

淤泥固化土的静力特性研究

Study on Static Characteristics of Silt Solidified Soil

孔令宜¹, 祁雄贵², 朱福强¹, 李因璐², 孟丽君², 朱永阳³

(1. 中建筑港集团有限公司, 青岛 266011; 2. 泰安市交通运输局港航铁路机场服务中心, 泰安 271000;
3. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘要: 通过无侧限抗压强度试验, 分析初始含水率、水泥掺量、粉煤灰掺量及养护龄期对淤泥固化土静力特性的影响。结果表明: 固化土强度随初始含水率升高而降低, 50%、60%、70% 含水率下满足铁路基床表层强度标准 (500 kPa) 的最低水泥掺量分别为 6%、8%、10%; 水泥掺量与强度呈线性增长关系, 拟合得到三种含水率下强度为零时的水泥掺量分别为 1.28%、2.24%、3.31%; 粉煤灰对强度的影响因含水率而异, 50% 含水率下强度随粉煤灰掺量增加而降低, 60% 和 70% 含水率下强度先增后减或逐步提升; 固化土 28 d 龄期内强度随养护时间增长而提高, 7~14 d 的增长速率高于 14~28 d。研究明确了多因素影响下的淤泥固化土强度变化规律, 为疏浚淤泥资源化利用提供了配比依据。

关键词: 淤泥固化土; 水泥; 粉煤灰; 静力特性; 峰值强度

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0074-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.014

KONG Lingyi¹, QI Xiongguai², ZHU Fuqiang¹, LI Yinlu², MENG Lijun², ZHU Yongyang³

(1. China Construction Port Construction Group Co., Ltd., Qingdao 266011, China;

2. Tai'an City Transport Bureau Port Aviation Railway Airport Service Center, Tai'an 271000, China;

3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study investigated the effects of initial water content, cement dosage, fly ash content, and curing age on the static characteristics of silt solidified soil through unconfined compressive strength tests. The results indicated that the strength of the solidified soil decreased with increasing initial water content. The minimum cement dosages required to meet the strength criterion for railway subgrade surface layers (500 kPa) were 6%, 8%, and 10% at initial water contents of 50%, 60%, and 70%, respectively. A linear relationship was observed between cement dosage and strength, with extrapolated zero-strength cement thresholds of 1.28%, 2.24%, and 3.31% for the three water content levels. The influence of fly ash on strength exhibited water content dependency: strength decreased with fly ash addition at 50% water content, showed an initial increase followed by reduction at 60% water content, and demonstrated progressive enhancement at 70% water content. The strength increased throughout the 28-day curing period, with higher growth rates observed during the 7-14 days phase compared to the 14-28 days phase. These findings elucidate the coupled effects of multiple factors on strength evolution and provide practical

作者简介: 孔令宜 (1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地基处理。

通信作者: 朱永阳 (1996—), 男, 博士研究生, 研究方向: 软土地基处理。

收稿日期: 2023-10-19

mix proportion guidelines for the resource utilization of dredged silt.

Key words: silt solidified soil; cement; fly ash; static characteristics; peak strength

0 引言

疏浚淤泥的规模化弃置引发土地占用与二次污染风险，其资源化利用亟需解决力学性能不足的核心瓶颈。淤泥固化处理是目前比较成熟的一项技术，在淤泥中掺入一些固化材料养护形成复合土体，从而提高淤泥土的强度，改善淤泥土不良的工程性质^[1]。而产生的固化土的静力特性与原状土有很大不同，主要体现在应力-应变关系、残余应力等方面^[2]，而影响这些参数的因素有很多，如固化剂的掺量、养护条件等^[3-5]，许多学者对此展开了研究。

朱伟等^[6]对白马湖疏浚淤泥展开研究，利用无侧限抗压强度指标来判断固化效果，试验发现淤泥固化土强度与水泥的掺入量有很好的线性关系。进一步地，张春雷等^[7-8]对水泥固化上海软土进行研究，试验发现原土样的初始含水率会对固化后土体的强度和变形产生极大的影响，初始含水率越高固化土的强度便越低，研究认为固化土的无侧限抗压强度可以通过建立一个以初始含水率为控制因子的公式来预测。黄英豪等^[9]对淤泥固化土进行了三轴剪切试验，结果发现淤泥固化土存在固结屈服应力，当淤泥固化土所受外部荷载超过该屈服应力时，应变会突然增大，这意味着固化土的压缩性产生了突变；固化土的固结屈服应力会随着固化剂掺量的增多呈线性增大。王国才等^[10]通过三轴试验分析了水泥为主固化剂，氢氧化钠、三乙醇胺、粉煤灰、高炉矿渣和减水剂等为外掺剂配置而成的固化剂的固化效果，结果表明少量外掺剂能够提高淤泥固化土的强度，但掺量超过一定值后，强度反而随着外掺剂掺量的增加而降低。

对于不同类别和区域的土体，以及同一土体在不同固化材料加固下的静力特性有所差异，目前相关研究有所欠缺。因此，以山东泰安大清河疏浚淤泥为对象，采用无侧限抗压强度试验对不同条件下配置的淤泥固化土进行研究，分析含水率、不同固

化材料掺量以及养护龄期等因素对淤泥固化土力学性质的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

淤泥为山东泰安大清河疏浚淤泥，固化材料以水泥为主，选用普通硅酸盐P·O 42.5水泥，主要指标见表1；采用I级粉煤灰作为辅助固化剂，主要指标见表1。从性质上看，粉煤灰可与水发生水化反应，具有良好的减水效果，并且具有良好的抗剪性和水稳性，可以弥补水泥在固化淤泥时存在的早期强度不足以及后期变形等问题，但其自身黏聚力较低、自凝性较差，不能单独使用。因此可以在以水泥为主固化剂的基础上，添加一定量的粉煤灰来降低水泥的用量。

表1 水泥、粉煤灰的主要指标									
Table 1 Main index of cement and fly ash									
材料	物理性能			主要化学成分/%					
	比表面积 /(m ² /kg)	凝结时间 /min		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
		初凝	终凝						
水泥	363	161	234	58.95	23.4	6.3	3.98	4.72	2.65
粉煤灰	430			0.845	56.11	30.06	3.01	2.53	0.65

1.2 试件制备

根据TB 10102—2023《铁路工程土工试验规程》^[11]（简称“规程”），制做直径39.1 mm、高80 mm的圆柱土块。制作好的试件需要放入养护箱内养护至24 h后再拆模，此时试件已基本成型。脱膜后将合格试件放入养护箱内继续养护至规定龄期。养护箱的温度设定在(20±2)℃，相对湿度设定在95%。无侧限抗压强度试验依据试验规程进行。

1.3 试验方法

TB 10001—2010《铁路路基设计规范》^[19]中规定铁路路基化学改良土作填料在不同情况下的强度标准。试验以基床表层控制值500 kPa作为各配比试件的筛选标准。试验方案见表2。每组配比均设计3个平行样。

岩土力学

表 2 淤泥固化试验方案
Table 2 Silt solidification test scheme

负压值 /kPa	初始含 水率/%	水泥掺量/%	粉煤灰 掺量/%	龄期/d
30	70	4、6、8、10		7、14、28
60	50	4、6、8、10		7、14、28
90	60	4、6、8、10		7、14、28
30	70	选取达到 7 d	10、15、20	7、14、28
60	50	控制值最低	10、15、20	7、14、28
90	60	的水泥掺量	10、15、20	7、14、28

2 试验结果与分析

2.1 应力 - 应变关系

不同含水率对固化土应力 - 应变曲线的影响规律如图 1 所示。在相同较低的水泥掺量 ($c = 4\%$) 下不同初始含水率的固化土峰值强度随着含水率的增加而明显降低, 而破坏应变有所提高, 呈现出一定的塑性破坏, 并且初始含水率越高, 塑性越明显。从图 2 显示的固化土破坏形态来看, 总体呈塑性剪切破坏, 具有明显的斜裂缝, 含水率较低 (50%、60%) 时破坏土体呈较为完整的两部分; 而含水率较高 (70%) 时, 破坏土体分散成较多部分, 性质接近纯淤泥土。

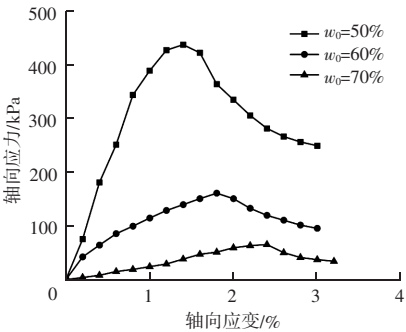


图 1 不同初始含水率的固化土应力 - 应变曲线图 (7 d)
Fig. 1 Stress - strain curves of solidified soil with different initial water contents (7 d)

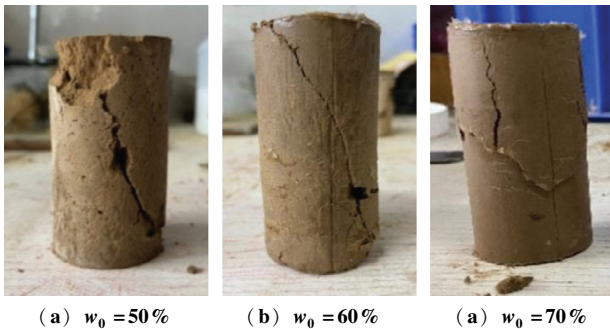


图 2 不同初始含水率的固化土破坏形态图
Fig. 2 Failure pattern of solidified soil with different initial water contents

不同水泥掺量对固化土应力 - 应变曲线的影响规律如图 3 所示。在相同初始含水率 (60%) 下不同水泥掺量的固化土强度和破坏应变随着水泥的增加而增加, 并存在两种破坏形式: 水泥掺量较低 (4%、6%、8%) 时为塑性破坏, 即强度达到峰值后趋于稳定或缓慢减小, 同时存在一定的残余强度; 而水泥掺量较高时 (10%) 呈脆性破坏, 即强度达到峰值后迅速下降, 几乎没有残余强度。从图 4 展示固化土的破坏形态来看, 前两种的破坏为一条明显的裂缝贯穿整个试件, 而后两者的破坏主要呈 45° 角的剪切破坏, 即破坏裂缝与主应力的方向存在一定的角度。

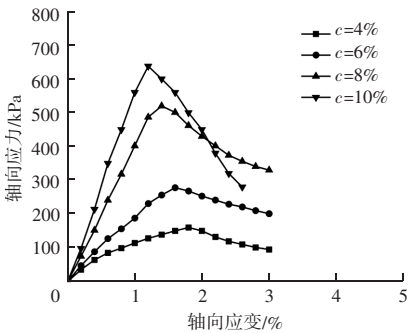


图 3 不同水泥掺量的固化土应力 - 应变曲线图 (7 d)
Fig. 3 Stress - strain curves of solidified soil with different cement contents (7 d)

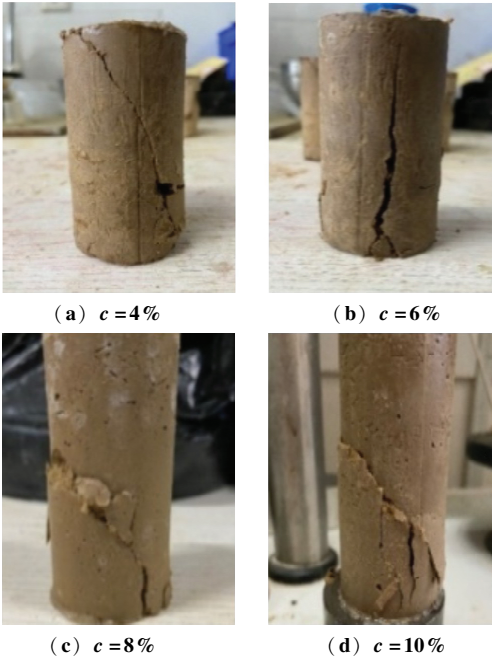


图 4 不同水泥掺量的固化土破坏形态图
Fig. 4 Failure pattern diagram of solidified soil with different cement contents

不同粉煤灰掺量对固化土应力 - 应变曲线的影响规律如图 5 所示。在相同初始含水率（70%）和水泥掺量（10%）下，粉煤灰不同掺量的固化土强度随着粉煤灰的增加而呈现小幅度的提高，破坏应变几乎保持不变。其破坏主要为脆性破坏，并且粉煤灰掺量越高，脆性表现得越明显。从图 6 显示的固化土破坏形态来看，粉煤灰掺量较低（10%）时主要为脆性剪切破坏，表现为一条主裂缝斜穿试件，周围伴有一些细小裂缝；掺量较高（15%、20%）时表现为脆性张裂破坏，即裂缝沿主应力的方向发展并贯穿整个试件，同时从内部拉裂开。分析原因

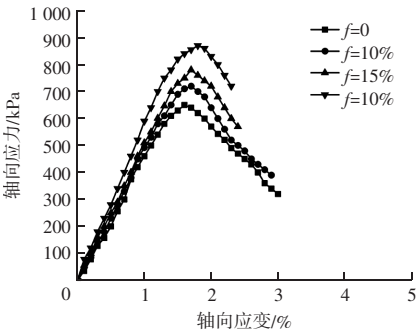


图 5 不同粉煤灰掺量的固化土应力 - 应变曲线图（28 d）
Fig. 5 Stress - strain curves of solidified soil with different fly ash contents (28 d)

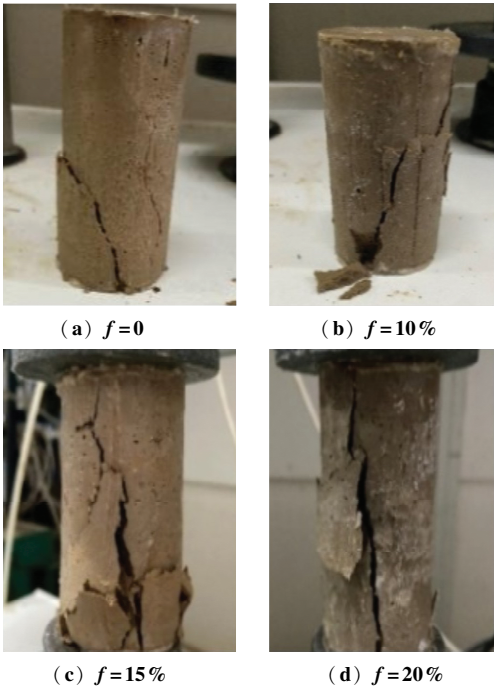


图 6 不同粉煤灰掺量的固化土破坏形态图
Fig. 6 Failure pattern diagram of solidified soil with different fly ash contents

是粉煤灰水化产生的胶凝物质将土颗粒胶结起来形成骨架，当粉煤灰掺量较小时，水化产物较少，胶结能力弱，无法形成有效的骨架来抵抗外力的破坏，所以变形趋于淤泥土体本身；掺量较大时，固化土内部几乎形成整体骨架，因此表现出较强的脆性。

2.2 无侧限抗压强度

根据 TB 10001—2010《铁路路基设计规范》^[12]要求的基床表层的控制值作为固化材料的筛选标准，单掺水泥的固化土养护 7 d 后的测试结果见表 4。

表 4 不同水泥掺量下的固化土 7 d 无侧限抗压强度

初始含水率/%	无侧限抗压强度/kPa			
	4%	6%	8%	10%
50	435	570	799	1 240
60	167	273	516	641
70	67	186	318	508

要满足 500 kPa 的强度控制指标，不同含水率下的最低水泥掺量均不相同， $w_0 = 50\%$ 时水泥最低掺量为 6%， $w_0 = 60\%$ 时水泥最低掺量为 8%， $w_0 = 70\%$ 时水泥最低掺量为 10%。因此，双掺试验中各初始含水率下的水泥掺量分别取 6%、8%、10%，试验结果见表 5。根据单掺水泥与双掺水泥和粉煤灰的固化土 7 d 强度试验值，可得到满足铁路规范要求

的配比方案，见表 6。

为了更加清晰、直观了解固化土强度随着各因素改变的变化趋势，因此绘制各因素下的强度图来分别讨论其对强度的影响规律，并分析其中的变化机理。

表 5 不同粉煤灰掺量下的固化土无侧限抗压强度

基础配比	龄期/d	无侧限抗压强度/kPa			
		0	10%	15%	20%
$w_0 = 50\%$ $c = 6\%$	7	570	366	345	334
	14	631	444	433	406
	28	759	660	621	604
$w_0 = 60\%$ $c = 8\%$	7	516	534	619	557
	14	575	604	688	631
	28	645	768	871	819
$w_0 = 70\%$ $c = 10\%$	7	508	520	572	607
	14	543	577	632	683
	28	654	721	772	870

岩土力学

表 6 水泥与粉煤灰双掺的配比方案

Table 6 Mix proportions of solidified soil with cement and fly ash blending

负压力/kPa	初始含水率/%	最低水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%
30	70	10	10、15、20
60	50	6	不建议添加粉煤灰
90	60	8	10、15、20

2.2.1 初始含水率

各水泥掺量下的固化土强度与初始含水率的关系如图 7 所示，初始含水率对固化土强度具有显著影响，因此是影响固化土强度的决定性因素之一。总体来看，各水泥掺量下的固化土强度随初始含水率的升高而降低。分析其中原因，单掺水泥固化土的强度提高主要依靠水泥水化生成的胶凝产物的胶结作用和填充作用，该过程需要水的参与，但水的掺量需要控制适当。当淤泥中的水分超过水泥水化所需要的水量时，多余的水分将会残留在固化淤泥中间，而试件的含水率均大于土的液限，因此试件在整个养护过程中均处于饱和状态。随着初始含水率的增加，孔隙比逐渐增大，越来越多的水分会分布于土颗粒和胶结产物孔隙中，使颗粒簇团间的相互作用减弱，即土颗粒和胶结产物之间的黏结力降低，导致强度逐渐降低。

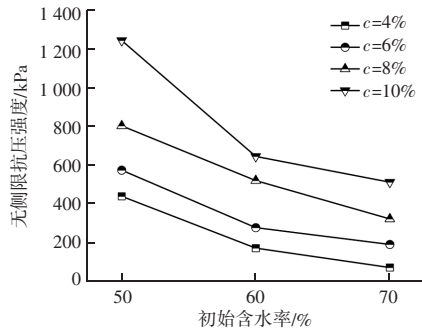


图 7 初始含水率对固化土 7 d 强度的影响

Fig. 7 Effect of initial water content on 7 d strength of solidified soil

2.2.2 单掺水泥

不同初始含水率下的固化土强度与水泥掺量的关系如图 8 所示。固化土强度和水泥掺量的关系几乎呈线性相关。对各含水率下的强度值进行线性拟合，线性拟合度 R^2 分别达到 0.90、0.96、0.98。同时将拟合曲线延伸至抗压强度为 0 时的坐标轴上，得到三种初始含水率下的水泥掺量分别为 1.28%、2.24%、3.31%，表明若水泥掺量低于这个值时，淤泥便会呈

流动的液态，几乎没有强度，水泥对土体的固化不起任何作用，这对实际工程有一定的参考意义。

进一步分析最低水泥掺量，其增长幅度随着初始含水率的增加而显著提高，初始含水率从 50% 增加到 60%，最低水泥掺量提高了 75%；从 50% 增加到 70%，最低水泥掺量更是提高了 159%，这意味着在实际疏浚淤泥的资源化利用中，需要尽可能降低初始含水率，从而降低水泥的用量，提高经济效益。

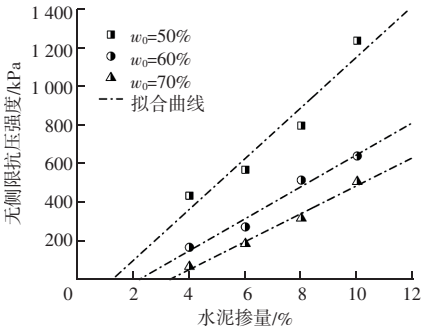


图 8 水泥掺量对固化土 7 d 强度的影响

Fig. 8 Effect of cement content on 7 d strength of solidified soil

2.2.3 水泥、粉煤灰双掺

各含水率及其对应基准水泥掺量下的固化土强度随粉煤灰掺量的关系如图 9 所示。粉煤灰的掺入对纯水泥固化土的 7 d 龄期强度增益效果各不相同：对于 $w_0 = 50\%$ 、 $c = 6\%$ 的固化土，随着粉煤灰掺量的提高，其强度是依次下降的，分别为无添加的 64.2%、60.5%、58.6%；对于 $w_0 = 60\%$ 、 $c = 8\%$ 的固化土，其强度先增后减，分别为无添加的 103.5%、120.0%、107.9%；对于 $w_0 = 70\%$ 、 $c = 10\%$ 的固化土，其强度是依次上升的，分别为无添加的 102.4%、112.6%、119.5%。同时可以发现，不同粉煤灰掺量对强度的影响差异不大。

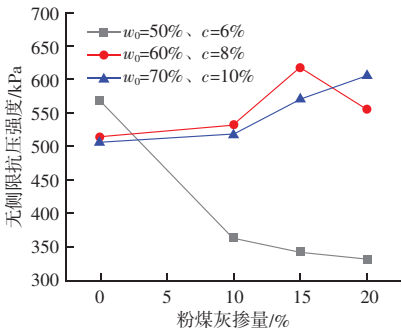


图 9 不同初始含水率下水泥与粉煤灰双掺对固化土 7 d 强度的影响

Fig. 9 Influence of fly ash on 7 d strength of solidified soil with different initial water contents

分析其中原因,粉煤灰发生化学反应需要碱性环境,而在养护阶段初期,固化土内以水泥的水化反应为主,此时对于初始含水率为 50%、水泥掺量为 6% 的固化土,较低的水泥掺量在较短的时间内发生化学反应所产生的氢氧根离子不足以引起较大的 pH 改变,所以粉煤灰的加入会滞留在土体结构中,还未进行化学反应,强度因此降低,并且随着掺量的增加,降低的程度越明显。相较于此,后两种固化土随着水泥掺量的增加和初始含水率的提高,水泥会迅速并充分发生水化等反应,可以在较短时间内提高土体的 pH 值,此时粉煤灰在碱性环境下充分发生硬凝反应生成胶凝物质,从而增强土体结构,提高了土体强度。需要注意的是,在 $w_0 = 60\%$ 、 $c = 8\%$ 的固化土中,当粉煤灰掺量超过 15% 后土体的强度反而降低,这是因为粉煤灰的添加存在一个适宜区间,当超过这个区间时,水泥水化反应生成的氢氧化钙不足以与粉煤灰反应,多余的粉煤灰同样会残留在土体结构中,使其变得松散,造成强度降低。

2.2.4 龄期

各配比的固化土强度随龄期的关系如图 10 所示,各配比下的固化土在 28 d 龄期内强度随着龄期的增长均有所提高,但增长速率有差异。

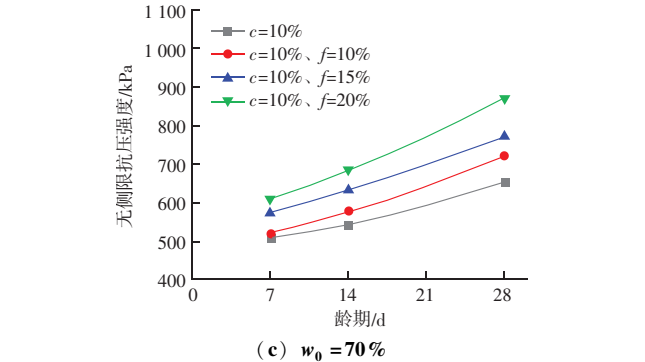
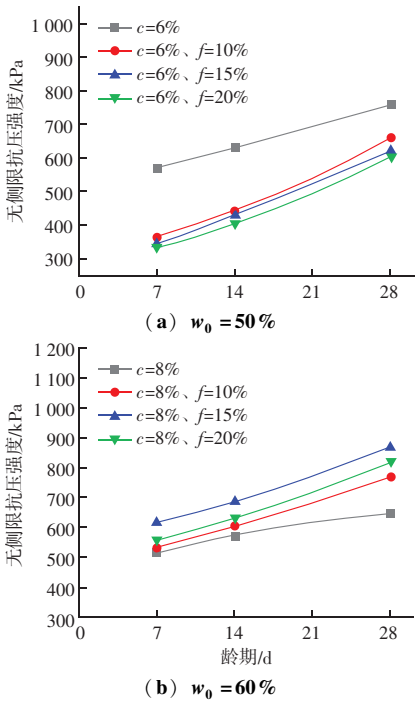


图 10 各含水率下不同粉煤灰掺量的固化土强度随龄期的增长关系
Fig. 10 Relationship between strength of solidified soil and growth of age with different fly ash content under different water content

将各配比的固化土 14 d 强度与 7 d 强度之比定义为增长系数 k_1 , 将 28 d 强度与 14 d 强度之比除以 2 定义为增长系数 k_2 , 结果见表 7。增益系数 k_1 均大于 k_2 , 原因是在固化初期, 固化土强度主要来自于固化材料自身的水化反应、水解和硬凝反应等, 吸收土体中大量的自由水, 生成凝胶体, 凝胶体逐渐结晶, 晶体增长并相互穿插, 充填在黏土颗粒之间的空隙, 在土体内部形成网状结构, 构成固化土的骨架, 使内部变得更加致密。随着时间的延长, 土体内部自由水减少, 固化材料也逐渐消耗殆尽, 因此强度的增长速率有所减缓。

表 7 各配比固化土强度增益效果 Table 7 Strength gain effect of solidified soil with different proportions				
初始含水率/%	水泥掺量/%	粉煤灰掺量/%	k_1	k_2
50	6		1.107	0.602
50	6	10	1.213	0.743
50	6	15	1.255	0.717
50	6	20	1.216	0.744
60	8		1.114	0.561
60	8	10	1.131	0.636
60	8	15	1.111	0.633
60	8	20	1.133	0.649
70	10		1.069	0.602
70	10	10	1.107	0.625
70	10	15	1.105	0.611
70	10	20	1.125	0.637

3 结论

通过无侧限抗压强度试验, 阐明了疏浚淤泥固化土的静力特性调控规律, 得到以下主要结论:

(1) 初始含水率升高显著增加水泥掺量需求, 当初始含水率从 50% 增至 70% 时, (下转第 94 页)

岩土力学

参 考 文 献

[1] 屈浩, 张波, 张振义, 等. 盾构隧道侧穿引发砌体建筑物变形损伤实例研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (3): 119-130.

[2] 董宇. 基于现场变形监测成果在盾构近接既有隧道段的变形预测研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 50-56.

[3] 白海卫, 王剑晨, 刘运亮. 基于应力平衡的上穿施工既有隧道微变形控制 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (5): 1569-1577.

[4] 寇鼎涛. 北京地铁大兴机场线矩形断面大跨度隧道上穿施工时对既有有线结构变形的控制 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (8): 56-64.

[5] 姜之阳, 张彬, 刘硕, 等. 大断面矩形顶管上跨施工对既有地铁隧道变形影响研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30 (5): 1703-1712.

[6] 张建军, 陈浩, 韩会云, 等. 上跨地铁区间环隧匝道施工稳定性控制研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (12): 100-109.

[7] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (4): 194-202.

[8] 魏纲, 郭丙来, 王哲, 等. 考虑开挖宽度的基坑卸荷引起下卧

盾构隧道变形计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (4): 1019-1030.

[9] 陈仁朋, 刘慕淳, 孟凡衍, 等. 基坑开挖旁侧盾构隧道结构横向受力与变形研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (1): 24-32.

[10] 梁宇. 地铁盾构施工在快速路下方上跨南水北调干渠技术研究 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (8): 915-917.

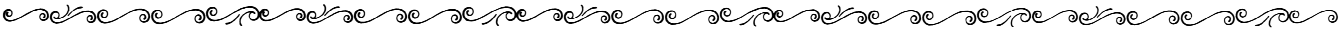
[11] 朱汉华, 周小涵, 王葵, 等. 隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (1): 79-86, 94.

[12] 曹洋, 林育睿, 张二望, 等. 地铁盾构施工对上跨桩板结构的扰动机制研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (7): 24-30.

[13] 丁吴玉, 刘利先, 李霖. 地表增荷比对方盾构隧道变形和内力的影响 [J]. 工业安全与环保, 2024, 50 (8): 61-65.

[14] 顾锋. 软土地区市域快速轨道交通大直径盾构隧道的横断面变形特征及其控制限值 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (8): 97-102.

[15] 杨艳玲, 韩现民, 李文江. 地铁盾构区间近距离下穿顶管隧道力学响应及沉降控制标准研究 [J]. 铁道标准设计, 2022, 66 (3): 118-123, 149.



(上接第 79 页)

满足铁路基床强度标准的最低水泥掺量需大幅提高。

(2) 粉煤灰的增强效果受含水率与水泥掺量双重制约: 在低含水率 (50%) 或不足水泥掺量条件下, 添加粉煤灰将降低固化土强度; 而高含水率 (70%) 与足量水泥 (10%) 配合时, 粉煤灰掺量提升可明显节约水泥用量。

(3) 固化土强度增长呈现显著时效特征, 约 70% 的 28 d 强度在养护前 14 d 形成。

该成果为同类型高含水率疏浚淤泥的工程化利用提供了可操作的配比设计准则, 通过优化材料组合可降低处理成本, 同时满足路基承载性能要求。

参 考 文 献

[1] 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/OL]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 73-78. DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.014.

[2] 旷春贵, 胡世平. 复掺水泥+聚丙烯纤维改良淤泥质废弃软土试验研究 [J/OL]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 83-87, 129. DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2021.05.015.

[3] 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.

[4] 田大作. 洞庭湖北部垸内沟渠淤泥固化土物理力学性质试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019 (12): 141-144.

[5] 邹维列, 贺扬, 张凤德, 等. 改性淤泥固化土非饱和渗透特性试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2017, 51 (11): 2182-2188.

[6] 朱伟, 冯志超, 张春雷, 等. 疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2005 (5): 32-35.

[7] 张春雷, 朱伟, 李磊, 等. 湖泊疏浚泥固化筑堤现场试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2007 (1): 27-29.

[8] 张春雷, 朱伟, 黄英豪, 等. 固化淤泥三轴试验研究 [C/OL] //第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集 (上册). 中国云南昆明, 2006, 3: 259-261 [2025-02-21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CPFD&dbname=CPFD9908&filename=ZGSL200611001064>.

[9] 黄英豪, 朱伟, 周宣兆, 等. 固化淤泥压缩特性的试验研究 [J/OL]. 岩土力学, 2012, 33 (10): 2923-2928. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.10.003.

[10] 王国才, 吴旻炯. 滩涂淤泥固化土力学特性试验研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2015, 43 (4): 468-472.

[11] 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2023 [S/OL]. (2023-04-20) [2025-02-25].

[12] 铁路路基设计规范: TB 10001—2016 [S/OL]. (2016-12-20) [2025-02-25].