

外加剂对流态淤泥固化影响研究

江文琛¹, 林文逸^{2,3}, 方祥位^{2,4}, 李玉豪², 黄 晟¹, 水亮亮¹

(1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 德兴市龙头山乡人民政府, 江西 上饶 334218; 4. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 为了进一步提升外加剂对流态淤泥固化效果, 在自主研发的流态淤泥固化复合型胶凝材料 (CCM) 基础上, 通过单因素试验和正交试验研究了外加剂石膏、水泥基渗透结晶材料 (CCCW) 和抗泥剂对流态淤泥固化流动度和强度的影响, 并探讨了龄期和掺量对流态固化效果的影响, 确定外加剂的优化配比, 得到了一种复合型流态土固化剂 (CFSS)。结果表明: 流动度随石膏和抗泥剂掺量增大呈现先增大后减小的趋势, 随 CCCW 掺量增大持续减小; 无侧限抗压强度随石膏和 CCCW 掺量增大而增大, 随抗泥剂掺量增大而减小。CFSS 流态淤泥固化的 56 d 体缩较水泥固化降低 44%, 且强度提高 13.5%。CFSS 掺量在 8%~20% 范围内, 流动度和强度与 CFSS 掺量呈近似线性关系。掺入外加剂不会改变流态淤泥固化的水化产物种类, 但促进了水化产物产生; 随掺量增大, CFSS 固化淤泥累计孔隙体积和最可几孔径逐渐减小, 从而提高流态淤泥固化的效果。

关键词: 流态固化; 淤泥; 石膏; 水泥基渗透结晶材料 (CCCW); 抗泥剂

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0001-08

Influence Analysis of Admixtures on Fluidized Solidified Sludge

JIANG Wenchen¹, LIN Wenyi^{2,3}, FANG Xiangwei^{2,4}, LI Yuhao², HUANG Sheng¹, SHUI Liangliang¹

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

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Government of Longtoushan Township, Shangrao, Jiangxi 334218, China;

4. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing 400045, China)

Abstract: To further improve the effect of admixtures on the flowable solidification of sludge, based on a self-developed composite cementitious material (CCM) tailored for fluidized sludge solidification, this work explores the effects of gypsum, cement-based capillary crystalline waterproofing materials (CCCW), and anti-clay agents on flowable solidified sludge through single-factor and orthogonal tests, examines the impacts of curing time and content on solidification effectiveness. An optimized mix ratio was determined, yielding a composite fluidized soil stabilizer (CFSS). Results indicate that the fluidity of the solidified sludge first increases and then decreases with increasing dosages of gypsum and anti-clay agent, whereas it decreases continuously as CCCW dosage rises. In terms of unconfined compressive strength, increasing gypsum or CCCW dosage enhances the strength, while a higher anti-clay agent dosage leads to reduced strength. The influencing factors on fluidity, in descending order of significance, are: CCCW > anti-clay agent > gypsum. For strength, the order is: gypsum > CCCW > anti-clay agent. Compared with cement solidification, sludge solidified with CFSS shows a 44% reduction in the 56-day volume change rate and a 13.5% increase in strength. Within the CFSS dosage range of 8%~20%, both fluidity and strength exhibit a linear relationship with the dosage.

收稿日期: 2025-12-05

修稿日期: 2026-01-13

基金项目: 重庆英才创新创业示范团队项目 (CSTC2024YCJH-BGZX00012); 重庆市建设科技计划 (城科字 2024 第 2-2 号); 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研项目 (K2023K124A)

作者简介: 江文琛(1986—), 男, 正高级工程师, 主要从事土壤地下水修复和固体废物处置研究工作。E-mail: jiangwenchen@smeci.com

通讯作者: 方祥位(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土稳定与固化、微生物岩土工程、非饱和土与特殊土及地基处理方面的研究工作。E-mail: fangxiangwei1975@163.com

Admixtures do not alter hydration product types but accelerate their generation, cumulative pore volume and most probable pore size gradually decrease with higher content, thereby improving solidification effectiveness.

Keywords: fluidized solidified; sludge; gypsum; cementitious capillary crystalline waterproofing (CCCW) material; anti-clay agents

淤泥具有“三高两低”(高含水率、高孔隙率、高压缩性、低强度和低渗透性)特性,广泛分布于河道、湖泊及沿海地区,其处理与资源化利用一直是环境岩土工程领域的难点^[1]。传统的水泥固化法虽能改善淤泥强度,但存在流动性差、体积收缩大及碳排放高等问题^[2-3]。近年来,流态固化土技术因其良好的流动性和施工便利性,在路基回填、基坑回筑等工程中展现出广阔的应用前景^[4]。

国内外学者针对流态固化土的工作性能和力学性质等方面开展了大量研究。陈容华等^[5]采用水泥、粉煤灰和生石灰对粉质黏土进行固化,研究了各固化剂成分掺量、温度和龄期对流动度和强度的影响,建议了水泥、粉煤灰和生石灰的掺量。牛家栋^[6]利用矿渣基地聚物对盾构土进行固化处理,结果表明,矿渣基地聚物生成的无定形凝胶增强了土壤颗粒间的胶结作用,提高了密实度;并分析了固化剂掺量和养护温度对盾构固化土无侧限抗压强度的影响。刘成龙^[7]以太原市姚村综合管廊工程为背景,采用复合掺合料-激发剂掺配方式,确定矿渣水泥与固化剂的质量比和水灰比等参数。包益鑫^[8]研究了电石渣和脱硫灰单掺及复掺对流态土基本性能及微观特性的影响,与Ca(OH)₂和CaSO₄复掺体系相比,采用电石渣和脱硫灰单掺或复掺制备的流态固化土具有更优异的流动性。Nataraja等^[9]以粉煤灰、稻壳灰和采石场粉尘作为可控低强度材料(CLSM,即流态固化土)的组成材料,研究表明,用水量和水泥掺量对CLSM强度的影响最大,其次是稻壳灰和粉煤灰。杨俊钊^[10]用硅酸盐水泥固化黄海某海域海底淤泥,发现水固比和分散剂掺量对混合料浆流动度影响显著,而水泥掺量对流动度几乎没有影响。Sheen等^[11]研究了矿渣替代水泥对CLSM工作性能的影响,结果表明,随着矿渣掺量增加,流动性逐渐增大,凝结时间逐渐延长。Kaliyavaradhan等^[12]研究了CLSM的塑性性能,结果表明,粉煤灰、高炉矿渣、铸造砂和废橡胶等固废制备CLSM会影响其凝结时间、流动性、离析和泌水率等性能,废料超过一定掺量会影响流动性,并出现离析现象。综上,流态固化土研究已取得丰硕成果,淤泥由于特殊的物理力学特性给其流态固化带来极大挑

战,目前尚处于起步阶段。林文逸等^[13]针对淤泥结合固废资源化利用研发了一种流态土固化剂,该固化剂由复合胶凝材料CCM(水泥、矿粉、生石灰及硅酸钠)和分散剂组成,但其流态固化效果有待进一步提升。

本文以重庆市歌乐山典型淤泥为对象,在笔者研发的流态土固化剂(复合胶凝材料CCM+分散剂)基础上,通过单因素试验和正交试验研究外加剂石膏、水泥基渗透结晶材料(CCCW)和抗泥剂对流态淤泥固化流动度和强度的影响,确定外加剂的优化配比,得到复合型流态土固化剂(CFSS),并研究龄期和掺量对流态淤泥固化的影响;最后通过XRD和MIP测试分析相应的微观机制。为流态淤泥固化的工程应用奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用淤泥取自重庆市沙坪坝区歌乐山某建筑工地,物性指标如表1所示,天然孔隙比1.51,天然含水率65.8%,大于液限,是典型的淤泥。淤泥颗粒的不均匀系数C_u为24.67,曲率系数C_c为1.08。采用X射线荧光光谱仪(XRF)测定淤泥的化学组成如表2所示。

表 1 淤泥物理性质指标^[13]

比重 <i>G_s</i>	液限 <i>W_p</i> /%	塑限 <i>W_L</i> /%	塑性 指数 <i>I_p</i>	最优含水 率 <i>W_{op}</i> /%	最大干密度 <i>ρ_d</i> /(g·cm ⁻³)
2.54	59.50	31.69	19.2	32.78	1.33

表 2 淤泥化学组成及含量^[13]

化学 组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	MgO	TiO ₂	其它
含量 /%	60.02	22.01	6.67	3.18	2.76	1.63	1.52	1.08	1.13

流态固化材料包括复合胶凝材料CCM、分散剂和外加剂。CCM由基础胶凝材料(水泥和矿粉)和激发剂(生石灰和硅酸钠)混合而成^[13]。分散剂采用木质素磺酸钙。

淤泥具有“三高两低”特性,会出现失水收缩的现象,掺入膨胀外加剂可以生成膨胀性物质减小收

缩;同时已有研究表明,淤泥及固化淤泥对水十分敏感,掺入水稳外加剂可增强液态淤泥固化的水稳性能^[1,10];分散剂掺量过高会产生大量气泡并导致强度降低,掺入流动外加剂可有效减少表面活性剂掺量并提高流动度。

膨胀外加剂为石膏,白色粉末;水稳外加剂为水泥基渗透结晶材料(CCCW),灰色粉末;流动外加剂为抗泥剂,棕黄色液体,含固量 70%。

1.2 试样制备

试样制备主要包括混合材料拌合、装样养护和脱模养护三个阶段^[13]。

(1) 混合材料拌合:根据试验方案配合比称量出所需的淤泥、各种固化材料和水;首先将称好的淤泥和固化材料(干料)放入搅拌机中慢搅 3 min,混合均匀;然后加入水和液体材料,快速搅拌 5 min 后结束。

(2) 装样养护:采用 39.1 mm×80 mm 上下开口的圆柱体模具,装样前对模具底部进行密封处理,即用胶带封住底部并保持底部平整,并在模具内壁上均匀涂抹适量凡士林,方便试样脱模。将搅拌好的液态淤泥固化倒入模具,放于室内自然养护 48 h。

(3) 脱模养护:养护 48 h 后,对试样进行脱模处理,首先将胶带拆除,利用土工刀切去高出模具端口部分的固化土,然后利用仪器将试样缓慢顶出模具,置于室内自然养护至相应龄期。

1.3 试验方案

(1) 单因素试验

为了研究外加剂石膏、CCCW 和抗泥剂对液态淤泥固化流动度和 28 d 强度(UCS)的影响规律和适宜掺量,设置石膏掺量为 0~1.5%、CCCW 掺量为 0~1.5%、抗泥剂掺量为 0~0.1%。试验中复合胶凝材料 CCM 掺量固定为 9.62%,分散剂掺量固定为 0.08%,水土比固定为 70%。外加剂单因素试验方案如表 3 所示。

表 3 外加剂单因素试验方案

外加剂种类	掺量/%					
石膏	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50
CCCW	0.00	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50
抗泥剂	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10

(2) 正交试验

为了确定三种外加剂的优化配比,在单因素试验确定的适宜掺量基础上,通过正交试验得到石膏、CCCW 和抗泥剂的最优配比,从而与复合胶凝材料

CCM 和分散剂混合得到复合型液态土固化剂(CFSS)。

(3) 龄期试验

为了研究龄期对 CFSS 固化淤泥的影响,以 CFSS 掺量为 12% 的液态淤泥固化作为研究对象,通过体积测试和 UCS 试验对不同龄期(2、3、5、7、14、21、28 和 56 d)液态淤泥固化的体积和强度变化规律进行分析。另设置水泥+分散剂(掺量同 CFSS)固化淤泥组,通过对比,更好地揭示 CFSS 固化淤泥体积和 UCS 随龄期的发展规律。

(4) 掺量试验

为了研究 CFSS 掺量对液态淤泥固化的影响,设置 CFSS 掺量为 8%、12%、16% 和 20%。通过流动度试验和 UCS 试验对不同掺量液态淤泥固化的流动度和 28 d 强度变化规律进行分析。

(5) 微观试验

对单因素试验试样进行 XRD 测试,XRD 测试采用荷兰帕纳科 Empyrean X 射线衍射仪进行。对掺量试验试样进行 MIP 测试,MIP 测试采用美国康塔公司的 PoreMaster-33 仪器进行。分析固化的相应微观机制。

1.4 测试方法

(1) 流动度测试

流动度测试参考《引气砂浆和引气灰浆的试验方法》规范中的方法^[14]。试验装置采用内径和高均为 80 mm 的空心亚克力玻璃圆筒,将其放置于光滑玻璃板上,液态固化土拌和完成后缓慢注满圆筒,然后缓慢匀速将圆筒提起,测量其最大坍落扩展直径及其垂直方向直径,取二者平均值作为液态固化土的流动度。

(2) 无侧限抗压强度测试

无侧限抗压强度试验采用 YZM-IIIC 多功能路面材料强度试验机进行,加载速率 1 mm/min。所有试样均制备三个平行试样,剔除平行试样中的异常数据后取算术平均。

2 试验结果与分析

2.1 石膏掺量对固化淤泥流动度和强度的影响

石膏掺量对液态淤泥固化流动度和 28 d 无侧限抗压强度影响如图 1 所示。由图 1 可知,随着石膏掺量增大,流动度呈先增后减趋势,最大达到 203.5 mm。这是因为石膏可以作为水泥的缓凝剂,石膏与水泥熟料中矿物形成水化产物附着在熟料表面,延缓了水泥的水化反应^[15],所以石膏掺量较低时流动度有所提高。但随着石膏掺量不断增大,石

膏与水泥水化产物反应消耗了大量的水,并且生成的钙矾石填充土体孔隙,使土体更加密实,表现为流动度下降。

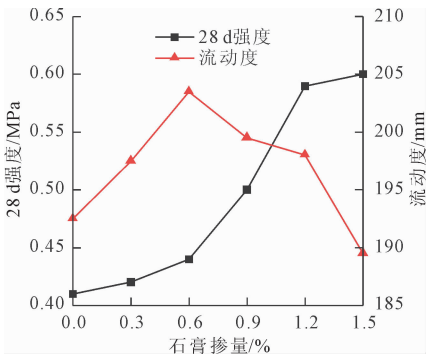


图 1 石膏掺量对流态淤泥固化流动度和 28 d 强度的影响

随着石膏掺量增大,流态淤泥固化的强度显著提升。这是由于石膏与水泥水化产物反应可以促进钙矾石的生成,钙矾石作为一种膨胀性水化产物,不仅能够胶结土颗粒,还能填充土体孔隙,使得流态淤泥固化强度提高^[16-17]。

2.2 CCCW 掺量对固化淤泥流动度和强度的影响

CCCW 掺量对流态淤泥固化流动度和 28 d 无侧限抗压强度影响如图 2 所示。由图 2 可知,随着 CCCW 掺量增大,流态淤泥固化流动度一直减小,这是因为 CCCW 可以促进水泥水化反应,消耗了更多水分,同时生成的水化产物增强了颗粒间的黏结力,使得流动度下降,另外 CCCW 中的细小颗粒填充在淤泥颗粒之间的孔隙中,使整个体系更加密实,减少了可流动的空间,导致流动度下降。

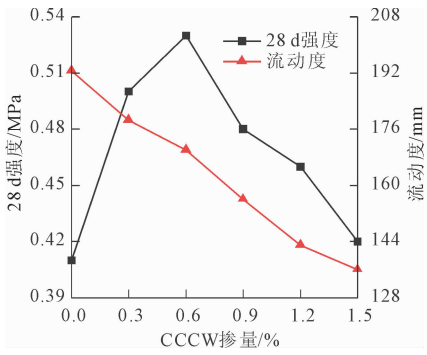


图 2 CCCW 掺量对流态淤泥固化 28 d 强度和流动度的影响

随着 CCCW 掺量增大,流态淤泥固化强度先增大后减小。这是因为 CCCW 作为刚性防水材料,能够激活水泥的二次活性,促进其再次水化,从而封堵渗水裂缝,使得强度增加。但 CCCW 掺量过高时,生成过量的结晶体膨胀会破坏已生成的 C-S-H,导致流态淤泥固化强度降低^[18]。

2.3 抗泥剂掺量对固化淤泥流动度和强度的影响

抗泥剂掺量对流态淤泥固化流动度和 28 d 无侧限抗压强度影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着抗泥剂掺量增大,流态淤泥固化流动度先增大后减小,0.04% 掺量时流动度达到最大。该抗泥剂为聚醚型抗泥剂,同时具有疏水与亲水基团,具有较高的分散性及减水效果,分子作用到水泥颗粒间的静电力呈立体式,起到空间位阻和静电排斥双重作用,改善流动性。但其存在一个最佳掺量,超过这个掺量,减水效果会大大降低。同时随着抗泥剂掺量增大,流态淤泥固化的强度降低,这是因为抗泥剂分子吸附在水泥颗粒表面会阻碍水泥水化反应,从而导致强度降低。

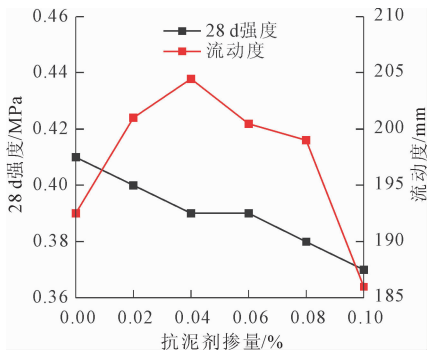


图 3 抗泥剂掺量对流态淤泥固化 28 d 强度和流动度的影响

综上所述,由于流态固化土需要同时考虑流动度和强度的要求,工程中流态固化土的流动度一般要求达到 160~220 mm,抗压强度一般要求达到 0.3~2.0 MPa。由图 1—图 3 可确定石膏适宜掺量为 0.6%~1.2%,CCCW 适宜掺量为 0.3%~0.9%,抗泥剂适宜掺量为 0.02%~0.06%。

2.4 正交试验分析

(1) 正交试验因素与水平

根据单因素试验结果,以石膏掺量 A、CCCW 掺量 B 和抗泥剂掺量 C 作为变量,以流动度和 28 d 强度为评价指标,对三个变量的取值进行三因素三水平正交试验设计,正交试验因素与水平如表 4 所示。

表 4 正交试验因素与水平

变量因素	水平		
	1	2	3
A-石膏/%	0.6	0.9	1.2
B-CCCW/%	0.3	0.6	0.9
C-抗泥剂/%	0.02	0.04	0.06

(2) 正交试验结果

采用 L₉(3⁴) 正交设计表,忽略因素间相互作

用,正交试验结果如表 5 所示。应用极差分析法(用于分析各个因素的重要性次序)和方差分析法(用于判断各个因素影响是否显著)对试验数据进行处理,从而确定各种因素对流动度及 28 d 强度影响的显著性及影响规律。

表 5 正交试验结果

试验 序号	因素 A	因素 B	因素 C	CCM /%	分散剂 /%	流动度 /mm	UCS /MPa
1	1(0.6)	1(0.3)	1(0.02)	9.62	0.08	157	0.47
2	1(0.6)	2(0.6)	2(0.04)	9.62	0.08	154	0.56
3	1(0.6)	3(0.9)	3(0.06)	9.62	0.08	148	0.53
4	2(0.9)	1(0.3)	2(0.04)	9.62	0.08	159	0.54
5	2(0.9)	2(0.6)	3(0.06)	9.62	0.08	156	0.52
6	2(0.9)	3(0.9)	1(0.02)	9.62	0.08	140	0.58
7	3(1.2)	1(0.3)	3(0.06)	9.62	0.08	158	0.58
8	3(1.2)	2(0.6)	1(0.02)	9.62	0.08	145	0.66
9	3(1.2)	3(0.9)	2(0.04)	9.62	0.08	142	0.70

(3) 极差分析

利用 SPSS 软件对流态淤泥固化的流动度和 28 d 强度进行极差分析,分析结果如表 6 和表 7 所示。流动度和 28 d 强度因素水平变化趋势如图 4 和图 5 所示。

表 6 流动度极差分析

因素	k_1	k_2	k_3	R	因素主次	最优配合比
A	153	152	148	5	B > C > A	$A_1B_1C_3$
B	158	152	143	15		
C	147	152	154	7		
空列	154	151	151	3		

表 7 28 d 强度极差分析结果

因素	k_1	k_2	k_3	R	因素主次	最优配合比
A	0.52	0.55	0.65	0.13	A > B > C	$A_3B_3C_2$
B	0.53	0.58	0.60	0.07		
C	0.57	0.60	0.54	0.06		
空列	154	151	151	3		

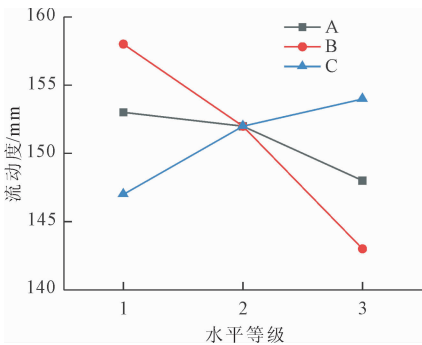


图 4 流动度因素水平变化趋势

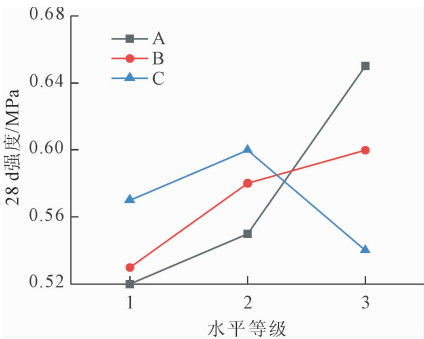


图 5 28 d 强度因素水平变化趋势

由表 6 可知,各因素对流态淤泥固化流动度影响权重按从大到小排序为:CCCW > 抗泥剂 > 石膏,即 CCCW 对流动度的影响最显著,其次是抗泥剂,而石膏影响相对较小。并且由图 4 可以看出,流态淤泥固化流动度随 A 和 B 的增加而减小,随 C 的增加而增加,因此流动度最佳组合为 $A_1B_1C_3$ 。

由表 7 可知,各因素对流态淤泥固化 28 d 强度影响权重按从大到小排序为:石膏 > CCCW > 抗泥剂,即石膏对流动度的影响最显著,其次是 CCCW,而抗泥剂的影响相对较小。并且由图 5 可以看出,流态淤泥固化 28 d 强度随 A 和 B 的增加而增加,随 C 的增加先增加后减少,因此 28 d 强度最佳组合为 $A_3B_3C_2$ 。

(4) 方差分析

利用 SPSS 软件对流态淤泥固化的流动度和 28 d 无侧限抗压强度进行方差分析,分析结果如表 8 和表 9 所示。由表 8 可知,CCCW 和抗泥剂对流动度影响较为显著(F 值 > 临界值),且 CCCW 的显著程度高于抗泥剂(F_B 值 > F_C 值),石膏对流动度影响不显著。由表 9 可知,石膏和 CCCW 对 28 d 强度影响较为显著(F 值 > 临界值),且石膏的显著程度高于 CCCW(F_A 值 > F_B 值),抗泥剂对 28 d 强度影响不显著。方差分析结果与极差分析结果一致,这表明正交分析结果是合理的。

表 8 流动度方差分析

方差来源	偏差平方和	自由度	均值	F 值	F 临界值	显著性
A	34.7	2	17.3	17.3	$F_{0.05}(2,2) = 19$	显著
B	324.7	2	162.3	162.3		
C	68.7	2	34.3	34.3		
误差	2	2	1			

结合极差分析和方差分析结果,综合考虑流动度和强度,最终得出的优化配比为 $A_3B_2C_3$;即外加

剂石膏、CCCW 和抗泥剂的优化掺量为 1.2%、0.9% 和 0.06%。

为保证最终流态淤泥固化的流动度,对复合胶凝材料、分散剂和外加剂进行复配,即得到复合型流态土固化剂 CFSS。

表 9 强度方差分析						
方差来源	偏差平方和	自由度	均值	F 值	F 临界值	显著性
A	0.026 7	2	0.013 4	92.62	$F_{0.05}(2,2) = 19$	显著
B	0.008 4	2	0.004 2	29.15		显著
C	0.004 8	2	0.002 4	16.69		
误差	0.000 2	2	0.000 1			

2.5 龄期对 CFSS 固化淤泥体积和强度的影响

2.5.1 体积发展规律

体积变化率是评价土体变形特性的重要指标,能够直接反映流态固化土初凝成型后体积变化规律。体积变化率 ΔV_R 计算式为:

$$\Delta V_R = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \times 100\%$$
 (1)

式中: V_1 为流态固化土 2 d 脱模后体积(初凝成型后体积); V_2 为养护至相应龄期体积。

图 6 为体积变化率(体缩)随龄期的变化曲线。由图 6 可知,掺入 CFSS 的流态淤泥固化随龄期体积变化率在 0~7 d 先迅速减小,而 7 d 后基本保持平衡,56 d 体积变化率仅为 1.1%。而掺入水泥和分散剂的流态淤泥固化 0~7 d 的体积变化率与掺入 CFSS 基本一致,但 7 d 以后掺入水泥的流态淤泥固化持续体缩,到 28 d 后才缓慢趋于平衡,56 d 体积变化率为 1.95%。试验结果表明,掺入 CFSS 的流态淤泥固化 56 d 体积变化率比掺入水泥的流态淤泥固化减小约 44%,说明掺入 CFSS 起到了良好的体积抑制作用。

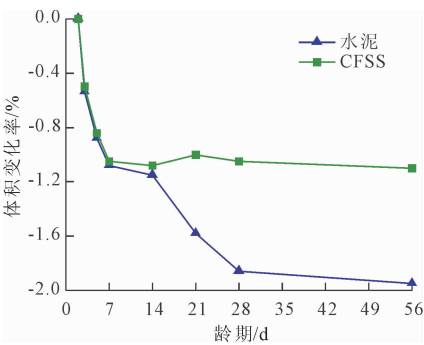


图 6 固化淤泥体变随龄期的变化曲线

2.5.2 强度发展规律

流态淤泥固化 28 d 强度随龄期的变化如图 7 所示。由图 7 可知,随着龄期增大,掺入 CFSS 的流态淤泥固化的无侧限抗压强度先快速增大后缓慢增大。具体表现为,在龄期 0~21 d 时,流态淤泥固化的无侧限抗压强度迅速增大,21 d 后无侧限抗压强度增长变缓,增长速率逐渐减小。与 7 d 相比,28 d 流态淤泥固化的无侧限抗压强度增大到约为 1.4 倍;28 d 流态淤泥固化的无侧限抗压强度分别比 14 d 提高了 21%,21 d 提高了 5.6%;而 56 d 流态淤泥固化的无侧限抗压强度仅比 28 d 提高了 3.5%。因此,在工程回填中建议以 28 d 的无侧限抗压强度作为最终强度。

另外,对比掺入水泥和分散剂的流态淤泥固化,掺入 CFSS 流态淤泥固化的无侧限抗压强度整体略有提高,且在 14 d 后提高较为明显,56 d 时,掺入 CFSS 流态淤泥固化的无侧限抗压强度约比掺入水泥固化淤泥提高了约 13.5%,这说明 CFSS 固化淤泥能较好地改善流态淤泥固化的强度。这是因为 CFSS 固化淤泥发生的碱激发火山灰反应生成了更多水化产物,有效提高了固化淤泥的中后期强度。

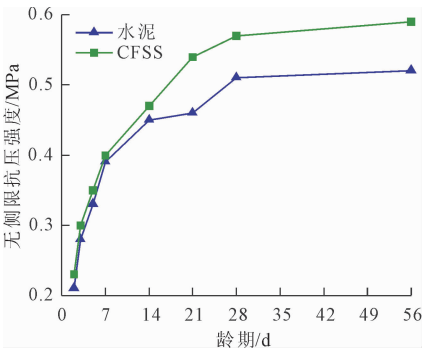


图 7 固化淤泥强度随龄期的变化曲线

2.6 CFSS 掺量对固化淤泥流动度和强度的影响

图 8 为 CFSS 掺量与流动度的关系曲线。由图 8 可知,随着 CFSS 掺量不断增大,流动度呈近似线性不断减小,CFSS 掺量为 8%~20% 时,流动度均在 210~250 mm 之间,大于 160 mm,满足工程实际要求。

图 9 给出了不同 CFSS 掺量下试样破坏后的外观样貌。由图 9 可知,试样的破坏主要表现为剪切破坏,破坏后形成了剪切裂纹。并且随着 CFSS 掺量增大,流态淤泥固化的破坏剪切面更明显,这说明随着掺量增大,流态淤泥固化逐渐呈现脆性破坏特征。

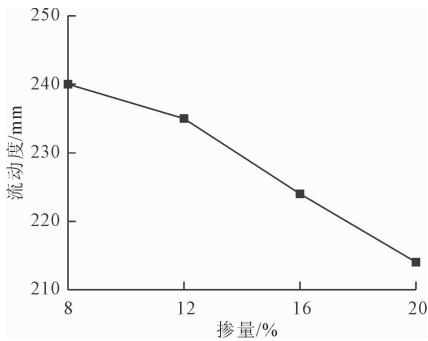


图 8 CFSS 掺量与流动度的关系

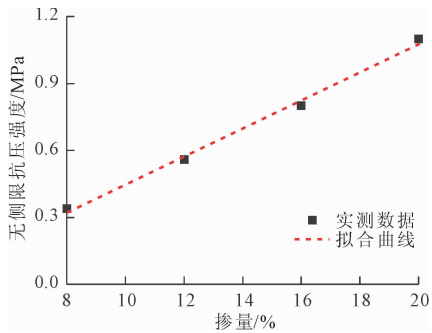


图 11 无侧限抗压强度和 CFSS 掺量的关系

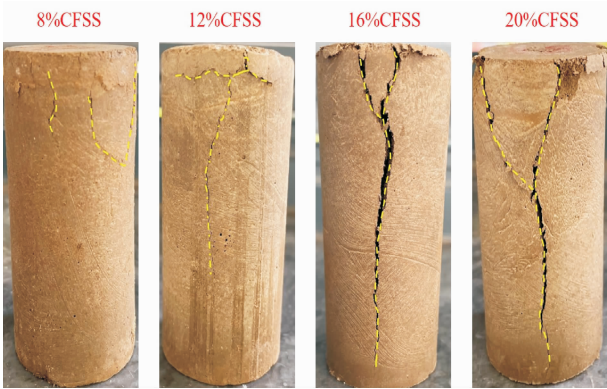


图 9 试样破坏后的外观

不同 CFSS 掺量下试样的应力应变曲线如图 10 所示。从图 10 可知,随着 CFSS 掺量增大,液态淤泥固化的强度逐渐增大,同时液态淤泥固化由塑性破坏逐渐向脆性破坏发展。另外,随着掺量增大,应力峰值对应的应变有减小的趋势,这说明 CFSS 显著提高了试样的弹性模量。

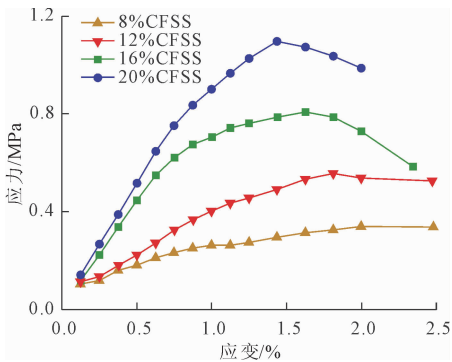


图 10 不同 CFSS 掺量下液态淤泥固化的应力-应变曲线

液态淤泥固化强度与 CFSS 掺量的关系如图 11 所示。根据数据拟合可知,峰值强度 S_p 和 CFSS 掺量 C 线性关系显著(式(2)),且拟合优度 R^2 值为 0.992。

$$S_p = 0.063 \times C - 0.182 \quad (2)$$

式中: S_p 为峰值强度,MPa; C 为 CFSS 掺量,%。

2.7 微观特征

图 12 为掺入不同外加剂时固化淤泥的 XRD 图谱。由图 12 可知,掺入 CCCW 和抗泥剂的液态淤泥固化均出现了 AFt 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 CaCO_3 衍射峰,与 CCM 衍射峰几乎一致,说明掺入 CCCW 和抗泥剂不会改变 CCM 水化产物种类。掺入石膏试样钙矾石衍射峰强度较高,说明石膏的掺入有利于钙矾石的生成。总体上外加剂的掺入促进了水化产物的产生,提高了固化效果。

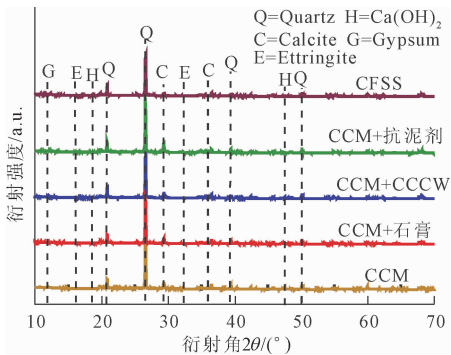


图 12 不同外加剂固化淤泥的 XRD 图谱

图 13 为不同 CFSS 掺量液态淤泥固化 28 d 龄期的孔隙分布情况。随 CFSS 掺量增大,累计孔隙体积呈现递减趋势,所有试样的累计孔隙体积均低于 1 ml/g。CFSS 掺量较小时,生成的水化产物较少,试样孔隙较多,累计孔隙体积较大,这也说明提高 CFSS 掺量可以明显降低试样累计孔隙体积。

根据张先伟等^[19]研究,对孔隙进行分类:小于 0.1 μm 为小孔径,大于 1 μm 为大孔径,介于 0.1 ~ 1 μm 之间为中孔径。图 11 中左波峰横坐标表示液态淤泥固化试样的最可几孔径,该参数反映了试样内部出现频率最高的孔隙直径,也可用于表征连通孔道的最小孔径。分析表明,所有试样的最可几孔径均分布在 0.1 ~ 1 μm 之间,即均为中孔径;随着 CFSS 掺量增大,曲线波峰逐渐左移,试样最可几孔径逐渐减小。

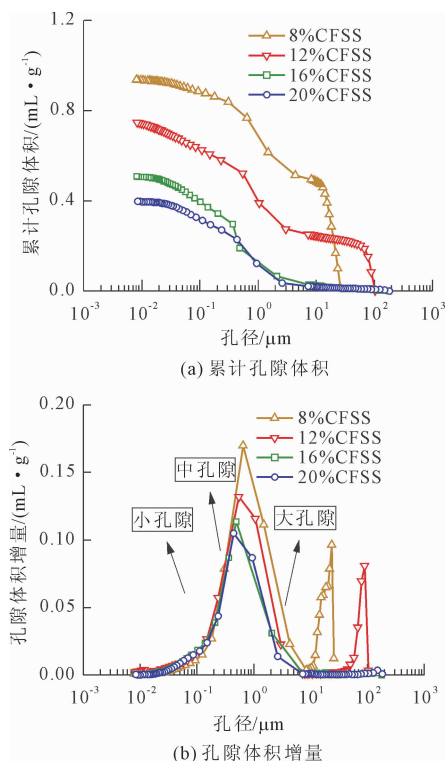


图 13 不同 CFSS 掺量流态淤泥固化孔隙分布情况

图 14 为最可几孔径与 CFSS 掺量的关系曲线。由图 14 可知,试样最可几孔径与 CFSS 掺量存在明显的线性关系。

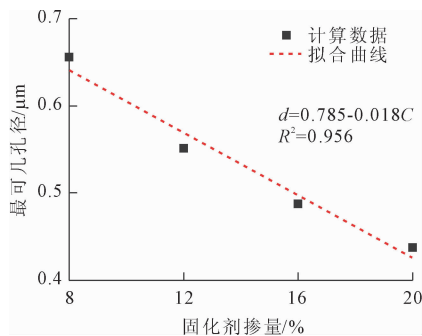


图 14 最可几孔径和 CFSS 掺量的拟合曲线

综上,流态淤泥固化生成的水化产物可以有效填充孔隙,提高土体密实程度。从微观角度解释了流态淤泥固化试样强度增大、体缩减小的原因。

3 结 论

通过单因素和正交试验,分析了外加剂石膏、CCCW 和抗泥剂对流态淤泥固化流动度和强度的影响,确定了外加剂的优化配比,得到了复合型流态土固化剂 CFSS;并研究了龄期和 CFSS 掺量对流态淤泥固化的影响。主要结论如下:

(1) 流动度随石膏和抗泥剂掺量增大呈现先增

大后减小的趋势,随 CCCW 掺量增大持续减小;无侧限抗压强度随石膏和 CCCW 掺量增大而增大,随抗泥剂掺量增大而减小。流动度影响权重按从大到小排序为:CCCW > 抗泥剂 > 石膏;强度影响权重按从大到小排序为:石膏 > CCCW > 抗泥剂。

(2) 确定了外加剂石膏、CCCW 和抗泥剂的优化配比,与复合胶凝材料 CCM 和分散剂复配得到了复合型流态土固化剂 CFSS。

(3) 随龄期增大,流态淤泥固化体积变化率(体缩)先迅速增大,7 d 后趋于稳定;强度逐渐增大,28 d 趋于稳定;CFSS 固化淤泥 56 d 体缩较水泥固化降低 44%,且强度提高 13.5%。随 CFSS 掺量增大,流态淤泥固化的流动度呈近似线性减小,强度呈近似线性增大。

(4) 掺入外加剂不会改变流态固化土的水化产物种类,但促进了水化产物产生;随掺量增大,CFSS 固化淤泥累计孔隙体积和最可几孔径逐渐减小;从微观上分析了流态淤泥固化效果改善的机制。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周岳富,张 明,何 灿,等. 固废基固化剂处理不同初始含水率土体固化特性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2024,49(6):1216-1224.
- [3] Mo Liwu, Zhang Feng, Deng Min, et al. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2017,83:138-145.
- [4] 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.
- [5] 陈容华,甄朋民. 基于粉质黏土的预拌流态固化土的影响因素分析[J]. 重庆建筑,2020,19(9):32-36.
- [6] 牛家栋,杜运兴,张自成,等. 矿渣基地聚物流态盾构固化土的性能研究[J]. 硅酸盐通报,2024,43(6):2176-2185.
- [7] 刘成龙. 新型预拌流态固化土性能及回填施工工艺[J]. 山东交通学院学报,2021,29(4):91-98.
- [8] 包益璠,王宁宁,李书进,等. 电石渣-脱硫灰复掺对流态固化土基本性能及微观特性的影响[J]. 硅酸盐通报,2023,42(12):4449-4455.
- [9] Nataraja M C, Nalanda Y. Performance of industrial by-products in controlled low-strength materials (CLSM)[J]. Waste Management, 2008,28(7):1168-1181.
- [10] 杨俊钊. 普通硅酸盐水泥对海底淤泥固化效果影响因素试验研究[J]. 中国港湾建设,2020,40(9):26-30.

(下转第 82 页)

5 结 论

(1) 斜塔环梁人行斜拉桥在恒载和人群荷载作用下, 环形主梁受力具有很强的空间性, 其与恒载作用相比, 主梁与主塔的受力趋势大致相同, 应力和位移最大值有所增大。

(2) 主梁在拉索锚固点及塔梁连接处出现明显的应力集中, 箱梁受压, 边环、中环梁受拉, 恒载作用下在塔梁连接处达到应力最值, 分别为 -19.3 、 19.4 、 13.6 MPa; 恒载和人群荷载共同作用下分别为 -51.0 、 39.9 、 26.6 MPa。主塔应力沿高度变化复杂, 在索锚固区和截面突变处出现应力重分布, 整体处于受压状态。

(3) 施工监测数据表明, 成桥过程中主梁线形、主塔应力及拉索索力的实测值与理论值吻合良好, 偏差均处于控制精度范围内, 说明施工控制措施有效, 结构最终成桥状态符合设计要求。

参考文献:

- [1] 陈明宪. 斜拉桥的发展与展望[J]. 中外公路, 2006(4): 76-86.
- [2] 范伟强. 独塔曲线混合梁斜拉桥索力优化及索力调整研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [3] 贾伟红, 张志平, 苏凡. 人行斜拉桥力学性能及舒适度分析[J]. 公路, 2019, 64(7): 174-178.
- [4] 刘世明, 赵顺波, 李晓克. 大跨人行异型斜拉桥静、动力及抗震性能分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(4): 45-50.

- [5] 林杰, 欧阳泽卉, 刘新华, 等. 小边跨曲线混凝土独斜塔斜拉桥总体设计[J]. 世界桥梁, 2025, 53(5): 1-8.
- [6] 林杰, 高建丽. 大跨度独斜塔斜拉桥静力计算分析[J]. 中国水运, 2022, 22(4): 125-128.
- [7] 佟志峰, 熊雷, 刘小奇, 等. 单索面独斜塔斜拉桥桥塔施工关键设计参数影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 47-52.
- [8] 罗雷, 李凯. 异型桥塔斜拉桥施工过程仿真与监测[J]. 建材世界, 2018, 39(5): 70-74.
- [9] 汪高斯. 地锚式单跨独斜塔斜拉桥受力特点研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 1-6.
- [10] 祝嘉翀, 黄天立, 周朝阳, 等. 高铁大跨拱承式独塔斜拉桥成桥状态力学参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2244-2254.
- [11] 刘本永. 主跨 165 m 单线铁路独塔混合式结合梁曲线斜拉桥设计[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(6): 84-89.
- [12] 陈锋, 李新伟, 李泽露, 等. 跨京广铁路信阳编组场大桥施工控制关键技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(4): 50-56.
- [13] 李睿智, 王立彬, 李建慧. “月牙形”独塔曲线斜拉桥成桥计算及结构优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2023-2033.
- [14] 梁青山, 刘海龙. 小半径曲线斜拉桥适应性研究[J]. 公路, 2017, 62(8): 151-155.
- [15] 张二华, 单德山, 周泳涛. 大跨曲线斜拉桥 II 形主梁分析方法研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(5): 44-48.
- [16] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.

(上接第 8 页)

- [11] Sheen Y N, Zhang Lihao, Le D H. Engineering properties of soil-based controlled low-strength materials as slag partially substitutes to Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 822-829.
- [12] Kaliyavaradhan K S, Ling Tungchai, Guo Mingzhi, et al. Waste resources recycling in controlled low-strength material (CLSM): A critical review on plastic properties[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 383-396.
- [13] 林文逸, 方祥位, 雷运涛, 等. 流态固化淤泥复合胶凝材料配比优化及其固化机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-11. [2026-03-10] <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241101.1140.002>.
- [14] JHS A313-1992 エアモルタル及びエアミルクの試験方法[S]. 东京: 日本道路公团, 1992.
- [15] 谢建海, 亢虎宁, 赵党会. 脱硫石膏的性能及其作为

- 水泥缓凝剂的应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(5): 16-18.
- [16] 晁军. 碱渣-石膏-水泥联合固化粉土的力学特性及微观机理研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36(4): 98-105.
- [17] He Jun, Zhou Lirong, Zhang Lei, et al. Effect of curing temperature on the geotechnical behavior of solidified sludge in landfill temporary cover applications[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(4): 1569-1578.
- [18] 杨康辉, 欧忠文, 肖寒冰, 等. CCCW 对硫铝酸盐水泥固化土强度的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 83-87.
- [19] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2794-2800.