回填狭窄区粉砂基可控低强度材料制备与性能

徐 凌[1]，王小兵[1]，袁 捷[1]，任华平[2]，韩乙锋[3]，徐西永[3]

（1.同济大学 交通运输工程学院，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，济南 250107）

摘 要：通过制备可控低强度材料用作施工狭窄区的回填材料，控制水固比、灰水比和粉煤灰掺量参数，研究了其工作性能、力学性能和耐久性能的变化规律。结果表明：流动性与灰水比和水固比成正相关，设计流动度为25 cm、水泥掺量为4.1%～12.9%时，28 d抗压强度为0.19～0.87 MPa，且抗压强度与水泥用量高度正相关；CBR和回弹模量值与抗压强度具有良好的线性关系；最佳设计配比下材料的压缩变形量远低于粉砂土，具有提高机场基坑与管廊的回填狭窄作业面的施工效率和夯实效果的意义。

关键词：道路工程；回填狭窄区；可控低强度材料；流动性；强度

中图分类号：U414 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)08-2657-12

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231269

Controlled low strength materials based on silty sand and its properties in narrow backfill zone

XU Ling[1], WANG Xiao-bing[1], YUAN Jie[1], REN Hua-ping[2], HAN Yi-feng[3], XU Xi-yong[3]

(1. *School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai* 201804, *China*; 2. *China Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing* 100029, *China*; 3. *Shandong Provincial Airport Management Group Co., Ltd., Jinan* 250107, *China*)

Abstract: This paper prepared a controlled low-strength material for backfilling in the narrow area. The variation rules of its working performance, mechanical properties and durability with the water-solid ratio, the gray-water ratio and the content of fly ash were studied. The results showed that the fluidity of CLSM was positively correlated with the ratio of gray-water and water-solid. The compressive strength was between 0.19 and 0.87 MPa at 4.1%～12.9% of the cement content when the design fluidity was 25 cm, highly positively correlated with the cement content. The CBR value and the modulus of resilience have a good linear relationship with the compressive strength. The compression deformation of mix proportion was much lower than that of silty sand, which can improve the construction efficiency and tamping effect at the narrow backfill surface of the airport foundation pit and pipe gallery.

Key words: road engineering; narrow backfill zone; controlled low strength materials; fluidity; strength

收稿日期：2023-11-17.

基金项目：国家自然科学基金项目(51861145402).

作者简介：徐凌(1997-)，男，博士研究生. 研究方向：道路与机场工程. E-mail：lxu@tongji.edu.cn

通信作者：袁捷(1973-)，男，教授，博士. 研究方向：道路与机场工程. E-mail：yuanjie@tongji.edu.cn

0 引 言

回填工程中施工作业面狭窄、结构物界面存在死角或回填盲区,导致回填材料难以得到充分压实,常引发严重的工后问题[1-3]。常规措施是选取优质回填材料或采用改良土,由于大型机械在狭窄回填区域难以发挥作用,只能采用人工或小型夯实机具,但其施工效率低且压实效果不佳[4]。

可控低强度材料(Controlled low-strength material,CLSM)因其自密实、免压实等特点,被广泛应用于管廊基坑、桥台背等狭窄回填工程[5-7]。传统CLSM主要由集料、水泥、水、粉煤灰和添加剂组成[8-11]。随着环保及可持续发展理念的普及,众多工业废料(如建筑垃圾、建筑渣土、粉煤灰、工业铸造砂、高炉矿渣、垃圾焚化底渣等)被作为原料或辅料制备CLSM[9, 10, 12, 13]。

范猛等[14]以废弃土为原料,以灰土比调节强度和加州承载比(California bearing ratio,CBR)值并应用桥台部回填。王智远等[15]分析了拌合物流动性能受材料掺量、时间影响的变化规律。Lee等[16]则用黏土和淤泥制备流动化回填材料,用于管沟回填。刘萌[17]利用建筑渣土制备出工作性能满足要求的CSLM。张骏等[18]以电石渣、钢渣、煤矸石为主要原料制备CSLM,研究了温度、原料配比等因素对其抗压强度的影响。此外,学者们针对不同原材料和工程要求,选用了如硅灰、石膏等多种外掺料对CLSM进行了改性[19, 20]。在制备过程中,还可以使用输气剂、减水剂等添加剂调控CLSM的工作性能,以满足施工或力学的要求[21]。

现有研究主要聚集于利用各类材料作为制备CLSM并用于一般路基、雨污水管和桥台背等较低应用等级的回填中,对于应用在荷载较大的城市主干道和机场场道的基坑狭窄区域的回填材料研究深度不足。本文通过设计制备粉砂基CSLM,为解决城市高等级路面和机场场道基坑狭窄区缺少施工面的回填难题提供了参考方案。

1 试验材料与方法

1.1 技术路线

本研究重点针对狭窄区场景,通过配合比优化得到各项性能满足要求的CLSM配合比,具体的技术路线如图1所示。

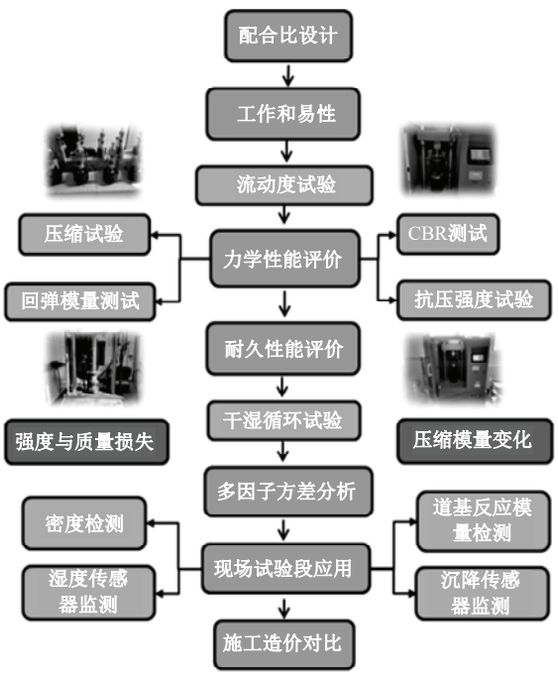


图1 技术路线

Fig. 1 Technical route

1.2 原材料

本试验粉砂土选用济南市遥墙机场二期改扩建的地下综合管廊开挖弃土。该区域位于黄河冲积平原区,粉砂土分布广泛,具有颗粒细小、粉粒含量高,级配较差等特点。该粉砂土的基本物理性质如表1所示。由筛分结果,计算得到土样不均匀系数C_u为18.00,曲率系数C_c为2.09,属于粉砂,粉砂颗粒级配如图2所示。试验所用水泥为海螺牌P.O 42.5普通硅酸盐水泥,粉煤灰等级为Ⅱ级,参数见表1。试验用水为自来水。

表1 粉砂土、水泥和粉煤灰基本性质

Table 1 Basic properties of silty soils, cement and fly ash

原材料	液性指数		塑性指数		最佳含水率/%		最大干密度/(g·cm^{-3})		CBR/%
粉砂土	0.67		9.2		14.1		1.76		8.4
原材料	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			
水泥	250	295	28.7	48.7	5.7	8.5	合格		
原材料	细度/%	烧失量/%	需水量/%	SO_3/%	SiO_2/%	Al_2O_3/%	Fe_2O_3/%	CaO/%	MgO/%
粉煤灰	21	1.13	92.5	0.85	59.04	28.68	3.16	0.45	0.64

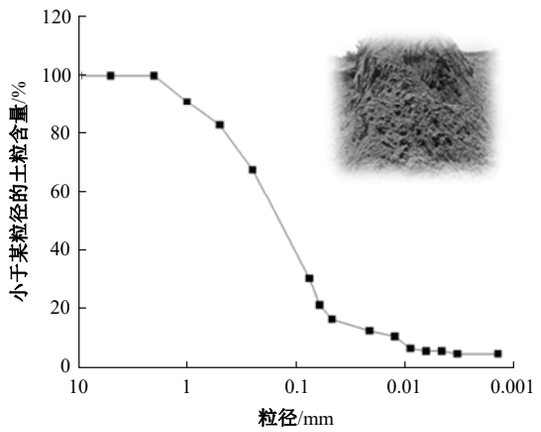


图 2　济南开挖废弃的粉砂颗粒级配图

Fig. 2　Particle distribution size diagram of silty sand excavated in Jinan

1.3　试件设计

1.3.1　工作性能

试验以灰水比（水泥质量/水质量）、水固比（水质量/固体质量）和粉煤灰掺量（粉煤灰/干土质量）作为变量参数，研究材料流动性的变化规律，具体配合比如表 2 所示。

表 2 试验配合比

Table 2　Mix ratio of tests

编号	灰水比	水固比	粉煤灰掺量/%	编号	灰水比	水固比	粉煤灰掺量/%
1	0.1	0.37	0	10	0.1	0.37	5
2	0.1	0.39	0	11	0.1	0.39	5
3	0.1	0.41	0	12	0.1	0.41	5
4	0.2	0.37	0	13	0.2	0.37	5
5	0.2	0.39	0	14	0.2	0.39	5
6	0.2	0.41	0	15	0.2	0.41	5
7	0.3	0.37	0	16	0.3	0.37	5
8	0.3	0.39	0	17	0.3	0.39	5
9	0.3	0.41	0	18	0.3	0.41	5

1.3.2　力学性能与耐久性能

水泥掺量对 CLSM 的力学性能影响显著。粉煤灰中富含硅铝氧化物，易与水泥水化生成 C-S-H 和 C-A-H 等具有胶结作用的凝胶产物，对强度有一定影响。基于此，本研究对配合比设计方案进行优化，取灰水比为 0.1、0.2、0.3，粉煤灰掺量为 0%、5%，并根据流动度试验曲线，计算得到流动度为 25 cm 时的水固比。力学试验按照表 3 所示配合比进行。

1.4　试验方法

本文选取的 CLSM 工作性能包括流动性，力学性能包括无侧限抗压强度、CBR、回弹模量，耐久性能包括干湿循环。

表 3　力学试验配合比

Table 3　Mix ratio of mechanical tests

编号	灰水比	水固比	粉煤灰掺量/%
A1	0.1	0.42	0
A2	0.2	0.40	0
A3	0.3	0.39	0
B1	0.1	0.40	5
B2	0.2	0.39	5
B3	0.3	0.38	5

（1）流动性测试参考 ASTM D6103，模具采用 Φ100mm×200mm 的圆筒。测试过程中，保证工作面平整，圆筒垂直缓慢上提（2～4 s 完成），立即用直尺测量拌合物坍落扩展的两条相互垂直直径；测试全过程须在 90 s 内完成。

（2）无侧限抗压强度测试参考 ASTM D4832。试件浇筑成型后静置 48 h 脱模，避免试件被破坏；标准养护至龄期前 1 d 浸水，以测得试件在最不利情况下的抗压强度，速率采用 1 mm/min。

（3）CBR 试验依据《公路土工试验规程》（JTG 3430—2020）进行：浇筑成型后室温放置 24 h 后移入养护室，标准养护至龄期前 1 d 浸水 96 h，然后测试。

（4）回弹模量试验根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTG E51—2009）的顶面法进行。试件成型后标准养护至龄期前 1 d 浸水，以测得试件在最不利工况下的值。试验最大荷载值设定为 0.4～0.6 MPa，对于 0.4 MPa 的试件取抗压强度的 65%，以测得材料在实际受力范围内的回弹模量。

（5）压缩试验参考《水泥土配合比设计规程》（JGJ/T 233—2011）。试验模具为 Φ61.8 mm×20 mm 的环刀，标准养护室养护 7、28 d 后，于测试前 1 d 浸水，然后采用全自动固结仪进行测试。加压等级为 50、100、200、400 kPa，每级荷载稳定标准为 1 h 内变形量≤0.01 mm。

（6）干湿循环试验依据 ASTM D559 进行。将成型养护 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水稳性。试验模具尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm，每组 3 个平行试件 3 个。

2 性能试验结果与分析

2.1 工作性能

2.1.1 灰水比与水固比对CLSM流动性的影响

工作性能的优劣决定了材料能否充分填充回填区域,尤其是在狭窄区和存在大量死角或盲角的区域,因此保证材料的工作性能是材料应用的前提。此外,在相同固化剂掺量下,工作性能(如流动性)与力学强度是矛盾的,在设计时要进行合理平衡。因此,需探究灰水比和水固比掺量对CLSM流动性的影响规律,流动度随灰水比和水固比的变化规律如图3所示。

在图3(a)未掺粉煤灰试验组中,当水固比较低时,灰水比增大仅使流动性缓慢增加;而增大水固比时,流动性才随灰水比增大而显著变化。水固比对流动性的影响规律与之类似。而在图3(b)掺5%粉煤灰试验组中,3条趋势线接近于平行,说明掺入粉煤灰后,水固比和灰水比的变化均匀地改变材料的流动性。

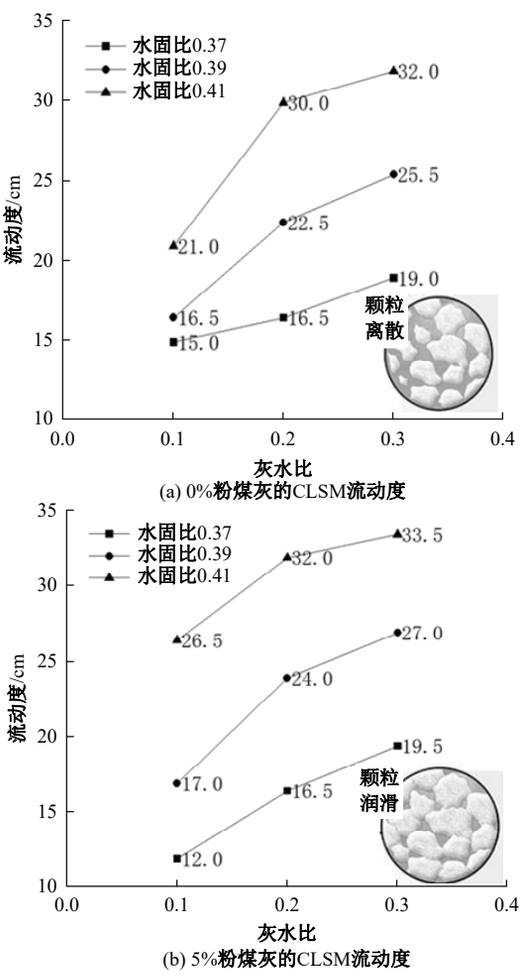


图3 流动度随灰水比和水固比的变化规律

Fig. 3 Variation of fluidity with the ratio of ash to water and water to solid ratio

究其原因,未掺粉煤灰时,流动性增加更多地依赖于用水量的增加,而粉砂土材料一旦含水率过高,则颗粒离散、呈液化状态,导致流动度急剧增大,其材料均质性和连续性下降;相反,粉煤灰因具有"滚珠效应"(粉煤灰中玻璃微珠特有的物理特性),使水泥颗粒的絮凝结构解絮并促进颗粒扩散,同时使浆体内部结构黏度和颗粒摩擦力降低,从而提升材料的流动性;此外,大量的玻璃微珠颗粒使得粉煤灰能更好地填充骨料之间的空隙并形成润滑层,使材料内部更加密实,从而改善材料的均质性和连续性。综上,水固比和灰水比的增加都对流动性有正向影响;水泥掺量和用水量的增加都有利于提升材料的流动性。

2.1.2 粉煤灰对CLSM材料流动性的影响

为平衡工作性能与力学性能,除了确定灰水比、水固比对CLSM流动性的影响外,还需明确粉煤灰掺量对CLSM流动性的影响规律,如图4所示。

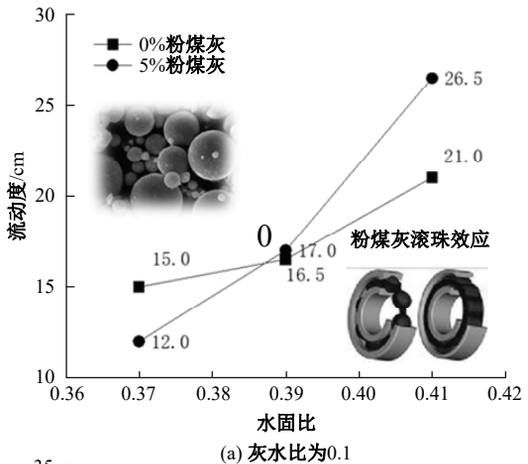
由图4可知,随着水固比增大,流动性逐渐变强。在图4(a)中,当水固比为0.37、灰水比为0.1时,掺入粉煤灰并不能很好地改善流动性;随着水固比的增大,掺入的粉煤灰能够与足够的水进行反应,改善了CLSM的流动性,粉煤灰的作用随着水的增加而逐渐显现,因此流动度曲线存在交叉,这种效果可以归因于粉煤灰颗粒的"滚珠效应"。加入5%粉煤灰后,流动性变化特征与未加粉煤灰的差异较大,这主要是灰水比为0.1时用水量较少,大部分水被粉土吸收,游离水较少;而此时掺入粉煤灰使浆体内部结构黏度和颗粒摩擦力降低,从而提高流动性。在图4(b)和图4(c)中,当灰水比增大时,拌合料中较多的游离水填充间隙,降低黏度和颗粒摩擦,此时粉煤灰的"滚珠效应"减弱,表现为加入之后差异不大,流动度曲线的变化趋势较为一致。

因此,在固定用水量下,水泥和粉煤灰都有利于增加材料的流动性;且当CLSM的设计流动度在20~30 cm时,粉煤灰的使用可减少用水量,从而抑制泌水和沉陷等不利现象的发生,有利于工程应用。

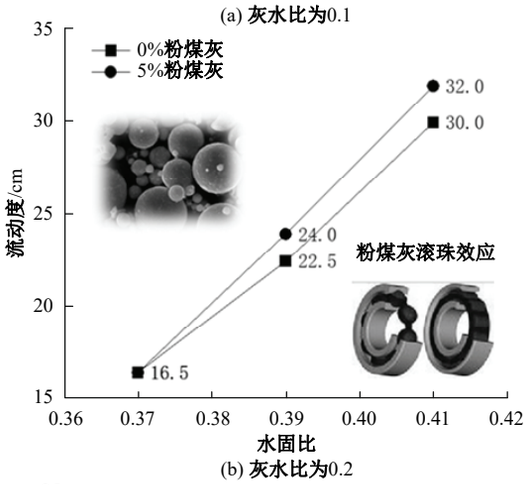
2.2 力学性能

2.2.1 无侧限抗压强度

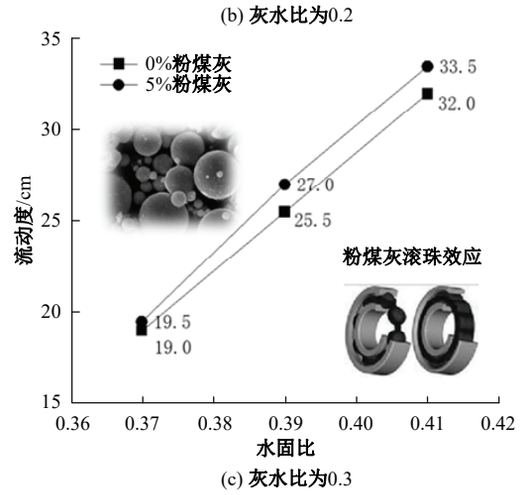
通常情况下,CLSM的抗压强度为0.35~



(a) 灰水比为0.1



(b) 灰水比为0.2



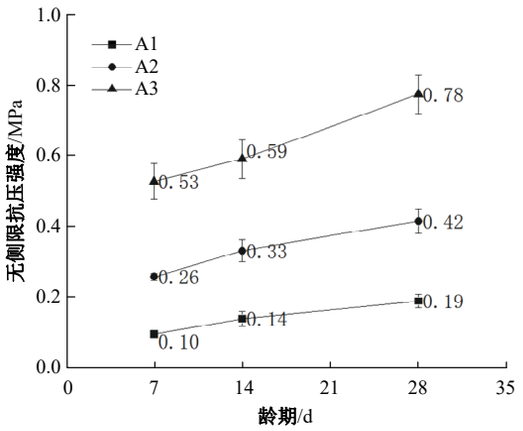
(c) 灰水比为0.3

图 4　粉煤灰掺量对各配比的 CLSM 流动度影响

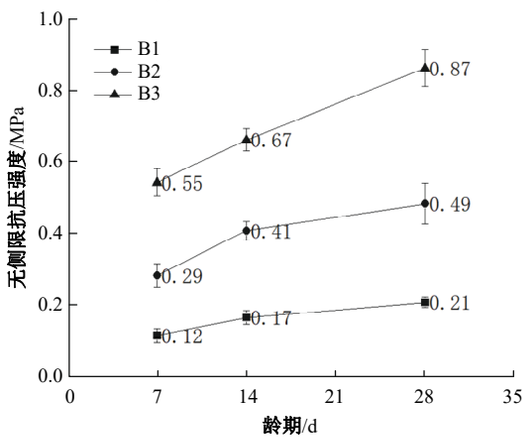
Fig. 4　Effect of fly ash content on the fluidity of CLSM in each ratio

1.40 MPa。当抗压强度＜0.35 MPa时,可人工二次开挖;当抗压强度＞1.4 MPa时,则需要使用机械设备开挖,一般压实回填土的强度约为0.3～0.7 MPa,粉煤灰的CLSM抗压强度,如图5所示。

由图5(a)可知:A1组(灰水比为0.1)28 d抗压强度值为0.19 MPa,未达到CLSM的基本



(a) 0%粉煤灰的CLSM抗压强度



(b) 5%粉煤灰的CLSM抗压强度

图 5　粉煤灰的 CLSM 抗压强度

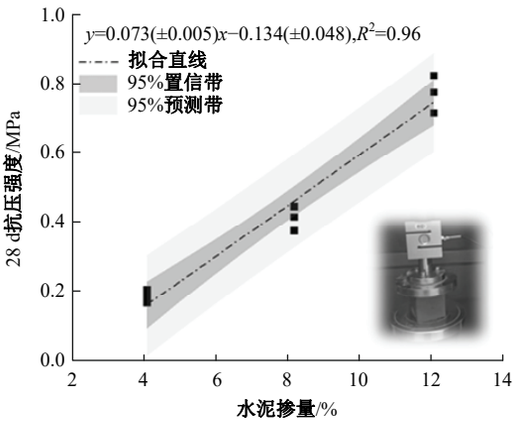
Fig. 5　CLSM compressive strength of fly ash

强度要求(0.35～1.40 MPa);A2组(灰水比为0.2)28 d抗压强度为0.42 MPa,略超过最低要求0.35 MPa;A3组(灰水比为0.3)28 d抗压强度为0.78 MPa,超过最低要求0.35 MPa。由图5(b)可知:加入粉煤灰的B组强度比A组要高,但粉煤灰含量对材料抗压强度的影响有限。

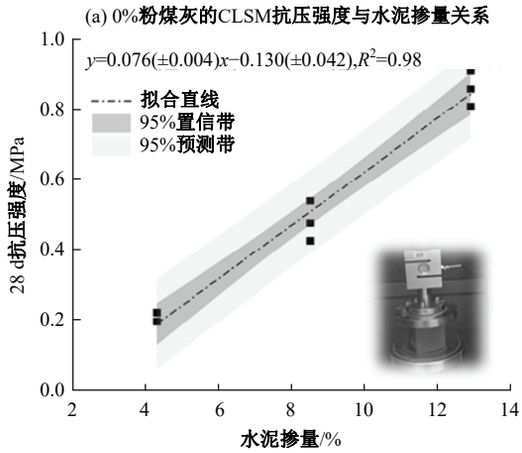
粉煤灰的CLSM抗压强度与水泥掺量的关系如图6所示,由图6(a)可知,在流动度控制在25 cm时,A组水泥掺量为干土质量的4.1%～12.2%,28 d抗压强度为0.19～0.78 MPa,二者呈线性关系。由图6(b)可知,B组水泥掺量为干土质量的4.3%～12.9%,28 d抗压强度为0.21～0.87 MPa,二者呈现高度正相关。

2.2.2　力学强度与压缩变形

CBR和回弹模量是反映材料性能的重要指标,而工程应用上通常以抗压强度为控制指标。此外,材料的压缩变形性能直接影响地基的长期沉降。本次试验通过比较B3配合比与粉砂土和水泥土的压缩变形量来评价材料压缩性能。



(a) 0%粉煤灰的CLSM抗压强度与水泥掺量关系



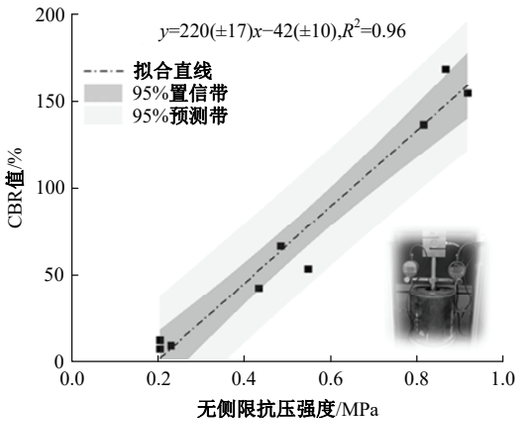
(b) 5%粉煤灰的CLSM抗压强度与水泥掺量关系

图6 粉煤灰的CLSM抗压强度与水泥掺量关系

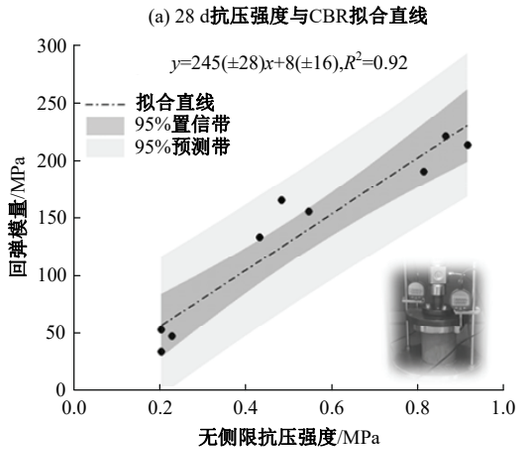
Fig. 6 Relationship between CLSM compressive strength of fly ash

CLSM标准养护7 d的CBR值均＞8%,满足施工要求。由图7(a)可知,28 d CBR值与抗压强度呈良好的线性关系且高度正相关,可以用抗压强度预测CBR值。B1组各项力学强度较低,CBR虽恰好满足要求,但回弹模量未达到一般压实粉砂土土基的回弹模量;B2和B3组28 d回弹模量为100～200 MPa,高于常规砂质回填材料,且与抗压强度同样具有良好的线性关系(见图7(b)),也可以用抗压强度预测回弹模量值。

不同材料的压缩模量如图8所示。由图8可知,B3组28 d压缩模量显著高于粉砂土,与4%水泥土基本相当。不同材料的压缩变形量如图9所示,虽然B3组的压缩变形量较4%水泥土略大,但材料总变形曲线整体位于粉砂土变形曲线之下,表现出低压缩和高固化性能。因此,采用B3组材料进行应用在基坑回填中,由上部结构荷载和附加荷载引起的压缩变形量小于常规设计中所用的粉砂土。总之,B3组表现出高固化、低压



(a) 28 d抗压强度与CBR拟合直线



(b) 28 d抗压强度与回弹模量拟合直线

图7 28 d强度与CBR和回弹模量的拟合直线

Fig. 7 28 d compressive strength with CBR and resilience modulus fit straight line

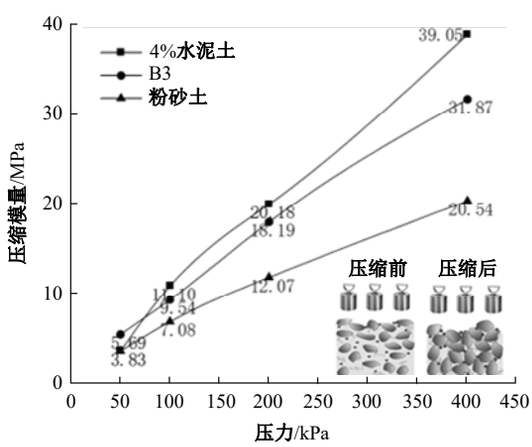


图8 不同材料的压缩模量

Fig. 8 Compression modulus of different materials

缩性能,压缩变形量远小于粉砂土,地基稳定后的变形能力与4%水泥土相当。

2.3 耐久性能

耐久性试验主要包括干湿循环和冻融循环。本文研究的材料主要应用于济南的新建城市道路

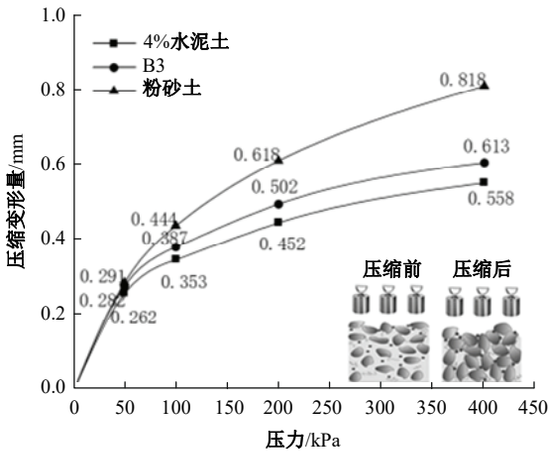


图 9　不同材料的压缩变形量

Fig. 9　Compression deformation of different materials

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。但材料在长期的干燥与湿润环境中,会出现吸水膨胀与失水收缩现象,从而产生较大的干湿循环应力。因此,本文主要以抗压强度损失率、质量损失率和压缩性能来评价材料在干湿循环下的耐久性能。

干湿循环后的抗压强度与抗压强度损失率如图 10 所示。由图 10 可知,B3 材料的强度在首个 3 次循环时显著提升约 45%,而在后续的循环中稳定在 1 MPa 左右。干湿循环后的质量与质量损失率如图 11 所示。由图 11 可知,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,在长期干湿交替环境中,材料整体的骨架不会被破坏,可有效避免材料内部细颗粒散失形成空隙而导致的沉降问题。

干湿循环前后材料的压缩模量和压缩变形量

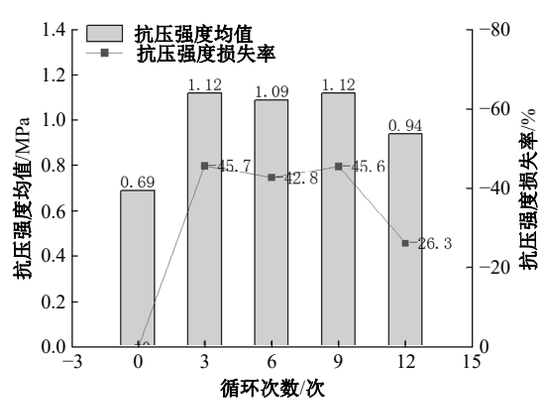


图 10　干湿循环后的抗压强度与抗压强度损失率

Fig. 10　Compressive strength and compressive strength loss rate after wet and dry cycles

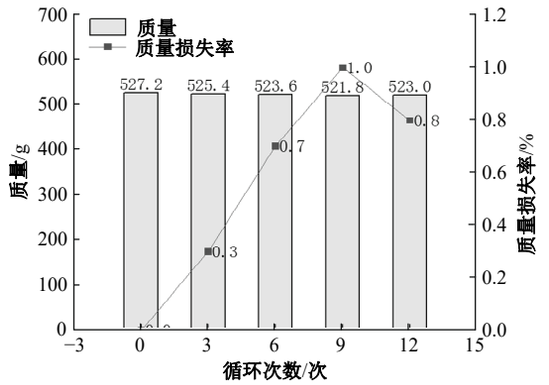


图 11　干湿循环后的质量与质量损失率

Fig. 11　Mass and mass loss rate after wet and dry cycles

分别如图 12 和图 13 所示。由图 12 和图 13 可知,所优选的 B3 配合比经过干湿循环后,各级荷载下材料的总变形量都有所下降,这与 B3 在循环后抗压强度增长是一致的;但是压缩模量基本与循环前的模量保持一致。在干湿循环前后,在每级荷

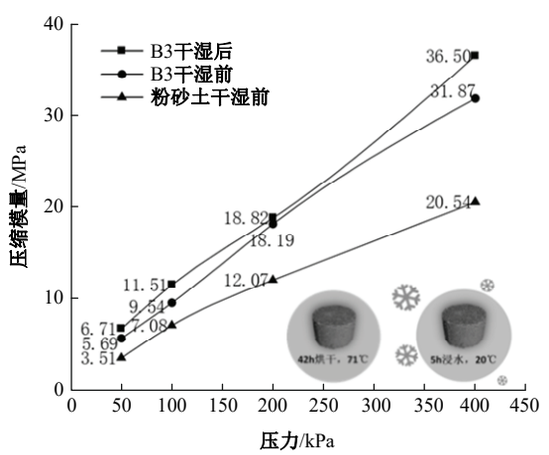


图 12　干湿循环前后材料的压缩模量

Fig. 12　Modulus of materials before and after wet-dry cycles

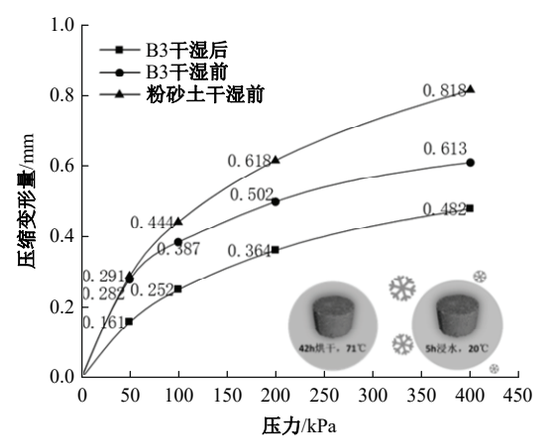


图 13　干湿循环前后的压缩变形量

Fig. 13　Deformation before and after wet-dry cycles

载下B3的压缩变形量与压缩模量均超过100%压实粉砂土的,满足地基的沉降变形要求。

《预拌流态固化土填筑工程技术标准》T/BGEA 001—2019中规定,路基下深度>1.5 m时,强度需达到0.4 MPa(本研究应用部位);下深度为0~0.8 m时,强度需达到0.8 MPa。试验表明,材料在干湿循环后残余强度稳定在1 MPa,该值大于标准要求的0.8 MPa,满足城市快速路路基全部位的要求,且其压实度指标达到飞行区道基最高要求。综合干湿循环下的抗压强度和压缩变形量的变化来看,B3材料能够很好地抵抗水的长期侵蚀与破坏作用,具有优良的耐久性能,是一种理想的基坑回填材料。

3 交互作用下多因子方差分析

为了进一步评价灰水比、水固比和粉煤灰掺量对CLSM流动性的影响程度,通过方差分析法找出有显著作用的因素,并确定三因子之间的交互作用。运用SPSS计算如表4所示。

在α=0.05显著性水平下,因子A和B的P值<0.05,因此认为因子A(灰水比)和B(水固比)对流动度有显著影响;而因子C的P值>0.05,认为因子C(粉煤灰掺量)对流动度无显著影响。具体表现为流动度随灰水比和水固比的改变而显著变化,随粉煤灰掺量的改变仅有微弱变化(与掺量正相关)。

三因子交互作用分析如图14所示,可以看出,交互效应AB、AC、BC、ABC的P值均都>0.05,因此认为灰水比、水固比和粉煤灰掺量三因子的交互作用对流动度无显著影响。图14(a)中,3条拟合曲线斜率基本相同,表明交互效应AB不显著;图14(b)、图14(c)中,因子C与A、B共同作用时,流动度的改变也不显著。

表4 多因子方差分析

Table 4 Multifactor variance analysis

因子	自由度	平方和	均方和	F比	P值
A:灰水比	2	383.39	191.69	42.60	<0.000 1
B:水固比	2	816.72	408.36	90.75	<0.000 1
C:粉煤灰掺量	1	2.78	2.78	0.62	0.442 28
AB	4	24.61	6.15	1.37	0.284 42
AC	2	2.39	1.19	0.27	0.769 82
BC	2	9.72	4.86	1.08	0.360 53
ABC	4	48.61	12.15	2.70	0.063 62
误差	18	81.00	4.50	—	—
总和	35	1 369.22	—	—	—

注:显著性检验选取5%的显著性水平;P值在显著性检验中表示检验假设被否定的概率。

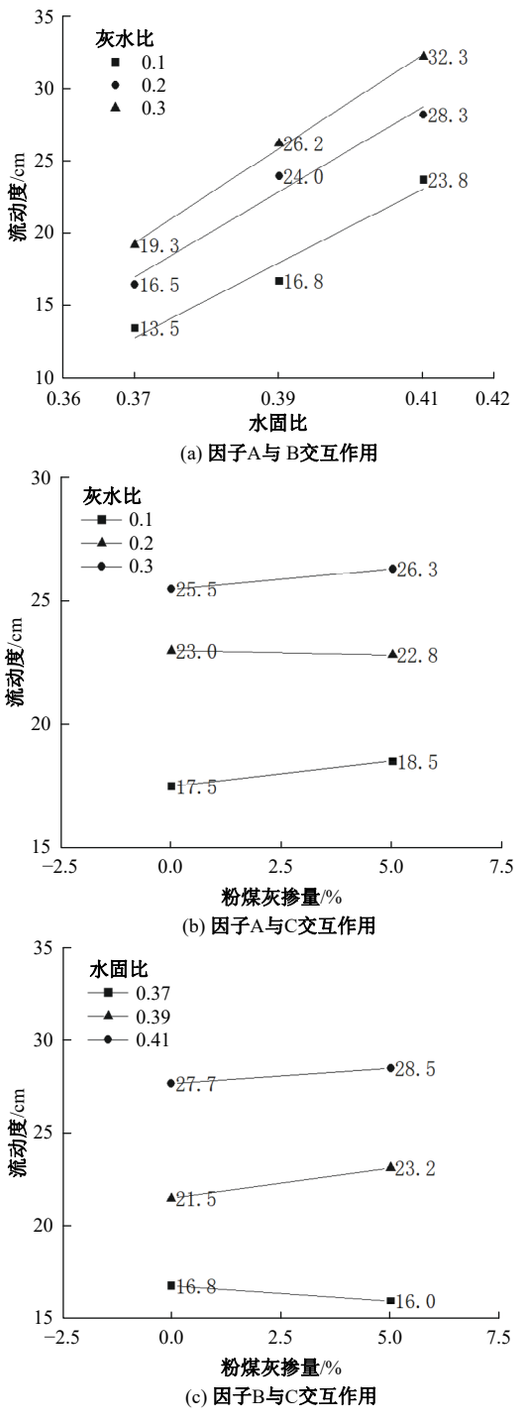


图14 三因子的交互作用

Fig. 14 Interaction of three factors

结合以上分析,水固比和灰水比都对流动性具有显著正向影响,是CLSM流动性的主要影响因素;粉煤灰对材料流动性的提高效果并不明显。因此,如要保障工作性能,需重点控制水泥掺量和用水量。

4　现场试验段工程应用性能评价

4.1　密度和道基反应模量

本文通过室内试验得到了适用于狭窄回填区的材料配比B3，为验证其用于基坑与管廊狭窄区回填的工程应用性，在综合管廊施工段选取一段20 m长的回填区域开展现场试验段试验，如图15和图16所示。回填完成后养护7、28 d，进行密度检测和道基反应模量检测，结果如表5所示。

由表5可以看出，现场施工拌合材料密度能够达到室内最大密度的98%以上，这说明其在实际应用中具有良好的填充密实性，这是保证强度和长期耐久性的关键。从强度性能上来看，道基反应模量7 d达65 MN/m^{3}以上，28 d能达80 MN/m^{3}以上。对于4F级飞行区，地基的模量要求一般在35～40 MN/m^3，才能使垫层的模量达到规范指标70 MN/m^3。因此，B3材料的道基反应模量约为规范要求40 MN/m^{3}的2倍，满足作为飞行区地基回填材料的强度要求。同时，根据显著性检验可知，



图15　现场回填试验段

Fig. 15　Field backfill test section

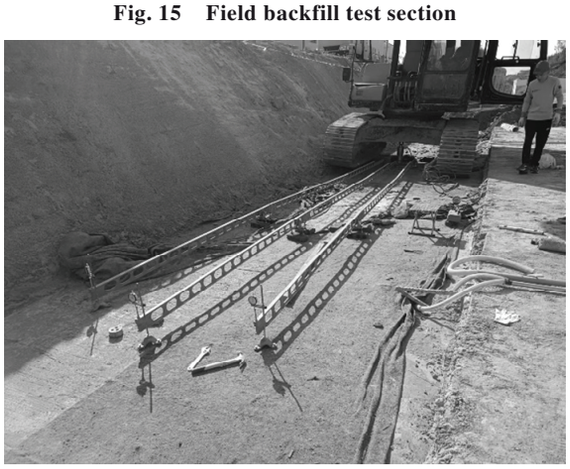


图16　道基反应模量检测

Fig. 16　Detection of subgrade reaction modulus

表5　现场试验段检测数据与龄期显著性检验（α=0.05）

Table 5　Field test section test data and Significance test（α=0.05）

检测项目	7 d龄期		28 d龄期		P值	显著性差异
道基反应模量/(MN·m^{-3})	66.5	65.4	80.1	82.4	0.021	Y
现场密度/(g·cm^{-3})	1.847	1.831	1.827	1.809	0.042	Y
室内试验密度/(g·cm^{-3})	1.867	1.856	1.852	1.835	0.034	Y
现场/室内密度/%	98.7		98.6		0.872	N

注：N为P值＞0.05，无显著性差异，Y为P值＜0.05，存在显著性差异。

7 d与28 d龄期的道基反应模量、室内密度与现场密度存在显著差异，这说明狭窄回填区材料的固化龄期对现场试验段的性能起着重要作用，实际应用中需要确保回填材料的充分固结与强度的形成。

4.2　湿度与沉降传感器监测

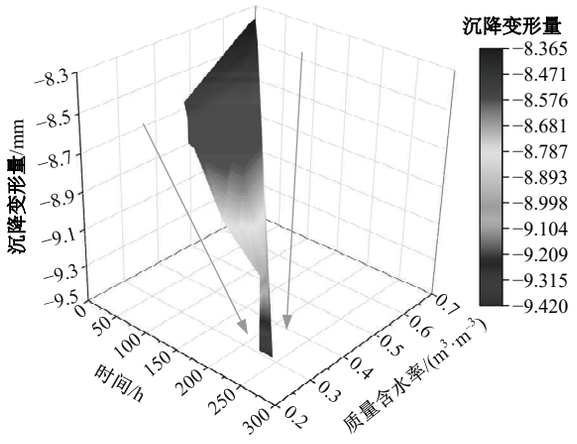
试验段通过预埋光纤传感器与温湿度传感器构建监测网络，跟踪监测CLSM回填的工后沉降和变形，现场传感器埋设照片与解调仪如图17所示。沉降计在回填狭窄区域纵横向中间位置各布置一个，监测深度3.5 m；湿度计共设置3个，沿深度方向每隔1 m布置一个。

回填区上层工后10 d内的监测情况如图18所示。由如图18(a)可以看出，随着时间的推移，回填区的CLSM湿度逐渐降低，土体沉降变形缓慢增加。这主要是由于CLSM固结引发早期变形与收缩沉降。三维云图在工后8～9 d已收敛至较小的椎体形状，表明此时上层CLSM的早期变形已基本结束，此后质量含水率与沉降变形量变化速率显著降低。由图18(b)可以看出，CLSM质量含水率与回填区沉降变形量呈现出对数相关性，这与回填区上层工后湿度与沉降监测的三维

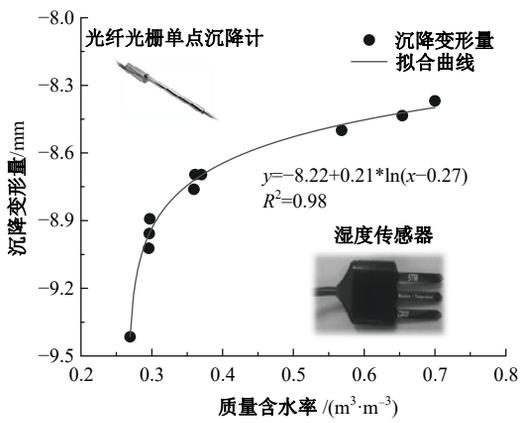


图17　现场传感器埋设及解调仪

Fig. 17　Field position and data acquisition of sensors



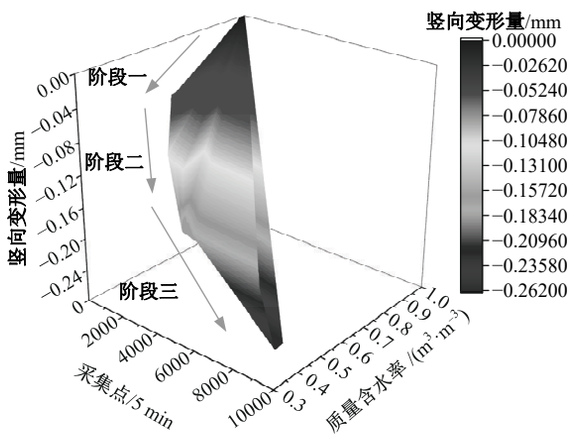
(a) 湿度与沉降监测三维云图



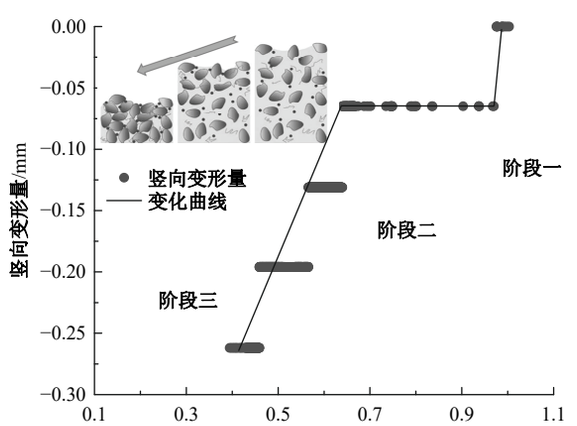
(b) 质量含水率与沉降变形量相关性拟合

图18 回填区上层工后短期监测(10 d)

Fig. 18 Short-term monitoring of the upper layer of the backfill area after construction(10 days)



(a) 湿度与沉降监测三维云图



(b) 质量含水率与沉降变形量相关性拟合

图19 回填区工后长期监测(250 d)

Fig. 19 Long-term monitoring of the upper layer of the backfill area after construction(250 days)

云图收缩趋势一致。

持续对回填区湿度与沉降进行监测,以验证其长期耐久性能。回填区工后长期(250 d)的监测结果如图19所示(湿度监测结果取3个传感器的平均值作为回填区整体湿度)。可以看出,回填区上层CLSM的长期湿度和土体沉降监测结果与短期监测规律基本一致,但竖向变形量显著减小,这是由于回填区固结的后期,土体趋于密实。同时,回填区整体湿度的变化呈现出明显的阶段性:第一阶段为湿度快速下降阶段,这是因为回填区上层高效的空气对流可以加快水气挥发;第二阶段为湿度平稳保持阶段,回填区中下层的水气挥发因为土体的毛细水效应存在滞后现象,因此整体的湿度挥发速度减缓;第三阶段为湿度匀速下降阶段,表现为湿度平稳保持阶段之后的进一步挥发。

4.3 现场施工造价对比

现场施工造价计算如表6所示,CLSM自密实回填方案的材料及施工总费用约为210元/m^3。同时,以湿贫混凝土浇筑回填方案为基准,计算了各方案的节省造价与节省比例。结果表明,CLSM自密实回填方案与普通水泥土、水泥石屑进行碾压回填或者湿贫混凝土浇筑回填方案相比,造价降低50%左右,具有良好的经济效益。

表6 现场施工造价计算

Table 6 Field construction cost calculation

回填方案	材料费用/(元·m^{-3})	施工费用/(元·m^{-3})	总费用/(元·m^{-3})	节省造价/(元·m^{-3})	节省比例/%
CLSM自密实回填	90	120	210	340	61.8
水泥土回填	40	320	360	190	34.5
水泥石屑碾压回填	150	320	470	80	14.5
湿贫混凝土浇筑回填	300	250	550	0	0

5　结　论

（1）CLSM流动度随着灰水比和水固比的增大而增大，利用多因子方差分析得出二者为流动性的主要影响因子；粉煤灰有利于提升材料的流动性但效果不明显；流动设计时需优先控制灰水比和水固比。

（2）设计流动度为25 cm、水泥掺量在4.1%～12.9%时，28 d抗压强度达到0.19～0.87 MPa，且与水泥掺量具有线性关系；7 d抗压强度能达到28 d抗压强度的53%～68%，可用7 d抗压强度预测28 d抗压强度。

（3）CLSM的7 d CBR值均＞8%，满足要求；CLSM抗压强度达到0.49 MPa以上的B2和B3组的28 d回弹模量能够达到100～200 MPa，高于常规砂质材料；28 d CBR和回弹模量都与抗压强度具有良好的线性关系。

（4）CLSM的优化配合比在干湿循环后残余强度稳定在1 MPa左右，压缩变形量循环前后均远低于粉砂土（100%压实度），具有优异的耐久性能。通过各项强度试验确定材料的抗压强度应≥0.49 MPa，深度＞3 m的部位；通过研究材料的耐久性能，对于城市高等级路面基坑狭窄区的全部位，推荐B3配合比。

（5）现场施工拌合材料B3的密度能够达到室内最大密度的98%以上，具有良好的填充密实性；道基反应模量是地基要求40 MN/m^{3}的2倍，满足飞行区下穿通道和道路综合管廊回填材料的强度要求。

（6）CLSM的早期变形在工后8～9 d基本结束，早期沉降变形总量控制在10 mm以内，后期沉降变形总量控制在0.3 mm以内，质量含水率与回填区沉降变形量呈现出对数相关性。CLSM的及施工总费用约为210元/m^3，与常规回填材料相比，造价可降低50%左右。

（7）后续研究建议对试验段回填狭窄区粉砂基CLSM的服役性进行长期监测，同时进行实时的跟踪反馈。

参考文献：

[1] 樊亮，周圣杰，侯佳林，等. 黄河淤积粉土的两种复合稳定方案与性能对比[J]. 长江科学院院报，2021，38(12)：118-124.
Fan Liang，Zhou Sheng-jie，Hou Jia-lin，et al. Composite stabilization of silty soil near the yellow river：two methods and performance comparison[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2021，38(12)：118-124.

[2] 刘丽萍. 低液限粉土路基填料工程特性研究[J]. 路基工程，2010(2)：65-66.
Liu Li-ping. Study on engineering characteristics of low liquid limit silt in subgrade filling[J]. Subgrade Engineering，2010(2)：65-66.

[3] 张晶，王云，付伟，等. 黄淮地区粉土填料长期路用性能试验研究[J]. 路基工程，2022(1)：62-65.
Zhang Jing，Wang Yun，Fu Wei，et al. Experimental study on long-term road performance of silt filler in huanghuai area[J]. Subgrade Engineering，2022(1)：62-65.

[4] 赵振国. 水撼法施工水泥稳定砂砾的应用研究[J]. 公路工程，2013，38(2)：47-50.
Zhao Zhen-guo. Application of cement stabilized gravel constructed with water shake method[J]. Highway Engineering，2013，38(2)：47-50.

[5] 王建刚，张金喜，郭阳阳. 建筑垃圾控制性低强度材料性能及工程应用[C]//世界交通运输大会，北京，中国，2018：161-170.

[6] 鲍远琴. 自流平回填材料的研制及其在检查井中的应用[D]. 合肥：合肥工业大学土木与水利工程学院，2013.
Bao Yuan-qin. Development of self-leveling backfill material and its application in the check well[D]. Hefei：School of Civil and Hydraulic Engineering，Hefei University of Technology，2013.

[7] 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，2022，356：No. 131899.

[8] Alizadeh V. Influence of cementing paste volume on properties of controlled low strength materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering，2018，30(3)：No. 04017305.

[9] Siddique R. Utilization of waste materials and by-products in producing controlled low-strength materials[J]. Resources Conservation and Recycling，2009，54(1)：1-8.

[10] Lee N K，Kim H K，Park I S，et al. Alkali-activated，cementless，controlled low-strength materials (CLSM) utilizing industrial by-products[J]. Construction and Building Materials，2013，49：738-746.

[11] 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): No. 69949.

[12] 杨媛媛, 黄春文, 王夏. 固体废弃物在自流平砂浆中的应用[J]. 福建建材, 2018(10): 36-38.
Yang Yuan-yuan, Huang Chun-wen, Wang Xia. Application of solid waste in self-leveling mortar[J]. Fujian Building Materials, 2018(10): 36-38.

[13] 朱浩泽, 于峰泉, 耿健, 等. 钛石膏基可控低强度材料强度及体积稳定性研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(11): 3644-3653.
Zhu Hao-ze, Yu Feng-quan, Geng Jian, et al. Strength and volume stability of controlled low-strength material based on titanium gypsum[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11): 3644-3653.

[14] 范猛, 张金喜, 苗英豪, 等. 非压实回填土性能及工程应用研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2008, 4(增刊1): 246-250.
Fan Meng, Zhang Jin-xi, Miao Ying-hao, et al. Study on properties and engineering application of uncompacted backfill[J]. Journal of Highway and Transportation (Research and Development Applied Technology Edition), 2008, 4(Sup1): 246-250.

[15] 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): 160-165.
Wang Zhi-yuan, Zhang Hong, Qian Jin-song, 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): 160-165.

[16] Lee K H, Kim J D. Performance evaluation of modified marine dredged soil and recycled in-situ soil as controlled low strength materials for underground pipe[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2013, 17(4): 674-680.

[17] 刘萌. 建筑渣土制备可控低强材料及性能研究[D]. 北京:北京建筑大学土木与交通工程学院, 2016.
Liu Meng. Preparation and properties of controlled low-strength materials produced by construction waste[D]. Beijing:School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.

[18] 张骏, 兰思杰, 李阳, 等. 用电石渣、钢渣和煤矸石制备可控性低强度材料[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1967-1972.
Zhang Jun, Lan Si-jie, Li Yang, et al. Using steel slag, carbide slag and coal gangue to make controlled low strength material[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1967-1972.

[19] 李晶辉, 刘兆爽, 赵文杰. 石膏基自流平地面材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3587-3593.
Li Jing-hui, Liu Zhao-shuang, Zhao Wen-jie. Research development of gypsum based self-leveling materials of floor[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11): 3587-3593.

[20] 李静静. 硅灰对石膏基自流平砂浆性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 80-82.
Li Jing-jing. Influence of silica fume on properties of gypsum-based self-leveling mortar[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(5): 80-82.

[21] 张雄, 刘恒, 张恒, 等. 聚羧酸减水剂引气效应复配优化研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6): 957-962.
Zhang Xiong, Liu Heng, Zhang Heng, et al. Optimization of air entrained effect of polycarboxylate superplasticizer[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6): 957-962.