

# 建筑垃圾改良膨胀土填筑路基可行性研究

周志清, 王定鹏

(中冶南方城市建设工程技术有限公司, 湖北 武汉 430200)

**摘要:** 通过三种粒料级配组合的建筑垃圾按照 0%、20%、30%、40%、50% 的比例掺入到膨胀土后进行室内试验, 分析试样的 CBR 力学特性和胀缩特性。结果表明: 一定比例掺量的建筑垃圾可以提高膨胀土的 CBR 强度特性以及降低其胀缩; 相同掺比时不同的粒级组合起到的效果不同, 而粒级组合相同时, 不同的建筑垃圾掺比改良效果亦不同。当压实度满足规范要求, 选择合理的粒级组合和掺比时, 建筑垃圾改良膨胀土满足公路路基材料强度要求及胀缩总率的要求。根据室内试验结果进行现场路基填筑, 结果表明建筑垃圾改良膨胀土方法科学、可行。

**关键词:** 建筑垃圾; 膨胀土; 掺比; 级配; CBR; 胀缩特性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)05-0716-07

## Feasibility study on filling roadbed with expansive soil improved by construction waste

ZHOU Zhiqing, WANG Dingpeng

(MCC South Urban Construction Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

**Abstract:** The construction waste through the combination of three kinds of granule gradation is mixed with expansive soil at a ratio of 0%, 20%, 30%, 40%, and 50%, and then an indoor test is conducted to analyze the CBR mechanical properties and expansion and contraction properties of the sample. The results show that a certain proportion of construction waste can improve the CBR strength characteristics of the expansive soil and reduce its expansion and contraction; with the same mixing ratio, different particle size combinations have different effects, and with the same particle size combination, the improvement effect of different construction waste mixing ratio is also different. When the degree of compaction meets the requirements of the specification and a reasonable particle size combination and mixing ratio are selected, the improved expansive soil of construction waste meets the strength requirements of the roadbed materials and the requirements of total expansion and contraction rate. The site subgrade is filled according to the results of indoor tests, and the results show that the method of improving expansive soil by construction waste is scientific and feasible.

**Key words:** construction waste; expansive soil; mixing ratio; gradation; CBR; expansion and contraction characteristics

膨胀土是因历史地质作用形成的一种特殊性黏土, 呈灰白、灰黄、棕红、褐黄等色状, 其矿物成分以强亲水性蒙脱石、伊利石为主<sup>[1]</sup>。遇水易膨胀软化、强度衰减, 失水易收缩开裂; 具有显著的胀缩性和多裂隙性, 浅层破坏多发<sup>[2]</sup>。针对膨胀土的工程特性, 李妥德<sup>[3]</sup>对采用矿渣复合料改良膨胀土的工程特性进行了研究, 结果表明: 掺入矿渣无机料改良膨胀土的方法是经济可行的。庄心善<sup>[4]</sup>等通过对风化砂改良后的膨胀土进行无荷膨胀率和三轴试验, 找出膨胀土膨胀率、粘聚力和

内摩擦角随风化砂掺量的变化规律, 确定最佳掺砂比。陈善雄<sup>[5]</sup>、刘广武<sup>[6]</sup>、李建宁<sup>[7]</sup>等探讨了膨胀土的石灰类改性剂改性技术。贺行洋<sup>[8]</sup>等在对影响膨胀土胀缩性的因素研究后, 对工程中现有膨胀土固化方法耐久性较差的原因进行了说明。唐咸远<sup>[9]</sup>等采用不同化学改良材料对不同路段膨胀土进行改良试验, 通过分析不同改良土有关胀缩、强度试验数据对比说明不同改良材料对膨胀土的效果及适应性。此外, 膨胀土处理方法还有路基保湿法<sup>[10-11]</sup>、换土法<sup>[12]</sup>、桩基础<sup>[13-14]</sup>等。

收稿日期: 2020-12-17

修改稿日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077625)

第一作者: 周志清(1993—), 男, 硕士, 从事公路桥梁施工管理。E-mail: 249284220@qq.com

随着我国城市化进程的加快,人们从事建设、拆迁、装修等生产活动越来越多。而这些活动中往往伴随着产生大量的渣土、砖块、混凝土等建筑垃圾。目前,中国建筑垃圾的处理方式较为落后,对社会环境造成不利影响。将建筑垃圾按一定比例掺入到膨胀土中的物理改良法一方面可起到降低膨胀土路基胀缩特性、降低其毛细作用,另一方面也可起到提高路基强度特性及其透水性,起到“变废为宝”的效果。

作为路基填料其 CBR 强度必须满足规范要求,此外,膨胀土若用作路基填料其胀缩特性亦需满足要求,因此,本文主要针对建筑垃圾混合土的强度以及胀缩特性进行研究。

1 试验材料

试验用土取自荆州城北复兴大道第一分部,土样取回后,按照《公路土工试验规程》<sup>[15]</sup>进行了

土粒基本物理性质指标以及胀缩特性等试验,结果见表 1~2。

依据《膨胀土地区建筑技术规范》<sup>[16]</sup>自由膨胀率判别标准、《公路路基设计规范》<sup>[17]</sup>中的胀缩总率、标准吸湿含水率判别标准、李生林<sup>[18]</sup>塑性图判别方法等最终判定土样为弱膨胀土,故需经过处理后才可用于路基填筑。

建筑垃圾取自第一分部沿线房屋拆迁所产生的混合物,主要成分为:砖渣含量 50%左右,混凝土块及碎屑含量 49%左右,陶瓷钢筋等含量 0.7%左右,轻物质含量 0.3%左右,对杂物进行清捡,破碎处理后,分别过筛 40 mm(圆孔筛)、31.5 mm、19 mm、9.5 mm、选择方孔筛<sup>[19]</sup>分成四种粒组。下文中分别称为①、②、③、④粒组。按《公路工程集料试验规程》<sup>[20]</sup>对其进行了原材料试验,主要包括各成分含量、材料密度、吸水率、液塑限测定等。试验结果如表 3。

表 1 土粒基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical properties of soil particles

土粒比重 $G_s$	含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_P$	CBR/ $\%$	最大干密度 $\rho_{d_{max}}/(g \cdot cm^{-3})$	最佳含水率 $w/\%$
2.70	20.2	41.5	19.6	21.9	0.99	1.83	17.3

表 2 土粒胀缩特性指标

Tab. 2 Expansion and shrinkage characteristics of soil particles

自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	无荷膨胀 $\delta_e/\%$	有荷膨胀率 $\delta_{ep}/\%$	膨胀力 $P_e/kPa$	缩限 $w'_a/\%$	收缩系数 $c_{sL}$	标准吸湿含水率 $w_a/\%$	胀缩总率 $e_{ps}/\%$
42	12.50	1.08	267.7	11.5	0.24	3.32	0.85

表 3 建筑垃圾再生料原材料试验

Tab. 3 Raw material test of construction waste recycled materials

项目	表观密度 $\rho_a/(g \cdot cm^{-3})$	表干密度 $\rho_s/(g \cdot cm^{-3})$	毛体积密 $\rho_b/(g \cdot cm^{-3})$	吸水率 $w_x/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	粒组/mm			
							①	②	③	④
砖混集料	2.48	2.11	1.87	13.3	27.8	7.9	0~9.5	9.5~19	19~31.5	31.5~40

注:液塑限试验所用样品为再生细集料中粒径小于 0.5 mm 的部分

2 试验方案

配置 3 种粒级组合:粒级组合 I(由单粒组③组成)、粒级组合 II(由单粒组②组成)、粒级组合 III(由粒组①、④按照 5:5 比例组成),将 3 种建筑垃圾粒级组合再按照 0%、20%、30%、40%、50%、的质量百分数掺到素土中,由重型击实试验得到试样。称量计算干密度后,进行浸水饱和并记录试样膨胀量,饱和后进行贯入试验测得 CBR<sub>5.0</sub>。按照 13 种组合最佳含水率、压实度 94%称料取样,每组 3 个试样,然后利用万能材料实验

仪静压成型,将所得试样按照 CBR 试验方式进行浸水 3 d 饱和,并记录读取试样的浸水膨胀量,12 组掺建筑垃圾混合土试样按照各自膨胀量与 0%掺比素土试样膨胀量比例近似换算胀缩总率,浸水饱和后按照《公路土工试验规程》<sup>[15]</sup>进行 CBR 试验。

3 试验结果及分析

3.1 建筑垃圾改良土击实试验结果

对 13 组试样进行重型击实试验,得到各自最佳含水率、最大干密度如表 4 所示。

表 4 建筑垃圾土击实试验结果

Tab. 4 Soil compaction test results of construction waste

项目	素土		粒级组合Ⅰ					粒级组合Ⅱ				粒级组合Ⅲ			
掺量比例/%	0	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50		
最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	1.810	1.832	1.843	1.852	1.814	1.812	1.821	1.833	1.822	1.821	1.836	1.837	1.824		
最佳含水率/%	17.8	14.1	12.7	11.9	10.7	14.5	13.3	12.4	11.2	14.2	13.0	12.1	10.8		

由表 4 可知:对比素土、建筑垃圾土的干密度稍有增加,这是因为建筑垃圾的掺入会在试样内部形成粗骨架作用,而膨胀土起到填充作用,混合土级配较素土更优,因此最大干密度略有上升.对比同一粒级组合看出 3 种建筑垃圾粒级组合改良土在建筑垃圾掺量为 20%~40%时,随着建筑垃圾掺量的增加,试样最大干密度递增,当掺量超过 40%时,最大干密度出现明显减小趋势.并且当掺量为 50%时,干密度骤降,说明当建筑垃圾含量过高,

试样内部骨架孔隙过大,土体比例过小,骨架孔隙没有得到有效填充<sup>[21]</sup>.此外建筑垃圾土最佳含水率较素土降低,并随着掺比的增加而降低,对比不同粒级组合,相同掺比时粒级组合 I 最佳含水率最低,这是因为土样最佳含水率与土粒粒径有关,相对粒径越大,最佳含水率越小<sup>[22]</sup>.

### 3.2 CBR 试验结果

由重型击实 100% 压实度试样及静压成型 94% 压实度试样  $\text{CBR}_{5.0}$  如下表 5 及图 1~2 所示.

表 5 CBR 试验结果

Tab. 5 CBR test results

项目	素土		粒级组合Ⅰ					粒级组合Ⅱ					粒级组合Ⅲ		
掺量比例/%	0	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50		
CBR <sub>5.0</sub> (100%压实度)/%	0.99	7.81	11.6	17.8	16.3	4.02	6.03	13.2	14.1	6.92	11.3	16.2	15.3		
CBR <sub>5.0</sub> (94%压实度)/%	0.62	5.62	7.89	10.7	10.8	3.12	4.38	8.58	9.73	5.11	7.91	10.2	10.3		

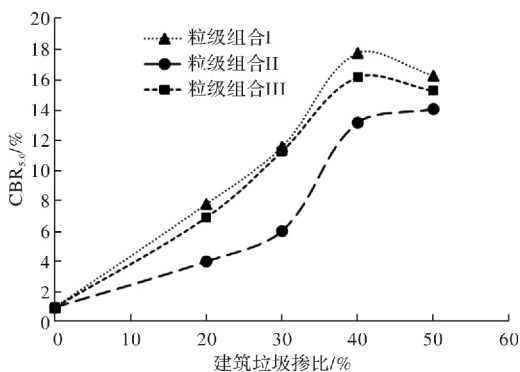


图 1 重型击实试样  $\text{CBR}_{5.0}$  与掺比关系

Fig. 1 The relationship between  $\text{CBR}_{5.0}$  and mixing ratio of heavy compacted sample

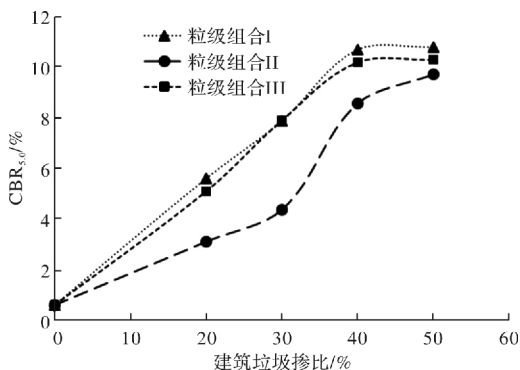


图 2 静压成型试样  $\text{CBR}_{5.0}$  与掺比关系

Fig. 2 The relationship between static pressure forming sample  $\text{CBR}_{5.0}$  and mixing ratio

由表 5 及图 1~2 可知:静压成型建筑垃圾土 CBR 强度较素土明显提高,且 3 种建筑垃圾粒级组合掺量为 20%~50%时,  $\text{CBR}_{5.0}$  呈现递增,而当掺量大于 40%时  $\text{CBR}_{5.0}$  虽然仍然增加,但是增加的趋势较之前有所减缓,这是因为建筑垃圾粒级组合改良膨胀土强度特性主要依赖于建筑垃圾的骨架效应,50% 建筑垃圾掺量时,改良土中建筑垃圾骨架作用增加,但是土体比例过小,骨架孔隙没有得到有效填充,这从击实试验结果 50% 建筑垃圾掺比时最大干密度减小可验证.重型击实建筑垃圾土 CBR 强度高于静压成型建筑垃圾土,但 CBR 强度随建筑垃圾掺比的变化趋势两者有所不同,原因可能是成型方式不同,内部建筑垃圾骨架作用不同从而对膨胀土的膨胀约束效果不同,浸水后膨胀量也不同,因此 CBR 变化趋势不同.

荆州城北快速路设计标准为一级公路,《公路路基设计规范》<sup>[17]</sup> 中一级公路对于路基填料 CBR 值及压实度要求如下表 6 所示.

表 6 路基不同部位 CBR、压实度要求值

Tab. 6 CBR and compaction requirements for different parts of subgrade

路基部位	下路堤	上路堤	下路床	上路床
填料最小强度(CBR)/%	$\geq 3$	$\geq 4$	$\geq 5$	$\geq 8$
压实度/%	$\geq 93$	$\geq 94$	$\geq 96$	$\geq 96$

对比表 5、6 可知: 建筑垃圾土在规范要求压实度时 CBR 强度满足路堤要求(除粒级组合 II 20% 掺比时不满足上路堤要求), 压实度满足规范要求时粒级组合 I 建筑垃圾掺比为 30%~50%, 粒级组合 II 掺比 40%~50%, 粒级组合 III 掺比 30%~50%, CBR 强度能达到路床要求。因此, 建筑垃

圾改良后膨胀土在一定压实度且建筑垃圾配、掺比合理时材料 CBR 强度可以达到规范要求。

3.3 膨胀量试样结果

试样浸水饱和膨胀量测量结果如下表 7, 图 3~4 所示。

表 7 膨胀量记录结果

Tab. 7 Recording results of expansion

项目	素土		粒级组合Ⅰ				粒级组合Ⅱ				粒级组合Ⅲ			
掺量比例/%	0	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50	
膨胀量(100%压实度)/mm	5.40	3.39	2.73	1.67	1.87	4.11	3.42	2.72	2.31	3.79	3.15	2.40	2.21	
膨胀量(94%压实度)/mm	4.45	3.11	2.75	2.25	1.88	3.50	3.15	2.70	2.30	3.22	2.84	2.32	1.94	

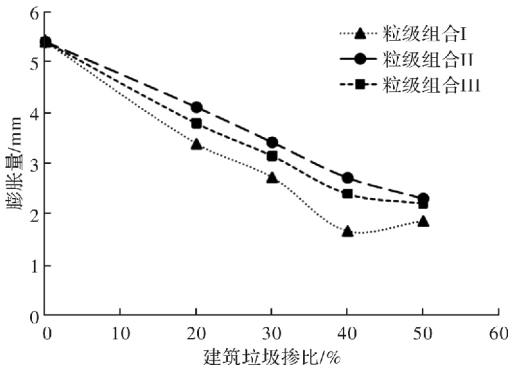


图 3 重型击实试样膨胀量与掺比关系

Fig. 3 The Relationship between expansion and mixing ratio of heavy compacted specimen

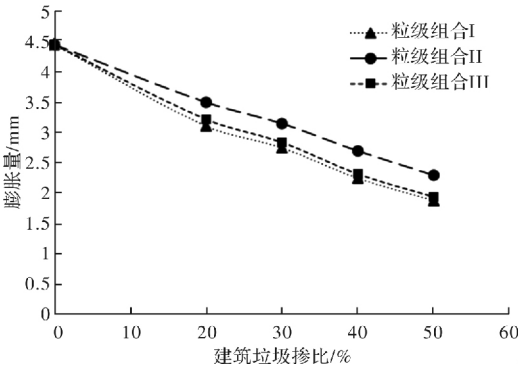


图 4 静压成型试样膨胀量与掺比关系

Fig. 4 The relationship between expansion and mixing ratio of hydrostatically formed samples

由表 7 及图 3~4 可知: 建筑垃圾的掺入显著降低了膨胀土的膨胀特性, 这是因为一方面建筑垃圾的掺入使土体中膨胀土比例降低, 导致膨胀量降低, 另一方面建筑垃圾骨架对膨胀土起到抑制膨胀作用。此外粒级组合 II、III 由击实所得试样建筑垃圾掺比 20%~50% 时膨胀量随着建筑垃圾掺比的增加膨胀量降低, 粒级组合 I 超过 40% 后膨胀量稍有增加, 原因可能是因为粒级组合 I 建筑垃圾掺比达到 50% 时, 干密度较小, 内部空隙较大, 粗骨架之间联结作用减弱, 对膨胀土的约束作用降低。而由静压成型试样膨胀量随着建

筑垃圾掺比的增加膨胀量一直降低, 出现这种情况的原因可能是因为击实、静压成型试样内部建筑垃圾粗骨架结构不同: 击实过程中试样内部建筑垃圾破碎、粒级重组、移动、嵌固等现象更为显著, 粗骨料之间的摩擦-咬合力更显著, 抑制膨胀作用更明显。

建筑垃圾土胀缩总率按式 1 换算: 最终换算结果整理如图 5~6, 表 8 所示。

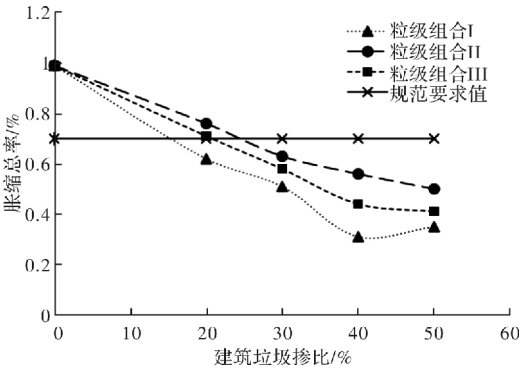


图 5 重型击实试样胀缩总率与掺比关系

Fig. 5 The relationship between the total expansion and contraction ratio of the heavy compacted sample and the mixing ratio

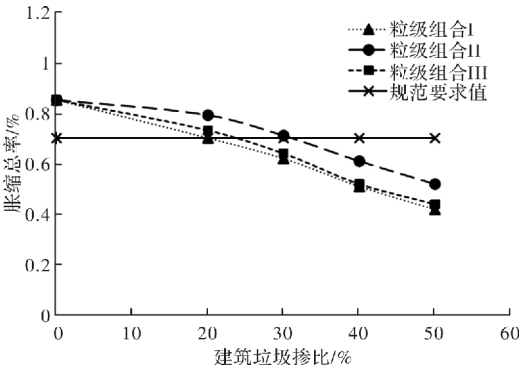


图 6 静压成型试样胀缩总率与掺比关系

Fig. 6 The relationship between the total expansion and contraction ratio of the static pressure forming sample and the mixing ratio

表8 建筑垃圾土胀缩总率换算结果

Tab. 8 Conversion results of total expansion and contraction rate of construction waste

项目	素土		粒级组合Ⅰ			粒级组合Ⅱ				粒级组合Ⅲ			
掺量比例/%	0	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50
胀缩总率(100%压实度)/%	0.99	0.62	0.51	0.31	0.35	0.76	0.63	0.56	0.50	0.71	0.58	0.44	0.41
胀缩总率(94%压实度)/%	0.85	0.70	0.62	0.51	0.42	0.79	0.71	0.61	0.52	0.73	0.64	0.52	0.44

$$e'_{ps} = \frac{l_1}{l_2} \times e_{ps} \quad (1)$$

式中： $e'_{ps}$ 为建筑垃圾土胀缩总率； $l_1$ 为建筑垃圾土膨胀量； $e_{ps}$ 为素土胀缩总率； $l_2$ 为素土膨胀量。

由表8及图5、6可知：由重型击实试验所得试样胀缩总率除粒级组合II与粒级组合III中20%掺比大于《公路路基设计规范》<sup>[17]</sup>要求值0.7%，其余粒组胀缩总率均满足要求，而由静压成型所得试样胀缩总率较重型击实所得试样更大，但也基本满足规范要求不大于0.7%（除粒级组合II中20%、30%与粒级组合III中20%掺比），在实际工程中路基的碾压是采取振动与静压结合的方式进行，因此路基胀缩总率取由重型击实试验所得试

样更符合工程实际。因此可说明建筑垃圾改良后膨胀土在合理粒料级配及掺比时胀缩特性上可以达到规范要求。

## 4 工程实例

项目工程实例为荆州城北快速路一分部，试验段长度100 m，宽度15 m。路堤厚度50 cm，建筑垃圾掺比30%、压实度按照94%控制。路床80 cm，建筑垃圾掺比40%、压实度按照96%控制，路床顶面设计弯沉值194 mm、回弹模量40 MPa。建筑垃圾在现场加工破碎，技术指标如表9所示。

表9 现场建筑垃圾筛分结果

Tab. 9 Screening results of on-site construction waste

粒径/mm	40	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100	98.6	94.42	90.53	84.86	79.26	69.67	61.52	54.18	37.86	27.84	18.18	14	10.5	6.78

建筑垃圾现场破碎加工后与膨胀土拌和闷料24 h，闷料完成后采用自卸车运送到试验路段，摊铺均匀后（视干湿程度进行洒水或晾晒），采用路拌机拌和，然后采用26 t钢轮压路机进行压实，现场碾压技术参数如表10所示。

路堤分两层铺设碾压、路床分四层铺设碾压。每层碾压完成后进行压实度检测，检测结果如表11所示。

表10 现场路基碾压技术参数

Tab. 10 Technical parameters of on-site roadbed rolling

阶段	压路机型号	碾压速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	碾压遍数	工艺要求
初压	26t 钢轮压路机	40	1遍	静压
复压	26t 钢轮压路机	45	4遍	先弱振1遍，再强振3遍
终压	26t 钢轮压路机	50	1遍	静压

表11 现场压实度检测结果

Tab. 11 On-site compaction test results

桩号	实测压实度/%					
	路堤一	路堤二	路床一	路床二	路床三	路床四
K8+020	95.1	95.6	97.3	96.7	97.5	98.7
K8+035	94.2	95.2	98.2	97.2	97.4	98.2
K8+050	94.8	95.7	96.5	97.1	97.8	98.4
K8+070	94.6	94.8	97.6	97.6	98.1	98.1
设计压实度/%	94.0	94	96	96	96	96

由表11可知：路堤、路床各分层压实度指标均满足规范要求。路床顶面施工完成后3 d进行了现场回弹弯沉试验，总检测了两个车道，每车道

检测7个点。检测结果及回弹模量换算结果如表12所示。

表 12 路床顶面回弹弯沉检测结果一览表(0.01 mm)

Tab. 12 List of detection results of rebound deflection on the top surface of road bed (0.01 mm)

序号 检测位置	路床顶面			
	左辅道一车道		左辅道二车道	
	左轮	右轮	左轮	右轮
实测值弯沉值 1	101	80	98	106
实测值弯沉值 2	97	88	86	100
实测值弯沉值 3	90	56	87	90
实测值弯沉值 4	93	68	79	90
实测值弯沉值 5	87	116	93	80
实测值弯沉值 6	84	104	107	98
实测值弯沉值 7	108	84	88	102
平均弯沉值	94.3	85.1	91.1	95.1
标准差	7.74	18.8	8.48	8.27
代表弯沉值	107.0	116.0	105.0	108.7
换算回弹模量	82.3	91.2	85.2	81.6

由表 12 可知, 试验路路床顶面弯沉值满足设计要求, 路床顶面换算回弹模量达到设计要求。

## 5 结论

本文通过 3 种粒级组合及不同掺比建筑垃圾改良膨胀土的一系列室内物理、力学指标、胀缩特性试验进行建筑垃圾改良膨胀土可行性研究, 得出以下结论:

(1)建筑垃圾掺入膨胀土中可提高膨胀土 CBR 强度, 建筑垃圾土 CBR 随着建筑垃圾掺量的增加而升高。当建筑垃圾掺量较低时, CBR 强度可满足路堤填料要求, 而当掺量达到 40%、50% 时, 建筑垃圾混合土 CBR 强度甚至可满足路床要求;

(2)建筑垃圾掺入膨胀土中可显著降低膨胀土胀缩特性, 随着掺比的增加效果越好。不同的粒级组合在掺比相同时, 改良效果不同, 对比发现粒级组合 I 改良效果最好。3 种粒级组合掺比分别达到 20%、30%、30% 及以上时, 胀缩总率低于 0.7%, 满足规范要求;

(3)当按照设计要求, 严格施工时, 建筑垃圾改良土路基弯沉值及回弹模量可达到路基设计要求值, 因此建筑垃圾改良膨胀土方法在工程中切实可行。

## 参考文献 References

[1] 陈善雄, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土工程特性及其石灰改性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(S): 9-12.  
CHEN Shanxiong, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Engineering characteristics of expansive soil and experimental study on lime modification[J]. Rock and Soil

Mechanics, 2002, 23(S): 9-12.  
[2] 陈晓静, 陈亮, 李昆朋. 气候环境影响下的膨胀土裂隙试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 35-39, 50.  
CHEN Xiaojing, CHEN Liang, LI Kunpeng. Experimental research on expansive soil cracks under the influence of climate environment[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition), 2020, 42(3): 35-39, 50.  
[3] 李妥德, 赵中秀. 用矿渣复合材料改良膨胀土的工程性质[J]. 岩土力学, 1993, 15(5): 11-23.  
LI Tuode, ZHAO Zhongxiu. Improving the engineering properties of expansive soil with slag composite materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 15(5): 11-23.  
[4] 庄心善, 王子翔. 风化砂改良膨胀土无荷膨胀率及强度特性试验研究[J]. 公路, 2018, 9(9): 248-252.  
ZHUANG Xinshan, WANG Zixiang. Experimental study on unloaded swelling rate and strength characteristics of expansive soil improved by weathered sand[J]. Highway, 2018, 9(9): 248-252.  
[5] 陈善雄, 李伏保, 孔令伟. 弱膨胀土工程特性及路基处治对策[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 353-359.  
CHEN Shanxiong, LI Fubao, KONG Lingwei. Engineering characteristics of weak expansive soil and road-bed treatment countermeasures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 353-359.  
[6] 刘广武. 安阳装甲兵团道路膨胀土路基处理技术研究[J]. 华东公路, 2003(2): 32-35.  
LIU Guangwu. Research on the treatment technology of expansive soil roadbed in Anyang armored corps[J]. East China Highway, 2003(2): 32-35.  
[7] 李建宇, 谢宝玉. 宁夏膨胀土地区筑路技术研究[J]. 交通标准化, 2003(11): 22-26.  
LI Jianyu, XIE Baoyu. Research on road construction technology in expansive soil areas in Ningxia[J]. Transportation Standardization, 2003(11): 22-26.  
[8] 贺行洋, 陈益民, 张文生. 膨胀土化学固化现状及展望[J]. 硅酸盐学报, 2003, 21(11): 1101-1106.  
HE Xingyang, CHEN Yimin, ZHANG Wensheng. Current status and prospects of chemical solidification of expansive soils[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2003, 21(11): 1101-1106.  
[9] 唐咸远, 李迎春, 罗得把. 南宁膨胀土化学改良的路用性能试验研究[J]. 公路, 2015, 2(2): 169-174.  
TANG Xianyuan, LI Yingchun, LUO Deba. Experimental study on road performance of chemically improved expansive soil in Nanning[J]. Highway, 2015, 2(2): 169-174.

- [10] 李建宇,谢宝玉,徐永福. 膨胀土路基的加固方法[J]. 江苏交通工程,1997(6):14-17.  
LI Jianyu, XIE Baoyu, XU Yongfu. Reinforcement method of expansive soil roadbed[J]. Jiangsu Traffic Engineering,1997(6):14-17.
- [11] 徐永福. 膨胀土地基处理方法[J]. 河海大学学报,1998,26(6):26-30.  
XU Yongfu. Treatment method of expansive soil foundation[J]. Journal of Hohai University,1998,26(6):26-30.
- [12] 王明芳. 砂石垫层在软弱地基及膨胀土地基处理中的应用[J]. 皖西学院学报,2005,21(2):84-85.  
WANG Mingfang. The application of sand-gravel cushion in the treatment of soft foundation and expansive soil[J]. Journal of West Anhui University,2005,21(2):84-85.
- [13] 卢其凯. 膨胀土地基桩基工程中桩型的选择[J]. 土工基础,1997,11(4):30-32.  
LU Qikai. Selection of pile type in pile foundation engineering of expansive soil[J]. Geotechnical Foundation,1997,11(4):30-32.
- [14] 周光孔. 钻孔砂桩对膨胀土地基改性研究[J]. 广西土筑,1993,18(3):111-119.  
ZHOU Guangkong. Research on the modification of swelling soil foundation by bored sand piles[J]. Guangxi Soil Engineering,1993,18(3):111-119.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程:JTG E40-2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Highway geotechnical test regulations:JTG E40-2007[S]. Beijing:People's Communications Press,2007.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地地区建筑技术规范:GB50112-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for construction in expansive soil area:GB50112-2013[S]. Beijing:China Construction Industry Press,2013.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范:JTG D30-2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Highway subgrade design code:JTG D30-2015[S]. Beijing:People's Communications Press,2015.
- [18] 李生林,薄遵昭,秦素娟,等. 塑性图在判别膨胀土中的应用[J]. 地质论评,1984(4):352-356.  
LI Shenglin, BO Zunzhao, QIN Sujuan, et al. Application of plastic map in identifying expansive soils[J]. Geological Review,1984(4):352-356.
- [19] 张宝琛. 建筑垃圾再生材料处理湿陷性黄土地基试验研究[D]. 西安:长安大学,2018.  
ZHANG Baochen. Experimental study on the treatment of collapsible loess foundation with construction waste recycled materials[D]. Xi'an:Chang'an University,2018.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程:JTG E42-2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Highway engineering aggregate test regulations:JTG E42-2005[S]. Beijing:People's Communications Press,2005.
- [21] 董云,柴贺军. 土石混合料振动压实特性的试验研究[J]. 路基工程,2006(5):73-75.  
DONG Yun, CHAI Hejun. Experimental study on vibration compaction characteristics of soil-rock mixture[J]. Roadbed Engineering,2006(5):73-75.
- [22] 刘丽萍,折学森. 土石混合料压实特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006(1):206-210.  
LIU Liping, ZHE Xuesen. Experimental study on compaction characteristics of soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006(1):206-210.

(编辑 沈 波)