

工程废弃泥浆制备流态固化土的强度与流动性研究

杨 炜¹ 赵冬冬² 陈 新² 何继宏² 张 勇³ 夏 涛³

1 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 无锡 214000

2 华昕设计集团有限公司, 江苏 无锡 214000

3 纳思同(江苏)科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000

[摘要]流态固化处理是泥浆资源化利用的有效途径。本论文针对流态固化土影响因素和流动性随时间衰变规律不明晰等问题,分析了固化剂掺量、泥浆初始含水率、养护龄期对流态固化土无侧限抗压强度的影响以及固化剂掺量、泥浆初始含水率、静置时间对流态固化土流动度的影响。结果表明,流态固化土的无侧限抗压强度随固化剂掺量的增加而增大,随初始含水率的增加逐渐减小,随养护龄期的增大而增大。流态固化土的28d无侧限抗压强度为7d强度的2.15~2.2倍。流态固化土的流动度随初始含水率的增大而增大,随固化剂掺量的增加而略微减小,随静置时间的增大而逐渐减小。在制备流态固化土时应尽量使用较低的初始含水率,以获得理想的胶结强度,同时,流态固化土搅拌完成后应尽快运输至现场进行浇筑,以满足流动性的要求。

[关键词]流态固化土; 强度; 龄期; 流动性

DOI: 10.33142/ect.v3i6.16857

中图分类号: TU472

文献标识码: A

Study on Strength and Fluidity of Flowable Solidified Soil Prepared from Engineering Waste Slurry

YANG Wei¹, ZHAO Dongdong², CHEN Xin², HE Jihong², ZHANG Yong³, XIA Tao³

1. Wuxi Urban Key Construction Project Management Center, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. Huaxin Design Group Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

3. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: Flowable solidification is an effective approach for the resource utilization of slurry. Addressing issues such as the unclear influencing factors and the decay law of fluidity over time for flowable solidified soil (FSS), this paper analyzes the effects of binder content, initial moisture content of the slurry, and curing age on the unconfined compressive strength (UCS) of FSS, as well as the effects of binder content, initial moisture content of the slurry, and standing time on the fluidity of FSS. The results indicate that the UCS of FSS increases with higher binder content, gradually decreases with increasing initial moisture content, and increases with longer curing age. The 28-day UCS of FSS was found to be 2.15 to 2.2 times that of the 7-day strength. The fluidity of FSS increases with higher initial moisture content, slightly decreases with increasing binder content, and gradually decreases with longer standing time. To achieve desirable cementitious strength, a lower initial moisture content should be employed during FSS preparation. Furthermore, FSS should be transported to the site and poured as soon as possible after mixing to meet fluidity requirements.

Keywords: flowable solidified soil; strength; curing age; fluidity

引言

随着城市轨道交通建设的快速发展(全国运营里程达10945.6公里,54城325线),盾构法施工产生大量泥浆(体积达挖方量的2~3倍^[1]),加之钻孔桩、地连墙等工程泥浆,其高含水率、低强度特性导致直接利用困难。传统板框压滤或堆存处理方式成本高昂且占用土地,亟需探索泥浆资源化利用途径。与此同时,基础设施建设对砂石资源需求激增,过度开采导致资源枯竭、生态破坏与环境恶化。国家政策(如《砂石行业绿色矿山建设规范》^[2]、《关于推进机制砂石行业高质量发展的若干意见》^[3])明确要求严控天然砂石开采、推广机制砂,致使砂石价格居高不下。在此背景下,将泥浆固化处理后用于管廊回填、台背填筑等工程,不仅能替代砂石、降低成本,缓解资源环境压力,契合“无废城市”理念,更能有效解决泥浆处

置难题,实现显著的经济、生态与环境效益。

流态固化土技术为此提供了有效方案。该技术通过向泥浆掺加固化剂及外加剂,经搅拌形成兼具流动性和可浇筑性的材料,硬化后具备一定强度与抗水性。其自流产、高抗渗、强度可调、施工便捷等优点,使其广泛应用于基坑肥槽、管廊、台背等回填工程。利用泥浆直接制备流态固化土,可省去板框压滤环节(仅需简单絮凝沉淀),大幅降低处理成本,且相较三渣土、轻质泡沫土等传统材料更具经济优势。

近年来,流态固化土研究取得诸多进展:王聪聪等^[4]利用赤泥-钢渣粉-水泥复合固化剂处理现场土,揭示了赤泥掺量对工作性、强度及微观结构的影响及协同效应;钟维军等^[5]优化了矿渣基固化剂及减水剂体系,实现了优异力学性能;易富等^[6]采用地聚物固化渣土并建立强度预测模型;丁建文等^[7]提出水泥-磷石膏双掺固化淤泥方案,

阐明了钙矾石膨胀的增强机制及限值；黄英豪等^[8]与郎瑞卿等^[9]则聚焦新拌流态土的流动性及黏滞性，探明了含水率、水泥掺量及液限的影响规律。

综上，现有研究虽在固化剂开发及新拌土流动性方面成果显著，但流态固化土的关键影响因素尚需系统剖析，其流动性随静止时间的衰变规律尤不明晰。为此，本文将深入探究流态固化土的影响因素及其流动性时变特性，旨在为其工程应用提供理论支撑。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料与试验方案

试验所用泥浆为无锡市某建筑工地钻孔灌注桩泥浆，根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[10]，测得泥浆的天然含水率为 78.88%，天然密度为 1.54g/cm^3 。所用固化剂为无锡坤鼎建材厂生产的流态土专用固化剂，其主要成分为二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙。

为研究固化剂掺量、泥浆初始含水率、养护龄期对流态固化土强度的影响，设计 5 个泥浆初始含水率和 4 个固化剂掺量，养护龄期设计为 1、3、7、14、28 天。试验方案如表 1 所示。在研究固化剂掺量和流动度关系的试验中，控制含水率为 160%，设计 8%、10%、12%、15% 的固化剂掺量；在研究含水率和流动度关系的试验中，控制固化剂掺量为 10%，设计含水率为 120%、140%、160%、180%；在研究流动度随时间变化的试验中，取固化剂掺量为 10%，含水率分别为 120%、140%、160%、180% 的浆体，测定其在 0h、0.5h、1h、2h、3h、4h 时刻的流动度，分析其流动度随时间变化的规律。

表 1 流态固化土无侧限抗压强度试验方案

固化剂掺量/%	泥浆初始含水率/%	养护龄期/d
8、10、12、15	160	28
10	120、140、160、180、200	28
10	160%	1、3、7、14、28

1.2 制样方法与试验方法

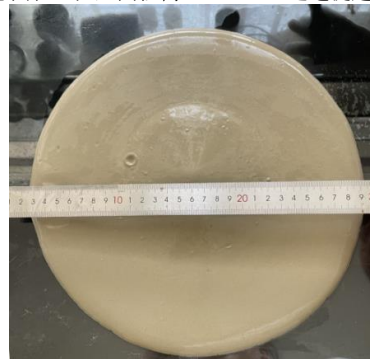
试样尺寸参考《自密实固化土填筑技术规程》(T/CECS 1175-2022)^[11]，采用边长均为 70.7mm 的立方三联模具，用于无侧限抗压强度研究。浇模后在室内静置 2~3 小时，在成型过程中，为确保试样表面不会因干燥而发生开裂，在试样表面覆盖保鲜膜后放入标准养护箱（温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度不低于 95%）中进行养护，养护至相应龄期后进行无侧限抗压强度试验。参照《水泥砂浆立方体抗压强度试验方法》(T 0570—2005)^[12]测量无侧限抗压强度，每组试验设置 3 个平行试样，计算三个试样的抗压强度的平均值作为试验结果。

在流动性测试试验中，采用内径 80mm、高度 80mm 的有机玻璃圆柱筒和 500mm×500mm 玻璃板进行测定。将玻璃板放置在水平位置，用湿布擦抹玻璃使其表面湿而不带水渍。将有机玻璃圆柱筒放在玻璃板中央；将新制备

好的流态固化土迅速注入有机玻璃圆柱桶内，使用刮刀均匀刮平表面；在静置 0h、0.5h、1h、2h、3h、4h 后，将有机玻璃圆柱桶垂直方向迅速提起，并同步启动秒表以记录时间，待经过 30s 后，用直尺测量坍落浆体在垂直方向上的两个直径，并计算其平均值，以此作为流态固化土的初始流动度，试验过程如图 1。



(a) 流态固化土注入圆柱筒 (b) 迅速提起圆柱筒



(c) 测量流动度

图 1 流动性测试试验流程

2 试验结果与分析

2.1 固化剂掺量对无侧限抗压强度影响

固化剂掺量对流态固化土标准养护 28d 后的无侧限抗压的影响如图 2 所示。

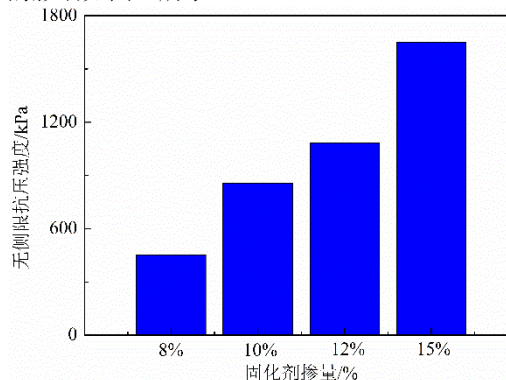


图 2 固化剂掺量对无侧限抗压强度的影响

从图 2 中可以看出流态固化土的强度随固化剂掺量的增加而发生明显的增强，固化剂掺量从 8% 增加到 15% 后，强度由 452kPa 增强到 1650kPa，增加了 3.65 倍。在加入固化剂之前，由于泥浆具有很高的含水率（160%），

使得泥浆不具备强度,当加入固化剂制备成流态固化土后,流态固化土逐渐形成强度,这说明流态固化土的强度来源完全取决于固化剂的水化胶凝作用。当固化剂掺入流态固化土后,固化剂中的碱金属矿物发生水解,形成氢氧化钙、氢氧化镁等碱性物质,提升孔隙溶液的pH值,进而在固化剂中激发剂的作用下诱导固化剂和黏土矿物中的活性二氧化硅和三氧化二铝等析出并参与水化反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、钙矾石等胶凝产物。这些胶凝产物不仅能够胶结土颗粒,而且起到填充孔隙的作用。固化剂掺量越高,生成的水化胶凝产物越多,土颗粒胶结越牢固,孔隙填充越密实,流态固化土的强度越高。

2.2 含水率对无侧限抗压强度影响

图3所示为泥浆初始含水率对无侧限抗压强度的影响。从图中可以看出,流态固化土的无侧限抗压强度随着泥浆初始含水率的增加而近似线性减小。在泥浆初始含水率为120%时,掺入10%固化剂后流态固化土的28d无侧限抗压强度可达1105kPa;而当泥浆初始含水率增加至200%时,10%固化剂掺量下流态固化土的28d无侧限抗压强度降低至527kPa,与泥浆初始含水率120%相比,无侧限抗压强度降低约52.3%。由此可见,泥浆初始含水率对流态固化土的强度存在显著影响。这主要是由于随着泥浆初始含水率增加,流态固化土的自由水含量越高、孔隙越大。一方面,自由水含量的增加使得固化剂水化产生的氢氧化钙、氢氧化镁等碱金属氧化物对孔隙溶液pH的影响降低,较低的pH值不能有效激发固化剂中活性二氧化硅和三氧化二铝等参与水化反应,不能有效生成大量水化硅酸钙、水化铝酸钙、钙矾石等胶凝产物,胶结效果减弱;另一方面,随着孔隙的增大,土颗粒之间的间距逐渐增大,所需要的水化填充产物也更多,在固化剂掺量一定的情况下,孔隙越大,填充效果越差,流态固化土的强度越低。根据图3的试验结果,建议在制备流态固化土时尽量使用较低的泥浆初始含水率,以获得理想的胶结效果。

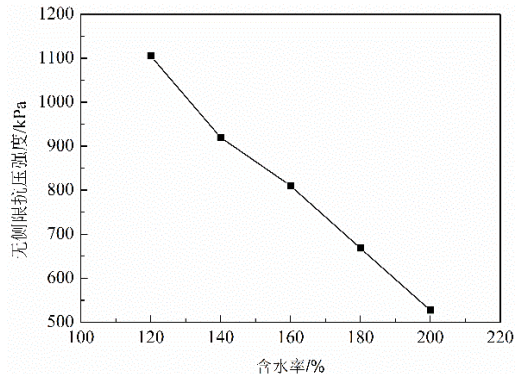


图3 泥浆初始含水率对无侧限抗压强度的影响

2.3 养护龄期对无侧限抗压强度的影响

图4为不同养护龄期条件下流态固化土的无侧限抗压强度。由图可知,随着养护龄期的增长,三种初始含水

率的流态固化土的无侧限抗压强度均逐渐增加。在标准养护的1~7d内,流态固化土的强度保持稳定的快速增长趋势,在标准养护的7~14d内,强度增长速度相较于前7d略微减慢,在标准养护14~28d内,强度增长速度逐渐减缓。由此可知,固化剂的水化反应在14d内反应较为剧烈,生成了较多的水化胶凝产物,使得流态固化土的强度随着养护龄期的增加逐渐增大;养护龄期超过14d后,水化反应进程放缓,流态固化土强度的增长速率也逐渐减慢。此外,三种不同含水率条件下流态固化土的28d强度约为7d强度的2.15~2.2倍。

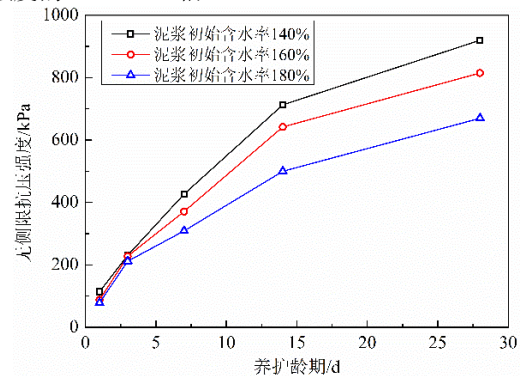
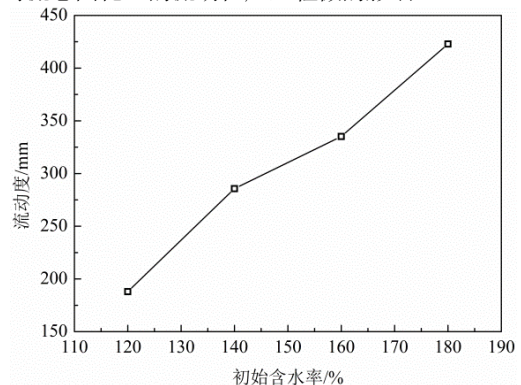


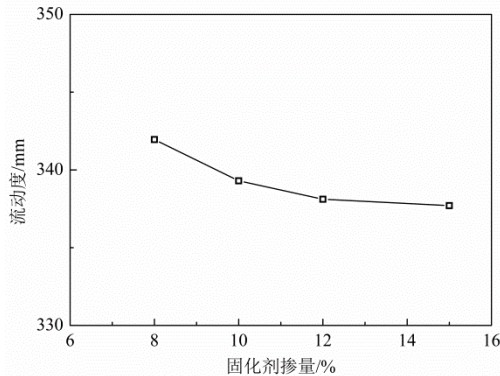
图4 无侧限抗压强度随养护龄期发展规律

2.4 流态固化土的流动性

图5(a)为不同初始含水率条件下流态固化土的初始流动度。由图5(a)可知,含水率对流态固化土的流动度有很大的影响,流动度随含水率的增加而增加。在含水率为120%~180%时,流动度增加了233.5mm。这主要是由于随着初始含水率的增大,流态固化土的土颗粒间的间距增大,土颗粒间的黏聚力、范德华力等逐渐减小,黏滞阻力减小,流动度增大。图5(b)为不同固化剂掺量条件下流态固化土的初始流动度。可以看出,随着固化剂掺量的增加,流态固化土的流动度呈现略微下降的趋势,但流动度总体变化幅度很小,固化剂掺量由8%增加至15%时,流动度仅下降约4mm。这主要是由于流态土的初始含水率较高,固化剂掺入后短时间内并未发生水化,仅固化剂粉体的吸水作用对流态固化土的流动性产生轻微的影响。



(a) 含水率对流动度的影响



(b) 固化剂掺量对流动度的影响

图5 流态固化土的流动度

图6所示为流态固化土的流动度随时间衰变规律。从图6可看出随着静置时间的增加,流态固化土的流动度呈下降趋势。这是由于随着时间的增加,固化剂逐渐发生水化反应,随着水化反应过程的推进,流态固化土中的自由水不断被消耗,此外,在静置的过程中,随着时间的增加,由于水和泥的密度不同,会使部分水析出,进一步导致流态固化土的流动性降低。以2h为转折点,在静置时间0~2h时,流动度迅速降低,且流动度随时间的增加呈近似线性下降趋势,在2~4h内,流动度下降速度明显减小。在静置4h时,三组流态固化土的流动度都接近80mm(圆柱桶的内直径),即拔去圆柱桶后流态固化土可达到直立的效果,这说明流态固化土在搅拌后的4h后已基本不具备流动性。从含水率角度分析,含水率为180%,在搅拌后4h内其流动度减小了336.5mm,随着含水率的减小,流动度的变化值也逐渐减小,但总体而言,在相同静置时间下,初始含水率越高,流态固化土的流动度越大。因此,为保证流态固化土具有足够的流动度,在能够保证强度的前提下应尽量提高泥浆的初始含水率,且流态固化土搅拌完成后应尽快运输至现场进行浇筑。

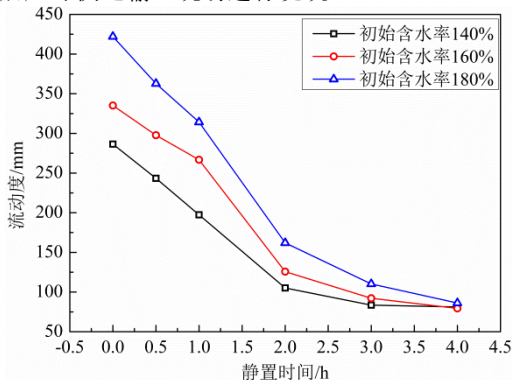


图6 流态固化土的流动度随时间衰变规律

3 结论

本文对流态固化土的强度和流动度进行了分析,主要

研究结论如下:

(1) 流态固化土的强度与固化剂掺量、含水率、养护龄期均有关。流态固化土的无侧限抗压强度随固化剂掺量的增加近似线性关系增大,随初始含水率的增加逐渐减小,随养护龄期的增大而增大。在制备流态固化土时尽量使用较低的泥浆初始含水率,以获得理想的胶结效果。

(2) 流态固化土的28d无侧限抗压强度为7d强度的2.15~2.2倍,在针对工期较紧张的项目时,可根据7d强度推测28d强度,以满足工期要求。

(3) 流态固化土的流动度随初始含水率的增大而增大,随固化剂掺量的增加而略微减小,初始含水率对流动度的影响比固化剂掺量更加明显。流态固化土的流动度随静置时间的增大而逐渐减小,静置时间超过4h时流态固化土基本失去流动性。流态固化土搅拌完成后应尽快运输至现场进行浇筑,以满足流动性的要求。

【参考文献】

- [1]常鸽,李春杰,丁光莹,等.钱江隧道盾构废弃泥浆的混凝分离[J].环境工程学报,2012,6(10):3752-3756.
 - [2]DZ/T 0316-2018, 砂石行业绿色矿山建设规范[S].中华人民共和国自然资源部.
 - [3]工业和信息化部等.关于推进机制砂石行业高质量发展的若干意见[EB/OL].2019.
 - [4]王聪聪,刘茂青,宋红旗,等.赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(7):2488-2496.
 - [5]钟维军,赵雅雯,陈雪梅,等.矿渣基复合固化剂对预拌流态固化土力学强度的影响[J].新型建筑材料,2023(3):46-50.
 - [6]易富,姜珊,慕德慧,等.流态地聚物固化土强度特性及其强度预测[J].水文地质工程地质,2023,50(1):60-68.
 - [7]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.
 - [8]黄英豪,戴济群,徐锴.新拌固化淤泥的流动性和黏滞性试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(2):235-244.
 - [9]郎瑞卿,裴璐熹,孙立强,等.新拌不同液限淤泥固化土流动性试验研究[J].岩土力学,2023,44(10):2789-2797.
 - [10]GB/T 50123-2019,土工试验方法标准[S].北京:中国标准出版社,2019.
 - [11]T/CECS 1175-2022,自密实固化土填筑技术规程[S].北京:中国计划出版社,2023.
 - [12]JGJ/T70,建筑砂浆基本性能试验方法标准[S].北京:中华人民共和国建设部,2009.
- 作者简介:杨炜(1969—),男,汉族,江苏无锡人,大学本科,副总工程师,研究方向:新型建造材料与施工技术。