到 2025 年建筑垃圾综合利用率达到 60%。另一方面, 受国家环保政策限制, 优质石料资源产量削减, 石料价格上涨, 水稳碎石材料整体造价也显著上升。此时, 寻找优质碎石替代资源迫在眉睫。传统的尾矿、煤矸石等碎石替代方案有较强的地域性, 受当地工业布局局限, 且运距普遍较高。若能结合当地废弃土消纳需求, 以改良废弃土置换部分基层碎石, 并筛选再生混凝土作为粗骨料, 则有良好的经济性^[1]。

水泥稳定碎石作为一种典型的无机结合料稳定材料, 其构成核心为级配良好的碎石集料, 辅以占集料质量 3%~8% 的水泥及最佳含水率的水。该材料的力学性能主要源于水泥水化反应与碎石嵌挤作用, 赋予基层必要的强度和刚度, 从而确保足够的承载能力^[2], 该材料在路面基层中的使用占比高达 90%^[3-4], 凸显了研究再生集料替代原生集料应用于此类基层的显著价值。针对水泥稳定碎石基层的性能, 国内外学者已就其强度、收缩特性等展开了广泛研究^[5-7]。研究普遍表明, 基层强度与其刚度、抗收缩及抗冲刷性能呈正相关^[8-10]。然而, 该材料对温度和湿度变化高度敏感, 易引发温度收缩与干燥收缩, 进而产生收缩裂缝。此类裂缝不仅直接削弱基层的强度, 更易导致上层沥青面层产生反射裂缝, 最终导致道路服役寿命的显著缩短。

薛万安^[11]运用理论、基本性能试验和具体项目实践的方法全面分析了大厚度水泥稳定碎石基层施工, 对大厚度水泥稳定碎石基层施工的摊铺工艺、碾压工艺和养生工艺分别进行了总结。王叔鹏^[12]基于掺赤泥橡胶粉水稳碎石试件和普通水稳碎石试件进行了试验研究, 对比分析其力学性能, 得出掺入赤泥橡胶粉水稳碎石比普通水稳碎石抗压强度高、劈裂强度高、回弹模量低。杨春燕^[13]针对骨架空隙型水泥稳定碎石基层, 开展了大粒径集料的配比优化研究, 系统评估了多种配比方案下材料的无侧限抗压强度、孔隙率及干缩率等关键性能指标, 揭示了集料级配对其力学与变形特性的影响规律, 确定了最佳大粒径集料配比方案。陈光等^[14]利用 ABAQUS 有限元模拟软件构建了水稳填充大粒径碎石材料模拟试件, 嵌

入黏聚力模型, 从系统总能量与材料破坏状态两个角度分析水稳填充大粒径碎石材料的抗裂机理。涂亮亮等^[15]研究了建筑废弃物在水泥稳定基层中应用时对其强度、抗冲刷性能和干缩特性影响的规律, 并与天然碎石集料制备的水稳层进行了性能对比分析。

针对基层材料的研究大多关注水泥稳定碎石基层及多种工业固废掺料水泥稳定碎石基层, 取得了一定的效果^[16-17]。但传统水泥稳定碎石基层因碎石料源紧缺, 所需成本较高; 复合工业固废掺料水稳碎石则因掺料来源地不同, 运距较高, 推广性较差。实际上, 我国大部分渣土场接纳的渣土伴有大量的废弃集料。产业端上, 现有研究大多聚焦于工程渣土的路基资源化利用, 而对其副产品废弃集料鲜有探讨, 造成极大浪费。本文考虑废弃土与废弃集料的消纳需求, 秉持“以废治废”理念, 以大量改良废土掺入破碎的混凝土集料中, 制备新型土石混合基层材料。在此基础上, 开展重型击实试验、无侧限抗压强度(UCS)试验、弯拉强度试验和水稳强度试验, 分析材料的强度和耐久性能, 明晰再生土石混合绿色基层材料优选掺比与作用机理, 结合响应面分析优化施工方案; 最后, 结合工程渣土集中改良工厂, 实现再生土石混合绿色基层材料的集约化生产与应用, 通过现场弯沉及取芯检测, 验证了材料路用性能的可行性。

1 废弃混凝土骨料基本性能试验

1.1 试验材料

选取绍兴地区典型的建筑垃圾破碎废弃混凝土作为本项研究的骨料, 共分 A, B, C, D, E 五档骨料, 如图 1 所示。A, B, C, D 档料为混凝土破碎集料, 从 A 至 D 分别为粗集料、中档集料、细集料与混凝土石粉; E 档料主要为砖混结构的破碎集料。此外, 改

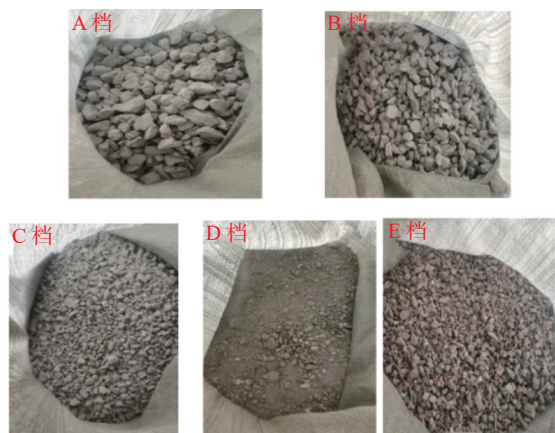


图 1 混凝土破碎集料

Fig. 1 Concrete crushed aggregate

良废弃土选自绍兴绿程新材料渣土改良工厂出厂的灰土路用填料,其基础原料选用绍兴地铁2号线二期盾构渣土,经过绿恒渣土改良工厂集中生产,按2%掺灰、闷料、破碎、拌合等多道工序制备而成。

1.2 试验结果

(1)集料筛分试验

分别测量各档配料的级配曲线,再以废弃混凝土天然破碎比例配置混合集料,质量比为A档:B档:C档:D档:E档=24%:24%:16%:20%:16%,测定混合集料的级配曲线,结果如表1所示。集料级配曲线如图2所示。

表1 各档废弃混凝土筛余情况
Tab.1 Screen residue of waste concrete

筛孔尺寸/mm	过筛质量百分率/%					混合料
	A类	B类	C类	D类	E类	
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
26.5	100.0	100.0	87.0	100.0	100.0	93.7
19.0	100.0	100.0	52.6	100.0	100.0	78.3
9.5	96.2	17.9	12.1	100.0	95.2	52.3
4.75	54.4	6.6	2.2	88.7	49.3	33.5
2.36	23.9	4.5	0	73.2	23.9	20.9
0.6	7.6	0	0	49.2	11.3	12.5
0.075	1.8	0	0	15.3	1.0	3.5

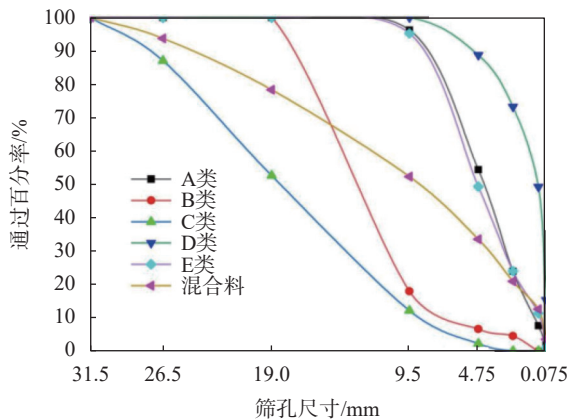


图2 颗粒级配曲线图
Fig.2 Grain gradation curve

将筛分结果结合《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)可知,混合集料符合高速公路和一级公路推荐的C-B-3级配范围,可以作为公路路面基层施工的混合料施工。

(2)集料基本性能试验

为了检测废弃集料路用潜能,检测了再生骨料的压碎值、表观密度、吸水率、堆积密度等参数,并

与天然骨料参数进行了对比,具体结果如表2所示。

试验结果见表2,结合《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中对粗集料的要求,破碎混凝土骨料满足高速公路和一级公路基层 $\leq 20\%$ 的压碎值要求,同天然骨料相比,具有更高的经济效益;破碎混凝土骨料的表观密度满足不小于 2450 kg/m^3 的要求,同时吸水率也满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)所指定的 10% 的要求;骨料的堆积密度满足大于 1350 kg/m^3 的要求;再生骨料的针片状含量大于天然骨料的针片状含量,且略微超过规程对再生骨料的针片状含量要求,属于不良骨料,但针片状指标主要针对嵌挤型基层材料提供依据,过细过薄的集料无法形成骨架体系。本研究主要基于悬浮型基层材料开展,对该参数要求相对更低。总之,废弃混凝土作为基层骨料,满足骨料应用的基本特性要求,相对于天然骨料成本显著降低。本研究期望以不同土石比例配备土石混合料基层材料,配合不同配比的P-O 42.5水泥,降本增效的同时,消纳大量废弃土与废弃混凝土资源,具有良好的社会效益。

表2 再生骨料与天然骨料基本性能对比
Tab.2 Comparison of fundamental properties between recycled aggregate and natural aggregate

基本性质	压碎值/%	表观密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	吸水率/%	堆积密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	针片状 含量/%
再生骨料	8.7	2583	6.68	1370	24.97
天然骨料	7.2	2768	4.49	1510	8.57
技术要求	<20	>2450	<10	>1350	<22

2 再生土石混合基层路用性能试验研究

为有效控制利用废弃的土资源,消纳废弃混凝土,本节将混凝土破碎集料作为粗骨料,废弃土源填充粗骨料孔隙,以土石质量比2:8,4:6,5:5,6:4,8:2五组配比制备基层材料(后简称为土石比),并在此基础上加入水泥,探究其强度和耐久性能改变,评价在基层填料应用的可行性,并提出达到规范要求的最优配比。试验包含土石混合料的重型击实试验、无侧限抗压强度试验、水稳定性试验研究。

2.1 重型击实试验

试验方法参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)击实试验方法,选用土石比为2:8,4:6,5:5,6:4,8:2的试样分别开展击实试验,根据试验结果绘制含水率-干密度曲线,如图3所示。从含水率-干密度曲线可以明显看出,随着土石比的增加,曲线峰值逐渐向右下方移动,即最优含水率上升,最大干密度显著下降,其中土石比为2:8时的

最大干密度为 2.20 g/cm^3 , 最优含水率为 6.3% 。当土石比为 $8:2$, 土料占混合物主体部分时, 最大干密度仅为 1.88 g/cm^3 , 最优含水率为 12.5% 。显然, 土石混合物中, 石料密度较改良土密度更高, 更高的土石比显然将导致其混合料密度更低。

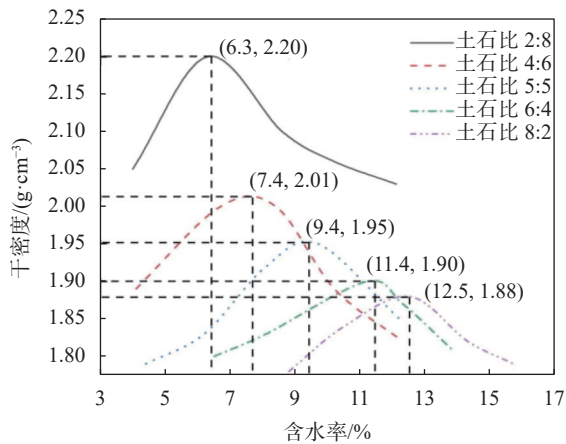


图3 含水率-干密度关系曲线
Fig. 3 Relationship curve between water content and dry density

2.2 无侧限抗压强度试验

选用的水泥掺量为 4% , 5% , 6% 。选用的土石比为 $2:8$, $4:6$, $5:5$, $6:4$, $8:2$, 试样制备采用静压成型工艺, 依据最大干密度和最佳含水率配制混合料, 并充分浸润熟化 24 h 以上; 随后掺入水泥并搅拌均匀。最终使用标准 $\phi 150 \times 150 \text{ mm}$ 圆柱钢模在压力成型设备上制备标准试样。关键工序示意图见图4。试验方法参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)规定的无侧限抗压强度试验方法。

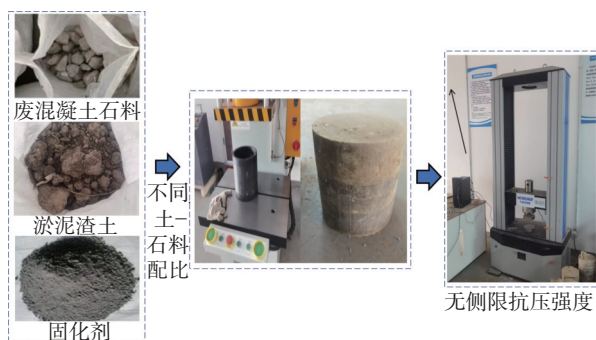


图4 试验流程
Fig. 4 Experimental flow

目前, 公路规范以 7 d UCS (标准养护 7 d 龄期的无侧限抗压强度) 作为考核基层材料强度指标的标准。图5为不同水泥掺量及土石比, 对废旧材料水泥稳定碎石 7 d UCS 的影响。《公路沥青路面设计规范》(JTGD 50—2017) 中规定中交通等级高速公路基层的水泥稳定类无机结合料 7 d UCS 要求为 4 MPa , 即

图5红线处。可以发现, 随着土石比的增加, 整体 7 d UCS 呈现先增大后减小的趋势, 当土石比达到 $4:6$ 时, 混合物强度达到峰值, 之后随着土掺量的不断增加, 整体混合物体系逐渐向悬浮型骨架转化, 进而最终实现达到细颗粒离散体系, 20% 的骨料仅以填充物形态存在于混合物里。因此, 土石比 $8:2$, 水泥掺量为 6% 时, 该配比的 UCS 仅为 3.4 MPa , 在5个配比中为最低值。值得注意的是, 土石比 $2:8$ 的试样 UCS 相较土石比 $4:6$ 更低, 这是因为废弃集料相较标准碎石其基本性能有显著差异, 土石比 $2:8$ 的试样无法形成嵌挤型结构, 80% 废弃集料制样后内部存在大量空隙, 造成强度损失。土石比 $4:6$ 的试样虽然粗集料含量较低, 但更多的改良土粒填充粗集料孔隙, 形成了相对密实结构, 显然强度更高。

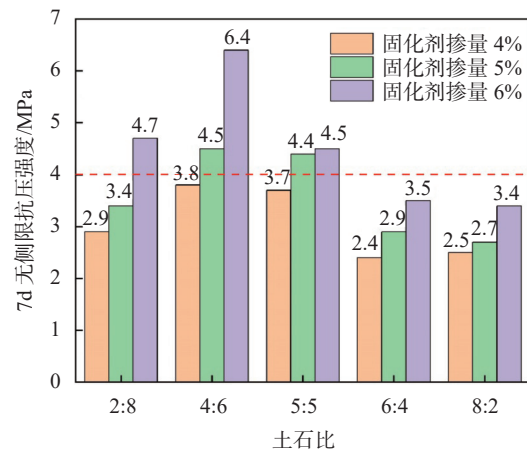


图5 不同水泥掺量试样 7 d-UCS 试验结果
Fig. 5 7 d-UCS test results of samples with different cement content

此外, 与水泥掺量为 4% 土石混合物料相比, 掺入 6% 的水泥各土石比工况 7 d 抗压强度分别增加了 67.86% , 68.42% , 21.62% , 45.83% , 36.00% , 土石比为 $4:6$ 时的 7 d UCS 的提升最大。与水泥掺量为 5% 土石混合物料相比, 掺入 6% 的水泥各土石比工况 7 d 抗压强度分别增加了 38.24% , 42.22% , 2.27% , 20.69% , 25.93% , 土石比为 $4:6$ 时的 7 d UCS 的提升最大, 土石比为 $2:8$ 的强度提升幅度紧随其后。综上所述, 土石比为 $4:6$ 时, 新型再生基层材料的强度提升最为显著, 合适的土石掺比可以大幅度提高再生土石混合基层材料的抗压强度。

为了进一步探讨龄期对强度的影响, 将 4% 水泥掺量混合料的 7 d 与 28 d UCS 试验结果作柱状图 (见图6), 由图可知材料的抗压强度皆随养护龄期的增长而增加, 各土石比工况下养护 28 d 的废旧材料

水稳基层抗压强度较养护 7 d 分别增大了 13.80%, 18.42%, 13.51%, 16.67%, 8.00%, 呈现先增大后减小的趋势, 土石比 4 : 6 的强度提升最大。将 6% 水泥掺量混合料的无侧限试验结果作柱状图(见图 7), 由图可知材料的抗压强度皆随养护龄期的增长而增加, 各土石比工况下养护 28 d 的废旧材料水稳基层抗压强度较养护 7 d 分别增大了 19.15%, 25.00%, 26.67%, 20%, 8.82%, 呈现先增大后减小的趋势, 土石比 5 : 5 的强度提升最大。由此可见, 在废旧材料水稳基层掺入水泥后, 不同龄期抗压强度均得到提高, 其随养护龄期增长的速率亦得到提升。显然, 低土石比工况, 例如 2 : 8 与 4 : 6 工况随龄期的强度增长率相较于 8 : 2 工况更为显著。

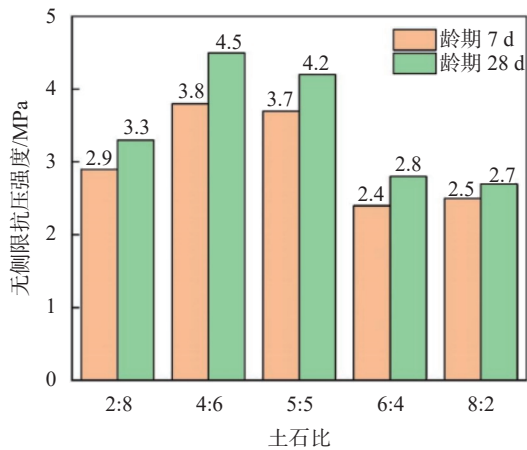


图 6 水泥掺量为 4% 的 UCS 结果

Fig. 6 UCS results of samples with cement content of 4%

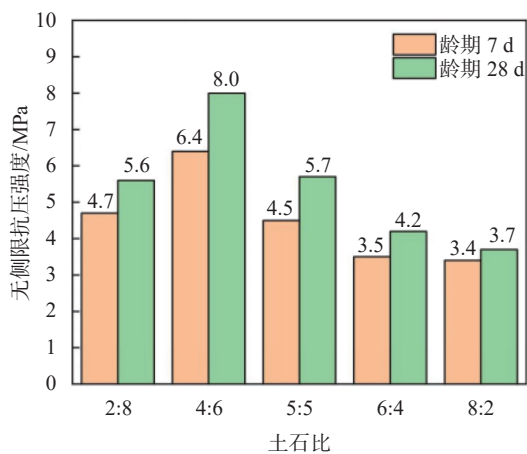


图 7 水泥掺量 6% 的 UCS 结果

Fig. 7 UCS results of samples with cement content of 6%

2.3 弯拉强度和弹性模量的试验研究

(1) 试验方法

试验测定参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)中的有关规定, 针对无

侧限抗压强度较大的试验组, 加做弯拉强度和弹性模量试验。选择尺寸 100 mm×100 mm×400 mm 的中梁试件, 水泥为 5% 和 6%, 土石比 4 : 6, 压实度为 96% ~ 100%, 试件参照标准养护方法养护 90 d。试验采用三分点加压的方法, 加载时保持均匀、连续, 加荷速率为 50 mm/min, 直至试件破坏。按式(1)计算弯拉强度:

$$R_s = \frac{PL}{b^2h} \quad (1)$$

式中: R_s 为弯拉强度, MPa; P 为破坏极限荷载, N; L 为跨距, 即两支点间的距离, mm; b 为试件宽度, mm; h 为试件高度, mm。

(2) 试验结果

弯拉强度和弹性模量试验结果见表 3。试验组统一水泥掺量 6%, 其中“WL46-100”为土石比 4 : 6, 压实度为 100%。

表 3 弯拉强度和弹性模量试验结果
Tab. 3 Test results of tensile strength and elastic modulus

试验组	弯拉强度/MPa	弹性模量/MPa
WL46-100	1.95	24339
WL46-98	1.78	20574
WL46-96	1.53	18531
WL28-96	0.65	6224
WL55-96	1.22	9056

根据《公路沥青路面设计规范》(JTGD 50—2017)对无机结合料稳定类材料的要求, 水泥稳定粒料的弯拉强度应为 1.5 ~ 2.0 MPa, 弹性模量应为 18000 ~ 28000 MPa。在土石比为 4 : 6, 水泥掺量为 6% 的条件下, 该材料的弯拉强度和弹性模量均符合标准。此外, 随着压实度的提高, 弯拉强度最高可提升 27%; 在 96% 压实度下, 弯拉强度相比低压实度试件提升了 31%。这表明, 废土与废石料的基层材料具备较高的承载能力, 能够在外力作用下保持形状, 展现出优良的韧性和刚性。同时, 该材料在长期使用中能够抵抗疲劳和老化, 具备显著的工程应用价值。

2.4 水稳定性试验研究

针对水泥掺量为 4%, 5%, 6%, 土石比为 2 : 8, 4 : 6, 5 : 5, 6 : 4, 8 : 2, 制样与养护方法与无侧限抗压强度试验相同, 为测定试样水稳定性, 在养护达到 6 d 后, 将试样置入深度大于试样高度 (50 cm) 的水池中浸水养护 1 d, 最后将养护好的试样用湿抹布擦去表面水分, 测定其无侧限抗压强度值, 通过与未浸水养护的强度值相比较得出强度损失, 进而分析废

土联合废石料基层材料的水稳性能。

水泥掺量为 4% 的废土联合废石料基层材料浸水后的无侧限抗压强度结果见图 8, 各土石比对应的水稳系数如图中折线所示。由图可知, 材料浸水后的 7 d 无侧限抗压强度都有一定程度的损失, 各土石比混合料水稳系数分别为 86.21%, 81.58%, 81.08%, 91.67%, 88.00%, 其水稳系数均大于 80%, 具有较好的水稳强度, 土石比为 6 : 4 的水稳系数最大, 土石比为 2 : 8 的水稳系数最小。然而, 就浸水后的强度而言, 土石比 4 : 6 的试样浸水后虽然水稳系数较低, 但仍持有最高强度, 展现出良好的抵抗水害侵蚀能力。

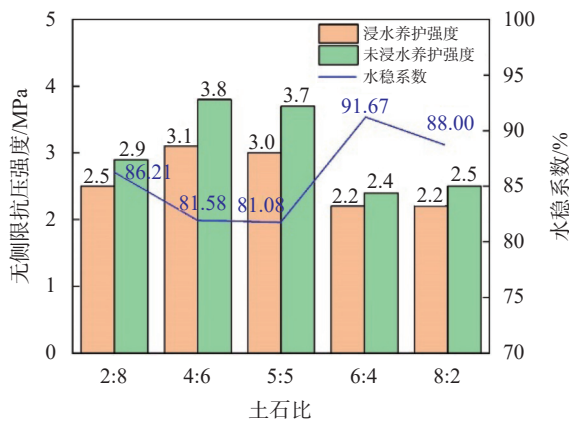


图 8 水泥掺量为 4% 试样的水稳性试验结果
Fig. 8 Experimental results of water stability of samples with cement content of 4%

水泥掺量为 6% 的废土联合废石料基层材料浸水后的无侧限抗压强度结果见图 9, 各土石比对应的水稳系数如图中折线所示。6% 水泥材料浸水后的 7 d 无侧限抗压强度都有一定程度的损失, 各土石比混合料水稳系数分别为 63.83%, 71.88%, 71.11%, 77.14%, 73.53%, 其中土石比为 6 : 4 的水稳系数

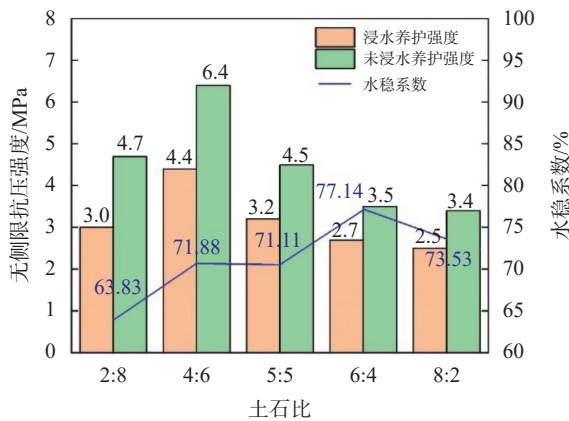


图 9 水泥掺量为 6% 试样的水稳性试验结果
Fig. 9 Experimental results of water stability of samples with cement content of 6%

最大, 土石比为 2 : 8 的水稳系数最小, 废土掺量高于废石料的材料水稳系数均大于废土掺量低于废石料的材料, 这是由于建筑垃圾再生料作为一种特殊的“粗粒土”, 将其用于基层材料时, 其中含有的砖块和砂浆等组分表面孔隙大、吸水性强, 使得再生料的含水率易受外界环境的影响, 产生强度损失。

3 基于响应面法的优化配比试验

3.1 回归方程的建立

在已经完成的两个因素影响无侧限抗压强度试验的基础上, 采用 Box-Behnken 法设计响应面试验, 以 UCS(Y) 为响应值, 土石比(A)、水泥掺量(B)和压实度(C)为影响因素。响应面试验因素水平见表 4, 结果见表 5。

表 4 响应面试验因素水平
Tab. 4 Response surface test factor levels

限值	土石比A	水泥掺量B/%	压实度C/%
最小值	40	4	96
最大值	80	6	100

表 5 响应面试验设计与结果
Tab. 5 Design and results of response surface experiment

试验号	土石比A	水泥掺量B/%	压实度C/%	UCS/MPa
1	80	4	100	2.9
2	80	4	96	2.5
3	80	6	100	4.7
4	80	6	96	4.0
5	80	5	98	3.5
6	60	4	100	4.2
7	60	5	100	5.0
8	60	6	100	6.4
9	60	6	98	5.7
10	60	6	96	5.2
11	60	5	96	4.1
12	60	4	98	3.7
13	50	6	100	5.0
14	50	5	100	4.5
15	50	4	100	3.7
16	50	6	96	4.1
17	50	4	96	2.9
18	40	6	100	3.5
19	40	4	96	2.0
20	40	5	98	2.7
21	40	5	100	2.9

采用 Design-Expert 软件, 对表 3.2 的试验结果进行回归拟合, 得到回归方程 $UCS=3.95+2.87/A+$

$0.6994 \times B + 0.2935 \times C + 0.3816 / A \times B - 0.0655 / A \times B + 0.0403 \times B \times C - 3.27 / A^2 + 0.1712 \times B^2 - 0.115 \times C^2$ 。由此可以得到,残差正态分布如图 10,拟合度情况如图 11,强度云图如图 12。

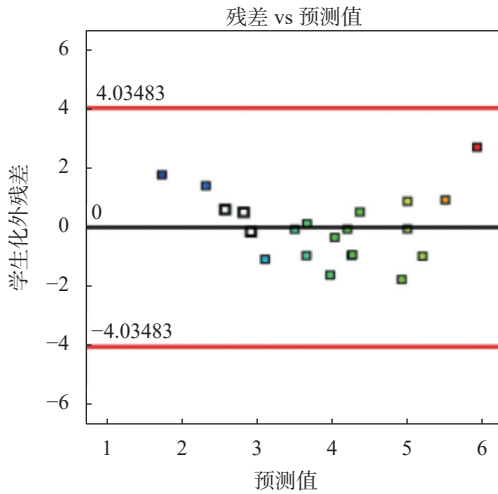


图 10 残差正态分布

Fig. 10 Residual normal distribution

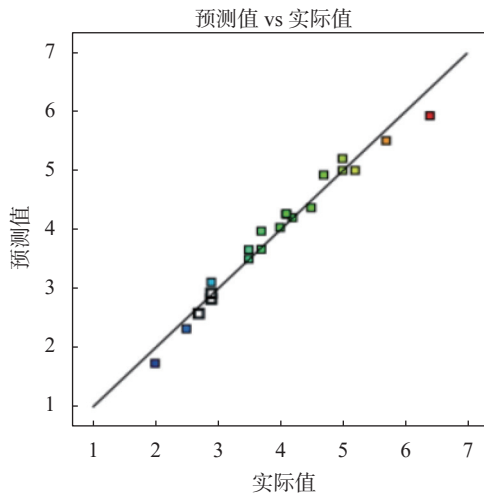


图 11 拟合度情况

Fig. 11 Fitting degree

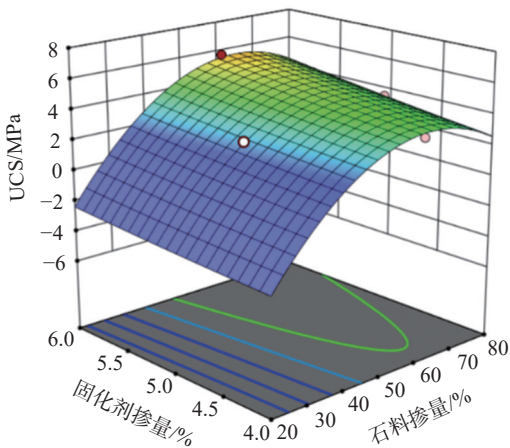


图 12 7d UCS 云图

Fig. 12 7 d UCS contour map

对回归模型进行拟合度和残差分析,模型拟合均匀地分布在直线两侧,表明模型的拟合度良好,残差分布符合正态分布规律,从强度云图来看,模型的强度均在土石比 4 : 6、水泥掺量 6%、压实度 98% 处达到最高点,分析模型存在最优解。

3.2 回归模型的方差分析

对 7 d 龄期抗压强度回归模型拟合公式进行方差分析,分析结果见表 6。使用均方、 F 值与 P 值衡量模拟方程的方差关系, F 值越大、 P 值越小,越能代表相关系数的显著性。7 d 龄期抗压强度拟合方程的 F 值为 40.83, P 值 < 0.0001 , 即 7 d UCS 模拟方程的 P 值小于 0.01, 因此可以证明模型的显著性非常高。通过对土石比(A)、水泥掺量(B)、压实度(C) F 值比较,由表 6 还可知,土石比和水泥的影响均显著 ($P < 0.01$), 各因素的影响大小顺序为 $A > B > C$, 即土石比 $>$ 水泥掺量 $>$ 压实度。

表 6 回归模型方差分析
Tab. 6 Analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	24.38	9	2.71	40.83	< 0.0001
A	9.66	1	9.66	145.67	< 0.0001
B	3.84	1	3.84	57.92	< 0.0001
C	1.40	1	1.40	21.11	0.0008
AB	0.2218	1	0.2218	3.34	0.0947
AC	0.0022	1	0.0022	0.0326	0.8599
BC	0.1087	1	0.1087	1.64	0.2269
A^2	10.24	1	10.24	154.38	< 0.0001
B^2	0.0150	1	0.0150	0.2258	0.6440
C^2	0.0049	1	0.0049	0.0743	0.7902
残差	0.7298	11	0.0663		
总和	25.11	20			

模型拟合方程的可信度检验如表 7 所示,其中 R^2 表示模型预测值与实测值之间的相关系数,相关系数 R^2 越大,相关性越好;在校正的 R^2 值与预测的 R^2 值之间差异不可超过 0.2 的条件下,校正的 R^2 值与预测的 R^2 值越接近 1,模型可信度越高;变异系数 < 10 ,说明试验的可靠性和准确性较高;信噪比大于 4,则认为模型拟合是合理的。从表 7 可以看出,7 d 龄期抗压强度模型的 R^2 为 0.9762,校正 R^2 值与预测 R^2 值分别为 0.9693 与 0.9728,信噪比为 33.4324,变异系数为 3.44。结果表明,回归方程的可靠性和准确性都很高,模拟方程与实际契合度较高。回归方程的建立与检验可为后续现场施工提供依据。针对渣

土场差异时间段的废弃土、废弃混凝土堆滞配比,可协调合适的新型基层材料土石比、水泥配比,实现基于 UCS 与实际料源的堆滞比的基层材料配比动态设计。

表 7 模型可信度分析
Tab. 7 Model reliability analysis

模型	R^2	修正 R^2	预测 R^2	变异系数	信噪比
7 d UCS	0.9762	0.9693	0.9728	3.44	33.4324

4 现场试验结果

绿云路(凤林西路以北—329 国道)智慧快速路工程,全线采用“高架主线+地面辅路”敷设型式,与现状 S308(S31)省道衔接,全长约 6.7 km。本次试验段研究范围位于工程 II 标段,北站东路至善酿路路段东半幅,具体桩号范围为 K6+920—K7+220,全长约 300 m,宽 20 m,土石混合基层材料用量约为 2200 m^3 ,具体试验段设计如图 13 所示。

新型水稳材料的生产采用厂拌法进行,依托绿程公司后渚水稳生产基地和北站东路主生产基地联动生产,平均运输半径仅 1.2 km 左右。北站东路厂

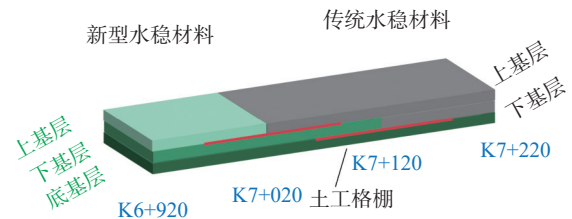


图 13 试验段设计示意图

Fig. 13 Schematic diagram of test section design

区内部道路先导段检测数据优良。试验段基层材料要求如下:①上基层:16 cm 基层材料,7 d UCS 为 5~6 MPa;②下基层:16 cm 基层材料,7 d UCS 为 4~5 MPa;③底基层:16 cm 基层材料,7 d UCS 为 4~5 MPa,路面结构层验收弯沉值:基层顶面 26.5 (单位:0.01 mm)。

试验段的底基层,全部采用新型土石混合材料通铺,下基层 K6+920—K7+120 采用新型土石混合材料铺筑,上基层 K6+920—K7+020 采用新型土石混合材料铺筑;其余部位用传统水稳材料铺筑,为协调沉降,控制差异变形,于新型材料与传统水稳材料搭接处布置土工格栅。现场生产与施工工序见图 14。



图 14 生产与施工工序

Fig. 14 Production and construction process

养护 7 d 后,采用 HZ-20 型水稳取芯机对基层取芯检测,现场取芯如图 15 所示。结果显示,试样取芯完整度良好。土工实验室检测其无侧限抗压强度为 5.1 MPa,满足设计值要求。上基层填筑后养护 7 d,采用贝克曼梁法双侧同时测定弯沉,评定其整体承载能力。检测路段的弯沉代表值为 20.8(0.01 mm),弯沉值低于设计值 26.5(0.01 mm)。综上所述,试验段所用土石混合基层材料无论是弯沉还是取芯 UCS 检测值,皆满足设计要求,该绿色新型基层材料具备良好的应用性。值得注意的是,由于土石混合基层材料细集料过多,当其作为上基层使用时,其与沥青层间的搭接存在不紧密、脱空等现象。为此,首先可考虑增加透层乳化沥青用量,保证透入深度;此外,土石

混合材料摊铺后的表面可考虑拉毛,提供更多搭接面积。

相较于传统水泥稳定碎石基层,再生土石混合



图 15 现场取芯结果

Fig. 15 Field coring results

材料的优势包括:①经济性:利用废弃土与再生骨料可降低材料成本约 35%;②环保性:每公里道路可消纳建筑垃圾 1.2 万 t,同时节约大量天然料源,减少开山采石;③抗裂性:悬浮型结构减少收缩裂缝风险。

其局限性为:①再生骨料针片状含量较高,可能影响嵌挤型基层的骨架形成;②由于内含较多的细集料,土石混合基层材料的耐久性相较水泥稳定碎石相对较差,同时做上基层使用时,细集料过多易导致表面光滑,上基层与沥青层的透层搭接相较传统材料更为松散,可能存在错动。

5 结论

本研究以废弃土与废弃石料为原材料,综合运用无侧限抗压强度(UCS)、弯拉强度、弹性模量等试验,探寻适宜的土石混合配比,从而开发出具备优良强度和耐久性的土石混合绿色基层材料。借助 Box-Behnken 响应面法,并结合方差分析,确定了土石比 4:6、水泥掺量 6% 以及材料压实度达到 98% 的最优方案。最终,将室内试验研究结果应用于现场试验,经现场弯沉测试及取芯检测,结果表明材料性能表现优异。主要结论如下:

(1)基于废弃混凝土和废弃土的消纳需求,提出一种新型再生土石混合绿色基层材料,当土石比为 4:6,水泥掺量为 6%,对再生土石混合基层材料展现出良好的抗压强度,达到 6.4 MPa,水稳定性、弯拉强度与弹性模量皆表现良好。

(2)基于 Box-Behnken 响应面分析法,对材料的 7 d UCS 三因素影响进行系统分析,提出新型基层材料 7 d UCS 预测模型。最后,结合方差分析显示模型具备显著性。

(3)土石混合绿色基层材料在绍兴市绿云路现场试验段得到了应用,试验段取芯检测 UCS 强度为 5.1 MPa,弯沉代表值为 20.8(0.01 mm),低于设计值弯沉代表值为 26.5(0.01 mm),新型基层材料具备良好的推广应用价值。

(4)再生土石混合绿色基层材料的研发实现了就地取材,结合弃土与建筑垃圾改良,在减少废弃土和建筑垃圾堆放的同时,相比于水泥稳定碎石可以减少路面沉降,环境效益与经济效益显著。

参 考 文 献

[1] 孙兆云,王林,张磊,等.基于 DCP 的不同固化粉土基层路用性能分析[J].*岩土工程技术*,2023,37(1):19-23. (SUN Z Y, WANG L, ZHANG L, et al. Road

performance analysis of different solidified silt base based on DCP[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2023, 37(1): 19-23. (in Chinese))

- [2] XUAN D X, HOUBEN L J M, MOLENAAR A A A, et al. Mechanical properties of cement-treated aggregate material – a review[J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 496-502.
- [3] ZHENG Y X, ZHANG P, CAI Y C, et al. Cracking resistance and mechanical properties of basalt fibers reinforced cement-stabilized macadam[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 312-334.
- [4] SUN Y, LI L H. Strength assessment and mechanism analysis of cement stabilized reclaimed lime-fly ash macadam[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 118-129.
- [5] SHALABI F I, MAZHER J, KHAN K, et al. Cement-stabilized waste sand as sustainable construction materials for foundations and highway roads[J]. *Materials*, 2019, 12(4): 600.
- [6] MARTINEZ-ECHEVARRIA M J, LOPEZ-ALONSO M, GARACH L, et al. Crushing treatment on recycled aggregates to improve their mechanical behaviour for use in unbound road layers[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120517.
- [7] NWAKAIRE C M, YAP S P, ONN C C, et al. Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235: 117444.
- [8] HOU Y Q, JI X P, SU X L. Mechanical properties and strength criteria of cement-stabilised recycled concrete aggregate[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, 20(3): 339-348.
- [9] LV S T, XIA C D, YOU L Y, et al. Unified fatigue characteristics model for cement-stabilized macadam under various loading modes[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 775-783.
- [10] LV S T, YUAN J, LIU C C, et al. Investigation of the fatigue modulus decay in cement stabilized base material by considering the difference between compressive and tensile modulus[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 491-502.
- [11] 薛万安.大厚度水泥稳定碎石基层施工质量控制关键技术研究[D].西安:长安大学,2017. (XUE W A. Study on key technology of construction control for heavy-stiff cement stabilized macadam[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese))
- [12] 王书鹏.掺赤泥橡胶粉水泥稳定碎石基层材料的试验研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2022. (WANG S P. Experimental study on cement stabilized macadam base

- material mixed with red mud rubber powder[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [13] 杨春燕. 大粒径集料在骨架空隙型水泥稳定碎石基层中的应用研究 [J]. 四川水泥, 2022(12): 54-56. (YANG C Y. Study on application of large-size aggregate in skeleton-gap cement stabilized macadam base[J]. Sichuan Cement, 2022(12): 54-56. (in Chinese))
- [14] 陈光, 刘翠, 于仲慧. 基于内聚力模型的水稳填充大粒径碎石基层材料抗裂机理分析 [J]. 公路, 2023, 68(4): 364-369. (CHEN G, LIU C, YU Z H. Analysis of anti-cracking mechanism of water-stabilized filling large-size macadam base material based on cohesion model[J]. Highway, 2023, 68(4): 364-369. (in Chinese))
- [15] 涂亮亮, 许勐, 范璐璐, 等. 基于振动模式的再生水泥稳定碎石基层力学性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(9): 20-26. (TU L L, XU M, FAN L L, et al. Research on mechanical properties of recycled cement stabilized crushed stone based on vibration mode[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(9): 20-26. (in Chinese))
- [16] 田红云, 邓庆凯, 孟文诚, 等. 顶管淤泥改良道路底基层材料配方机理研究 [J]. 岩土工程技术, 2025, 39(1): 150-158. (TIAN H Y, DENG Q K, MENG W C, et al. Formulation mechanism of bottom layer material for road improvement by top pipe sludge[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2025, 39(1): 150-158. (in Chinese))
- [17] 王矿山, 庞龙, 戴振鑫, 等. 湖底淤泥固化土的环境耐久性研究 [J]. 岩土工程技术, 2023, 37(4): 455-460. (WANG K S, PANG L, DAI Z X, et al. Study on environmental durability of solidified lake-bottom sediment[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(4): 455-460. (in Chinese))

收稿日期: 2025-02-18