

流态固化土标准化进展与抗压强度尺寸效应研究

水亮亮^{1,2}, 郑晓光¹, 谭学军¹, 戴 腾¹, 王顺风¹

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 上海市市政工程设计科学研究所有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 流态固化土作为一种流动性好、强度可控的新型回填材料,可提高回填工程的施工效率和回填质量,同时该技术可实现工程渣土和泥浆的资源化利用,加快完善流态固化土技术标准体系对其推广应用具有重要意义。梳理分析我国8部流态固化土现行标准的适用范围、主要技术指标及测试方法,试验研究了不同标准规定下流态固化土试样抗压强度的尺寸效应。结果表明:我国流态固化土技术标准体系由团体标准和地方标准构成,尚存在术语表述不统一、指标体系差异明显和核心指标(流动性、抗压强度)测试方法各异等问题,导致不同标准下流态固化土技术参数可比性差、技术适配性存在争议,且流态固化土强度的尺寸效应与强度大小有关,但对应关系不显著。建议加快制定流态固化土行业标准和国家标准,引导团体标准和地方标准在修编和新编过程中逐步统一,推进流态固化土推广应用。

关键词: 流态固化土;抗压强度;尺寸效应;标准化;资源化利用

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0001-05

Research on Standardization Progress and Size Effect of Compressive Strength of Fluidized Stabilized Soil

SHUI Liangliang^{1,2}, ZHENG Xiaoguang¹, TAN Xuejun¹, DAI Teng¹, WANG Shunfeng¹

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Scientific Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Fluidized stabilized soil, as a new type of backfill material with good fluidity and controllable strength, can improve the construction efficiency and quality in backfilling projects. This technology also enables the resource utilization of construction spoil and mud. Therefore, accelerating the improvement of the technical standard system for fluidized solidified soil is of great significance for the promotion and application of this technology. The applicable scopes, main technical indicators and test methods of eight current standards related to fluidized stabilized soil in China are sorted out and analyzed. The experimental studies are conducted on the size effect among the fluidized stabilized soil strengths under different standard specifications. The results indicate that the technical standard system for fluidized stabilized soil consists of group standards and local standards in China. However, there are still problems such as inconsistent expression of terms, obvious differences in the index system, and different testing methods for core indicators (fluidity, compressive strength), which lead to the problems such as poor comparability of technical parameters and disputes over technical adaptability of fluidized solidified soil under the different standards. And the size effect of fluidized solidified soil strength is related to the magnitude of strength, but the correlation is not significant. It is recommended to accelerate the formulation of industrial and national standards for the fluidized stabilized soil, and to guide the gradual unification of group standards and local standards during the process of revision and new compilation in order to promote the application and popularization of this technology.

Keywords: fluidized solidified soil; compressive strength; size effect; standardization; resource utilization

收稿日期: 2025-04-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3803402);上海市科学技术委员会项目(22DZ1208900);上海市建委科研项目(沪建科 2023-002-005);上海市青年科技启明星项目(23QB1404600);上海市政总院科研项目(K2022J012A)

作者简介: 水亮亮(1989—),男,博士,高级工程师,从事低碳道路、固废利用技术研究与应用相关工作。

通信作者: 谭学军(1975—),男,博士,教授级高级工程师,从事城市多源固废处理处置与资源化利用研究与应用工作。电子信箱: tanxuejun@smedi.com

0 引言

流态固化土是一种新型岩土工程材料,其根据工程需要就地取土(如工程渣土、工程泥浆等),掺加与土质特性相适应的土壤固化剂、必要的水和外加剂等材料,经拌合均匀后,形成具有可施工性的浆料,经浇筑或填筑、养护、固化后具有一定强度、水稳定性、低渗透性,性能长期保持稳定^[1]。近年来流态固化土在我国市政工程^[2-4]、基坑肥槽^[5-6]和管道沟槽^[7-8]等工程建设中应用广泛,然而随着流态固化土技术工程应用的深入,标准化建设滞后与技术指标的区域性差异逐渐凸显,进而导致出现材料适配性不足、施工质量控制难等问题。

我国流态固化土标准化工作起步较晚,目前相关规范以团体标准和地方标准为主,且因所规定的流态固化土应用行业或场景不同等原因,不同标准对流态固化土的相关指标要求和测试方法存在显著差异,不利于流态固化土技术的推广应用。本文通过梳理现行主要标准,聚焦流态固化土流动度和抗压强度两大核心指标的差异,基于室内试验研究不同标准下抗压强度试样的尺寸效应,提出流态固化土标准化的发展建议,以期为该领域标准化进程提供理论支撑。

1 国内流态固化土标准体系现状与分析

本文按标准发布时间的先后顺序收集了8部流态固化土的代表性相关标准,对各标准的适用范围、主要技术指标及其测试方法进行梳理,分析不同标准的差异与联系。

(1)2019年3月北京岩土工程协会发布《预拌流态固化土填筑工程技术标准》(T/BGEA 001—2019)^[9],提出了流态固化土在空洞、肥槽和路基等回填工程中应用的技术要求,主要指标为抗压强度和评价流动性的坍落度、扩展度。用于孔洞、肥槽回填时,该标准对流动性要求较高(坍落度为150~240 mm,扩展度>400 mm),但对28 d抗压强度要求较低(≥ 0.4 MPa);而用于道路路基回填时,该标准对流动性要求较低(坍落度为80~150 mm),对28 d抗压强度根据不同道路等级和应用层位要求不一,但总体高于对空洞和肥槽回填的要求。流动性指标的测试方法参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)^[10]执行,抗压强度测试方法参照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)^[11]执行,试样

尺寸为边长100 mm的立方体。

(2)2022年3月四川省住房和城乡建设厅发布《预拌流态固化土工程应用技术标准》(DBJ51/T 188—2022)^[12],提出了流态固化土在狭窄及非承重空间(基槽、沟槽、空洞和坑穴等)、路基、临时地坪、三背回填(台背、涵背和墙背)和地基处理等各类回填工程中应用的技术要求,主要指标为流动扩展度(流动性)和抗压强度。根据不同应用场景,2项主要技术指标参数有所差异,且增加了湿密度、水稳系数和渗透系数等指标。其中,流动性指标的测试方法采用内径75 mm、高150 mm的圆柱筒测试,抗压强度测试方法参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[13]执行,试样尺寸为边长70.7 mm的立方体。

(3)2022年3月中国工程建设标准化协会发布《预拌流态固化土填筑技术标准》(T/CECS 1037—2022)^[14],提出了流态固化土在换填、空洞和肥槽等回填工程中应用的技术要求,主要指标为抗压强度和评价流动性的坍落度、扩展度。用于换填工程时,抗压强度应满足功能要求,坍落度(流动性)应达80~150 mm;用于空洞和肥槽回填时,28 d抗压强度不宜小于0.4 MPa,扩展度(流动性)>300 mm,2项指标的测试方法同《预拌流态固化土填筑工程技术标准》(T/BGEA 001—2019)中规定。此外,当建筑物地下室有抗浮设计时,肥槽回填流态固化土渗透系数应满足设计要求,且不宜大于 5×10^{-7} cm/s。

(4)2023年1月天津市市场监督管理委员会发布《泥态固化土道路填筑技术规程》(DB12/T 1179—2023)^[15],提出了流态固化土在各等级道路路基、台背、沟槽和基坑等部位中应用的技术指标,主要指标为流动度(流动性)和抗压强度,具体指标要求根据道路等级、应用部位不同而存在差异。其中,采用内径80 mm、高80 mm的圆柱筒测试流动度指标,抗压强度测试试样尺寸为边长100 mm的立方体。此外,从预防路基收缩开裂角度出发,标准还提出了干缩性能指标要求。

(5)2023年2月中国市政工程协会发布《流态填筑料回填工程技术标准》(T/CMEA 32—2023)^[16],提出了流态固化土在建筑和市政工程中回填应用的技术要求,主要指标为流动扩展度(流动性)和抗压强度。标准规定,在具有较大空间的管沟、非承重路基和肥槽等回填流态固化土时,其流动扩展度应为100~160 mm;在一般工程回填时,要求其流动扩展度

为160~220 mm,而在狭窄空间、无法振捣的空间回填时,要求其流动扩展度应 >220 mm,流态固化土的28 d抗压强度不宜小于0.5 MPa;而对于有二次开挖需求的回填工程,其28 d抗压强度不宜大于2.0 MPa。2项主要指标的测试方法同《预拌流态固化土工程技术标准》(DBJ51/T 188—2022)。此外,从流态固化土材料性能稳定性和回填工程抗渗性提升角度出发,标准还规定了流态固化土拌合物湿密度和抗渗系数的指标要求。

(6)2023年5月中国城镇供水排水协会发布《排水管道工程自密实回填材料应用技术规程》(T/CUWA 40055—2023)^[17],提出了流态固化土在排水管道沟槽回填应用的技术要求,主要指标为坍落扩展度(流动性)和抗压强度。标准规定,流态固化土的坍落扩展度应达500~600 mm,3 d抗压强度应 ≥ 0.2 MPa,28 d抗压强度应达0.4~2.0 MPa。其中,流动性测试方法参照《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T 283—2012)^[18]执行,实际与《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)相同,抗压强度的试样尺寸为100 mm立方体。此外,标准还对流态固化土的重度、泌水率和凝结时间等指标提出相关要求。

(7)2023年6月南京市城乡建设委员会发布《流态固化土填筑应用技术导则(试行)》^[19],提出了流态固化土在基坑肥槽、管道沟槽、地下结构顶板、地基孔洞、挡土墙侧壁和路基等部位中应用的技术要求,主要技术指标为流动值(流动性)和抗压强度,根据不同应用部位需求,2项指标的具体要求差异明显。采用内径80 mm、高80 mm的圆柱筒测试流动性指标,采用边长70.7 mm立方体测试抗压强度。此外,根据具体项目需要,标准还规定了泌水率和抗渗系数的指标要求。

(8)2024年5月上海市市场监督管理局发布《建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程》(DB 31/T 1483—2024)^[20],规定了流态固化土在基坑肥槽、建筑物内部剩余空间、管线沟槽、基坑底板、软土地基等回填或换填工程中应用的技术要求,主要技术指标为抗压强度和评价流动性的坍落度、坍落扩展度。根据回填空间是否具备振捣条件和对早期强度要求的不同,该规程对流动性和抗压强度指标要求差异明显,部分应用场景甚至规定了流态固化土的1 d抗压强度。其中,流动性指标测试方法参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016),抗压强度试样采用边长为70.7 mm的立方体。

此外,该规程还提出了充盈度、凝结时间、泌水率、表观密度和抗冻性等系列指标要求。

综上,我国流态固化土标准体系经历了从早期团体标准先行探索到地方标准逐步补充的发展过程,目前尚未形成国家标准和行业标准,且现有标准呈现如下特点。

(1)术语表述不统一。首先,不同标准对“流态固化土”的表述不统一,有侧重表达在工业化、标准化流程下生产制备的“预拌流态固化土”,也有侧重表达材料功能属性的“流态填筑料”和侧重填筑效果的“自密实回填材料”等表述,但其材料本质特性相近。其次,表征流态固化土工作性的术语表述不一致,如“坍落度”“坍落扩展度”“流动度”和“流动扩展度”等,这主要是由于测试方法不统一所致。此外,各标准中表述流态固化土拌合物单位体积重量的术语有“湿密度”“湿重度”“重度”和“表观密度”等,这也给使用者带来理解的不便。

(2)专注领域存差异。主要表现在团体标准专注领域更加侧重所属协会的专业方向,如中国城镇供水排水协会发布的标准专注于流态固化土在排水管道沟槽回填中应用的技术要求;地方标准规定流态固化土的应用领域则更加多元,如市政领域的道路、管线等回填,以及建筑领域的基坑肥槽、建筑物内部空间等回填。

(3)技术指标类型趋于全面。随着流态固化土技术标准化建设不断发展和工程应用不断深入,近年来发布的相关标准从仅关注流动性和抗压强度这2项核心指标,逐步增加了渗透系数、泌水率、凝结时间和湿密度等重要指标,上海市地方标准甚至提出了抗冻性、收缩率等耐久性指标要求,指标体系建设逐渐完善,具体如表1所列。

(4)核心指标测试方法不统一。如表1所列,流动性和抗压强度作为流态固化土的2项核心指标,在本文汇总的8部标准中,有4部标准采用混凝土坍落度筒法测试流动度,而采用 $\phi 80$ mm $\times$ 80 mm和 $\phi 75$ mm $\times$ 150 mm两种规格圆柱筒测试流动度的标准各2部,这是由于工程人员对混凝土流动度测试方法更加熟悉,且相关测试设备更易获取所致。而在流态固化土抗压强度测试方法中,选择边长70.7 mm立方体试块和100.0 mm立方体试块进行强度测试的标准各4部。总之,选取的8部现行标准针对2项核心指标的测试方法共有5套方案,这将导致技术指标数据可比性差、技术适配性争议大等问题,不利于技术推广应用。

表1 国内现行流态固化土代表性标准指标差异对比

标准名称	类型	流动性测试方法			抗压强度测试方法		其他指标
		混凝土 坍落度筒	φ80 mm×80 mm 圆柱筒	φ75 mm×150 mm 圆柱筒	70.7 mm 立方体	100.0 mm 立方体	
《预拌流态固化土填筑工程技术标准》(T/BGEA 001—2019)	团标	√	—	—	—	√	渗透系数
《预拌流态固化土工程应用技术标准》(DBJ51/T 188—2022)	地标	—	—	√	√	—	湿密度、水稳系数和渗透系数
《预拌流态固化土填筑技术标准》(T/CECS 1037—2022)	团标	√	—	—	—	√	渗透系数
《泥态固化土道路填筑技术规程》(DB12/T 1179—2023)	地标	—	√	—	—	√	湿重度、干缩性能
《流态填筑料回填工程技术标准》(T/CMEA 32—2023)	团标	—	—	√	√	—	湿密度、渗透系数
《排水管道工程自密实回填材料应用技术规程》(T/CUWA 40055—2023)	团标	√	—	—	—	√	重度、泌水率和凝结时间
《流态固化土填筑应用技术导则(试行)》	导则	—	√	—	√	—	泌水率、渗透系数
《建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程》(DB 31/T 1483—2024)	地标	√	—	—	√	—	充盈度、凝结时间、泌水率、表观密度、抗冻性、弹性模量和渗透系数

2 抗压强度尺寸效应研究

由表1可知,目前国内现行标准对流态固化土抗压强度主要采用立方体试块测试,尺寸为边长70.7 mm立方体和100.0 mm立方体2种。考虑道路工程测试材料抗压强度多采用圆柱形试样^[21],此外若对现场硬化后的流态固化土进行钻芯取样检验其强度,获得的芯样同样为圆柱形。为研究相同配合比下流态固化土不同尺寸试样的抗压强度差异,本文研究按土样:自研土壤固化剂:自来水=100:70:20的质量比制备流态固化土,所选土样为上海

常见低液限黏土烘干、粉碎并过5 mm筛后的样品。对该样品选用混凝土坍落度筒法测得的坍落度为275 mm,坍落扩展度为1 100 mm,采用φ80 mm×80 mm圆柱体测得流动度为235 mm,流态固化土流动性好。采用浇筑成型的方式,成型70.7 mm立方体试块、100 mm立方体试块、φ50 mm×50 mm圆柱试块、φ100 mm×100 mm圆柱试块和φ100 mm×200 mm圆柱试块共5种常见尺寸的抗压强度试样,以70.7 mm立方体试块为基准,测试并计算不同尺寸流态固化土强度的尺寸换算系数,结果如表2所列。

表2 不同尺寸流态固化土试样的抗压强度对比

试件尺寸	7 d	换算系数	28 d	换算系数	56 d	换算系数
70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm立方块	0.59	1.00	2.09	1.00	2.16	1.00
100 mm×100 mm×100 mm立方块	0.41	0.69	1.98	0.95	1.97	0.91
φ50 mm×50 mm圆柱试块	0.56	0.95	1.29	0.62	1.48	0.69
φ100 mm×100 mm圆柱试块	0.40	0.68	1.47	0.70	1.81	0.84
φ100 mm×200 mm圆柱试块	0.37	0.63	0.58	0.28	0.74	0.34

由表2可知,100 mm立方体试块尺寸大于基准试样,其换算系数小于1,且换算系数随流态固化土强度的增大而先增大后略有减小,当基准样流态固化土强度>2 MPa时,其换算系数>0.90。φ50 mm×50 mm圆柱体试块的换算系数随流态固化土强度增大而显著减小,在流态固化土基准样强度较小(<0.60 MPa)时,其换算系数为0.95,当流态固化土强度>2.00 MPa时,其换算系数在0.62~0.69。φ100 mm×100 mm圆柱

体试块的换算系数随流态固化土强度增大而增大,换算系数变化幅度相对较小,在0.68~0.84范围内。φ100 mm×200 mm圆柱体试块的换算系数在流态固化土强度较低(<0.60 MPa)时,仅略小于φ100 mm×100 mm圆柱体试块的换算系数,但随着流态固化土强度增大,换算系数迅速降低,在流态固化土强度>2 MPa时,φ100 mm×200 mm圆柱体试块的换算系数约为φ100 mm×100 mm圆柱体试块换算系数

的0.4倍。

总之,相同配合比下,边长 70.7 mm 流态固化土立方体试块的测试强度值最高,不同尺寸试块与 70.7 mm 立方体试块间强度换算系数与流态固化土强度的大小有关,但没有显著且稳定的对应关系。相比而言,φ100 mm×100 mm 圆柱体试块与基准试样间的强度对应关系相对稳定,在实际工程中可钻取 φ100 mm×100 mm 的圆柱体芯样,了解流态固化土的强度特征。

3 结 语

本文对我国现行流态固化土相关标准进行系统梳理与分析,并试验研究了不同标准规定下流态固化土强度测试的尺寸效应,主要结论如下。

(1)我国流态固化土技术标准体系已初步形成,并以团体标准和地方标准为主,但不同标准间存在术语表述不统一、专注领域和指标体系差异明显以及核心指标(流动度、抗压强度)测试方法各异等问题,导致不同标准下流态固化土技术参数可比性差、技术适配性存在争议,阻碍了该技术的推广应用。

(2)相同配比下,边长 70.7 mm 立方体流态固化土试块抗压强度最高,不同尺寸试件的抗压强度尺寸效应还与强度大小有关,其中 φ100 mm×100 mm 圆柱体试块与边长 70.7 mm 立方体试块的抗压强度换算系数为 0.68~0.84,变化相对较小。

(3)建议加快流态固化土行业标准与国家标准的制定,从规范术语定义、完善指标体系和统一测试方法等角度出发,引导团体标准和地方标准在修编和新编过程中逐步统一。此外,在标准内容上应关

注耐久性指标和工程质量验收等条款内容,并在抗压强度指标上细化对流态固化土早期强度的要求,以满足工程建设需求。

参考文献:

[1] 周永祥,王继忠.预拌固化土的原理及工程应用前景[J].新型建筑材料,2019,46(10):117-120.
[2] 杜衍庆,王新岐,曾伟,等.道路用流态固化土的基本性质与工程实践[J].天津建设科技,2021,31(3):12-15.
[3] 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):130-138.
[4] 苏悦,闫楠,白晓宇,等.预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J].材料导报,2024,38(9):66-72.
[5] 朱伟平.预拌流态固化土在基坑肥槽填筑工程中的应用研究[J].工程机械与维修,2024(12):139-141.
[6] 张霁川,何浪军,刘逾亮,等.预拌流态固化土在软土地基肥槽回填中的应用[J].建筑技术,2024,55(18):2208-2211.
[7] 甘雨,王全胜,张强,等.管道更新用流态固化土性能试验研究[J].中国市政工程,2025(1):20-25;142.
[8] 万敏,汪涛,陶后兴,等.流态土沟槽埋管回填材料对管道浮力的试验研究[J].中国市政工程,2022(4):64-67;124.
[9] T/BGEA 001—2019,预拌流态固化土填筑工程技术标准[S].
[10] GB/T 50080—2016,普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].
[11] JGJ/T 233—2011,水泥土配合比设计规程[S].
[12] DBJ51/T 188—2022,预拌流态固化土工程应用技术标准[S].
[13] GB/T 50081—2019,混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
[14] T/CECS 1037—2022,预拌流态固化土填筑技术标准[S].
[15] DB12/T 1179—2023,泥态固化土道路填筑技术规程[S].
[16] T/CMEA 32—2023,流态填筑料回填工程技术标准[S].
[17] T/CUWA 40055—2023,排水管道工程自密实回填材料应用技术规程[S].
[18] JGJ/T 283—2012,自密实混凝土应用技术规程[S].
[19] 南京市城乡建设委员会,流态固化土填筑应用技术导则(试行)[S].
[20] DB 31/T 1483—2024,建筑垃圾与工程泥浆再生自密实填筑技术规程[S].
[21] JTG 3441—2024,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

