

建渣与粉砂制备可控基坑回填材料的性能与应用

肖飞鹏¹, 曹正龙¹, 王小兵¹, 徐 凌¹, 吴 彪², 韩乙锋³, 徐西永³

(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: 以济南遥墙机场改扩建施工产生的大量建筑垃圾、粉砂土为主要骨料制备了具有高流动性、自密实和高强度特点的可控低强度材料(CLSM)。试验结果表明, 掺入建渣或石屑的试验组比纯粉砂的试验组强度显著提升, 且强度随掺量增加而增大; 建渣的改性效果比石屑高出约 80%, 且更为经济; 最佳配合比干湿循环强度降低并稳定在 1 MPa 左右, 质量损失率稳定在 1% 左右, 其压缩性能与水泥掺量为 6% (质量分数) 的水泥土相同, 干湿后压缩变形量远小于压实粉砂, 满足飞行区道基的长期承载要求。

关键词: 道路工程; 基坑回填; 可控低强度材料; 抗压强度; 耐久性

中图分类号: U414

文献标志码: A

Properties and Application of Controlled Foundation Materials from Construction Waste and Pit Silt

XIAO Feipeng¹, CAO Zhenglong¹, WANG Xiaobing¹,
XU Ling¹, WU Biao², HAN Yifeng³, XU Xiyong³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China Airport Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100029, China; 3. Shandong Provincial Airport Management Group Co., Ltd., Jinan 250107, China)

Abstract: In order to deal with the problem of backfilling in the narrow area of the underpass in the high-load flight area, a large amount of construction waste and silt produced by the reconstruction and expansion of Jinan Yaoqiang Airport was used as the main aggregate to prepare the controlled low-strength materials (CLSM) with the characteristics of high fluidity, self-compaction, and high strength. The test results show that the strength of the test group mixed with construction waste or stone debris increases significantly compared with the only silt

used. The modification effect of construction waste is about 80% higher than that of stone debris. It is more economical to add construction waste than stone debris, but not for the increase of the cement content. The dry - wet cycle strength of the best mix ratio decreases and stabilizes at about 1 MPa, with the mass loss rate stabilizing at about 1%. The compression performance is the same as soil with a 6% cement quality score, and the compressive deformation after the dry - wet cycle is much less than that of silt, which meets the long-term bearing requirements of the foundation in flight area.

Keywords: road engineering; foundation pit backfill; controlled low strength materials (CLSM); compressive strength; durability

近年来, 各地开展机场改扩建的步伐不断加快, 在规划与建设过程中, 会拆除许多现有道路及建筑结构, 将产生大量建筑垃圾^[1-2]; 而在机场各类给排水管道、综合管廊和下穿通道等构筑物开挖过程中, 也将产生大量的工程废土。针对建筑垃圾和废土等建筑废弃物的管理多是运至指定地点堆置, 不仅给当地环境和城市市貌造成影响, 而且长距离运输将增加工程成本^[3-4]。

在基坑与管线回填工程中, 常面临施工作业面狭窄、结构物界面存在死角或回填盲区等问题, 大型机械难以发挥作用, 人工或小型夯实机具施工效率低且效果不佳^[5-6]。可控低强度材料流动性高, 具有优异的工作性能和力学性能^[7-10], 在自重作用下, 可自行填充, 形成自密实结构^[11-13], 被广泛应用于基坑管线、桥台背等狭窄回填工程^[10, 14-15]。利用建筑废弃物作为原料制备流动化回填材料不仅可以实现固体

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51861145402)

第一作者: 肖飞鹏, 教授, 博士生导师, 哲学博士, 主要研究方向为道路材料。E-mail: fpxiao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

废弃物的循环利用、解决建筑垃圾堆积问题,而且免去了施工压实环节,在保证工程质量的同时,有效降低了成本^[16-17]。

本文以建筑废弃物、基坑渣土为骨料,通过控制流动度和水泥掺量保证材料的工作性能、力学性能和耐久性能,制备出满足回填要求的可控低强度材料,有效解决了建筑废弃物堆积难以处理和狭窄区回填困难的问题。

1 试验材料与方法

1.1 技术路线

本研究技术路线如图 1 所示。

1.2 原材料

1.2.1 粉砂土

本试验用土为济南市遥墙机场二期改扩建的地下综合管廊开挖弃土,其基本物理性质如表 1 所示。由筛分结果计算出土样不均匀系数 C_u 为 18.00,曲

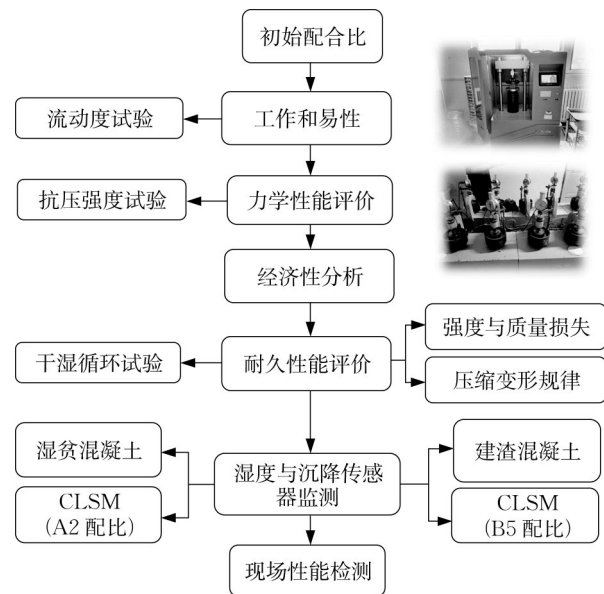


图 1 技术路线
Fig. 1 Technical route

率系数 C_c 为 2.09,颗粒组成见表 1,级配曲线见图 2a,确定该土为粉砂。

表 1 基本物理性质与粉砂颗粒组成

Tab. 1 Basic physical properties and composition of silt particles

液性指数	塑性指数	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	加州承载比/%	
0.67	9.2	14.1	1.76	8.4	
颗粒组成	卵碎石	砾石	砂石	粉粒	黏粒
粒径范围/mm	>60	[60,2)	[2,0.075)	[0.075,0.002)	<0.002
质量分数/%	0	0	69.50	30.00	0.50

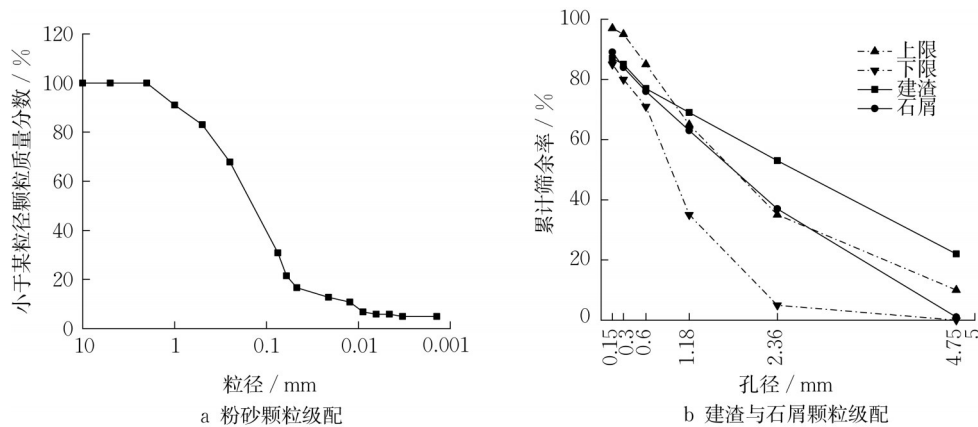


图 2 级配曲线
Fig. 2 Grading curve

1.2.2 建渣与石屑

济南遥墙地区场区内建筑物拆迁形成的砖混建筑垃圾经破碎后制成再生细集料(0~5 mm),细度模量 3.3。石屑来源于济南三合石料有限公司,细度

模量 3.5。砖混建渣(0~5 mm)和石屑的级配曲线、集料 1 区级配上下限见图 2b,常规物理性能指标见表 2。试验所用水泥为山东水泥厂生产的 P.O 42.5 水泥,参数见表 2。试验用水为自来水。

表2 建渣、石屑和水泥基本物理性质
Tab. 2 Basic physical properties of slag, stone chips, and cement

材料	砖块质量 分数/%	轻物质质量 分数/%	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	泥块质量 分数/%	吸水率/%	空隙率/%	0~0.15 mm 颗粒的活性 指数/%	有机物含量
建渣	70	0.8	2 538	1 529	8.9	6.48	42.4	63.7	合格
石屑			2 709	1 595	9.7	5.63	41.1	46.9	合格
比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)		标准稠度/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		安定性
			初凝时间	终凝时间	3 d	28 d	3 d	28 d	
341		28.6	190	291	18.0	43.3	4.0	8.2	合格

1.3 试件设计与制备

本材料应用于飞行区下穿通道的狭窄回填区,存在一定的死角和盲角,因此CLSM流动度宜控制在 20~30 cm^[18],本研究以无建筑废弃物的 CLSM 材料作为对照组,分别选择建渣和石屑占粉砂质量分数的 30%、50% 和 70%,水泥占总质量的掺量为 9% 和 13% 进行正交试验设计。试验配合比如表 3 所示。

表3 试验配合比
Tab. 3 Mix ratio

编号	粉砂用 量/%	建渣掺 量/%	石屑掺 量/%	水泥掺 量/%	用水量(流动 度 25 cm)/%
A1	100	0	0	9	39.0
A2	100	0	0	13	37.0
B1	100	30	0	9	22.8
B2	100	30	0	13	22.5
B3	100	50	0	9	20.7
B4	100	50	0	13	19.3
B5	100	70	0	9	20.3
B6	100	70	0	13	19.1
C1	0	0	30	9	21.0
C2	0	0	30	13	20.5
C3	0	0	50	9	21.7
C4	0	0	50	13	21.2
C5	0	0	70	9	21.4
C6	0	0	70	13	20.8

注:建渣掺量为建渣质量/粉砂质量;石屑掺量为石屑质量/粉砂质量;水泥掺量为水泥质量/(粉砂+建渣+石屑)质量;用水量为水质量/固体材料质量。下同。

1.4 试验方法

(1)CLSM 的流动性测试方法参考规范 ASTM D6103,模具为Φ100 mm×200 mm的圆筒;圆筒垂直缓慢上提,约2~4 s完成,立即用直尺测量拌合物坍落扩展后两个垂直方向上的直径,试验结果取平均值;测试全过程须在 90 s内完成。

(2)无侧限抗压强度试验参考规范 ASTM D4832;试件浇筑成型 48 h后脱模;标准养护至龄期前 1天浸水,下压速率为 1 mm·min⁻¹,至少开展 3次

平行试验。

(3)压缩试验参考《水泥土配合比设计规程》JGJ T233—2011;试验模具为Φ61.8 mm×20 mm的环刀,标准养护室养护 7、28 d;加压等级为 50、100、200 和 400 kPa,每级判稳时间为 1 h内变形量不超过 0.01 mm。

(4)干湿循环试验方法依据规范 ASTM D559;将成型养生 28 d的试件经过 12次干湿循环(5 h浸水,(20±1)℃;42 h烘干,(71±3)℃),通过计算试件的强度以及质量损失来评价材料的水稳性。试验模具尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。

2 力学强度与服役性能试验与分析

2.1 无侧限抗压强度

图 3a 和 3b 分别反映了不同建渣和石屑掺量下 CLSM 的 7 d 无侧限抗压强度特征。强度提升比值为试验组相比无固废试件测试值的提升。可以看出,随建渣或石屑的增加,材料强度呈现先缓慢增加后急速上升的趋势。比较不同养护时间条件下的强度曲线,可以发现 7 d 强度为 28 d 强度的 50%~60%,两者曲线走势基本一致。在 9% 水泥掺量下,建渣掺量为 30%、50%、70% 时强度分别为粉砂试样强度的 231%、323%、692%,建渣的掺入能够有效提升材料的整体力学性能。当建渣掺量为 0~50% 时,强度提升曲线比较平缓,而建渣掺量从 50% 提升至 70% 时,材料强度迅速增加,说明此时材料具有较密实的骨架结构。13% 水泥掺量与 9% 水泥掺量的强度提升曲线具有一致的走势,对于石屑也具有同样的规律。

图 4a 和 4b 分别反映了不同建渣和石屑掺量下 CLSM 的 28 d 无侧限抗压强度特征。比较图 4a 和图 4b 可以发现,整体上建渣的强度提升曲线位于石

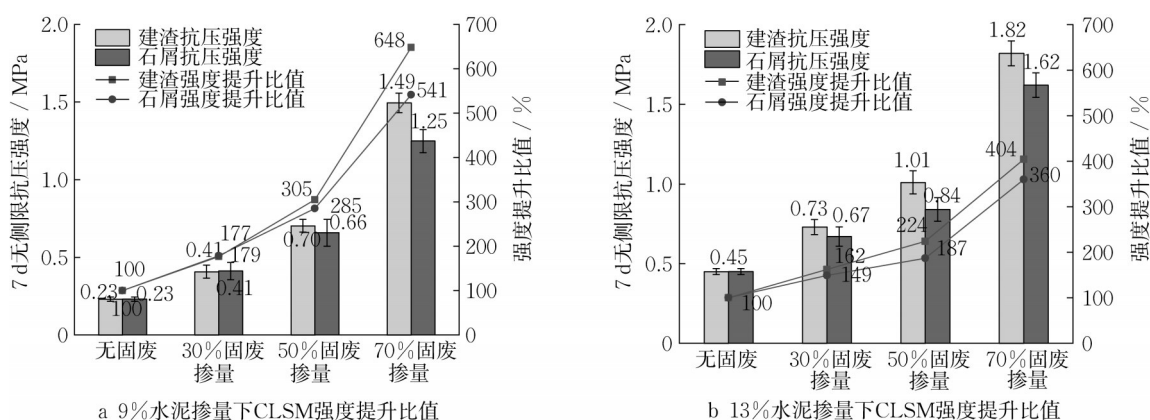


图3 CLSM材料的7 d强度提升比值

Fig. 3 7 d strength lifting ratio of CLSM material

屑之上,即对强度的提升效果要大于石屑。因此,建渣和石屑的掺入都能显著提高CLSM的强度,并且

随掺量的增加而增大,均在掺量为70%时强度最大,建渣对于强度提升效果要稍高于石屑。

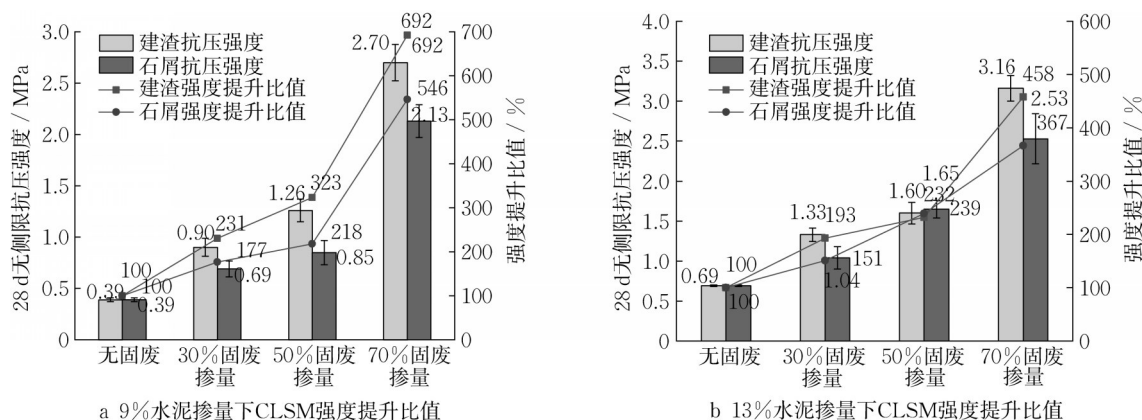


图4 CLSM材料的28 d强度提升比值

Fig. 4 28 d strength lifting ratio of CLSM material

2.2 压缩变形规律

在整个路面和道面结构体系当中,地基虽不是主要受力层,但却需要为上部结构提供长期而稳定的支撑,因此地基材料依然需要一定的强度;同时,地基抵抗竖向变形的能力以及长期沉降变形对于评估整体结构的稳定是十分重要的。在机场地基设计中通常采用的粉砂(100%压实度)或水泥掺量为6%的水泥土作为对照组与优化的B5配比进行对比。

由图5a可知,B5配合比材料的压缩模量远大于粉砂,略高于6%掺量的水泥土;根据图5b,材料总变形量曲线整体位于粉砂和6%掺量的水泥土变形曲线之下,B5配合比材料表现出比6%掺量的水泥土更低的压缩量,优于6%掺量的水泥土。因此B5配合比材料应用在基坑回填中,由上部结构荷载和附加荷载引起的压缩变形量是小于通常设计所用

的粉砂或是采用的6%掺量的水泥土。

2.3 干湿循环下的耐久性能

所研究的材料主要应用于济南的新建城市道路的综合管廊侧壁和机场改扩建的飞行区下穿通道,该地区最大冻深44 cm,平均地下水位在地表以下约3 m。回填材料处于该水位之下,因此不受冻融影响。但材料处于湿润的环境中,以抗压强度、质量损失和压缩性能评价材料在干湿循环下的耐久性能。

在图6a中,CLSM材料的强度在前3次循环时发生了较大的变化,强度损失约60%,在后续的循环中强度稳定于1 MPa左右。由图6b可知,CLSM材料的质量在干湿循环作用后基本没有变化,质量损失率稳定在1%左右。由此可见,在长期的湿润与干燥交替的环境中,两种材料整体的骨架不会被破坏。

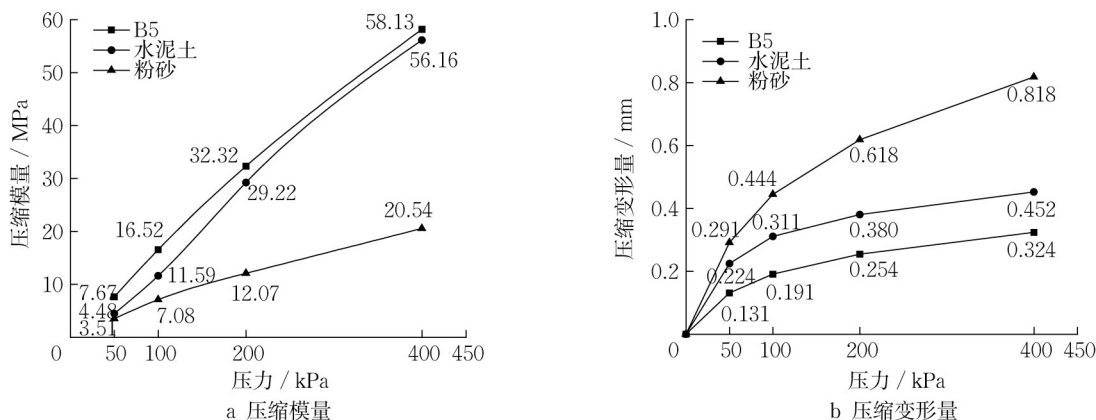


图5 不同材料的压缩模量与变形量

Fig. 5 Compression modulus and deformation of different materials

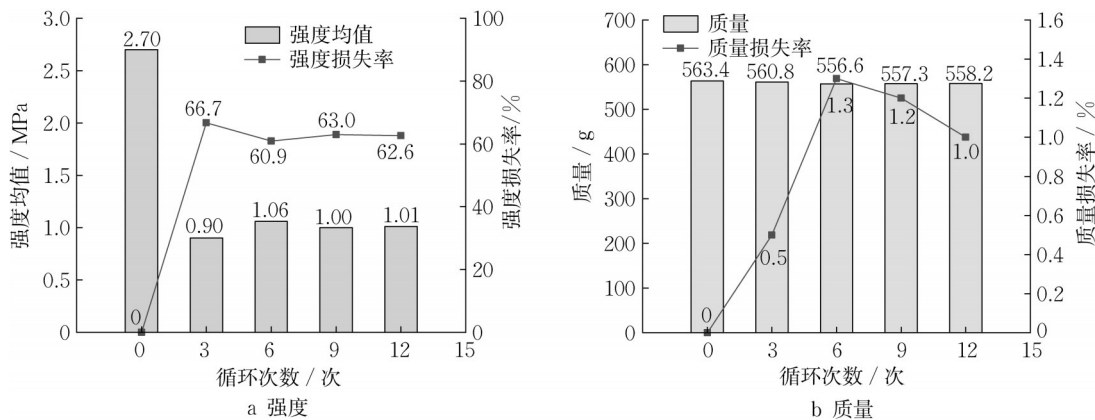


图6 材料的强度与质量随干湿循环次数的变化规律

Fig. 6 Variation of strength and mass of the material with the number of dry and wet cycles

CLSM材料的B5配比早期强度表现为虚高,经过3次干湿循环后强度大幅度降低,但不至于影响其作为管道下基础的填筑材料。材料强度降低的原因是由黏土制成的砖渣材料在干燥与湿润的交替环境作用下,材料内部发生吸水膨胀与失水收缩从而产生较大的干湿循环应力,对集料及其与胶凝材料的界面造成破坏,从而降低了材料颗粒之间的黏结与嵌锁程度,致使强度下降。

从长期沉降变形上看,B5配合比材料干湿循环后的各级荷载下压缩模量显著降低,但仍高于100%压实度的粉砂,其总变形量也显著增加,如图7所示;这与B5配合比材料前期强度虚高、经干湿循环后强度大幅下降是一致的。从材料性能上看,干湿循环后的B5配合比材料仍然优于100%压实度的粉砂。根据以上强度、质量损失和压缩变形量变化分析可知,B5配合比材料满足飞行区道基的长期承载要求。

3 现场试验段工程应用

3.1 施工方案与工艺

为满足该基坑回填的工程要求,且尽可能地降低造价,针对不同部位选取了不同的回填材料进行回填;并将区域分为狭窄区、结构影响区和一般回填区。本次就济南遥墙机场基坑与管线回填拟定了CLSM(A2 配比)、CLSM(B5 配比)、湿贫混凝土、建渣混凝土对第一层狭窄部位进行免压实回填;第二层结构影响区使用水泥土进行回填;第三层一般回填区使用素土进行回填。其中,窄缝处(本工程宽度为0.8 m,小型压实机械无法操作)回填土无法压实,狭窄区域的免压实回填是本次的研究重点。

3.2 传感器布设与监测

为探究CLSM材料和混凝土材料在施工回填早期和长期的沉降变形以及透水性能,采用单点沉降计对4种材料沉降变化进行监测,以智能光纤光

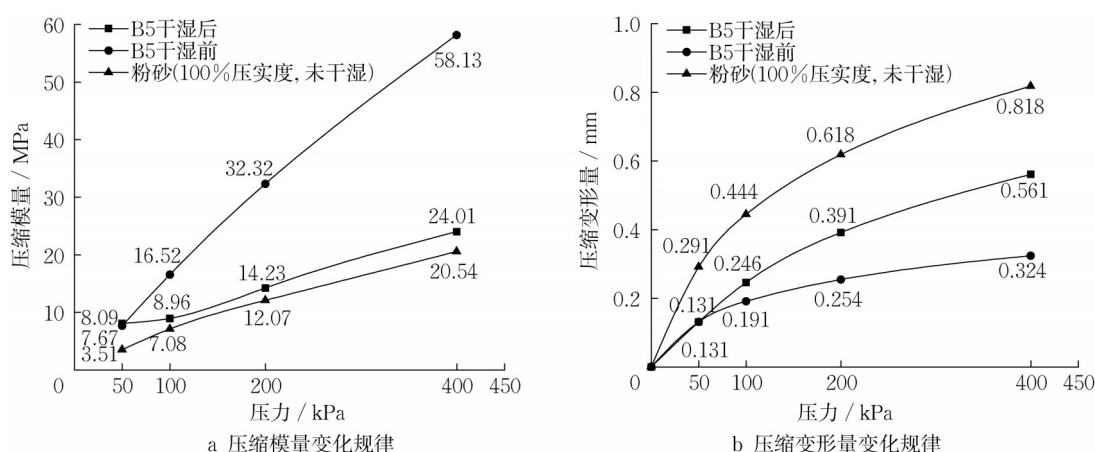


图7 干湿循环前后材料的压缩模量及变形量的变化规律

Fig. 7 Variation of compressive modulus and deformation of materials before and after wetting and drying cycles

栅沉降仪对沉降变化进行收集与分析,分析材料沉降量,评价回填质量,如图8所示。采用湿度计对CLSM(B5)回填材料的湿度进行监测,分析湿度与沉降变形的关系。现场传感器埋设如图9a所示。

CLSM(B5)区域,在回填狭窄区域纵横向中间位置布置沉降计1个,监测深度共3.5 m;湿度计共设置3个位于其旁,沿深度方向每隔1 m布置1个。

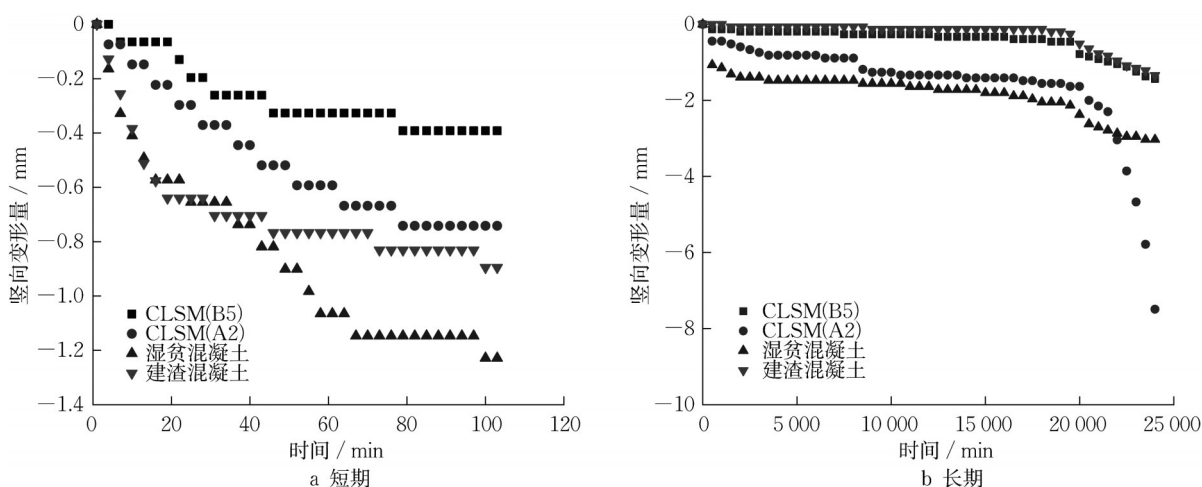


图8 不同回填材料累积竖向沉降

Fig. 8 Cumulative vertical settlement of different backfill materials

为了消除初始位移量的影响,对位移变化量进行了计算并定义为变形量。分析图8和图9可知,在初期1天内的早期变形中,CLSM(A2)的变形量维持在0.75 mm左右,CLSM(B5)的变形量为0.39 mm,湿贫混凝土的变形量为1.25 mm,建渣混凝土的变形量为0.90 mm。CLSM(B5)的早期变形量是4种材料中最小的,仅为0.39 mm;由于该材料用水量较少,早期形成的空隙不多,且材料易吸水,存在一定体积膨胀,所以早期竖向变形小。而在后期250 d后,CLSM(A2)变形量由原来的0.75 mm增加到8.20 mm,变形量极大,这主要是由于后期粉砂

材料早期吸水散失,材料也进一步软化,在上部压力下沉降量变大,这与该配比在干湿循环中表现为早期强度虚高一致。

从后期强度来看,CLSM(B5)和建渣混凝土后期差异不大,变形量极小,性能优异。CLSM(A2)从80 d到220 d的变形量增量明显大于其他几种材料,CLSM(A2)的抗变形能力较低。湿贫混凝土的变形量虽然达到了3.00 mm,但在后期较为稳定,随着水化反应的完成,变形量稍微增大,说明该材料仅是早期由于含大量自由水,在反应和挥发之后,出现沉降,后期基本稳定。

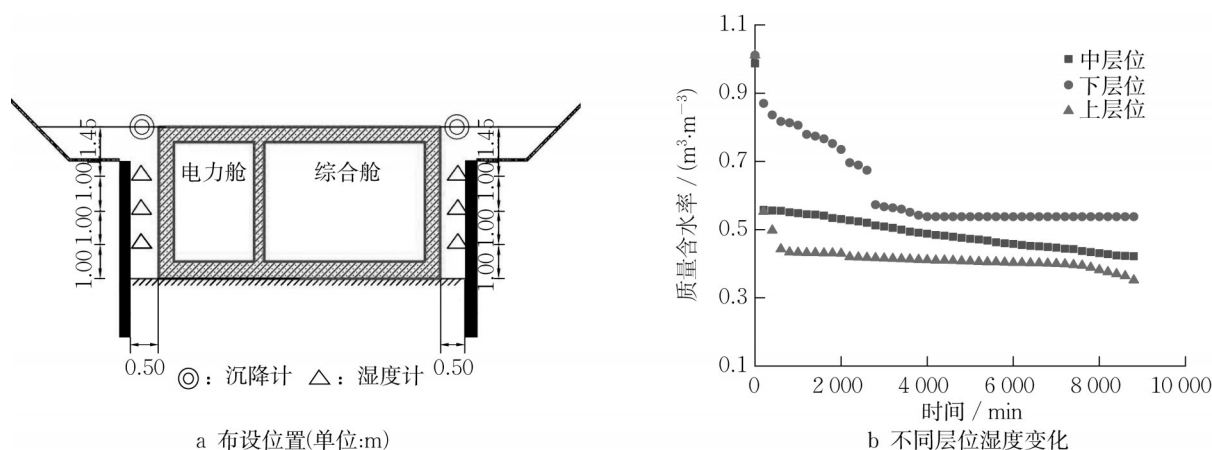


图9 CLSM(B5)材料湿度监测结果

Fig. 9 Humidity monitoring results of CLSM (B5)

回填区CLSM(B5)工况不同层位湿度变化与沉降的关系如图10所示。随着质量含水率的下降,回填区的竖向变形量也在缓慢增加。二维图中,湿度变化与沉降变形呈现出明显的三阶段特性,分别为早期的快速失水(阶段一),中期的平稳固结(阶段二)和后期的均匀沉降(阶段三)。对于建渣-粉砂胶凝结构,CLSM中颗粒较大的骨料之间形成强力链,构成材料的骨架结构;伴随着粉砂土细颗粒填充骨架使结构更加密实,骨料之间形成弱力链。同时,砖混建渣主要矿物组成为石英、长石与赤铁矿,含有大量 SiO_2 、 Al_2O_3 及少量 CaO ,具有较强的活性,且存在一些游离的 CaO ;较强活性的 SiO_2 、 Al_2O_3 与水、水泥混合后,生成水化硅酸钙CSH、水化铝酸钙CAH等水化产物,并消耗 CaO 水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,加快水化反应,提高材料强度。因此,虽然材料内部水分蒸发后留下部分水空隙,但水泥水化生产的胶体逐渐填充颗粒间的空隙,使得骨架更为牢固。此外,可以观察到相比上层土体,下层土体的固结具有一定的滞后性。

3.3 现场性能检测

3.3.1 强度检测

由表4可知,CLSM(A2)、CLSM(B5)、湿贫混凝土和建渣混凝土的28 d强度都大于0.4 MPa(应

用部位在路基3 m以下),满足《预拌流态固化土填筑工程技术标准》(T/BGEA001—2019)规范对管廊侧壁所在层位的要求,因此4种材料都可以作为城市综合管廊基坑与飞行区下穿通道的回填材料。

3.3.2 道基反应模量检测

道基反应模量是表征道基刚度,确定土基强度类型的重要指标,同时也是刚性道面设计的重要参数和土基工程质量的评定依据。《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MHT5004—2010)中垫层道基反应模量要求大于等于 $70 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3}$,由表4可知,4种材料均能满足规范要求。

3.3.3 密实度检测

通常采用压实度这一指标来评价材料的密实性,而本研究的材料CLSM为免压实材料。因此,本文提出用密实度指标来评价材料的密实性,即以取芯密度/留样密度作为密实度,以留样密度作为理论最大密度。4种材料的密实度都大于96%,密实性较好,能够充分填充现场基坑狭窄区。由图11可知,现场试验段留样试件与取芯试件的性能保持了较高的一致性,说明现场制备的基坑回填材料均匀性较好,施工工艺流程合理。取芯试件的抗压强度与密度均略高于留置试件的抗压强度与密度,这是现场施工后的压实与固结导致。4种不同的基坑回

表4 狭窄区回填材料现场性能检测

Tab. 4 On-site performance testing of backfill materials in narrow areas

回填材料	7 d 抗压强度/MPa		28 d 抗压强度/MPa		7 d 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		28 d 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)		道基反应模量/ ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-3}$)	密实度/%
	留样	取芯	留样	取芯	留样	取芯	留样	取芯		
CLSM (A2)	0.69	0.75	1.19	1.51	1848	1847	1852	1850	81.3	98.8
CLSM (B5)	1.38	1.49	1.37	1.76	1915	1912	1908	1905	90.1	99.1
湿贫混凝土	3.63	4.22	7.40	8.13	2292	2286	2284	2268	112.5	97.8
建渣混凝土	1.59	3.40	5.27	5.88	2071	2114	2067	2089	124.3	96.4

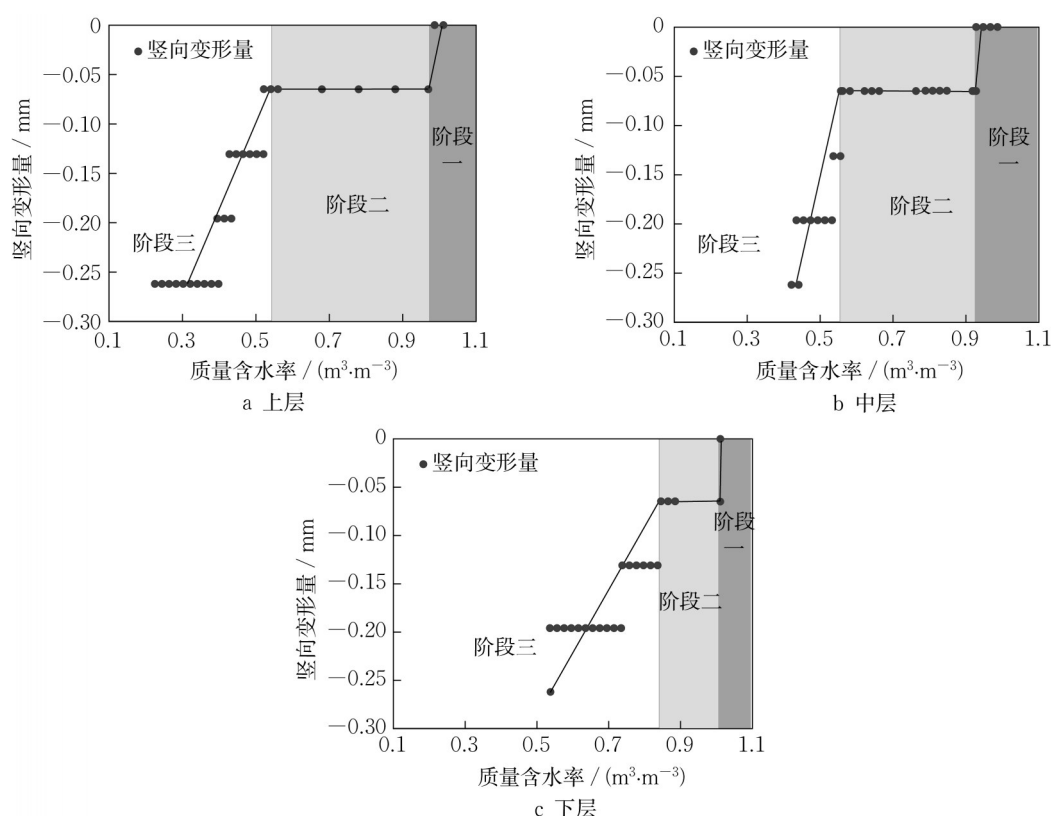


图10 CLSM(B5)不同层位湿度变化与沉降的关系

Fig. 10 Relationship between humidity changes and settlement at different layers of CLSM (B5)

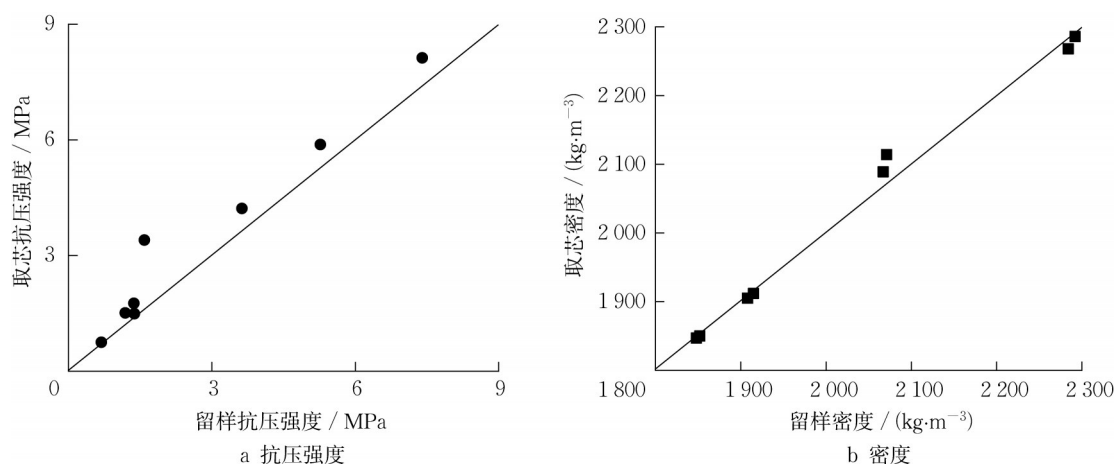


图11 留样与取芯试件性能差异对比

Fig. 11 Comparison of performance between retained samples and cored specimens

填材料在现场基坑狭窄区得到了较好的应用效果,有效验证了材料配合比设计与施工工艺的合理性。

4 材料经济性分析

CLSM具有较高的强度,满足《预拌流态固化土

填筑工程技术标准》(T/BGEA001—2019)中规定的路基下深度大于1.5 m处抗压强度要求达到0.4 MPa,路基下深度0~0.8 m范围的抗压强度要求达到0.8 MPa的要求。材料的价格在64~160元 $\cdot \text{m}^{-3}$ 之间,如表5所示。

表 5 掺入不同改性材料的 CLSM 材料价格

Tab. 5 Prices of CLSM materials with different modified materials

材料设计配比	无固废+9%水泥	30%+9%水泥	50%+9%水泥	70%+9%水泥
石屑改性/(元·t ⁻¹)	64	101	121	134
建渣改性/(元·t ⁻¹)	64	86	96	105
材料设计配比	无固废+13%水泥	30%+13%水泥	50%+13%水泥	70%+13%水泥
石屑改性/(元·t ⁻¹)	89	124	148	160
建渣改性/(元·t ⁻¹)	89	113	121	131

5 结论

针对高荷载飞行区下穿通道狭窄区回填问题,利用济南遥墙机场改扩建施工产生的大量建筑垃圾、粉砂土作为主要骨料制备了具有高流动性、自密实和高强度特点的可控低强度材料(CLSM)。

(1)建渣和石屑的掺入改善了纯粉砂土的级配,使得材料骨架更为密实,同时减少了用水量,提高了水灰比,降低了材料空隙。均在掺量为 70% 时强度最大。

(2)由于建渣颗粒较石屑稍粗且粉体具有更高的活性,建渣的改性效果平均比石屑高出约 80%,而石屑的单位价格强度却较建渣低很多;因此从工程造价的角度,掺入建渣比石屑更为经济。

(3)增加水泥掺量来提高强度并不经济;考虑应用在机场飞行区下穿通道回填需要较大的强度和优异的长期耐久性能,综合材料强度与性价比,最佳组合为 70% 建渣加 9% 水泥(编号 B5)。

(4) B5 配合比材料应用在地基回填中,由上部结构荷载和附加荷载引起的压缩变形量小于通常设计所用的粉砂或水泥掺量为 6% 的水泥土,可以满足地基的沉降变形要求。

(5) B5 配合比材料早期强度表现为虚高,经过 3 次干湿循环后强度大幅度下降,在后续的循环中强度稳定于 1 MPa 左右,质量损失率稳定在 1% 左右;压缩模量也随之降低,但其压缩变形量远小于一般的压实粉砂(100% 压实度)。

(6)在现场埋设沉降计和湿度计监测了 4 种材料的竖向变形量及湿度,结果表明,CLSM(A3)、CLSM(B5)、湿贫混凝土和建渣混凝土的沉降分别稳定在 10.0、35.0、3.5 和 6.0 mm。

作者贡献声明:

肖飞鹏:研究方向确定,论文修改。
曹正龙:数据采集,论文撰写与修改。
王小兵:数据采集,试验开展。

徐 凌:数据分析,论文撰写与修改。

吴 彪:试验设计,数据采集。

韩乙锋:试验设计,数据采集。

徐西永:数据采集,数据分析。

参考文献:

- [1] 任昕彤. 建筑垃圾源头减量城市规划策略研究 [D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
REN Xintong. Study on urban planning strategy of reducing construction waste from source [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [2] 荣玥芳, 姚彤, 孙啸松. 北京市建筑垃圾减量化规划应对策略研究 [J]. 现代城市研究, 2021, 7(3): 62.
RONG Yuefang, YAO Tong, SUN Xiaosong. Planning strategies for reduction of construction waste in Beijing [J]. Modern Urban Research, 2021, 7(3): 62.
- [3] 李丽华, 刘佳蓓, 肖衡林, 等. 建筑垃圾骨料浸出重金属对环境影响研究 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 92.
LI Lihua, LIU Jiabei, XIAO Henglin, *et al.* Environmental impact of heavy metal leaching from construction and demolition waste aggregates [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 92.
- [4] MA L, ZHANG L. Evolutionary game analysis of construction waste recycling management in China [J]. Resources Conservation and Recycling, 2020, 161(10): 1.
- [5] 周保生, 江建, 陈智斌. 建筑废弃物再生材料在基坑回填中的应用研究 [J]. 市政技术, 2016, 34(2): 162.
ZHOU Baosheng, JIANG Jian, CHEN Zhibin. Applied research of reclaimed material of construction waste in back-fill foundation pit [J]. Municipal Engineering Technology, 2016, 34(2): 162.
- [6] 陈梅, 靳昕, 吴军, 等. 改性建筑废弃物-粉土混合物的路用性能研究 [J]. 江苏建筑, 2020, 206(4): 111.
CHEN Mei, JIN Xin, WU Jun, *et al.* Recycling behavior of construction waste and silt mixture in subgrade [J]. Jiangsu Construction, 2020, 206(4): 111.
- [7] 周海成, 单宏伟, 冯良平, 等. 基于粉质黏土的流态水泥固化土配合比试验及应用研究 [J]. 公路, 2022, 67(10): 374.
ZHOU Haicheng, SHAN Hongwei, FENG Liangping, *et al.* Experiment and application research on the mix ratio of fluid

- cement-solidified soil based on silty clay [J]. Highway, 2022, 67(10): 374.
- [8] 魏建军, 张金喜, 王建刚. 建筑垃圾细料生产流动化回填材料的性能 [J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(3): 96.
- WEI Jianjun, ZHANG Jinxi, WANG Jiangang. Properties of flowable backfill materials using recycled fine aggregates of brick and concrete waste [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(3): 96.
- [9] 王建刚, 张金喜, 郭阳阳, 等. 含红砖建筑垃圾细料制备早强 CLSM 性能影响因素 [J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(11): 1414.
- WANG Jiangang, ZHANG Jinxi, GUO Yangyang, *et al.* Influence factors of rapid-hardening controlled low strength materials made of recycled fine aggregate based on red brick construction and demolition waste [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(11): 1414.
- [10] RAN Jin, ZHANG Jinxi, YANG Mijia, *et al.* Controlled low-strength material incorporating recycled fine aggregate from urban red brick based construction waste [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2017, 33(4): 496.
- [11] ALIZADEH V, HELWANY S, GHORBANPOOR A, *et al.* Design and application of controlled low strength materials as a structural fill [J]. Construction and Building Materials, 2014, 53(28): 425.
- [12] CHEN T, YUAN N, WANG S, *et al.* The effect of bottom ash ball-milling time on properties of controlled low-strength material using multi-component coal-based solid wastes [J]. Sustainability, 2022, 14(16): 9949.
- [13] TAN MANH D, KIM H K, KIM M J, *et al.* Utilization of controlled low strength material (CLSM) as a novel grout for geothermal systems: laboratory and field experiments [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 5(29): 101.
- [14] 王帅. 利用地铁盾构渣土制备可控低强度材料的研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- WANG Shuai. Study on controllable low-strength materials made from subway shield muck [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [15] 雷霆. 建筑垃圾低强度流动化回填材料性能优化及中试研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- LEI Ting. Study on performance optimization and pilotscale experiment of low-strength flowable backfill materials made of construction waste [D]. Beijing: Beijing Industry University, 2017.
- [16] 翟聚云, 樊姝芳, 言志信, 等. 建筑垃圾膨胀土回填地基工程特性及应用研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 321.
- ZHAI Juyun, FAN Shufang, YAN Zhixin, *et al.* Study on the engineering characteristics and application of construction waste expansive soil backfill foundation [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science), 2020, 52(3): 321.
- [17] HO L S, JHANG B J, HWANG C L, *et al.* Development and characterization of a controlled low-strength material produced using a ternary mixture of Portland cement, fly ash, and waste water treatment sludge [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 7(1): 356.
- [18] 王智远, 张宏, 钱劲松, 等. 干旱区工业废渣粉煤灰回填材料拌合物的流动性能研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 160.
- WANG Zhiyuan, ZHANG Hong, QIAN Jinsong, *et al.* Research on the flow ability of mixture of flowable backfill materials using industrial waste fly ash in arid zone [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(4): 160.