

水泥流态固化土配合比试验研究

Experimental Study on Mix Proportions of Cement Flowable Stabilized Soil

负 启

(内蒙古鲁电蒙源电力工程有限公司, 呼和浩特 010010)

摘要: 为满足流动性和强度要求的水泥流态固化土配合比, 将内蒙古准格尔出产的黏土与砂混合后添加水泥制备成水泥固化土进行试验。首先在黏土里掺入适量的砂制成 75% 和 50% 黏土的原料土, 然后通过添加水灰比为 3、5 和 7.5 的水泥浆液制备水泥流态固化土, 在水灰比一定的情况下, 确定了水泥流态固化土的含水率、流动度和单轴抗压强度之间的关系。结果表明: 相同配合比的单轴抗压强度主要取决于含水率和原料土总质量; 当水灰比相同时, 单轴抗压强度随着流动度的减小而增大, 流动度随着含水率的增加而增加。研究成果为水泥流态固化土制备提供理论依据与实用配比指导。

关键词: 固化土; 砂土; 混合试验; 流动度; 单轴抗压强度

中图分类号: TU432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 06-0035-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.007

YUN Qi

(Inner Mongolia Lu Electric Mengyuan Power Engineering Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: To meet the requirements of fluidity and strength, the cement slurry stabilized soil mix ratio was prepared by mixing clay from Zhungeer, Inner Mongolia with sand and then tested. Clay was mixed with an appropriate amount of sand to make soil raw materials containing 75% and 50% clay, and then cement slurry was added by controlling the water - cement ratio to prepare cement slurry stabilized soil. Under the condition of a constant water - cement ratio, the relationship between the moisture content, fluidity and uniaxial compressive strength of cement slurry stabilized soil was determined. The results show that the uniaxial compressive strength of the same mix ratio mainly depends on the moisture content and soil mass; When the water - cement ratio is the same, the uniaxial compressive strength increases with the decrease of fluidity, and the fluidity increases with the increase of moisture content. The research results provide a theoretical basis and practical mix ratio guidance for the preparation of cement slurry stabilized soil.

Key words: solidified soil; sand soil; mixing test; flow value; uniaxial compressive strength

0 前言

流态固化土作为一种绿色工程材料, 在工程中具有广阔的应用前景, 其定量评价是当前工程领域研究的难点与热点之一。实现流动特性与力学强度的协同调控, 对于提升工程质量、推动材料标准化应用具有重要意义^[1-2]。

在已有研究中, 多位学者从不同角度对固化土

作者简介: 负 启 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑结构。

收稿日期: 2025-05-06

材料科学

性能开展了系统探索。周永祥等^[3]采用多种低品质固废作为无熟料胶凝材料制备流态固化土。王丹等^[4]研究了冻结掺合土料在冻融循环作用下动力变形的机制。吴鸿昇等^[5]提出先固化后吸水的淤泥固化处理方法，并通过滴定试验、无侧限抗压强度试验和压汞试验，对比分析先吸水后固化和先固化后吸水这两种处理方法的固化效果和机理。聂怀军等^[6]提出以河道淤泥与粉煤灰为主要原料，采用协同胶凝激发技术实现对淤泥的固化稳定化处理。朱祐增等^[7]以水固比、聚羧酸减水剂掺量、水泥占胶凝材料比例（灰胶比）为试验因素，以流动度和泌水率的比值（流泌比）和 28 d 抗压强度为响应值，进行多指标优化。马亨通等^[8]采用硝酸盐类新型水泥激发剂+水泥为固化剂、以当地原料土为固化对象制备不同配比的新型流态固化土，证明治理后的边坡能同时保证植物生长效果良好。刘丽娜等^[9]建立了流态固化土强度预测模型，认为随着固化剂掺量和养护时间的增大，流态固化土趋近于脆性破坏。王宇杰等^[10]通过单纯形重心法对固化剂配合比进行了设计，开展了不同配合比流态固化土的指标试验，提出了抗压强度预测方程。梁仕华等^[11]对水泥固化基坑废弃渣土并将其作为填土材料的试验研究。张会丽等^[12]通过不同配合比抗压性能试验研究，分析了水泥、萘磺酸甲醛缩合物、无水硫酸钠、二氧化硅、粉煤灰、氯化钠对改性流态固化土抗压强度的影响。侯运炳等^[13]对冻融循环作用下全尾砂固结体强度与孔结构演化规律进行了研究。胡贵泉^[14]探究了赤泥掺量、冻融次数等对赤泥-水泥复合土的力学特性及疲劳特性的影响规律。丁智等^[15]对软土冻融并循环加载后微观结构的变化进行分析，从微观角度揭示冻融软土宏观特性的变化机制。

综合现有研究可知，目前对流态固化土的探讨多集中于力学性能与固化机理，而将流动特性和配合比设计结合的研究相对较少。基于此，以水泥、黏土和砂为原材料，设计不同配合比，通过水泥流态固化土流动度与单轴抗压强度试验，分析黏土、砂、水泥原材料的掺量及水灰比对材料工作性与力学性能的影响规律。为满足特定流动特性要求的水泥流态固化土制备提供理论依据与实用配比指导。

1 试验材料与配合比

1.1 原材料

黏土选用出自内蒙古准格尔的高岭土，物理性质见表 1。砂是粒径 0.25~0.85 mm 的中砂，颗粒密度 ρ_s 为 2.65 g/cm³。水泥采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥。在黏土里掺入适量的砂制成 75%、50% 掺量黏土的原料土，100% 黏土为基准组。土粒径分布如图 1 所示。

表 1 基本物理指标
Table 1 Basic physical indicators

密度 $/(\text{g}/\text{cm}^3)$	黏土 含量/%	淤泥 含量/%	含砂率 /%	液限 /%	塑限 /%
2.84	68	32	0	54.7	29.9

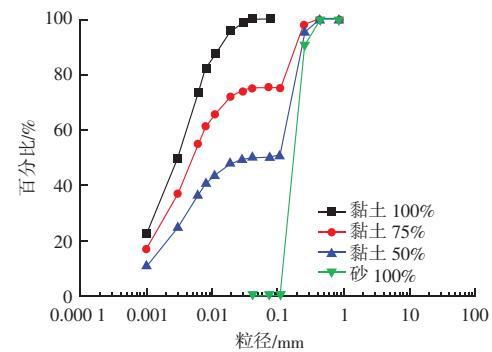


图 1 土的粒径分布
Fig. 1 Particle size distribution of soil

1.2 含水率与流动度的关系

水泥流态固化土的强度与原材料掺量、含水量、水灰比等参数相关，因此配比试验在配制不同掺量黏土的基础上同时将含水率和水灰比作为主要控制变量。图 2 为水灰比 (W/C) 为 3、5 和 7.5 时含水率 (w) 与流动度的关系，表 2 是流动度为 150 mm 时的含水率以及随着含水率增加而增加的流动度比值 $\Delta f/\Delta w$ 。

针对水泥流态固化土的流动度 f 与含水率 w 的关系，对不同水灰比 W/C 的水泥流态固化土通过以下方法求得：

(1) 对于设定某水灰比 W/C 的流态固化土，首先按含水率 w_1 制作不含水泥的流态固化土，并测定其流动值 f_1 。

(2) 然后按目标水灰比 W/C 制作水泥浆液（不含黏土和砂）。

(3) 将步骤2制备的水泥浆液添加步骤1制备的不含水泥的流态固化土中，混合制成含水率为 w_2 的流态固化土，并测定其流动值 f_2 。此方法可以精确控制流态固化土的水灰比。

(4) 通过重复此方法，针对每个水灰比 W/C 获得了流态固化土的含水率与流动值的关系。

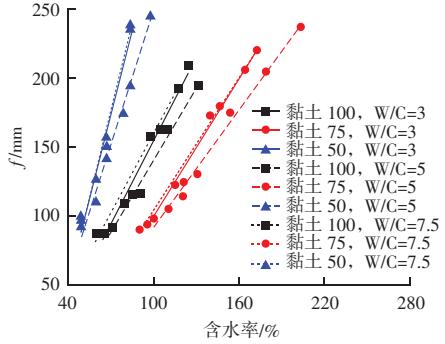


图2 含水率与流动度的关系

Fig. 2 Dealing with the relationship between moisture ratio and flow value

表2 流动度为150 mm含水率和比值 $\Delta f/\Delta w$

Table 2 The current value is 150 mm with a water content ratio and ratio $\Delta f/\Delta w$

W/C	100% 黏土		75% 黏土		50% 黏土	
	$w / \%$	比值 (mm/%)	$w / \%$	比值 (mm/%)	$w / \%$	比值 (mm/%)
3	142	1.418	106	1.728	69	3.629
5	131	1.686	98	2.041	65	4.174
7.5	129	1.599	95	1.928	64	4.112

从图2可以看出流态固化土的流动度随着含水率的增加而线性增加，水灰比为5时，100%黏土的流态固化土增加率为 $1.686 \text{ mm}/\%$ ，75%黏土的流态固化土增加率为 $2.041 \text{ mm}/\%$ ，50%黏土的流态固化土增加率为 $4.174 \text{ mm}/\%$ ；流动度随着砂掺量的增加而增加，水灰比为3和7.5呈现相同的趋势。相同流动度情况下，含水率在水灰比为3时比水灰比为5、7.5时大，但在水灰比为5和7.5时几乎相同。

在流态固化土中，即使对于相同的含水率，其流动度与其比值 $\Delta f/\Delta w$ 也存在显著差异，因为黏土中存在被土颗粒束缚的非自由水，且带负电荷的黏土颗粒与水泥的 Ca^+ 离子相互吸引，产生结块作用。

1.3 相同流动度的流态固化土配合比试验

表3包含不同含水率和流动度条件下的物质特征及物理特性。表中 m_s 为原料土的干质量， m_w 为水质量， m_c 为水泥质量， ρ_{sat} 为固化土的湿密度。 q_{u28} 为材

料龄期为28 d时的单轴压缩试验结果。特性如下：

(1) 在相同流动度的情况下，50%和75%黏土的流态固化土湿密度与100%黏土相比会有所增加。75%黏土的流态固化土的增幅为 $0.10 \sim 0.13 \text{ g/cm}^3$ ，50%黏土的流态固化土的增幅为 $0.20 \sim 0.24 \text{ g/cm}^3$ 。

(2) 在水灰比为3时，与100%黏土的流态固化土相比，50%和75%黏土的流态固化土的混合土的质量显著增加、水质量减小、水泥质量略有减小。

表3 配合比和单轴压缩试验结果

Table 3 Processing soil mix ratio and uniaxial compression test results

类型	W/C	f / mm	$w / \%$	m_s / kg	m_w / kg	m_c / kg	$\rho_{sat} / (\text{g/cm}^3)$	$q_{u28} / (\text{kN/m}^2)$
100% 黏土	3	90	99	689	682	227	1.598	972
		120	120	594	713	238	1.545	933
		150	142	519	737	246	1.502	906
		210	184	418	769	256	1.443	805
黏土	3	90	71	876	622	207	1.705	1 071
		120	89	746	664	221	1.631	966
		150	106	654	693	231	1.578	858
		210	141	522	736	245	1.503	754
黏土	5	90	53	1 060	562	187	1.809	1 195
		120	61	969	591	197	1.757	1125
		150	69	893	616	205	1.714	995
		210	86	765	658	219	1.642	935
黏土	7.5	90	95	731	695	139	1.565	441
		120	113	642	725	145	1.512	349
		150	131	571	749	150	1.470	281
		210	167	469	783	157	1.409	251
黏土	5	90	69	917	633	127	1.677	470
		120	83	807	670	134	1.611	363
		150	98	715	700	140	1.555	274
		210	127	586	744	149	1.479	248
黏土	5	90	50	1 125	563	113	1.801	403
		120	58	1 027	596	119	1.742	321
		150	65	954	620	124	1.698	318
		210	79	835	660	132	1.627	264
黏土	7.5	90	91	766	697	93	1.556	231
		120	110	665	732	98	1.495	183
		150	129	588	758	101	1.447	144
		210	166	479	795	106	1.380	119
黏土	7.5	90	64	976	625	83	1.684	270
		120	80	840	672	90	1.602	189
		150	95	742	705	94	1.541	129
		210	126	599	754	101	1.454	106
黏土	7.5	90	49	1 152	565	75	1.792	224
		120	57	1 051	599	80	1.730	178
		150	64	976	625	83	1.684	166
		210	79	847	669	89	1.605	129

材料科学

(3) 水灰比为3时, 50%、75%黏土和100%黏土的流态固化土的原料土总质量 m_s 随流动度的减小而显著增加, 水质量 m_w 和水泥质量 m_c 略有减小; 与其相比, 水灰比为7.5时的原料土总质量增加、水质量略有增加、水泥质量显著减少。

1.4 单轴抗压强度测试结果

在材料龄期为28 d时进行的单轴压缩试验结果见表3。在流动度为90、120、150和210 mm时, 单轴抗压强度随水灰比的减小呈指数增长。将流动度为90和210 mm的流态固化土的单轴抗压强度值进行比较, 无论流态固化土配合比如何, 90 mm值的流态固化土单轴抗压强度都更大。此外, 在对比水灰比时, 水灰比为7.5和5情况下, 流态固化土的单轴抗压强度几乎相同; 但在水灰比为3的情况下, 50%黏土的流态固化土单轴抗压强度大于75%、100%黏土的流态固化土。可以看出砂掺量增加而导致强度增加的现象仅出现在水灰比较小的情况下。

流态固化土的单轴抗压强度随着含水率减小均呈指数增长。此外, 随着砂掺量的增加, 达到相同单轴抗压强度所需的含水率逐渐减小。

1.5 原料土总质量与单轴抗压强度的关系

当流态固化土的水灰比相同时, 原料土总质量越大, 单轴抗压强度越高。单轴抗压强度(q_{u28})由式(1)表示。

$$q_{u28} = q_{uA} + \Delta_{q_{uB}} \quad (1)$$

式中: q_{uA} 为假定流动度为210 mm的 q_{u28} ; $\Delta_{q_{uB}}$ 为随原料土的质量 Δm_s 增加导致的单轴抗压强度增加量; β 为 q_{u28} 的增加系数, 在水灰比为3、5和7.5时分别为0.60~0.92、0.45~0.73、0.30~0.44。从表3可以看出, 当原料土质量 m_s 增加300 kg时, 单轴抗压强度在水灰比为3时增加了180~277 kN/m², 水灰比为5时增加了135~220 kN/m², 水灰比为7.5时增加了90~134 kN/m²。单轴抗压强度的增加随着水灰比的增加而减小。

当水灰比相同时, 在黏土中掺入砂后, 在相同的原料土的质量下, 单轴抗压强度会减小, 需要增加原料土质量才能增加单轴抗压强度。在50%黏土的流态固化土中, 当水灰比为5时, 为达到与100%黏土相同的单轴抗压强度, 所需的原料土质量约为后者的1.5~1.8倍。

1.6 物质成分与单轴抗压强度的关系

水泥基固化材料发生水化反应会形成大量的水合物, 这些水合物交织在一起, 填充原料土颗粒之间的空隙, 形成网状结构。这种结构是由水灰比决定的, 如果水灰比相同, 则结构将相同。水泥流态固化土中有原料土颗粒时, 原料土颗粒在网状结构形成过程中被纳入其中并受到约束。当网状结构发生剪切断裂时, 土体颗粒的剪切强度与水灰比所决定的水合物的黏结强度一起发挥作用。

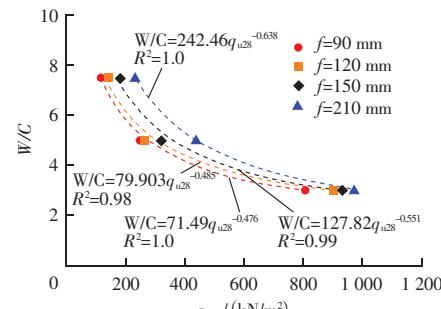
在流态固化土中, 水灰比相同且原料土总质量相等时, 单轴抗压强度随着砂掺量增加而减小。这是由于随着砂掺量增加, 原料土颗粒总数减少, 原料土颗粒之间的平均间距增加, 从而降低了土颗粒间摩擦所产生的剪切强度。

2 结果与分析

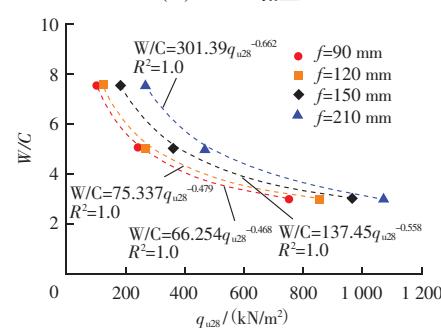
2.1 同时满足流动度和单轴抗压强度条件的配合比计算

针对不同砂掺量的流态固化土, 分别计算流动度在90、120、150、210 mm且单轴抗压强度 q_{u28} 为500 kN/m²条件下的配合比, 系统分析流态固化土不同砂掺量与流动度对配合比设计的影响规律。

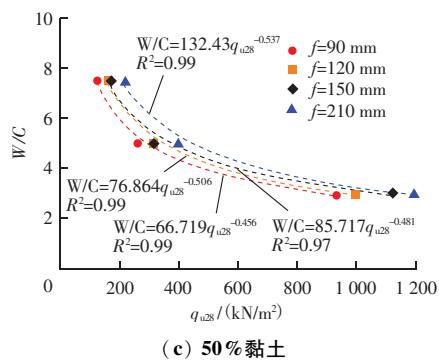
图3为流态固化土单轴抗压强度 q_{u28} 和水灰比的关系, 图4为对应的水灰比和含水率的关系。



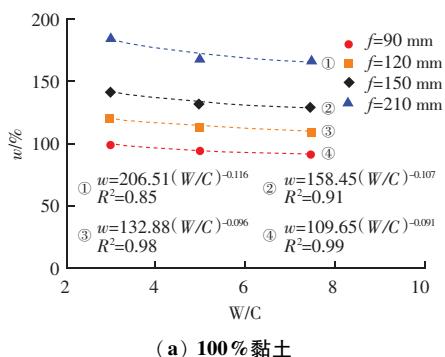
(a) 100%黏土



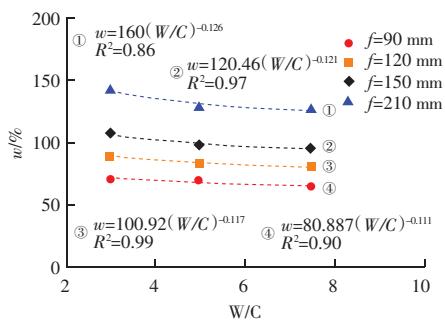
(b) 75%黏土



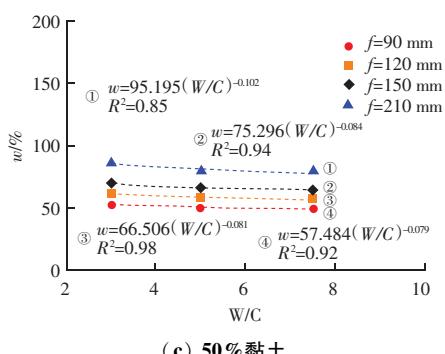
(c) 50% 黏土

图 3 q_{u28} 与水灰比的关系Fig. 3 The relationship between q_{u28} and water-cement ratio

(a) 100% 黏土



(b) 75% 黏土



(c) 50% 黏土

图 4 水灰比与 w 的关系Fig. 4 The relationship between water cement ratio and w

根据流态固化土的单轴抗压强度和水灰比关系可知, 流动度越小, 单轴抗压强度越大。相关性系数 R^2 在 0.97 ~ 0.99 范围内, 拟合度较高。另一方

面, 在水灰比和含水率关系中, 随着流动度的减小, 相同水灰比对应的含水率降低, 掺砂后含水率会显著下降; 相关性系数 R^2 的范围为 0.85 ~ 0.99, 同样具有较高拟合度。

2.2 单轴抗压强度为 500 kN/m²时的配合比

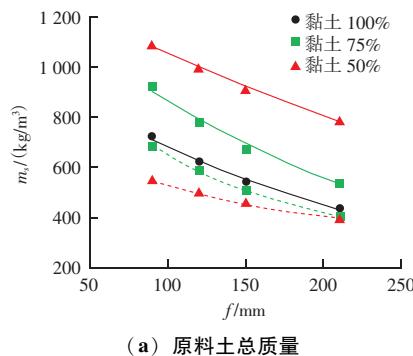
表 4 为单轴抗压强度为 500 kN/m²时的配合比计算结果。从每种流态固化土的结果来看, 所有配合比试件的流态固化土均随着流动度的增加, 水灰比呈降低、含水率呈增加趋势; 比较不同配合比的流态固化土, 当流动度相同时, 水灰比相差 0.1 ~ 0.3 左右, 但随着砂掺量增加流动度降低, 且含水率显著降低。

表 4 q_{u28} 为 500 kN/m² 时的配合比Table 4 Mix proportion when q_{u28} is 500 kN/m²

类型	流动度 /mm	W/C	w /%	材料/(kg/m ³)		密度 ρ_{sat} /(g/cm ³)
				黏土	砂	
100%	90	4.60	95	726	693	151
	120	4.16	116	623	722	174
	150	3.92	137	544	745	190
	210	3.71	177	438	777	209
75%	90	4.93	68	692	231	127
	120	4.29	85	587	196	155
	150	3.84	102	509	170	181
	210	3.61	136	407	136	204
50%	90	4.71	51	547	547	118
	120	4.31	59	498	498	136
	150	4.17	67	458	458	147
	210	3.92	83	395	395	167

图 5 为单轴抗压强度为 500 kN/m²时, 不同配合比流态固化土在流动度为 90、120、150 和 210 mm 条件下的成分特征。50% 黏土、75% 黏土和 100% 黏土的流态固化土, 原料土总质量随着流动度的减小而增加, 并且趋势线斜率相似。

比较 50% 黏土和 100% 黏土的流态固化土, 原料土总质量差异约为 350 kg/m³, 换算成体积时约为



(a) 原料土总质量

材料科学

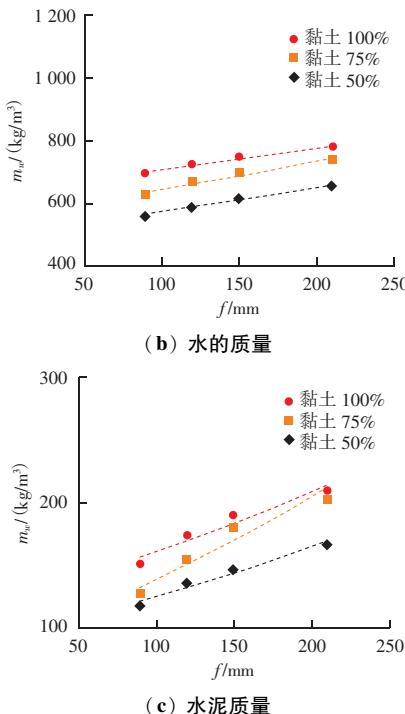


图 5 不同成分特征的对比

Fig. 5 Comparison of different component characteristics

0.13 m³。水质量差异约为 130 kg/m³（体积差异约为 0.13 m³），结果几乎相同。对比 75% 黏土和 100% 黏土的流态固化土，原料土总质量差异约为 130 kg/m³，换算成体积时约为 0.08 m³。水质量差异约为 70 kg/m³（体积差异约为 0.07 m³），结果也几乎相同。而水泥用量差异较小。

从水泥质量结果看出，随着流动度减小，水泥质量减小。当流动度从 210 mm 变为 90 mm 时，50% 黏土时水泥质量减少了 49 kg/m³（减少率约 29%），75% 黏土时水泥质量减少了 53 kg/m³（减少率约 29%），100% 黏土时减少了 58 kg/m³（减少率约为 28%）。将相同流动度条件下用 75% 黏土与 50% 黏土流态固化土进行比较，发现后者黏土质量减少了约 24~110 kg/m³，砂质量增加 158~374 kg/m³，水质量减少 53~86 kg/m³，水泥质量减少 14~21 kg/m³（减少率 12%~16%）。

在流态固化土的单轴抗压强度保持不变情况下，若降低流动度，则原料土总质量增加，而水泥质量减少。此外，将砂与黏土混合会增加原料土颗粒的质量，这与降低流动度的效果相同，水泥用量会减少。从增加原料土的用量或减少水泥用量的角度来看，降低流态固化土的流动值以及砂掺量是有效的，

若条件合适，可以现场使用。

3 结论

通过采用砂、黏土、水泥混合制备水泥流态固化土，并对固化土的强度和流动性进行研究，得出以下结论：

- (1) 对于所有配合比的流态固化土，当水灰比相同时，流态固化土的流动度随着含水率的增加而线性增加。
- (2) 当水灰比相同时，流态固化土的单轴抗压强度随着流动度的减小而增大，单轴抗压强度与原料土总质量成比例增长。
- (3) 当流态固化土配合比相同时，单轴抗压强度取决于水灰比和原料土总质量。

(4) 在流动度为 90~210 mm 的范围内，对比单轴抗压强度为 500 kN/m² 的 75% 黏土和 50% 黏土的流态固化土成分，发现后者黏土质量减少了约 24~110 kg/m³，砂质量增加 158~374 kg/m³，水质量减少 53~86 kg/m³，水泥质量减少 14~21 kg/m³。在确定现场流态固化土的配合比时，要综合考虑其流动度和单轴抗压强度，以及原料土和水泥用量的变化。

参 考 文 献

- [1] 徐征军, 张丽华. 关于公路桥涵台背回填材料的研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42 (12): 79, 81.
- [2] 卢一林. 吹填砂土处理技术及加固分析 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2024.
- [3] 周永祥, 刘倩, 王祖琦, 等. 流态固化土用无熟料胶凝材料的性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (10): 3548~3555.
- [4] 王丹, 刘恩龙, 杨成松. 冻融循环作用下冻结掺和土料动力特性研究 [J]. 冰川冻土, 2022, 44 (2): 524~534.
- [5] 吴鸿昇, 刘勇, 蔡辉敏, 等. 固化脱水过程对淤泥固化效果影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 73~78.
- [6] 聂怀军, 赖伟信, 彭芳鹏, 等. 粉煤灰-疏浚淤泥协同固化制备回填土的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (6): 74~78.
- [7] 朱祐增, 刘浩, 黄锐, 等. 基于响应面法的可控低强度材料配合比优化研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (8): 2670~2679.
- [8] 马亨通, 郭志红, 吴天齐, 等. 新型流态固化土边坡治理性能与生态效应 [J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2025, 23 (4): 65~74.
- [9] 刘丽娜, 高文生, 徐彤, 等. 预拌流态固化土强度特征及其模型研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (9): 98~103.

(下转第 65 页)

定这5个阶段。其中，通过后沉降（第四阶段）最大，开挖沉降（第二阶段）次之。

（3）针对不同阶段的变形原因，可以采取配置高质量泥浆、控制掘进姿态、盾构外侧空隙注入“克泥效”材料等变形控制措施。

参 考 文 献

- [1] 刘成虎. 岩溶地区地铁盾构下穿高铁框架涵关键技术研究 [J]. 交通世界, 2023, (21): 158–160.
- [2] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962–1966, 2004.
- [3] 魏纲, 蔡浩然, 齐永洁, 等. 盾构下穿引起围压改变对既有盾构隧道的影响研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(4): 708.
- [4] 杨超, 刘远明, 刘凯, 等. 贵阳地铁盾构隧道下穿高速铁路沉降规律 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(5): 2100–2110.
- [5] 欧阳鸿志, 朱定桂, 安斌, 等. 富水砂层盾构隧道下穿独立浅基础铁路桥加固方案比选研究 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 246–253.
- [6] 王继峰, 刺宝成, 孟祥丰, 等. 盾构隧道下穿铁路框架桥施工变形规律及控制措施 [J]. 公路, 2022, 67(3): 373–377.
- [7] 张亚洲, 林志宇, 马凝宇, 等. 砂卵石地层盾构隧道下穿施工对既有铁路框架桥的影响 [J]. 四川建筑, 2021, 41(6): 101–104.
- [8] 许有俊, 孟贞, 李志成, 等. 盾构隧道近距离下穿既有地铁车站沉降控制措施研究 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1044–1050.
- [9] 姚晓明, 舒波, 李波. 新建盾构隧道近距离下穿既有地铁线的安全控制技术 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 243–250.
- [10] 江华, 张晋勋, 江玉生, 等. 新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征研究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 159–164, 172.
- [11] 房倩, 杜建明, 李建业, 等. 大直径盾构隧道紧邻下穿既有地铁施工诱发地层沉降特征分析(英文) [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(3): 882–897.
- [12] 施成华, 郑晓悦, 王祖贤, 等. 考虑地层变异性的新建隧道下穿引起既有盾构隧道纵向变形的随机分析方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(2): 500–512.
- [13] 范文昊, 谢盛昊, 周飞聪, 等. 新建双线盾构隧道下穿既有隧道近接影响分区及控制措施案例研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60(4): 43–57.
- [14] 江杰, 龙逸航, 邢轩伟, 等. 富水圆砾地层盾构下穿既有地铁隧道掘进参数研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1828–1836.
- [15] 崔光耀, 麻建飞, 宁茂权, 等. 超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工加固方案对比分析 [J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊2): 414–424.

(上接第34页)

- [8] ZHANG S, GHOULEH Z, SHAO Y. Effect of carbonation curing on efflorescence formation in concrete paver blocks [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(6): 04020127.
- [9] 曹天骥. 水泥基外墙系统泛碱预测模型与抑制方法 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 李朗, 张玉玮, 高育慧, 等. 新型泛碱抑制剂的制备及应用 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52(1): 97–101.
- [11] VOSS K, 刘畅, 杜建东. 混凝土路面砖的变色现象 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2010(6): 18–22.

(上接第40页)

- [10] 王宇杰, 杜红秀. 流态固化土的电化学特性及其施工与力学性能 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2535–2541.
- [11] 梁仕华, 陈俊涛, 林焕生, 等. 水泥固化淤泥废弃土作为填土材料的试验研究 [J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(2): 102–106.
- [12] 张会丽, 霍光. 改性流态固化土抗压性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(1): 89–93, 112.

- [12] ORDÓÑEZ S, LA IGLESIA Á, LOUIS M, et al. Mineralogical evolution of salt over nine years, after removal of efflorescence and saline crusts from Elche's Old Bridge (Spain) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 343–354.
- [13] 王培铭, 寿梦婕. 高温条件下不同养护湿度对聚合物改性水泥砂浆拉伸粘结强度的影响 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45(1): 54–58.
- [14] 路林海, 周立民, 刘家海, 等. 轨道交通高架桥墩冬季施工混凝土泛碱机理分析 [J]. 中外公路, 2019, 39(6): 73–76.

- [13] 侯运炳, 丁鹏初, 韩冬, 等. 冻融循环对全尾砂固结体强度与微观孔结构的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(8): 68–73.
- [14] 胡贵泉. 冻融作用下赤泥—水泥复合土疲劳特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [15] 丁智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁循环荷载下冻融软土孔压发展及微观结构研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2328–2336.