

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.16

聚羧酸减水剂在工程渣土流态固化中的试验研究

吴美平¹, 龚明¹, 丁建文², 毕磊¹, 俞诚¹

(1. 南京江北新区建设和交通工程质量安全监督站, 南京 210044;
2. 东南大学 交通学院, 南京 211189)

摘要:为解决工程建设过程中废弃物堆积以及深窄基坑回填困难的问题,通过掺入聚羧酸减水剂、水泥、磷石膏以及水玻璃,以期将工程渣土进行流态化处理并用于基坑回填。通过流动度、无侧限抗压强度、干缩及微观试验,分析了不同外加剂对改良流态固化土流动性、强度与干缩性能的影响,并探讨了其改良机理。结果表明:掺入聚羧酸减水剂能够极大改善材料的流动性能,但随着水泥掺量的增加,流动度下降较快;磷石膏能够使试样在后期获得更高的强度,而水玻璃可以提高试样的早期性能及干缩性能;随着水泥、磷石膏和水玻璃的掺入,各种水化产物填充土体中的孔隙,土体内部结构变得更为致密。此外,在现场选取试验段进行现场回填,验证了流态固化土作为基坑回填料的可行性。研究成果可为提高流态固化土性能以及配合比设计提供参考。

关键词: 基坑回填; 流态固化土; 流动性; 强度; 干缩性能

中图分类号: TU502

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0548-08

Experimental Study on Engineering Residue Modified by Polycarboxylate Superplasticizer as Fluid Solidified Soil

Wu Meiping¹, Gong Ming¹, Ding Jianwen², Bi Lei¹, Yu Cheng¹

(1. Nanjing Jiangbei New District Construction and Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Nanjing 210044, P. R. China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China)

Abstract: To solve the problems of waste accumulation and deep and narrow backfilling of foundation pit in the construction process, by adding polycarboxylate superplasticizer (PCE), cement, phosphogypsum (PG) and water glass (WG), the engineering residue is improved into fluid solidified soil for foundation pit backfill. The effects of various admixtures on the fluidity, strength and drying shrinkage of the improved fluid solidified soil were studied through laboratory mobility test, unconfined compressive strength test, drying shrinkage test and microscopic test, and the improvement mechanism was analyzed. The results show that: The flow property of the material can be greatly improved by adding PCE, but the flow rate decreases rapidly with the increase of cement content. PG can make the sample obtain higher strength in the later stage, while water glass can improve the early performance and drying shrinkage property of the sample. With the incorporation of cement, PG and water glass, various hydration products fill the pores in the soil, and the internal structure of the soil becomes more dense. In addition, the feasibility of using fluid solidified soil as backfill for foundation pit is verified by selecting test section for field backfill. This paper can provide reference for improving the performance of fluid solidified soil and the design of mix ratio.

收稿日期: 2025-05-13 (修改稿)

作者简介: 吴美平 (1987—), 女, 江苏连云港人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土木施工技术与工程质量监督方向的研究。E-mail: 602046700@qq.com

通讯作者: 丁建文 (1975—), 男, 江苏泰兴人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程和地基处理方向的研究。E-mail: jwding@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (52378330, 51978159)

Keywords: backfilling of foundation pit; fluid solidified soil; flowability; strength; drying shrinkage

0 引言

近年来,随着中国基础设施建设的快速发展,产生了大量的建筑垃圾土,如基坑开挖土、盾构开挖土、河道疏浚土等^[1-3]。这些工程渣土往往含水率高、孔隙率大、压实困难,工程性质差,多数都未得到有效利用就直接消纳弃置处理,导致项目成本增加和土地资源浪费^[4-5]。另一方面,随着工程建设的蓬勃发展,基坑回填材料需求量巨大,而传统回填采用二八灰土或三七灰土进行分层碾压或夯实处理的方式不适用于深窄基坑回填的问题也逐渐显现,流态固化填料应运而生^[6]。对废弃渣土实施流态固化处理,是一种将其“变废为宝”的有效策略。该方法在消化废弃物的同时,可以直接生成适用于基坑回填的环保建筑材料。然而,由于渣土的高亲水性,在工程实践中需要加入更多的水来保证其流动性需求,而较高的含水量增加了离析和泌水的风险,会导致长期强度的下降^[7-8]。

为了在工程应用中更好地利用工程渣土,解决其在制备流态固化土过程中强度与流动性的矛盾,许多学者开展了相关的研究,谭正日等^[9]分析了聚羧酸减水剂(PCE)、脂肪族减水剂(SAF)、萘系减水剂(FDN)、三聚氰胺(PMS)4种减水剂降低渣土基高流态回填材料泌水率等的特性,结果表明,相同流动度下减水效果 PCE>SAF>PMS>FDN; Wan 等^[10]试验发现 PCE 可显著改善淤泥流态固化土流动度,但所需掺量高于混凝土。加入辅助固化材料可以减少水泥的使用量,研究表明,当所用固化材料的质量一定时,这种复合材料的强度要比仅使用水泥这一单一固化材料所处理的淤泥固化土获得更高的强度^[11-12]。磷石膏是生产磷酸过程中的工业固废,在水泥的碱性环境下,能够与其他物质反应生成钙矾石填充土体中的大孔隙。试验证明,磷石膏在促进强度增长、降低渗透系数以及防止离析等方面具有良好效果^[13-15]。水玻璃是硅酸钠的水溶液,其在防水堵漏工程中被广泛应用。它可以激发水泥体系的作用机理,从而获得更高的早期强度^[16]。

虽然目前已有关于流态固化土的相关研究,但关于聚羧酸减水剂在制备流态固化土上的应用仍较少,使用流态固化土进行基坑回填的研究案例也较少。基于此,本文以南京江北新区某项目为依托,选用5组配比,开展了室内流动度试验、无侧限抗压强度试验、干缩试验以及微观试验,验证不同

配比下流态固化土的性能差异,探究参加聚羧酸减水剂、磷石膏和水玻璃等外加剂对流态固化土性能的影响,并优选配比开展了现场测试,为流态固化土在基坑回填等实践工程的应用提供理论基础和技术支撑。

1 试验材料与过程

1.1 试验材料

试验用土为南京江北新区某项目基坑开挖土,其基本物理性质指标详见表1。固化剂采用 M·32.5 砌筑水泥,其各项性能均符合《砌筑水泥》(GB/T 3183—2017)要求。试验所用原材料包括聚羧酸减水剂(PCE)、磷石膏,以及水玻璃(波美度 38,模数 3.8)。渣土、水泥和磷石膏的化学组成如表2所示。

表1 工程渣土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of engineering residue

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	粒径分布(μm)/%		
				<5	5~75	>75
21.5	44.1	20.9	23.2	15.5	70.7	3.8

表2 材料主要化学成分含量

Table 2 Main chemical composition of PG and cement

	SO ₃ /%	CaO/%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	Loss/%
磷石膏	51.91	34.71	8.41	1.28	0.37	3.32
水泥	4.86	65.75	18.26	3.20	4.42	3.51
渣土	0.82	6.23	61.74	18.00	4.51	8.7

1.2 试验方法

1.2.1 试验配比设计

为探究水泥、磷石膏及水玻璃对流动固化土性能的影响,本研究首先基于文献与前期试验,确立了以2% PCE 掺量和50%含水率为基准的配比方案。详细的变量试验设计如表3所示。

表3 流态固化土配比设计

Table 3 Mixing design for fluid solidified soil

序号	减水剂掺量/%	水泥掺量/%	磷石膏掺量/%	水玻璃掺量/%
C15P20	2	15	20	/
C20P0	2	20	/	/
C20P20	2	20	20	/
C20P20W5	2	20	20	5
C25P20	2	25	20	/

注:减水剂和水泥为占干土比值;磷石膏和水玻璃为占水泥比值。

1.2.2 流动度试验

流动性试验参考《流态固化土填筑应用技术导则(试行)》,采用内径和高度均为 80 mm 的有机玻璃厚壁圆筒测量流动度,如图 1 所示。将拌合物装入圆筒、刮平表面后,快速垂直提起圆筒,使拌合物自由坍落。在静置 30 s 后,测定扩展面最大与最小直径,并取平均值作为其流动值。每组进行 2~3 次平行试验,最终结果取算术平均值。

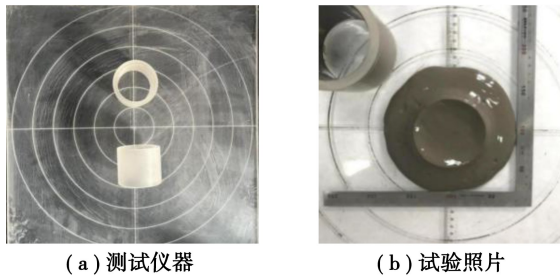


图 1 流动度试验
Fig. 1 Flowability test

1.2.3 无侧限抗压强度试验

流动性试验参考《流态固化土填筑应用技术导则(试行)》进行,采用符合现行行业标准《混凝土试模》JG 237 规定的 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的带底试模,如图 2。试模内涂刷机油后装满流态固化土,使用振捣棒均匀插捣。如流态固化土沉落低于试模口,应及时添加并抹平。静置 24 h 后脱模,包裹后放入标准养护室(20±5 °C,湿度>95%)中养护至设计龄期后,测定 3 个平行样的无侧限抗压强度。

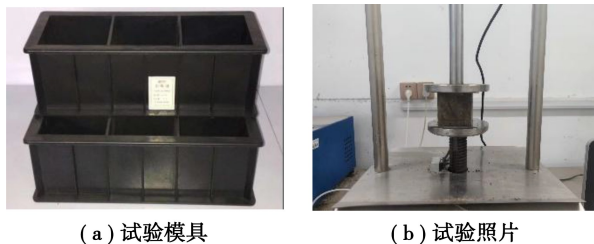


图 2 无侧限抗压强度试验
Fig. 2 Unconfined compression strength test

1.2.4 干缩试验

参考文献[17]中的试验方法进行干缩试验,采用 50 mm × 50 mm × 200 mm 的梁型试模。制样方法与无侧限抗压强度试验相同,同一配比的混合料 6 个试件为一组,3 个试件用来测定材料的收缩变形,另预留 3 个标准试件用来测量材料的干缩失水率,将试样在标准养护室中养护 7 d 后进行。

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{l} \quad (1)$$

$$\alpha_{di} = w_i \quad (2)$$

式中: ε_i 为第 i 次干缩应变; α_{di} 为第 i 次干缩系数; w_i 为第 i 次失水率(%)。

1.2.5 微观试验

为观察固化土微观形态,分析其水化情况,采用 TESCAN 电子显微镜进行电子扫描显微镜分析,在 28 d 龄期无侧限抗压强度试验后,从试件断口处提取部分样品,冻干后进行扫描电镜(SEM)试验。在测试之前,样品经过镀金以提高导电性。

1.2.6 现场试验

在现场进行一段试验段的施工回填后,取搅拌后的流态固化土进行制样,并进行养护。测量其无侧限抗压强度,并与室内制样进行对比。

2 结果与讨论

2.1 流动性

流动度是流态固化土的一个重要指标。当含水率为 50%,水泥掺量为 15% 时,研究了水泥掺量、水玻璃掺量和聚羧酸减水剂对渣土基流态固化土流动度的影响,结果如图 3 和图 4 所示。可以明显看到随着水泥掺量的增加,改良土的流动性能逐渐降低,且在未加入聚羧酸减水剂前均未能达到规范所要求的 160 mm 的流动度要求。这是因为体系中的水分在搅拌过程中被土颗粒及水泥颗粒裹挟吸附,剩余的自由水较少,导致颗粒间缺乏自由水的润滑作用,延展摩阻力较大,改良土的流动性较差^[17]。随着水泥掺量的增加,参与水化的水相应增多,致使流动性能进一步下降,但减少幅度较为有限,当水泥掺量从 15% 增加到 25% 时,流动度从 137 mm 降低为 119 mm,降幅为 13.1%。

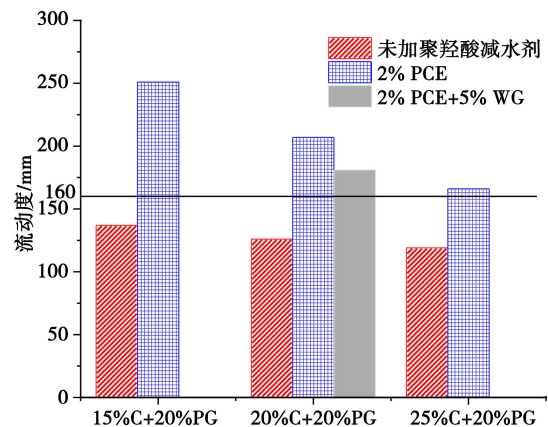


图 3 流动度随水泥及外加剂掺量的变化

Fig. 3 Variation of flowability with cement and additives

加入聚羧酸减水剂可以大幅提高流态固化土的流动性能。在 2% 的聚羧酸掺入量下,材料的流

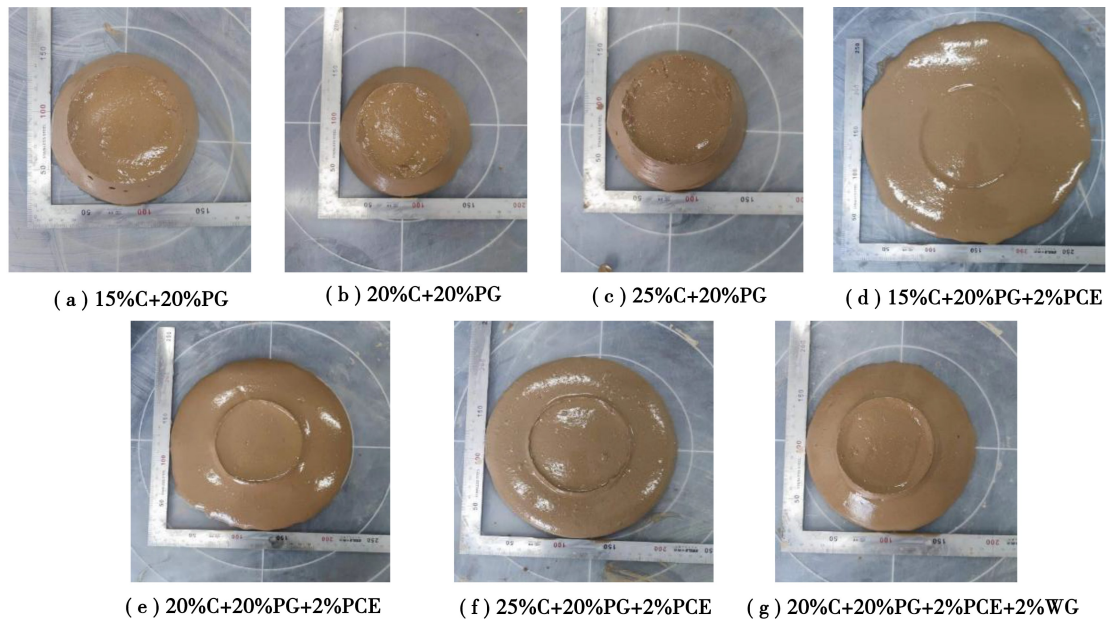


图4 各配比的流动度

Fig. 4 Flowability of different groups

动度提升都在40%以上,且各个配比均能够满足规范要求。由于聚羧酸减水剂具有链状结构,其吸附在土颗粒表面后,会产生空间位阻作用,进而分散体系中的絮凝结构,释放结合水和增加自由水量,增加颗粒表面的水膜厚度,降低颗粒之间的摩阻力,从而提高流动度^[18-19]。但是,可以明显看到,此时水泥掺量对流动度的影响明显增大。随着水泥掺量的增加,流态固化土的流动度大幅度下降。在水泥掺量为15%、20%和25%的情况下,流动度分别为251 mm、207 mm和167 mm,相比水泥掺量为15%时,25%水泥掺量下的流动度降低了约33.9%。这是可能因为聚羧酸减水剂的掺入也分散了水泥颗粒,使得水泥颗粒与水的接触面积变大,提高了水泥的水化速率,消耗了更多的水,从而导致流动性能出现较大幅度的降低。此外,加入5%的水玻璃后,由于其对水泥水化的促进作用,流态固化土的流动性也有所下降,从207 mm降至181 mm,下降幅度仅为12.6%,且仍能够满足规范要求。

2.2 强度性能

作为关键的质量控制指标,无侧限抗压强度直接关系到回填材料的工程性能与后期可再开挖性。不同配比试样在1 d、7 d及28 d的强度数据(表4,图5)表明,水泥掺量是主导因素。掺量越高,各龄期对应的强度值也越大。此外,随着龄期的增长,水泥掺量对强度的影响也逐渐增大。这是因为随着水泥的水化反应不断进行,水化硅酸钙等产物不断积累,强度不断提升^[20-22],都能满足规范要求

的28 d强度大于0.3 MPa的要求。

表4 各组配比的无侧限抗压强度(单位:kPa)

Table 4 Unconfined compression strength of different groups (unit: kPa)

配比	龄期/d		
	1	7	28
C15P20	49.4	401.5	625.4
C20P0	85.6	537.7	847.2
C20P20	56.2	760.6	1 171.3
C20P20W5	175.1	856.8	1 331.7
C25P20	117.8	1 072.3	1 700.5

通过图5可以发现,在养护初期(7 d以内),各组流态固化土的无侧限抗压强度增长速率较快。这是由于水泥水化生成了大量水化硅酸钙,这些胶凝物质相互胶结形成了致密的结构,提高了土体的强度,而随着龄期的增加,水化反应逐渐减弱,改良土的强度增长逐渐放缓,并逐渐稳定。相比配比C20P0,配比C20P20加入磷石膏能够极大提高试样的后期强度,在7 d和28 d龄期时分别提高了41.5%和38.3%。这是因为磷石膏的加入使土体生成大量钙矾石,与水化硅酸钙形成空间网状结构,从而极大提高试样的抗压强度^[13]。然而,由于磷石膏的缓凝作用,1 d龄期时试样的强度相对未加磷石膏的组别较低。此外,加入5%的水玻璃,在1 d龄期时试样强度即达到175.1 kPa,较基准情况提高了2倍以上,这表明其对于早期强度的发

展具有极大的促进作用。这是因为水玻璃能够破坏水泥中硅酸三钙和硅酸二钙的水解平衡,从而极大提高反应速率^[23]。随着龄期的增长,水泥不断水化,其对强度的贡献逐渐降低,但仍能提高试样的强度。

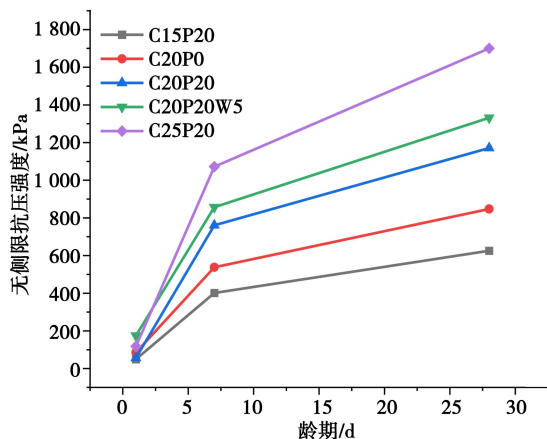


图 5 无侧限抗压强度与龄期的关系

Fig. 5 Relationship between unconfined compression strength and curing age

2.3 干缩性能

实际工程中收缩是化学收缩、干燥收缩、温度收缩以及碳化收缩等不同作用协同导致的结果,难以对其进行准确划分,半刚性改性材料的收缩主要是由环境温度与湿度的变化引起的^[24],故本文主要采用干缩试验评价改良流态固化土的抗干缩变形能力,干缩应变随时间的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,随着时间的增加,各组改良土的干缩应变逐渐增大,但增速逐渐减缓,各组改良土的干缩应变在试验的前 6 天几乎以直线增长,6 天时,各组对应的干缩应变分别为 $3\ 441.8 \times 10^{-5}$ 、 $2\ 451.7 \times 10^{-5}$ 、 $1\ 933.1 \times 10^{-5}$ 、 $2\ 687.4 \times 10^{-5}$,在 12 天后,各组曲线均逐渐趋于平稳,这说明在流态固化土作为填料时要注意早期养护,防止早期开裂。待变形稳定后,各组对应的干缩应变由大到小分别为 C15P20 > C20P20 > C20P20W5 > C25P20,对比各组可以发现随着水泥掺量增加,材料稳定后的干缩应变不断减小。这主要源于水泥掺量提高使土体内自由水减少,颗粒间距与孔径随之缩小,继而导致失水率降低,最终表现为干缩应变的减小。同时加入水玻璃后,试样的干缩系数相较于相同水泥磷石膏掺量的组别减小,说明水玻璃能够在一定程度上限制干缩应变的发展。

根据图 7 显示的平均干缩系数随时间的变化关系,可以看出各组流态固化土平均干缩系数都在前 5 天或前 6 天变化较大。C15P20 组、C20P20 组和 C25P20 组在早期平均干缩系数增长较为剧烈,

之后随着龄期趋于平缓;C20P20W5 组在早期就有平均较大的干缩系数减小,且在 5 天之后也趋于平稳。稳定后各组干缩系数由大到小分别 C20P20 > C15P20 > C20P20W5 > C25P20,总体而言,各改良土稳定后的平均干缩系数差别较小。

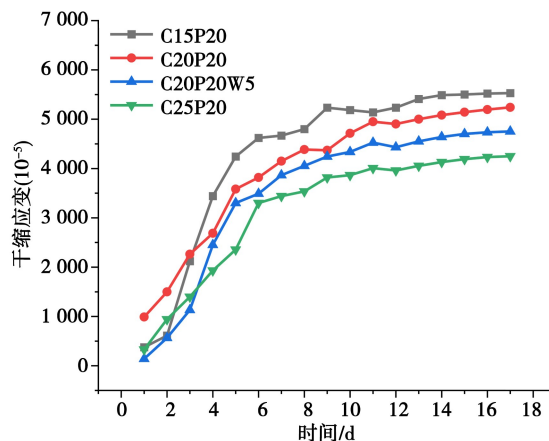


图 6 干缩应变随时间变化

Fig. 6 Variation of cumulative shrinkage strain over time

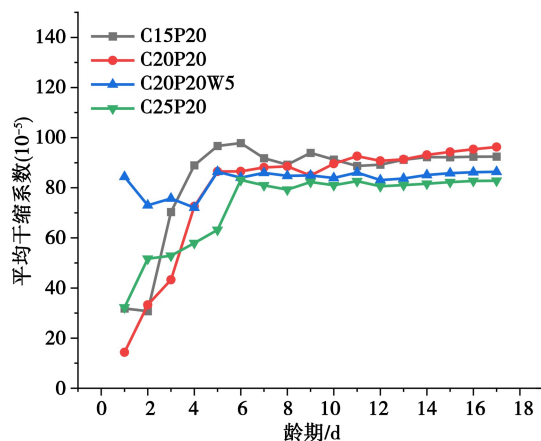


图 7 平均干缩系数随时间变化

Fig. 7 Variation of drying shrinkage coefficient over time

图 8 显示了干缩应变随累计失水率的关系,随着失水率的增大,改良土的干缩应变也逐渐增大。累计失水率小于 35% 时,试样的干缩应变增长明显,且两者基本呈线性关系。当累计失水率超过 40% 时,干缩应变的增长速度减缓,累计失水率与干缩应变也逐渐趋于稳定。

2.4 微观结构分析

通过对流态固化土的微观形貌与内部结构进行深入研究,以期更好地理解不同固化材料的作用机理,开展了不同配比的 28 d 龄期下的 SEM 试验,结果如图 9 所示。经过 28 d 养护后,试样中形成了丰富的水化产物。这些产物一方面填充了土体孔隙,提高了整体密实度;另一方面,通过生成的结晶体与凝胶物质将土颗粒胶结起来,强化了微观

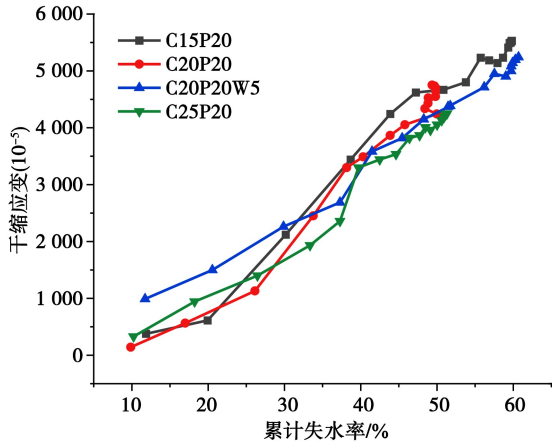


图 8 干缩应变与累计失水率的关系

Fig. 8 Relationship between cumulative drying shrinkage strain and cumulative water loss rate

结构。对比图 9(a)、(c)和(e),可以明显看到增加水泥掺量可以大幅提高水化硅酸钙(C-S-H)等水泥水化产物,试样变得更加致密,试样获得了更高的无侧限抗压强度和抗干缩性能。对比图 9(b)和(c),加入磷石膏后,生成了更多针棒状的钙矾石(AFt),填充了孔隙,与土颗粒和其他水泥水化产物形成致密的空间网状结构,土体孔隙明显减少,密实度更高,这也是土体强度进一步上升的主要原因。

从微观图像(图 9(d))观察发现,掺入水玻璃的试样水化产物数量显著增加。相较于 25%水泥的基准配比,试样中可以观测到更丰富的 C—S—H 凝胶等产物。水玻璃的激发作用使得水泥水化反应更充分,产生的大量胶凝物质与土颗粒结合,形成更大、更致密的团聚体。这一现象进一步验证了水玻璃在促进流态固化土水化反应方面的有效性,从而显著提高了材料的抗压强度。此外,水玻璃的使用还改善土体的整体结构和耐久性,因此该配比下的流态固化土具有较低的干缩应变和干缩系数。这些结果表明,水玻璃不仅可以促进水泥的水化过程,对增强了材料的稳定性具有一定的积极意义。

2.5 现场试验

南京江北新区某项目占地约 9 775.36 m²,拟建总建筑面积约 1.7 万 m²;包括地上建筑约 1.16 万 m²与地下建筑约 0.54 万 m²。由于工程工期要求高,基坑深度大,且地下室外墙距离支护结构较近,肥槽最窄处不到 1 m,因此难以采用传统人工夯实的回填方式。为此,选择了流态固化土进行回填。为兼顾流动性和强度,同时考虑成本因素,基于室内试验结果,采用 C15P20 配比进行现场试验段回填。原土料就地取材,采用基坑开挖渣土,土

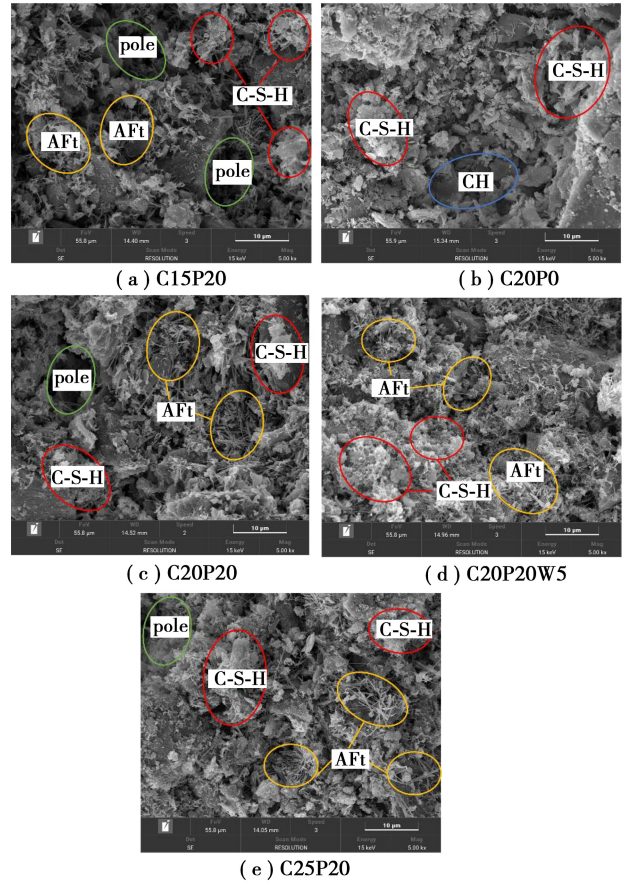


图 9 各配比 28 d 龄期的 SEM 图像

Fig. 9 SEM images of modified soil at 28 d

料的有机质含量在 5% 以下,土料最大粒径不超过 5 cm。采用立式强制搅拌机对流态固化土进行搅拌并进行填筑,如图 10 所示。

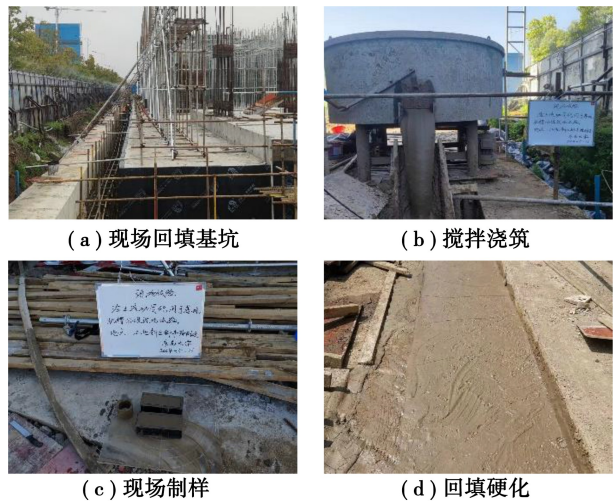


图 10 现场施工情况

Fig. 10 Site construction condition

取现场搅拌的流态固化土制样,养护后进行无侧限抗压强度试验,其结果如表 5 所示。与室内试验相比,现场搅拌的流态固化土强度较低,这可能

是由于搅拌不均匀和施工过程中水量控制的差异所导致的。尽管如此,试验结果仍然表明强度符合规范要求。

表5 现场与室内样品无侧限抗压强度

Table 5 Unconfined compression strength of field and laboratory samples

龄期/d	现场样品强度/kPa	室内样品强度/kPa
7	351.6	401.5
28	514.8	625.4

采用预拌流态固化土施工,解决了深窄基坑回填难的问题。同时,固化土本身的水稳性使其成为地下水与建筑外墙之间的一道屏障,有效保护建筑免受地下水侵蚀。相比于传统的素土、灰土回填,流态固化土具有早期强度高和就地取材的特点,能够减少压实工序,加快施工进度,提高施工效率,符合建筑业高质量发展的需求,具有广阔的工程应用前景。

3 结论

(1)掺入聚羧酸减水剂后,土体的流动性性能得到了大幅度改善,各配比的流动度都提升40%以上。随着水泥掺量的增加,流态固化土的流动性不断降低,同时适量水玻璃的加入也会降低其流动度,但影响较小。

(2)流态固化土因含水率较高,干缩应变较大,水泥掺量的增加会提高其干缩性能。各组配比的干缩应变和干缩系数在早期变化较大,后趋于平稳。同时,随着水玻璃的加入,流态固化土干缩性能也会提高。

(3)磷石膏通过激发并生成更多钙矾石晶体,大量结晶体交织形成的空间网状结构,从而显著提升了流态固化土的后期强度。相比之下,水玻璃能极大促进水泥的水化,从而在早期显著流态固化土的性能。

(4)综合流动性、强度、干缩及微观试验结果,表面采用适当改良剂处理的工程渣土可制备出物理力学性能优异的流态固化土,适用于基坑回填工程。

参考文献(References)

[1] 李丽华,韩琦培,李文涛,等. 循环荷载作用下建筑垃圾土动力性能[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(10): 97-102. (Li Lihua, Han Qipei, Li Wentao, et al. Dynamic Performance of Construction Waste Soil under Cyclic Loading [J]. Journal of Changjiang

River Science Research Institute, 2022, 39(10): 97-102. (in Chinese))

- [2] 杨德生,张孟喜,崔振清,等. 含建筑垃圾土的物理力学特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2011, 17(6): 792-798. (Yang Desheng, Zhang Mengxi, Cui Zhenqing, et al. Physical and Mechanical Behavior of Soil with Construction Waste [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2011, 17(6): 792-798. (in Chinese))
- [3] 许福,蒋川梓,张书经,等. 碱激发矿渣固化土压平衡盾构渣土的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 849-859. (Xu Fu, Jiang Chuanxin, Zhang Shujing, et al. Experimental Study on Alkali Activated Slag Solidification of Earth Pressure Balance Shield Muck [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3): 849-859. (in Chinese))
- [4] 王树英,刘鹏飞,胡钦鑫,等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 28-34. (Wang Shuying, Liu Pengfei, Hu Qinxin, et al. State-of-the-art on Theories and Technologies of Soil Conditioning for Shield Tunneling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 28-34. (in Chinese))
- [5] 张春雷,管非凡,李磊,等. 中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J]. 环境工程, 2014, 32(12): 95-99. (Zhang Chunlei, Guan Feifan, Li Lei, et al. The Progress in the Reutilization Treatment and Disposal of Dredged Sediments in China [J]. Environment Engineering, 2014, 32(12): 95-99. (in Chinese))
- [6] 周永祥,霍孟浩,侯莉,等. 低强度流态填筑材料的研究现状及展望[J]. 材料导报, 2024, 38(15): 126-134. (Zhou Yongxiang, Huo menghao, Hou Li, et al. Current Research and Prospect of Low Strength Flowable Filling Materials [J]. Materials Reports, 2024, 38(15): 126-134. (in Chinese))
- [7] Zhang J X, Wang J G, Li X H, et al. Rapid-hardening controlled low strength materials made of recycled fine aggregate from construction and demolition waste [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 81-89.
- [8] Zhang S, Jiao N, Ding J W, et al. Utilization of waste marine dredged clay in preparing controlled low strength materials with polycarboxylate superplasticizer and ground granulated blast furnace slag [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107351.
- [9] 谭正日,谭洪波,吕周岭,等. 不同类型减水剂对渣土基高流态回填料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3227-3233. (Tan Zhengri, Tan Hongbo, Lv Zhouling, et al. Effect of Plasticizer Type

- on Properties of Construction Spoil Based High-Fluid Backfill [J]. Materials Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9): 3227-3233. (in Chinese))
- [10] Wan X, Ding J W, Jiao N, et al. Preparing controlled low strength materials (CLSM) using excavated waste soils with polycarboxylate superplasticizer [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(9): 214.
- [11] 王瀚. 复合石灰石粉-粉煤灰-矿渣-尾矿混合砂混凝土基本性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020. (Wang Han. Study on the basic performance of composite limestone powder-fly ash-slag-tailings mixed sand concrete [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020 (in Chinese))
- [12] 王家滨, 侯泽宇, 张凯峰, 等. 多元胶凝材料体系再生混凝土力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 97-104. (Wang Jiabin, Hou Zeyu, Zhang Kaifeng, et al. Experiment Research of Mechanical Properties on Recycled Aggregate Concrete with Multiple Cementitious Materials System [J]. Materials Reports, 2022, 36(12): 97-104. (in Chinese))
- [13] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817-2822. (Ding Jianwen, Zhang Shuai, Hong Zhenshun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817-2822. (in Chinese))
- [14] 冯忠民. 大连湾海底淤泥流动固化土室内试验研究[D]. 保定:河北大学, 2020. (Feng Zhongmin, Laboratory test study on silt flow solidified soil in dalianwan lake bottom [D]. Baoding: Hebei University, 2020. (in Chinese))
- [15] 沈卫国, 周明凯, 余崇峻, 等. 磷石膏改性二灰路面基层材料的性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003(10): 34-38. (Shen Weiguo, Zhou Mingkai, Yu Chongjun, et al. Study on the Properties of Phosphogypsum Modified Lime-fly Ash Road Base Course Materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003(10): 34-38. (in Chinese))
- [16] 杨晓华, 俞永华. 水泥-水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J]. 中国公路学报, 2004(2): 69-73. (Yang Xiaohua, Yu Yonghua. Application of cement-silicate double solution grouting in loess Application of cement-silicate double solution grouting in loess [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004(2): 69-73. (in Chinese))
- [17] 崔宏环, 刘卫涛, 张立群. 土凝岩新型固化剂稳定路基粉质黏土的干缩性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 320-328. (Cui Honghuan, Liu Weitao, Zhang Liqun. Dry Shrinkage Properties of Silty Clay Stabilized by New Solidifying Agent of Soil Tuff [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 320-328. (in Chinese))
- [18] 郭晨. 基于PCE改良疏浚泥流动固化土的工程特性试验研究[D]. 南京:东南大学, 2022. (Guo Chen. Experimental Study on Engineering Characteristics of Flow-Solidified Clay Improved by PCE [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese))
- [19] 李秋超, 范颖芳, 李学良. 纳米偏高岭土水泥浆颗粒水膜厚度与流变参数相关性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(2): 273-281. (Li Qiuchao, Fan Yingfang, Li Xueliang. Correlation between water film thickness and rheological parameters of nano-metakaolin cement paste particles [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 273-281. (in Chinese))
- [20] Tang Y X, Miyazaki Y, Tsuchida T. Practices of Reused Dredgings by Cement Treatment [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5): 129-143.
- [21] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005(10): 103-107. (Zhu Wei, Zhang Chunlei, Gao Yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005(10): 103-107. (in Chinese))
- [22] 王文军, 袁飞飞, 蒋建良, 等. 高含水率吹填淤泥固化土强度特性及预测模型[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 461-467. (Wang Wenjun, Yuan Feifei, Jiang Jianliang, et al. Strength Properties and Prediction Models of Solidified Dredger Filled Mud with High Water-content, 2021, 17(2): 461-467. (in Chinese))
- [23] 简文彬, 张登, 黄春香. 水泥-水玻璃固化软土的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 632-637. (Jian Wenbin, Zhang Deng, Huang Chunxiang. Micromechanism of cement-soloum silicate-stabilized soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Supp. 2): 632-637. (in Chinese))
- [24] 余昌运. 磷石膏改性水泥-石灰稳定赤泥道路基层材料可行性研究[D]. 南京:东南大学, 2022. (Yu Changyun. Study on Feasibility of Phosphogypsum Modified Cement-Lime Red Mud Stabilized Road Base Material [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese))