

DOI: 10.7672/sgjs2026040030

建筑垃圾再生材料在路基工程中的应用*

舒斌¹, 万世成¹, 张旭², 徐文源¹, 水亮亮³, 杨洲²

(1. 成都交通投资集团有限公司, 四川 成都 610041; 2. 成都交投资源循环利用有限公司, 四川 成都 610041; 3. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

[摘要] 建筑垃圾再生材料在道路路基中应用是实现建筑垃圾规模化资源利用和推动道路行业绿色低碳转型的重要途径。以成都三环路改造工程为依托, 通过开展再生材料指标设计、路基填筑施工工艺研究及施工过程质量控制和验收, 综合评估建筑垃圾再生材料在路基工程中应用的可行性和施工效果。研究表明: 再生材料的加州承载比(CBR值)超80%, 表明具有较高的材料强度和较大的强度富余; 当再生材料中细集料(粒径<4.75mm)含量由25.2%提升至30.8%, 其CBR值和最大干密度均有所提高, 且现场更易碾压密实, 有利于施工质量控制; 通过摊铺、洒水、闷料、碾压等工序施工后, 路基压实度和弯沉值均满足设计要求, 路基外观平整、均匀, 质量良好。

[关键词] 道路工程; 建筑垃圾; 再生材料; 路基; 压实度; 资源化

[中图分类号] TU997

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0030-05

Application of Construction Waste Recycled Materials in Subgrade Engineering

SHU Bin¹, WAN Shicheng¹, ZHANG Xu², XU Wenyuan¹, SHUI Liangliang³, YANG Zhou²

(1. Chengdu Communications Investment Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Chengdu Communications Investment Resource Recycling Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China;

3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The application of recycled construction waste materials in road subgrade is an important approach to enabling large-scale resource utilization of construction waste and promoting the green and low-carbon transformation of the road industry. Based on the Chengdu Third Ring Road reconstruction project, this study conducted performance index design for recycled materials, investigated subgrade filling construction techniques, and implemented quality control and acceptance during construction, in order to comprehensively evaluate the feasibility and field performance of recycled materials used in subgrade engineering. The results indicate that the recycled material achieved a California Bearing Ratio (CBR) exceeding 80%, demonstrating high strength and substantial strength reserve. When the fine aggregate proportion (particle size < 4.75mm) increased from 25.2% to 30.8%, both the CBR and the maximum dry density increased, and field compaction became easier, which is beneficial for construction quality control. After a series of procedures including spreading, watering, moisture conditioning, and rolling compaction, both the degree of compaction and deflection met the design requirements, and the constructed subgrade exhibited a uniform and smooth surface with overall good quality.

Keywords: road engineering; construction waste; recycled materials; subgrade; compaction degree; resource recycling

* 国家重点研发计划(2022YFC3803405); 上海市科学技术委员会资助项目(22DZ1208900); 上海交委科研项目(JT2024-KY009); 上海市住建委科研项目(沪建科2023-002-005); 上海市青年科技启明星项目(23QB1404600); 成都交通投资集团有限公司科技创新项目: 建筑垃圾在工程领域资源化利用技术研究

[作者简介] 舒斌, 工程师, E-mail: 502855721@qq.com

[通信作者] 徐文源, 高级工程师, E-mail: 377203802@qq.com

[收稿日期] 2025-08-26

0 引言

成都是我国西部地区重要的中心城市和成渝双城经济圈核心城市, 在其城市建设和快速更新过程中, 产生了大量建筑垃圾亟待处理。目前成都市建筑垃圾处置方式以工程渣土堆坡造景、场地填高

为主,而拆除垃圾经分选、除杂、破碎、筛分等工艺加工后所得再生材料的利用路径尚未打通,极大限制了成都市建筑垃圾资源化利用水平,阻碍城市人居环境高质量发展。

现有研究成果^[14]表明,将建筑垃圾再生材料用于道路工程是资源化利用的重要方向,尤其是用于填筑路基,具有消耗量大、利用率高等优势。2009年,上海虹桥综合交通枢纽工程建设中,针对项目范围内30余条道路的建设需求和预计产生的上百万方建筑垃圾外运,设计方创造性地提出并论证了建筑垃圾废弃物在路基、路面垫层和底基层利用的可行性^[5]。2013年,陕西省在西咸北环高速公路使用沿线拆迁产生的建筑垃圾填筑路基,打造国内首条在高速公路项目中规模化利用建筑垃圾的“生态环保示范路”^[6],加上之后的西安外环高速公路(南段)等工程^[7],陕西省成功应用再生材料总计1 365万m³,恢复建筑垃圾占地约9 000亩。2016年,北京首都大环线(大兴—通州段)采用项目周边的建筑垃圾进行路基填筑,消耗建筑垃圾约167万m³,缓解天然砂石紧缺的同时避免了资源浪费,取得了节约成本、减污降碳等显著效益^[8]。

随着西部地区交通路网不断完善,筑路材料需求持续旺盛。本文选取成致路跨三环路跨线桥节点改造工程(简称“三环路改造工程”)为背景工程,开展建筑垃圾再生材料在四川省道路工程中的首次应用,分析总结再生材料设计指标、施工技术和质量控制方法。

1 工程概况

本工程位于成都市成华区三环路成致路相交处,三环路主道为城市快速路,双向八车道,辅道为城市主干路,双向八车道;成致路为城市主干路,双向四车道。为缓解三环路成致路立交的交通转换压力,并分担城外高快速路网入城的车流,节点拟改造为半互通立交,新增匝道在成致路段并入主道跨线桥一起落地。改造道路荷载等级为城市A级,标准段拓宽约5.7m,交通等级为重交通,路基压实度 $\geq 96\%$,路基顶面回弹模量 $\geq 40\text{MPa}$ 。原设计方案中机动车道的路床顶面以下80cm使用级配良好的天然砂砾,经论证后调整方案,采用建筑垃圾再生材料替代天然砂砾填筑厚度80cm的路床,如图1所示。

2 路基用再生材料指标设计

本项目用建筑垃圾再生材料为成都市房屋拆除产生的固体废弃物经加工处理后所得,主要组分为混凝土块、砖块、砂浆及其产生的细料。鉴于目

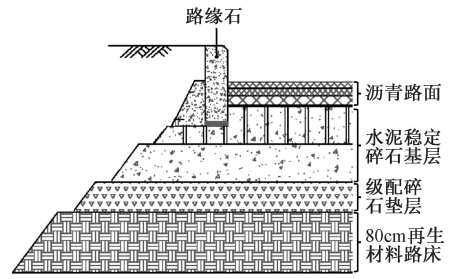


图1 再生材料路床填筑方案

Fig. 1 Roadbed filling scheme using recycled materials

前路基用建筑垃圾再生材料尚无国家标准,故参照CJJ 194—2013《城市道路路基设计规范》和JTG/T 2321—2021《公路工程利用建筑垃圾技术规范》进行再生材料指标设计。考虑到本项目为主城区道路改扩建工程,作业面狭小且地下管网密布,不具备利用羊足碾进行再生材料二次破碎和翻拌的施工条件^[9-10],要求再生材料最大粒径 $< 53\text{mm}$;为保证再生材料路基具有足够的强度和耐久性,要求再生混凝土颗粒含量 $\geq 30\%$ 。最终提出本项目路床用建筑垃圾再生材料的级配和技术指标,如表1、2所示。

表1 再生材料级配要求

Table 1 Gradation requirements for recycled materials

筛孔尺寸/mm	53.0	37.5	9.5	4.75	0.6	0.075
质量通过百分率/%	100	80~100	40~100	25~85	8~45	0~15

表2 再生材料技术指标

Table 2 Technical indices for recycled materials

技术指标	限值	试验方法
压碎值/%	≤ 40	T 0316
针片状颗粒含量/%	≤ 20	T 0312
再生混凝土颗粒含量/%	≥ 30	JTG/T 2321
0.075mm以下材料塑性指数	≤ 17	T 0118
有机质含量/%	< 2.0	T 0336
轻质杂物含量/%	≤ 1.0	JTG/T 2321
不均匀系数	≥ 5	T 0115
易溶盐含量/%	≤ 0.5	T 0153
CBR值/%	≥ 8	T 50123

注:再生混凝土颗粒是再生集中混凝土和石质颗粒的统称

3 再生材料路基施工技术

为保证施工质量,规范和指导再生材料路基施工工序和工艺,总体施工流程如图2所示。

3.1 施工准备

1) 建筑垃圾应以杂物含量少、均匀性好、无污染为优选原则。现场所用再生材料应与前期送检且质量合格的再生材料为同一料源、同一批次。当

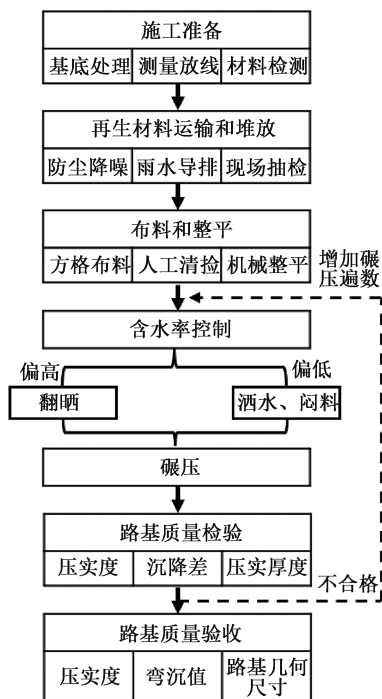


图2 再生材料路基施工流程

Fig. 2 Construction process for subgrade using recycled materials

料源或再生材料发生显著变化时,应重新取样送检,确保满足表1~2技术要求。

2)施工前,对基底进行清理、整平和压实,且在两侧做好排水措施,确保基底表面无积水,压实度满足设计要求(无设计要求时应 $\geq 90\%$);若存在浅层软弱地基换填,应采用透水性好的材料分层铺筑并逐层压实。

3)根据待摊铺路段尺寸、运输车装载量、松铺厚度、压实机械规格等参数,在施工现场划好卸料区域。

3.2 再生材料运输和堆放

1)再生材料运输宜采用厢式货车,或采用加盖篷布等措施防止水分散失、扬尘和抛撒。

2)需在施工场地临时露天堆放的再生材料应有效遮盖,堆放高度高出地坪不宜超过3m,四周宜设置排水沟。

3)对进场后的再生材料进行抽检,检测合格后方可使用。

3.3 布料和整平

1)将混合好的粗细集料均匀卸在待摊铺区域,倾卸角度宜 $< 30^\circ$,避免因物料离析造成摊铺不均。

2)同一水平层路基的全宽应采用同一料源、同一批次的再生材料,不得混合填筑。

3)采用推土机对再生材料进行初平,配合人工进一步拣除塑料、木块等轻质杂物。

4)初平后,采用平地机按25~30cm松铺厚度进行精平,然后采用钢轮压路机进行稳压;测定松铺厚度,厚度不满足时重复整平与稳压工序至满足要求。

5)对局部大颗粒集中区域由人工填充细料找平。

6)现场测定再生材料的天然含水率,为后续碾压阶段的含水率调整提供依据。

3.4 含水率控制和碾压

1)通过室内试验确定再生材料的最佳含水率。碾压时,再生材料含水率宜处于最佳含水率 $-1\% \sim 3\%$ 范围内,若实测含水率超过上述范围,应对再生材料进行翻晒;若实测含水率低于上述范围,宜将所需补水量分2次均匀洒布并闷料,具体方法如下:①第1次洒水为所需补水量的60%~70%,闷料2~4h,待路基表面风干不沾轮时,采用钢轮压路机静压1~2遍;②第2次洒水为所需补水量的30%~40%,闷料2~4h,待路基表面风干不沾轮时,继续碾压,直至满足要求。

2)再生材料分段填筑、分层压实,碾压工艺应符合以下规定:①钢轮压路机振动碾压的适宜频率为25~35Hz,振幅 $\geq 2\text{mm}$;②碾压按照先两边再中间、先轻后重、先慢后快和轮迹重叠的原则进行,压实路线纵向互相平行,横向接头重叠0.4~0.5m,前后相邻两区段纵向重叠2~5m,碾压参数如表3所示。

表3 再生材料路基碾压参数

Table 3 Rolling parameters for subgrade using recycled materials

阶段	碾压速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	碾压遍 数/遍	要求	机械类型 与规格
初压	25~33	1~2	静压	单钢轮振动
复压	33~67	≥ 5	先弱振再强振	压路机,自
终压	50~80	1~2	静压	重 $\geq 20\text{t}$

3.5 施工质量控制

再生材料路基质量控制要点包括材料品质、颗粒级配、施工参数和含水率等,施工过程中采用施工参数(压实功率、碾压速度、碾压遍数、铺筑厚度等)和施工质量检验(压实度、沉降差、弯沉值、外观等)双控制。再生材料路基检测项目、标准和频率应满足CJJ 1—2008《城镇道路工程施工与质量验收规范》,参照表4执行。

4 再生材料路基施工质量与分析

三环路改造工程路基施工共计使用两批次建筑垃圾再生材料,再生材料各项性能指标、施工参数、路基填筑质量及质量改善措施分析如下。

表 4 再生材料路基验收标准

Table 4 Acceptance standards for subgrade using recycled materials

项目	规定值	检测方法和频率
压实度/ %	≥96	灌砂法;每 1 000m ² 、每压实层抽检 3 点
沉降差	≤试验段确定的沉降差	精密水准仪;每 50m 检测 1 个断面,每个断面检测 5 点
弯沉	满足设计要求	弯沉仪;每条车道、每 20m 测 1 点
纵断高程/ mm	+10, -20	水准仪;每 200m 实测 2 个断面
中线偏位/ mm	≤50	全站仪;每 200m 测 2 点
宽度	满足设计要求	米尺;每 200m 测 4 处
平整度/ mm	≤20	3m 直尺;每 200m 测 2 处×5 尺

4.1 再生材料级配影响分析

本项目再生材料性能指标检测结果如表 5~7 所示。

表 5 再生材料性能实测值

Table 5 Measured performance values of recycled materials

项目	批次 1	批次 2	设计指标
压碎值/%	35.3	39.0	≤40
针片状颗粒含量/%	6.8	7.2	≤20
再生混凝土颗粒含量/%	44.6	41.9	≥30
0.075mm 以下材料塑性指数	6.6	8.8	≤17
有机质含量/%	1.95	1.75	<2
轻质杂物含量/%	0.21	0.27	≤1
不均匀系数	28.86	30.20	≥5
易溶盐含量/%	0.476	0.432	≤0.5
CBR 值/%	86.3	94.8	≥8

表 6 再生材料颗粒级配情况

Table 6 Particle size distribution of recycled materials

筛孔尺寸/mm	53.0	37.5	9.5	4.75	0.6	0.075
质量通过 批次 1	100	100	46.5	25.2	11.9	5.0
百分率/% 批次 2	100	100	40.8	30.8	16.4	6.1

表 7 再生材料标准击实试验结果

Table 7 Standard compaction test results for recycled materials

项目	批次 1	批次 2
最佳含水率/%	16.8	14.7
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.70	1.83

由表 5~7 可知,两批次再生材料所有技术指标均满足设计要求,其中,路床填料的关键指标 CBR 值分别为 86.3% 和 94.8%,表明再生材料具有较高的强度。颗粒级配方面,批次 1 的细颗粒 (< 4.75mm) 含量刚刚满足设计下限要求 (≥25%);为改善路基压实效果,本项目在批次 1 路基段完工后,

将批次 2 的粗、细集料比例进行了调整(细颗粒含量>30%)。研究结果显示,批次 2 再生材料虽然相较于批次 1 的混凝土颗粒含量略低,但具有更高的 CBR 值和最大干密度,在压实过程中,足量的细集料可填充粗集料之间的空隙,有助于形成强度高且稳定性好的骨架-密实结构。

三环路改造工程经验表明,适宜的粗、细集料比例对路床压实效果起到了有利影响,批次 2 路基段所用的压实功率更小、压实质量更佳,因此建议再生材料级配设计时,细集料含量宜≥30%;同时,考虑到粗集料有利于再生混合料形成强度^[11],建议同时限制细集料含量≤50%。

4.2 施工参数与碾压效果分析

三环路改造工程再生材料路基的施工参数、压实度和弯沉值等结果如表 8~10 所示。

表 8 再生材料路基施工参数

Table 8 Construction parameters for subgrade using recycled materials

施工参数	批次 1	批次 2
松铺系数	1.22	1.28
碾压遍数/遍	12~13	9~10

表 9 再生材料路基压实度

Table 9 Compaction degree of subgrade using recycled materials

组号	压实度/%					设计值
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	
批次 1	97.6	96.5	97.1	96.5	97.1	≥96
批次 2	97.8	96.7	97.3	97.8	96.2	

表 10 再生材料路基顶面弯沉值

Table 10 Surface deflection values of subgrade using recycled materials

组号	弯沉值(0.01mm)			变异系数/%
	平均值	代表值	设计值	
批次 1 路基段	163.2	219.5	≤232.9	17.2
批次 2 路基段	160.8	214.8	≤232.9	16.8

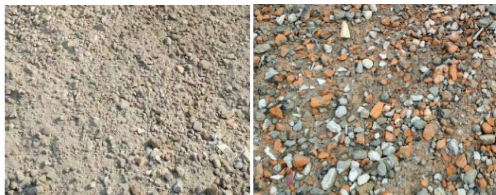
由表 8~10 可知,填筑路床的再生材料松铺系数为 1.22~1.28,与级配砂砾接近。路基压实度、路基顶面弯沉值均满足设计要求,施工质量良好。批次 1 再生材料需碾压 12~13 遍方可满足压实质量要求,而批次 2 再生材料仅需碾压 9~10 遍,表明其可压实性更好、施工成本更低。按照前文分析,这与提高细集料比例有关,即颗粒级配更加合理。

此外,两批次路基段的弯沉代表值均高于弯沉平均值,且变异系数较大,可能因素为:①再生材料组分复杂,且各组分之间物理性质差异较大;②路

基不同区域、不同批次再生材料的含砖量、粗细集料比例等情况存在差异。建议使用再生材料填筑路基时,一方面应控制再生材料组分稳定、级配良好,另一方面应严格做好施工过程管控,避免发生物料离析、含水量偏差大等问题。

4.3 路基压实质量改善措施

外观质量检查时,发现碾压后的路基表面部分区域出现了粗颗粒趋于集中的现象。经分析,原本粗细集料混合均匀的再生材料在经过第1次洒水闷料后,渗透深度达到3/4层厚,部分细集料随水流下渗至粗集料下方,使粗颗粒裸露于表面,进而造成“假离析”现象(见图3)。因此,在第2次洒水闷料结束后利用挖机对表层厚约10cm的再生材料进行翻拌后再碾压,即可使局部裸露的粗集料与下渗的细集料重新混合、碾压压实,较好地解决“假离析”问题,如图4所示。



a 洒水闷料前 b 洒水闷料后

图3 再生材料洒水闷料前后路基表面

Fig.3 Subgrade surface before and after watering and curing recycled materials



a 改善前 b 改善后

图4 再生材料路基“假离析”现象

Fig.4 “False segregation” phenomenon in subgrade using recycled materials

三环路改造工程施工作业期间,经历数次小雨天气,增加了路基质量控制的难度。再生材料路基不应雨天施工,当难以避免时需遵循:①对未摊铺的再生材料覆盖雨布;②对已摊铺路段快速碾压成型并及时覆盖;③对已完成压实后经历雨淋的路段,在摊铺下一层前对原路基稳压1~2遍。

最终,再生材料路基表面平整、均匀密实、无轮迹、无明显离析(见图5),各项指标满足设计和验收要求,实现了建筑垃圾再生材料在四川省道路工程首次应用,成功验证了再生材料用于道路路基技术可行且综合效益显著,为建筑垃圾规模化利用和城

市建筑垃圾系统治理提供了新路径。



图5 再生材料路基施工效果

Fig.5 Construction effects of subgrade using recycled materials

5 结语

1) 建筑垃圾再生材料中含有较多混凝土块、砖块等力学性能良好的硬质粒料,本研究中再生材料 CBR 值 $>80\%$,远高于现行规范对路基填料的强度指标要求,具有较大的强度富余。

2) 适宜的粗、细集料比例有利于建筑垃圾再生材料碾压压实,建议路基用再生材料中的细集料含量为 $30\% \sim 50\%$;同时,对于城市道路路床填筑,建议再生材料粒径 $<53\text{mm}$ 。

3) 再生材料路基的压实效果受含水率影响较大,应确保再生材料在最佳含水率附近碾压;针对2次洒水闷料后的“假离析”现象,建议对路基表层10cm进行翻拌碾压,使局部裸露的粗集料与少量下渗的细集料均匀混合,可改善压实质量。

参考文献:

- [1] 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.
ZHANG J H, DING L, ZHANG A S. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering: a review [J]. China journal of highway and transport,2021,34(10):135-154.
- [2] 李行,吴超凡,万暑,等. 建筑垃圾在路基回填料中的使用性能研究[J]. 中外公路,2019,39(1):253-256.
LI H, WU C F, WAN S, et al. Study on performance of construction waste in roadbed backfill materials [J]. Journal of China & foreign highway,2019,39(1):253-256.
- [3] 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.
XIAO Q H, LIU S L, QIU J S, et al. Application of construction and demolition waste in subgrade filling [J]. Science technology and engineering,2023,23(11):4502-4513.
- [4] 邱坪贵,赵宇阳,黄文金,等. 建筑垃圾混合料路用性能研究及其应用[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(3):200-205,216.
QIU P G, ZHAO Y Y, HUANG W J, et al. Application and research on road performances of construction waste recycling materials [J]. Journal of water resources and architectural engineering,2022,20(3):200-205,216.

- 76-79.
- ZHU H C, MA X L, ZHANG X L. Analysis and suggestion on the influence of temperature plunge on the deformation of concrete internal support structure system [J]. *Guangdong architecture civil engineering*, 2024, 31(9): 76-79.
- [2] 彭晓光. 西北干旱地区深基坑支护温度效应研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- PENG X G. Research on temperature effect of deep foundation pit retaining in arid area of Northwest China [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [3] 秦杏春. 饱和软黄土层深基坑支护与降水施工技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(13): 115-119.
- QIN X C. Construction technology of deep foundation excavation support and dewatering in saturated soft loess stratum [J]. *Construction technology*, 2024, 53(13): 115-119.
- [4] 任文峰, 赵鹏飞, 黄勤, 等. 冻融循环对长春典型土层深基坑开挖变形及稳定性影响分析[J]. *建材技术与应用*, 2024(1): 26-31.
- REN W F, ZHAO P F, HUANG Q, et al. Analysis of effects of freeze-thaw cycles on deformation and stability of deep foundation pit excavation in typical soil layers in Changchun [J]. *Research & application of building materials*, 2024(1): 26-31.
- [5] 韦钦闯, 孙超, 郭浩天, 等. 长春市某越冬深基坑桩锚支护结构受力变形监测与数值模拟对比分析[J]. *吉林建筑大学学报*, 2024, 41(1): 67-71.
- WEI Q C, SUN C, GUO H T, et al. Comparative analysis of stress deformation monitoring and numerical simulation of pile-anchor supporting structure of a deep foundation pit in winter in Changchun [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2024, 41(1): 67-71.
- [6] 何彦伟, 黄杰. 饱和软黄土地区深基坑支护施工技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(8): 97-102.
- HE Y W, HUANG J. Construction technology of deep foundation excavation support in saturated soft loess low area [J]. *Construction technology*, 2025, 54(8): 97-102.
- [7] 张新, 邵伟汉, 王俊增. 超深基岩基坑分段支护及底板抗浮控制技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(12): 154-161.
- ZHANG X, SHAO W H, WANG J Z. Segmented support of the ultra-deep bedrock foundation excavation and anti-floating control technology of bottom plate [J]. *Construction technology*, 2024, 53(12): 154-161.
- [8] 徐长剑, 李大华, 刘一博, 等. 大跨度下基坑支护结构体系受力及变形分析[J]. *兰州工业学院学报*, 2024, 31(5): 35-41.
- XU C J, LI D H, LIU Y B, et al. Stress and deformation analysis of a large-span support structure system [J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2024, 31(5): 35-41.
- [9] 何林南. 软土地区某复杂边界条件深大基坑支护设计与分析[J]. *建筑施工*, 2024, 46(10): 1687-1692.
- HE L N. Study and analysis of complex deep foundation pit support with complex boundary conditions in soft soil area [J]. *Building construction*, 2024, 46(10): 1687-1692.
- [10] 赖汶龙, 樊东昌, 蒋倩. 深基坑施工过程中支护结构变形分析[J]. *砖瓦*, 2024(10): 77-79.
- LAI W L, FAN D C, JIANG Q. Deformation analysis of supporting structure during deep foundation pit construction [J]. *Brick-tile*, 2024(10): 77-79.
- (上接第 34 页)
- [5] 张胜, 吕仁杰, 黄岩. 建筑废弃物在虹桥综合交通枢纽工程中的应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2009(8): 210-213.
- ZHANG S, LÜ R J, HUANG Y. Application of building waste matters in Hongqiao comprehensive traffic hub project [J]. *Urban roads bridges & flood control*, 2009(8): 210-213.
- [6] LIU L L, LI Z, CAI G J, et al. Humidity field characteristics in road embankment constructed with recycled construction wastes [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 259: 120977.
- [7] 张志跃, 杨军强, 魏振国, 等. 建筑垃圾在高速公路上的应用研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(4): 46-48, 61.
- ZHANG Z Y, YANG J Q, WEI Z G, et al. Research on the application of construction waste on expressways [J]. *Construction technology*, 2022, 51(4): 46-48, 61.
- [8] ZHANG J H, 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.
- [9] 高志兴. 建筑垃圾路基填筑技术[J]. *城市道桥与防洪*, 2020(1): 30-33, 9-10.
- GAO Z X. Construction waste subgrade filling technology [J]. *Urban roads bridges & flood control*, 2020(1): 30-33, 9-10.
- [10] 胡栾乔, 谭强, 朱曙光. 大吨位、高激振力压路机应用于红砂岩、泥岩路基填筑施工技术[J]. *工程建设与设计*, 2021(2): 202-203.
- HU L Q, TAN Q, ZHU S G. The application of large tonnage and high exciting force roller in red sandstone and mudstone subgrade filling construction technology [J]. *Construction & design for project*, 2021(2): 202-203.
- [11] 谢军, 房格莉, 魏振国. 建筑垃圾粗骨料含量对路用性能的影响与工程应用[J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(10): 101-106.
- XIE J, FANG G L, WEI Z G. Influence of coarse aggregate content of construction waste on road performance and engineering application [J]. *Construction technology*, 2022, 51(10): 101-106.