

再生砖混材料力学和耐久特性 及其在机场道面垫层的应用

吴杰¹, 赵咨泮¹, 姜昌山², 曹正龙³, 徐西永³, 袁捷¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100029;
3. 山东省机场管理集团有限公司, 山东 济南 250107)

摘要: 利用回收砖混材料设计了骨架密实型再生砖混混合料(RBCM);结合多种试验综合表征了RBCM在抗压、抗拉、贯入受力状态下的力学特征;考虑实际工况设计了试件循环和粒料循环两类耐久环境,并通过无侧限抗压强度试验量化了RBCM的耐久性能演变;依据现场试验段验证RBCM垫层的工程应用性能。结果表明,RBCM垫层的渗透性较差,宜在其上部设置透水垫层;水泥用量增加对RBCM抗压能力和破坏形态改善明显,其抗压和贯入强度较高,抗拉能力较差;少量水泥掺入使RBCM经过30次循环后的耐久系数仍大于50%;即使不掺水泥,再生砖混垫层的密实度和力学性能仍满足现行垫层设计指标的要求。

关键词: 机场改扩建工程;骨架密实型;再生砖混材料;垫层;耐久性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Mechanical and Durability Characteristics of Recycled Brick-Concrete Materials and Their Application in Airport Pavement Cushion

WU Jie¹, ZHAO Zifeng¹, JIANG Changshan²,
CAO Zhenglong³, XU Xiyong³, YUAN Jie¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Airport Construction Corporation of Civil Aviation Administration of China, Beijing 100029, China; 3. Shandong Airport Management Group Co., Ltd., Jinan 250107, China)

Abstract: This paper designed a skeleton dense recycled brick-concrete materials (RBCM) using recycled brick-concrete materials. The mechanical characteristics of RBCM under compressive, tensile, and penetration stresses were synthesized by various tests. Considering

the actual working conditions, two types of durability environments, i. e., the specimen cycle and the particle cycle, were designed, and the durability evolution of RBCM was quantified by an unconfined compressive strength test. The engineering application performance of the RBCM cushion was verified based on the field test section. The results show that the permeability of the RBCM cushion is poor, and it is appropriate to pave a permeable cushion on the upper part of RBCM cushion. The increase in cement content significantly improves the compressive strength and failure mode of RBCM, the compressive strength and penetration strength are higher, but the tensile strength is lower. The durability coefficient of RBCM after 30 cycles is still more than 50% after adding a little cement. Even without cement, the compactness and mechanical properties of the RBCM cushion still meet the requirements of the current cushion design index.

Keywords: airport reconstruction and expansion projects; skeleton dense type; recycled brick-concrete materials; cushion layer; durability performance

为适应日益增长的航空出行需求,我国近年来陆续开展旧机场改扩建工程^[1]。现有设施大面积拆除,导致产生大量建筑固废,尤其是以混凝土块和砖块混杂的砖混类材料^[2]。出于安全考虑,以往机场建设中通常将这些砖混类材料堆放或填埋处理。然而,这种处置方式占用大量土地资源,且存在对地下水潜在的污染风险^[3]。如何探索建筑固废资源化利用,减少基础设施建设对自然环境的影响已成亟需解决的问题。

机场道基垫层位于基层以下,厚度常为30~60

收稿日期: 2024-03-12

第一作者: 吴杰, 博士生, 主要研究方向为道路材料。E-mail: 2211371@tongji.edu.cn

通信作者: 袁捷, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

cm。山皮石是常用的填筑材料,但近年来其价格持续攀升。一方面,垫层方量较大,能够消纳大量建筑材料;同时,垫层结构层位较低,对原材料的强度和耐久性要求较低,因此是砖混类材料潜在的应用场景之一^[4]。为此,王小明等^[5]结合室内试验和精细化离散元模型分析了再生集料颗粒破碎和界面损伤对水稳材料强度的影响。因再生砖混材料中有相当部分砖粉,余其俊等^[6]利用等温量热仪和差热分析仪探究了砖粉粒径对水泥水化行为的影响,发现火山灰反应的开始时间随着再生砖混粒径的减小而提前。Yan等^[7]研究了砖部分替代天然集料含量的变化对水稳材料强度和耐久性的影响,证实再生砖粗集料增多导致混合料性能明显下降。而Meng等^[3]评估了高剂量水稳再生砖混集料的强度特性,结果表明材料的干缩变形在水泥剂量超过4%后迅速增加。为改善再生集料的表面缺陷,Su等^[8]利用聚乙烯醇对其进行了强化,但发现该措施对抑制混合料的冻融损伤效果不佳。

综上所述,学者们对再生砖混材料的力学和耐久性能展开了深入研究。但与水稳级配碎石相比,低掺量水稳全再生砖混材料的工作性能、耐久性能尚不明晰,缺少工程应用案例验证^[9]。基于此,本研究通过级配设计制备低掺量水稳全再生砖混试件;针对实际工况设计两类耐久性能试验,并综合分析水稳再生砖混材料的工作特性、力学特性和耐久特性。同时,在现场铺设足尺试验段,分析再生砖混垫层的工程应用效果和适宜的应用措施,为砖混材料在机场建设中实现较高资源化应用提供案例参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

1.1.1 砖混材料

再生砖混材料(RBCM)在加工前为某村庄因机场改扩建拆迁产生的砖块与混凝土块混杂的建筑固废,被加工为(0,5] mm、(5,10] mm和(10,30] mm粒径的3档集料。砖块在各档集料中的质量比分别为85.0%、45.6%、23.9%。每档集料的基本物理性质如表1所示。

再生砖混集料的粒径分布如表2所示。每档再生砖混集料的级配均匀性良好,没有出现个别筛孔空缺现象,可利用该3档再生砖混集料进行后续混合料级配设计。

表1 再生砖混集料基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of recycled brick-concrete aggregate

粒径/mm	(0,5]	(5,10]	(10,30]
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.542	2.557	2.534
吸水率/%		10.834	7.552
含水率/%	9.656	7.571	5.908
含泥量/%	8.614	1.994	1.184
压碎值/%	41.100	35.700	32.400

表2 再生砖混集料粒径分布

Tab. 2 Particle size distribution of recycled brick-concrete aggregate

粒径/ mm	不同筛孔尺寸(mm)质量通过率/%							
	31.5	26.5	19.0	9.5	4.75	2.36	0.60	0.075
(0,5]	100.0	100.0	100.0	100.0	68.5	46.3	21.9	0.4
(5,10]	100.0	100.0	100.0	86.2	2.7	2.0	1.6	0.2
(10,30]	100.0	99.9	68.2	5.2	1.4	1.3	1.0	0.2

1.1.2 水泥

研究用水泥为山东某公司生产的海螺牌P. O 42.5普通硅酸盐水泥。水泥用量通过外掺法确定。

1.2 试验方法

加州承载比(CBR)试验根据《公路土工试验规程》(JTG 3430)进行。渗水试验根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51)开展,每隔30 s记录一次读数。根据JTG E51开展无侧限抗压试验和间接抗拉试验。采用JTG E51顶面法测试抗压回弹模量。耐久性试验包括冻融循环和干湿循环,每种循环包括对养护后的试件进行处理(试件循环)和对再生砖混集料处理后再成型试件并养护(粒料循环)两类;冻融循环试验参考JTG E51,干湿循环试验参考ASTM D4843-88^[10]。试验参数如表3所示。

表3 耐久性试验参数

Tab. 3 Parameters of durability test

试验方法	试验条件			
	冻结		融化	
冻融循环	温度/°C	作用时长/h	温度/°C	作用时长/h
		-18	16	20
干湿循环	润湿		干燥	
	温度/°C	作用时长/h	温度/°C	作用时长/h
	20	16	60	8

2 骨架密实型再生砖混材料设计

2.1 级配设计

再生砖混材料级配参考《民用机场飞行区土(石)方与道面基础施工技术规范》(MH/T 5014)推

荐的水稳碎石底基层级配范围,参照李子良等^[2]的研究成果设计骨架密实型结构^[11]。初始级配、优化级配如图1所示。经级配优化后再生砖混材料中粗集料较初始级配有所减少,而细集料较初始级配明显增加。

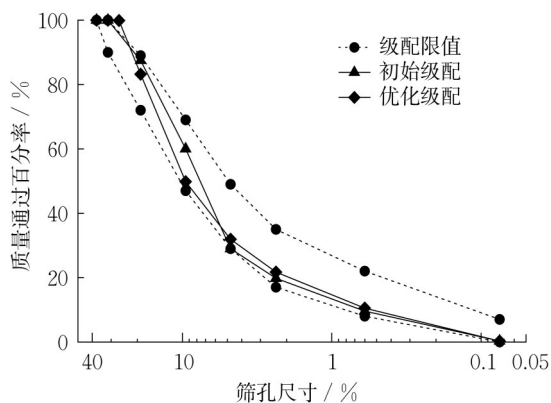


图1 再生砖混垫层级配设计

Fig. 1 Gradation design of recycled brick-concrete cushion

2.2 配合比设计

采用重型击实成型,水泥掺量为0~3%,RBCM后数字为水泥掺量,试验结果如表4所示。混合料最大干密度随水泥掺量增加而增大,但此规律不适用于最佳含水率。水泥掺量增加使水泥分布密度增大,水化反应速度加快,自由水在测定实际含水率前转变为结合水的现象更显著,烘干后测得实际含水率偏低^[12]。

表4 RBCM击实试验结果

Tab. 4 Compaction test results of RBCM

材料类型	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%
RBCM-0	1.85	11.5
RBCM-1%	1.87	13.1
RBCM-2%	1.90	12.6
RBCM-3%	1.91	12.7

2.3 渗水性能

随着水泥掺量增加,RBCM的渗水系数分别为11.33、8.67、7.00、4.33 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。依据美国联邦公路局提出的基层材料渗透性标准^[13],无水泥稳定RBCM的渗透性较差,不容易及时排出材料内部的水分^[9]。垫层材料渗水能力的强弱与其内部空隙率有直接关系^[14]。在压实过程中,棱角性更丰富、内部缺陷较多、粒径较大的再生砖混集料更容易发生颗粒破碎和棱角断裂,致使混合料更密实,内部空隙率降低,连通孔隙减少^[5]。再生砖混垫层低渗透性可能导致渗入基层的地表水在此累积而处于湿润状

态,降低基层的承载能力。因此应根据降雨和排水系统情况在再生砖混垫层上部设置大孔隙排水上层,减弱地表水的影响。

图2为RBCM的渗水试验结果。由图2可见,渗水量随时间逐渐增大,且速率逐步降低。试验开始前,试件顶面的开口孔隙较丰富,试验结束后明显减少。水向下流动以夹带湿化后的再生砖混微粉与水泥等胶结物质填充RBCM内部的连通孔隙。由于再生砖混材料吸水率较大,从渗水仪底座下渗的水有相当部分进入再生砖混集料孔隙以并和水泥颗粒相结合,并未从试件底部渗出。

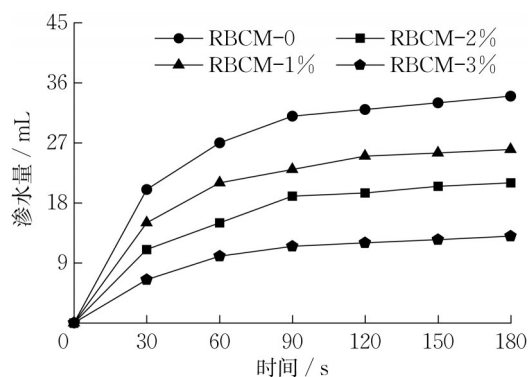


图2 RBCM渗水试验结果

Fig. 2 Permeability test results of RBCM

3 力学性能试验结果与评价

3.1 无侧限抗压强度

RBCM无侧限抗压强度试验结果如图3所示。由图3可见, RBCM的7 d抗压强度随水泥掺量增加而明显增大。当水泥掺量达到2%以后,RBCM的7 d抗压强度高于3.3 MPa,满足现行设计规范对基层水稳粒料材料的强度要求。降低水泥掺量至1%,RBCM的强度也能够满足垫层水稳粒料材料强度要求。因再生砖微粉中存在无定形的 SiO_2 和 Al_2O_3 等火山灰质物质,其与再生混凝土微粉中因熟料水化而产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应,即使未掺入水泥的RBCM,养护28 d的抗压强度也有小幅度增长^[6]。

随水泥掺量的增大,RBCM的强度提高。当水泥掺量较少时,再生砖微粉与水泥的比值较大,再生砖微粉降低胶凝材料体系的水化放热速率和放热能越显著。然而,水泥掺量的增加削弱了再生砖微粉的负面影响,促进了体系早期水化反应,使混合料早期强度贡献增长,故7 d与28 d的强度比值降低^[6]。

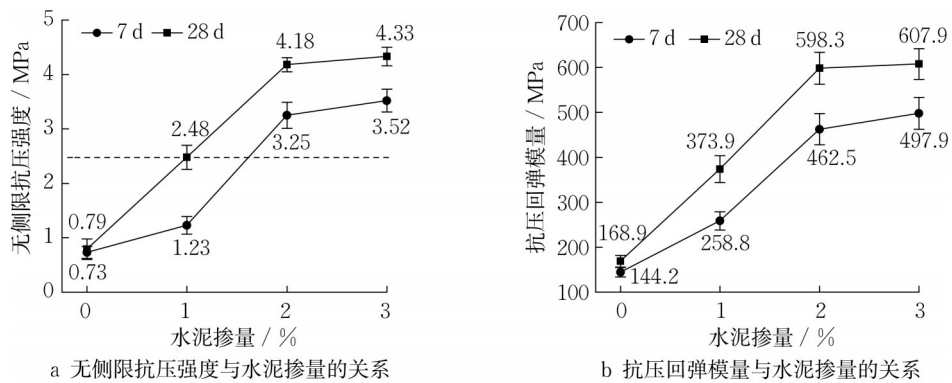


图3 RBCM无侧限抗压强度与抗压回弹模量试验结果

Fig. 3 Unconfined compressive strength test results of RBCM

图4为RBCM受压时的破坏形态。若不掺入水泥,RBCM在单轴压缩应力条件下多表现为劈裂破坏,并沿轴向出现了较多的破裂面。受试件端面与承压板间摩擦的影响,试件径向膨胀被约束,最终被径向拉力而破坏,此时其抗压能力并未完全发挥。掺入水泥后,RBCM逐渐向剪切破坏方式转变。试件没有形成贯穿上下端面的主裂纹,两端细小裂纹

减少,剪切带增多。水泥掺量增大后,试件抵抗径向膨胀变形能力增强,因径向拉力而拓展的张拉裂纹减少。当水泥掺量增加至3%时,试件端部为剪切破坏主导区,而中部为张拉破坏主导区,故在径向拉力和剪切应力作用下使轴向裂纹发生了偏转^[15]。较高的水泥掺量使试件在破坏时还表现出径向崩裂的过程,进一步提高了其抗压强度。

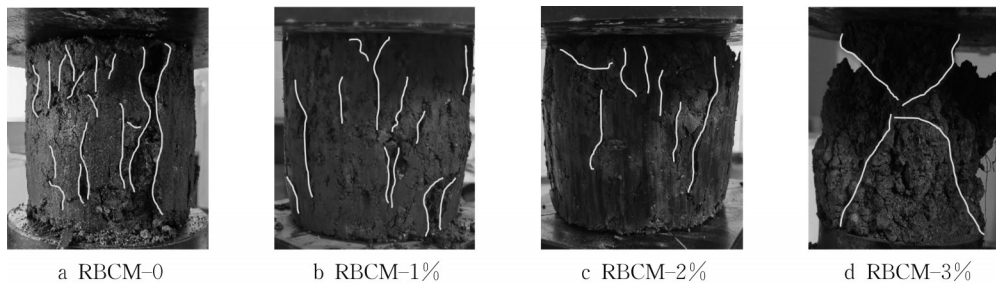


图4 RBCM单轴抗压破坏形态

Fig. 4 Uniaxial compressive failure pattern of RBCM

3.2 抗压回弹模量

图3b为RBCM抗压回弹模量试验结果,其变化趋势与无侧限抗压强度近乎一致,这一定程度表明试件的竖向变形几乎不受水泥掺量的影响。在掺入水泥后,RBCM抗压回弹模量显著增大。

RBCM在7d和28d龄期的回弹模量与抗压强度的关系如图5所示。在不同龄期下,RBCM的回弹模量和抗压强度均具有良好的线性关系,拟合优度 $R^2 > 0.97$,可借助直线方程对两参数相互预测^[16]。试件7d龄期时95%预测区间宽度明显高于28d,反映不同RBCM整体力学性能的均质性随龄期增大而不断提高,胶凝材料水化进程差异降低。另外,养护时间越长,水泥掺量的变化使RBCM力学性能的差异增大,宏观表现为曲线的横纵向跨度增大,拟合直线整体往上移动。

3.3 间接抗拉强度

图6为RBCM间接抗拉试验结果。RBCM的间接抗拉强度随水泥掺量增加而增大,但其提升幅度较低;即使掺入3%水泥,试件的间接抗拉强度也仅增加不足20%,大幅度低于水稳级配碎石^[3]。与其他强度指标相比,试件在养护7d后的间接抗拉强度增长幅度也偏小。

尽管增大水泥掺量后试件顶面空隙减少,但即使掺入3%水泥,试件的侧面和顶面仍存在较多空隙。一方面,再生砖混集料表面孔隙较多,相当部分的胶凝材料会进入集料内部孔隙,导致黏结集料界面的胶凝材料减少;另一方面,其表面黏附的废旧水泥砂浆等形成了界面过渡区,不利于应力的传递^[5]。因此在受拉状态下,RBCM中的初始微裂纹沿着应力垂直方向发展较快,抗拉强度快速降低。

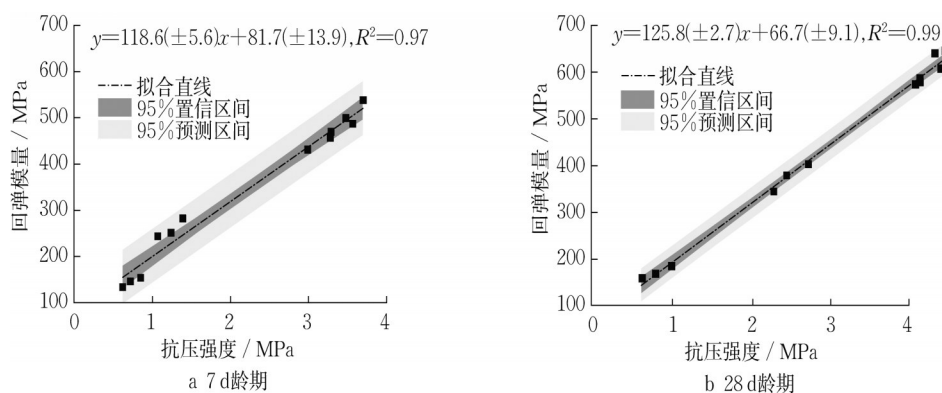


图5 RBCM回弹模量与抗压强度的关系

Fig. 5 Resilience modulus versus compressive strength of RBCM

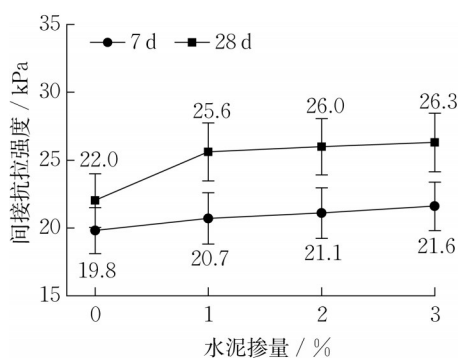


图6 RBCM的间接抗拉试验结果

Fig. 6 Indirect tensile test results of RBCM

3.4 CBR

图7为RBCM的CBR试验结果。如图7a所示, RBCM-0的荷载贯入强度与标准碎石相当, 并在加入水泥后成倍提高, 远高于机场对道床最小强度的要求。水化产物既能胶结集料, 提高集料颗粒间的黏聚力; 同时也能降低混合料空隙率, 使其与贯入杆接触的有效面积增大, 进一步提高荷载贯入强度。

泡水4 d后, RBCM浸水膨胀率与水泥掺量的关

系如图7b所示。掺入水泥前, 混合料的浸水膨胀率为 -0.14% , 表明再生砖混材料在充分润湿后略有湿陷性。因为砖粉主要原料是粉质黏土, 胶结黏土颗粒间的絮状包裹物在浸水后逐渐剥落, 导致颗粒间胶结强度减弱, 使骨架颗粒脱离约束而重新排列^[17]。水泥掺入后, 水化反应使固体相体积增大, 且水化产物中的无定形水化硅酸钙凝胶在润湿后也会出现一定膨胀, 导致混合料的浸水膨胀率持续增大, 抵消了其前期的湿陷变形, 满足机场道基均匀性的要求^[18]。

4 耐久性能试验结果与评价

研究地区地下水位埋深约2 m, 夏季频繁降雨可能使垫层处于干湿交替环境。冬季长达数月, 标准冻结深度约50 cm, 垫层材料可能受冻融损伤。此外, 拆迁产生的建筑固废长时间堆放地表, 也受冻融和干湿损伤潜在影响, 因此设置试件循环(对试件处理)和粒料循环(对粒料处理)两种耐久环境。

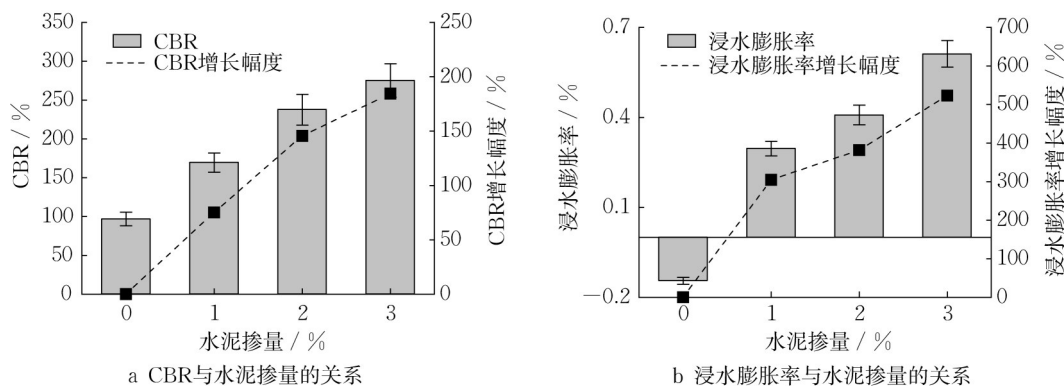


图7 RBCM的CBR试验结果

Fig. 7 CBR test results of RBCM

4.1 冻融循环试验

经试件冻融循环后,混合料抗压强度的变化如图8所示,阴影区域为标准差。由8a可见,RBCM的残余抗压强度随循环次数增加而不断下降。在冻结阶段,混合料空隙和再生集料孔隙中的游离水形成冰晶状体,伴随的体积膨胀使集料颗粒间黏结变差,强度降低。到融化阶段,冰晶状体融化,并带走剥落

的水化产物和集料颗粒,使混合料空隙率增大^[10]。若不掺入水泥,试件在经过30次冻融循环后便发生崩散,集料颗粒剥落。水泥加入后,集料颗粒间黏结力提高,混合物内部的空隙和集料颗粒表面孔隙减少,外部水分进入混合料的通道减少,试件抗冻融损伤能力增强,在30次冻融循环后仍均高于50%。

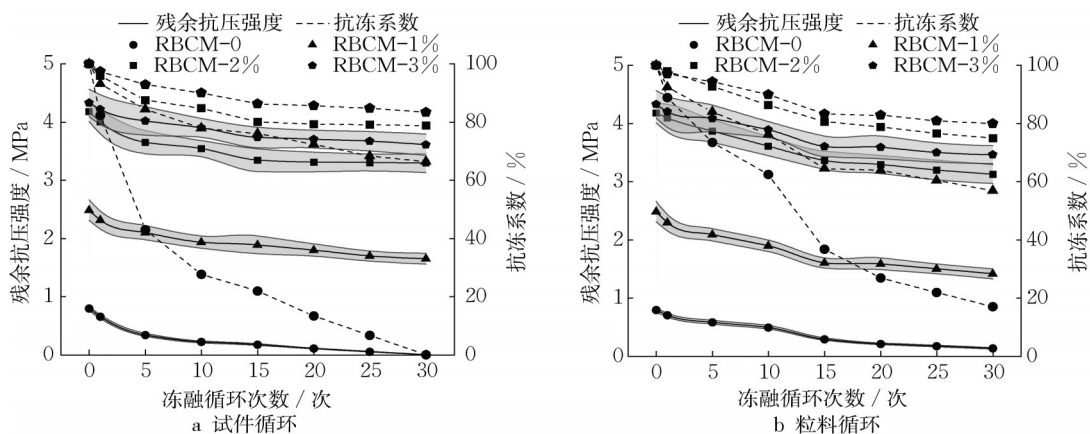


图8 冻融循环后RBCM力学性能的变化

Fig. 8 Variation of mechanical properties of RBCM after freeze-thaw cycle

图8b为试件经粒料冻融循环后的力学性能。RBCM的抗压强度随循环次数增加而不断降低,其趋势与试件冻融循环类似。但 t 检验表明,在 $p < 0.05$ 时,两种冻融循环方式下试件的抗压强度存在显著差异。在粒料循环过程中,冻胀作用使再生集料表面物质逐渐崩解,并未对集料间的水化产物产生直接影响^[19]。从结果上看,冻融方式对试件残余抗压强度的差异体现在RBCM-0上。尽管30次粒料循环使再生集料性能劣化,但仍能够成型为整体。而试件循环直接使试件崩散,丧失整体性。另外从均值看,经试件循环后的试件强度稍高于粒料循环,但不足1%。这表明对于水稳粒料材料可使用粒料循环方式模拟冻融作用。

研究表明,对数函数模型和Morgan Mercer Flodin (MMF)生长模型可描述水稳碎石在长期冻融下抗压强度的衰变规律^[9]。利用该模型进行拟合,如图9所示。MMF生长模型的拟合效果明显优于对数模型,拟合优度 $R^2 > 0.95$ 。利用MMF生长模型预测经两类循环方式后试件抗压强度的拟合优度均值在 $p < 0.05$ 时不存在显著差异,表明MMF生长模型能较好表达RBCM的力学性能演变,可适当减少冻融循环试验次数。

4.2 干湿循环试验

图10a为试件经干湿循环后的力学性能。RBCM的残余抗压强度随着干湿循环逐步下降。润湿过程,水分通过混合料中空隙逐步向内扩散,含水率增加,体积轻微增加;干燥时,内部水分的丧失促使吸力增加,微裂纹逐渐产生,使宏观强度降低^[20]。水泥的掺入使水分进入混合料内部的通道减少,改善了混合料的软化系数。在掺入3%水泥后,混合料的软化系数较无水泥试件提高了66.4%。

试件经过粒料干湿循环后的力学性能如图10b所示,其抗压强度逐渐衰减趋势与试件循环类似。对于RBCM-0,若直接对试件干湿循环则会因缺少胶结物质而导致软化系数快速下降,但粒料干湿循环后再成型仍具有较稳定的结构,软化系数下降较慢。再生集料颗粒逐渐崩解,表面孔洞增多,微裂纹发育,颗粒强度下降,致使混合料抗压强度降低^[21]。在掺入2%以上水泥后,经试件循环的试件抗压强度的降低速率反而慢于粒料循环。因为水泥减弱了干湿循环对试件的损伤,而粒料经循环后再成型却不具备这种特征。

图11为RBCM抗压强度与干湿循环次数的关系。不同于冻融循环,RBCM抗压强度随循环次数增大呈现近乎线性下降的趋势,没有表现出后

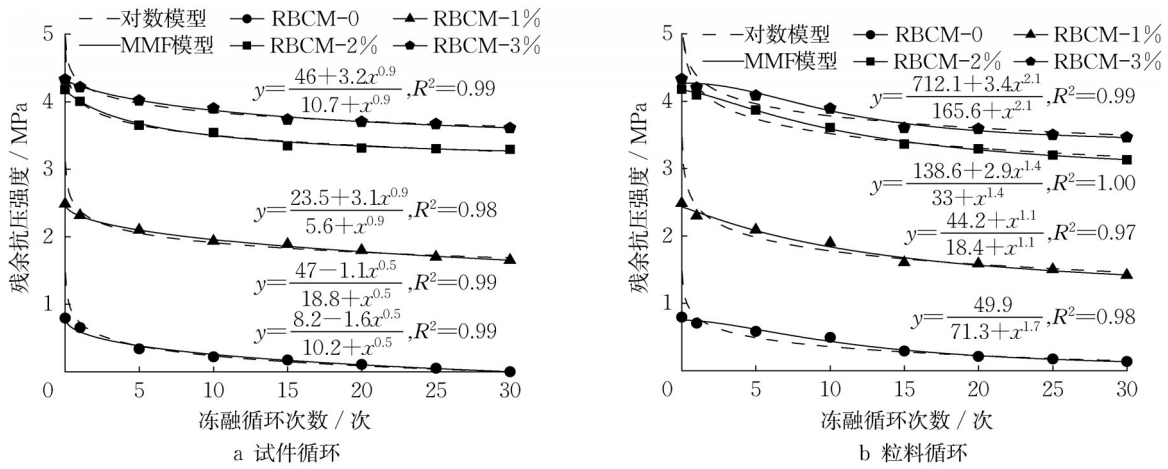


图9 冻融循环后RBCM力学性能演变模型

Fig. 9 Variation model of mechanical properties of RBCM after freeze-thaw cycle

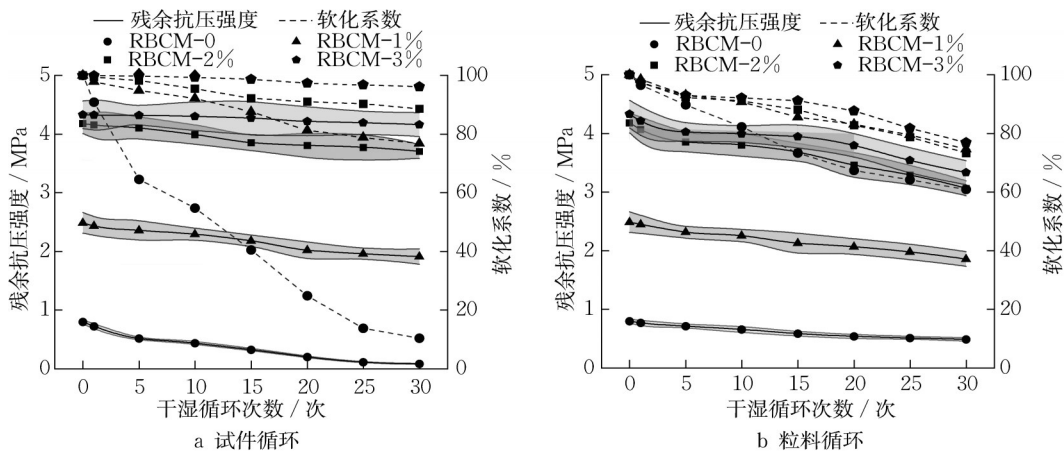


图10 干湿循环后RBCM力学性能的变化

Fig. 10 Variation of mechanical properties of RBCM after dry-wet cycle

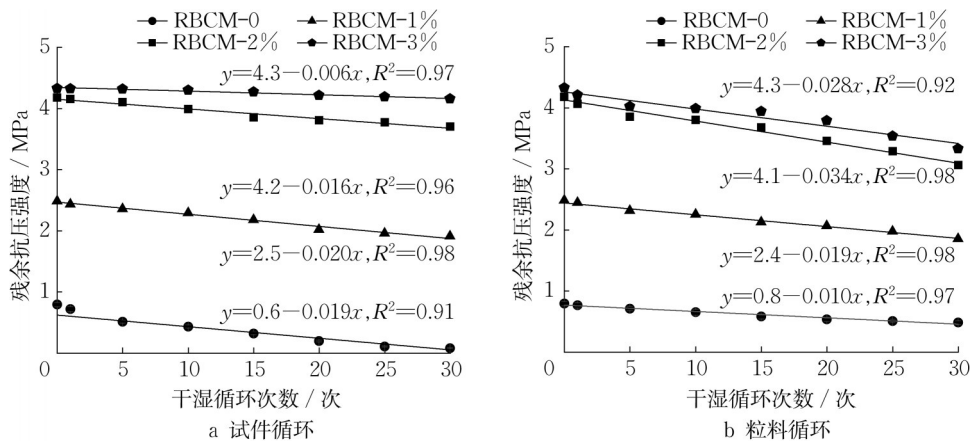


图11 干湿循环后RBCM力学性能演变模型

Fig. 11 Variation model of mechanical properties of RBCM after dry-wet cycle

期逐渐稳定的特征。可以推测RBCM的抗压强度对于干湿循环作用具有明显的时间依赖性,每次循

环对混合料的劣化影响较一致,可用一次函数对其预测。

5 现场试验段工程应用性能评价

5.1 试验段设计

为评估再生砖混垫层的工程应用效果,探究RBCM适宜施工工艺,在面积为18 000 m²的粉土地上铺设不同厚度垫层,并检测其垫层密实度和力学性能。垫层材料包括山皮石,各水泥掺量的RBCM。对山皮石,采用冲击碾压施工;对RBCM-0,分别采用冲击碾压和振动碾压施工,其他材料采用振动碾压施工。垫层厚度分别为30、40、50、60 cm,共20个垫层区块。鉴于冲击碾压施工对材料的破碎较明显,放大材料最大粒径至8 cm。经平面定位和标高测量后,利用推土机整平垫层,并根据碾压工艺选定压实机械碾压。当垫层厚度>40 cm后,分

两层碾压。待碾压完成后,立即检测垫层固体体积率和压实度,若3个点检测值变异系数大于10%为不合格。在养护7 d后进行后续检测。

5.2 垫层密实度

垫层的密实度如图12所示。在任一垫层厚度和水泥掺量下,再生砖混垫层的固体体积率>83%,压实度>96%,均满足现行垫层设计指标要求。因碾压机械的有效处置深度有限,通常在相同碾压次数下,垫层厚度越大,其固体体积率和压实度越低。对RBCM-0,受粒径较小的影响,采用振动碾压比冲击碾压更易提高垫层密实度。在振动碾压时,垫层的固体体积率规律性较压实度明显,采用前者评估粒料基层更适用。明确的是,水泥掺入增大了混合料中的固体相物质,使垫层固体体积率提高,明显优于山皮石垫层。

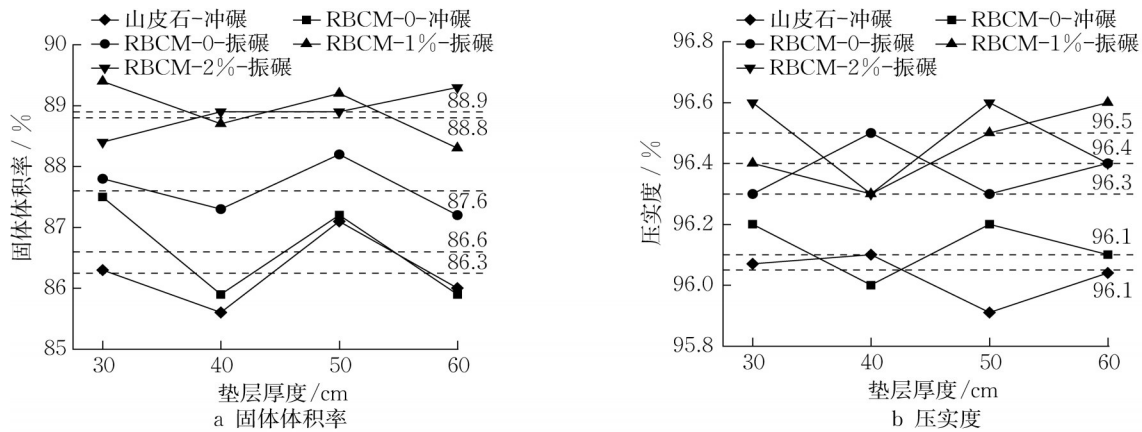


图12 试验段垫层密实度

Fig. 12 Compactness of cushion in test section

5.3 垫层力学性能

垫层的力学性能如图13所示。在任一垫层厚度和水泥掺量下,再生砖混垫层的道基反应模量>70 MN·m⁻³,满足现行垫层设计指标要求;而CBR>8%,满足道床填料强度要求。当水泥掺量高于1%时,垫层强度远高于设计最低限值,明显优于山皮石垫层。通常厚度的增加使垫层强度增大,但CBR从30 cm增加到40 cm时几乎没有增长。因为CBR主要反映表层材料性质,厚度的增长降低了垫层密实度。对RBCM-0,由于再生砖混集料颗粒粒径更大,垫层采用冲击碾压反而比振动碾压强度高,此时垫层道基反应模量与山皮石垫层相当。

5.4 经济性分析

山皮石材料单价约70元·t⁻¹,RBCM水泥掺量为0、1%、2%、3%时的材料单价分别约为45、52、60

和69元·t⁻¹。不同垫层的经济性可用下述公式量化^[22-23]:

$$B_m = \frac{F_m}{C_m} \quad (1)$$

$$F_m = \sum_i F_{i,m} W_{i,m} \quad (2)$$

$$F_{i,m} = \frac{Y_{i,m} - Y_{i,b}}{\text{Max}\{Y_{i,1}, Y_{i,2}, \dots, Y_{i,n}\} - Y_{i,b}} \quad (3)$$

式中: B_m 为垫层 m 的经济效益; F_m 为垫层 m 与对照垫层的性能提升; C_m 为垫层 m 与对照垫层的成本增长; $F_{i,m}$ 为垫层 m 第 i 类性能提升; $W_{i,m}$ 为垫层 m 第 i 类性能权重; $Y_{i,m}$ 为垫层 m 第 i 类性能值; $Y_{i,b}$ 为对照垫层 m 第 i 类性能值; n 为垫层类型。

若垫层各项性能权重相同,每种垫层经济效益如表5所示。随着水泥用量增大,再生砖混垫层的经济性 B_m 降低。与山皮石垫层相比,采用振动碾压

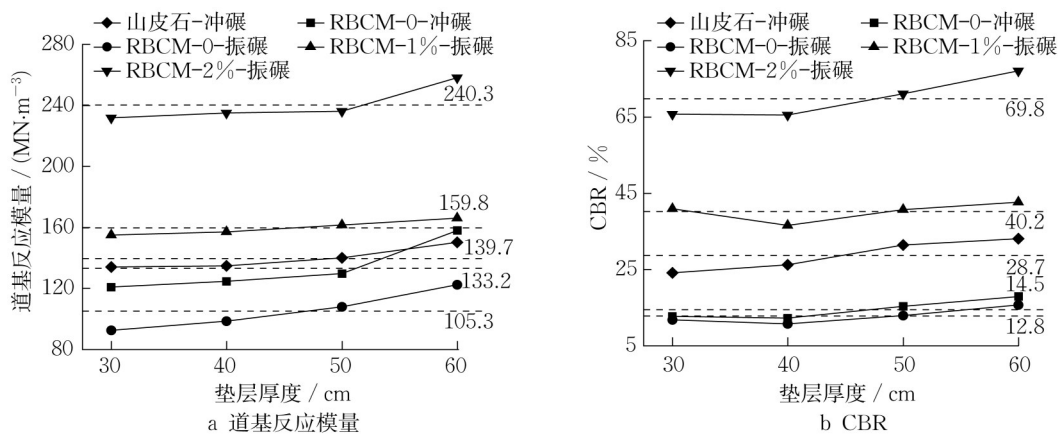


图13 试验段垫层力学性能

Fig. 13 Mechanical properties of cushion in test section

的再生砖混垫层不仅成本更低,且性能更优异。即便对RBCM-0,其垫层性能提升 $F_m=0.08>0$ 。考虑到耐久性,建议再生砖混垫层水泥掺量取1%~2%。

表5 垫层的经济效益

Tab. 5 Economic benefits of cushion

垫层类型	经济效益
RBCM-0	2.48
RBCM-1%	2.48
RBCM-2%	2.46
RBCM-3%	1.88

6 结论

(1)RBCM渗透性较差,不易排出水分,故再生砖混垫层主要起隔水、防冻作用;为保证结构排水需求,建议在再生砖混垫层上部设置透水垫层。

(2)水泥用量增加对RBCM抗压能力和破坏形态的改善很明显,当水泥掺量大于1%后,RBCM的无侧限抗压强度便能满足垫层设计要求,而抗压回弹模量和水稳级配碎石相当,可用拟合公式对两指标进行准确的相互预测。

(3)因胶结物质较少,低掺量下RBCM抗拉性能较差,但CBR远高于标准碎石;在浸水4d后,RBCM有轻微的膨胀变形,但满足道基均匀性的要求。

(4)RBCM的抗压强度随冻融循环和干湿循环次数增加而持续降低,掺入1%水泥即可大幅度提高RBCM的抗冻系数和软化系数;对于水稳RBCM,料料循环和试件循环在其残余抗压强度上不存在较大差异;可用MMF生长模型描述RBCM

残余抗压强度与冻融循环次数的关系,可用一次函数描述RBCM残余抗压强度与干湿循环次数的关系。

(5)现场试验段应用表明,即使不掺水泥,再生砖混垫层的密实度和力学性能也能满足现行垫层设计指标要求;当水泥掺量大于1%时,其强度远高于设计要求,RBCM-1%垫层的经济性较高;综合而言,1%~2%的水泥稳定再生砖混材料宜作为垫层设置在冻结深度较大、冻融频繁的机场。

作者贡献声明:

吴杰:试验,数据整理分析,论文撰写与修订。

赵咨洋:试验,数据整理分析,论文撰写与修订。

姜昌山:提出研究主题与论文思路。

曹正龙:试验监管与指导,结果验证与核实。

徐西永:技术咨询。

袁捷:文字校对,稿件修订。

参考文献:

- [1] 戚春香,李瑶,杨简,等.青藏高原机场跑道多年冻土地基温度场特征[J].交通运输工程学报,2019,19(1):33.
QI Chunxiang, LI Yao, YANG Jian, et al. Characteristics of temperature field of airfield runway permafrost subgrade in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 33.
- [2] 李子良,张栋,范涛,等.基于级配重组的骨架密实型水泥稳定砖混渣级配优化方法[J].交通科技,2023(5):133.
LI Ziliang, ZHANG Dong, FAN Tao, et al. Optimization method of slag gradation for skeletal dense cement stabilized brick construction based on gradation recombination [J]. Transportation Science & Technology, 2023(5): 133.
- [3] MENG T, LIAN S, YING K, et al. Feasibility study of cement-stabilized materials using 100% mixed recycled

- aggregates from perspectives of mechanical properties and microstructure [J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2021, 60(1): 490.
- [4] LIU J, LI J, LEI H, *et al.* Ground improvement of dredged fills with two improved vacuum preloading methods: case study [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 2022, 148(12): 05022008.
- [5] 王小明, 肖源杰, 杨涛, 等. 颗粒破碎和界面损伤对水稳再生骨料透水基层材料强度的控制机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(12): 4777.
WANG Xiaoming, XIAO Yuanjie, YANG Tao, *et al.* Controlling mechanism of particle crushing and interfacial damage on the strength of cement-stabilized recycled aggregate permeable base material [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(12): 4777.
- [6] 余其俊, 马婷, 张同生, 等. 再生砖粉粒径对水泥水化动力学与微结构发展的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(11): 63.
YU Qijun, MA Ting, ZHANG Tongsheng, *et al.* Effect of particle size on hydration kinetics and microstructure development of recycled brick powder-cement pastes [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2023, 51(11): 63.
- [7] YAN S, WANG B, MA J, *et al.* The effect of waste clay brick content on performance of cement-stabilized recycled concrete aggregate in pavement base and subbase applications [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(6): 04023135.
- [8] SU C, LI L. Study on strength enhancement factors of cement-stabilized recycled aggregate [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022: e9997483.
- [9] WANG T, SONG H, YUE Z, *et al.* Freeze - thaw durability of cement-stabilized macadam subgrade and its compaction quality index [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 160: 13.
- [10] ASTM International. Test method for wetting and drying test of solid wastes: D4843-88 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [11] HAFEEZ I, KAMAL M A, ISHAQ M A, *et al.* A laboratory-based research study to investigate the aggregate packing characteristics and its influence on asphaltic mixture's performance [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40(11): 3119.
- [12] 张俊, 翁兴中, 刘军忠, 等. 复合固化砂土力学及水稳性能试验研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(24): 115.
ZHANG Jun, WENG Xingzhong, LIU Junzhong, *et al.* Experimental study on mechanical and water stability of composite solidified sand [J]. *Materials Review*, 2014, 28(24): 115.
- [13] CEDERGGREN H R, O'BRIEN K H, ARAMN J A, *et al.* Guidelines for the design of subsurface drainage systems for highway structural sections [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1972.
- [14] 段川, 王腾, 邹晓翎. 基于空隙空间分布特征的沥青路面渗水成因分析[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(12): 1.
DUAN Chuan, WANG Teng, ZOU Xiaoling. Analysis of water seepage causes of asphalt pavement based on void spatial distribution characteristics [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(12): 1.
- [15] TRIPURA D D, SINGH K D. Behavior of cement-stabilized rammed earth circular column under axial loading [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(1): 371.
- [16] 周志刚, 王梓龙, 蒋少稀. 级配对低剂量水泥改性级配碎石性能的影响[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 15(4): 9.
ZHOU Zhigang, WANG Zilong, JIANG Shaoxi. Effect of graded low dose cement on performance of graded gravel [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 15(4): 9.
- [17] 尧俊凯. 湿陷性粉质黏土的组成成分及细观特征[J]. *铁道建筑*, 2019, 59(2): 46.
YAO Junkai. Composition and microscopic characteristics of collapsible silty clay [J]. *Railway Construction*, 2019, 59(2): 46.
- [18] HUANG F, HU Z, LI H, *et al.* Deformation mechanisms of cement paste with ultra-low water-to-cement ratios under different curing conditions at early ages [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 364: 129951.
- [19] LIU C, WANG D, WANG Z, *et al.* Dynamic splitting tensile test of granite under freeze-thaw weathering [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 140: 106411.
- [20] SUDDEEPONG A, INTRA A, HORPIBULSUK S, *et al.* Durability against wetting-drying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock [J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(2): 333.
- [21] 汤长西, 颜峰, 孔垂元, 等. 干湿循环下红砂岩颗粒崩解特性及微观机理研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(S2): 278.
TANG Changxi, YAN Feng, KONG Chuiyuan, *et al.* Study on particle disintegration characteristics and microscopic mechanism of red sandstone under dry and wet cycle [J]. *Materials Review*, 2023, 37(S2): 278.
- [22] WU J, ZHAO Z, JIANG C, *et al.* Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 449: 141832.
- [23] 王小兵. 沟管回填材料性能与工程应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2023.
WANG Xiaobing. Research on properties and engineering application of trench backfill materials [D]. Shanghai: Tongji University, 2023.