

考虑预压压力的理化复合法处理流泥的 强度发展模型

白欣悦¹, 郑俊杰¹, 章荣军^{1,2,3}, 刘斯杰¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;
3. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 采用融合了絮凝-固化-真空预压的理化复合法处理流泥能够实现流泥的高效资源化利用, 但既有研究对该方法处理流泥的强度发展模型的认知尚不充分。本研究开展了系统的无侧限抗压强度试验, 旨在剖析养护龄期、预压压力、等效初始含水率、固化剂掺量对理化复合法改性流泥早中期强度特性的影响机制。试验结果表明: 改性流泥强度随养护龄期呈现前期快速增长、后期增速逐渐趋缓的增长规律; 随预压压力的增大, 改性流泥强度近似呈线性增长; 固化剂掺量增加能显著提高改性流泥强度; 等效初始含水率的增加则会降低改性流泥强度。通过对试验数据的挖掘与拟合分析, 本研究创新性地构建了一种双曲线形式的强度发展模型, 该模型全面涵盖了养护龄期、预压压力、等效初始含水率、固化剂掺量等关键参数, 可为工程实践提供理论基础。

关 键 词: 流泥; 理化复合法; 絮凝; 固化; 预压压力; 强度发展模型

中图分类号: TU449

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2026) 06-1952-10

Strength development model for slurry-like mud treated by physicochemical combined method considering preloading stress

BAI Xin-yue¹, ZHENG Jun-jie¹, ZHANG Rong-jun^{1,2,3}, LIU Si-jie¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The integrated physicochemical approach, which combines flocculation, solidification, and vacuum preloading, presents an efficient strategy for the resource utilization of slurry-like mud. To address the limited understanding of the development of unconfined compressive strength (UCS) in treated slurry-like mud, this study systematically conducted unconfined compressive strength tests. The investigation primarily focused on examining the influence of curing age, preloading stress, equivalent initial water content, and binder dosage on the strength characteristics during the early to medium stages. The test results unveiled distinct relationships: UCS exhibits rapid growth during the initial curing stages, followed by a gradual deceleration in the growth rate. Elevated preloading stress induces a nearly linear increase in strength, whereas an increased binder dosage significantly enhances UCS. Conversely, a higher equivalent initial water content diminishes the strength. Based on a rigorous analysis and fitting of the experimental data, this research developed a novel hyperbolic strength development model. This model uniquely incorporates the effects of curing age, preloading stress, equivalent initial water content, and binder dosage as key governing parameters. The comprehensive model offers a valuable theoretical framework for predicting the strength behavior of modified fluid mud treated by this physicochemical composite method in practical engineering applications.

Keywords: slurry-like mud; physicochemical combined method; flocculation; solidification; preloading stress; strength development model

收稿日期: 2025-05-30

录用日期: 2025-08-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52338007, No.52208367); 湖北省重点研发计划项目 (No.2022BAA068)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52338007, 52208367) and the Key Research and Development Program in Hubei Province of China (2022BAA068).

第一作者简介: 白欣悦, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: baixinyue@whu.edu.cn

通信作者: 郑俊杰, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与隧道工程方面的教学、科研与技术咨询工作。

E-mail: zhengjunjie@whu.edu.cn

1 引言

随着现代水利枢纽工程、深水港建设及海洋资源开发的持续推进,疏浚工程产生的流泥呈现显著累积态势。这些流泥具有细颗粒含量高、颗粒级配差、含水率高、压缩性强等典型特征,导致其工程性能显著弱化,不宜直接作回填料使用^[1-3]。针对这些高含水率流泥的资源化利用问题,若采用工程中常用的化学固化法^[4-5],则将面临水泥用量急剧增加和随之而来的CO₂排放增加的双重代价,与可持续发展的工程理念相悖。为解决上述问题并实现对流泥的高效处理,有学者提出理化复合法(絮凝-固化-真空预压联合方法),将絮凝调理和真空预压技术引入到流泥的化学固化处理中^[6-8]。该方法的流程为在流泥浆中先后加入固化剂与絮凝剂,并结合真空预压处理流泥。其原理为基于高分子絮凝剂所具备的电荷中和与架桥效应,絮凝调理技术能显著改善流泥的渗透性。联合真空预压技术后,土体排水通道增加,同时负压环境得以形成,大幅提升了流泥的脱水效率^[6];随着超孔隙水压力的消散,土骨架应力随之增加,土颗粒联系更紧密;提高土体结构性的同时也提升了固化效率,使得改性流泥强度显著增强^[9-10]。研究证明,理化复合法处理流泥的效果显著^[11-12],与同条件下传统的用水泥等固化剂处理的流泥相比,经该联合方法处理的流泥强度可提升数倍^[13]。

土体的抗压强度是衡量流泥处理效果的重要指标。目前国内外学者已经对固化土强度的影响因素及其发展模型展开了大量研究。Horpibulsuk等^[14]提出用黏土水灰比(含水率与水泥掺量的比值均以百分比表示)替代水灰比的固化土强度预测模型。Zhang等^[15]探究了温度对水泥固化土强度发展的影响,利用混凝土常用成熟度理论与温度因子相结合,构建了强度发展模型。现有强度预测模型多为对数曲线或双曲线形式,Bi等^[16]提出了一种利用强度增长速度建立的模型,引入对数正态分布的累计分布函数,利用对数正态分布的概率密度函数变化规律与强度发展速率随时间变化关系吻合从而提出强度预测模型,并对参数进行了求解。Liu等^[17]通过试验提出了一种考虑偏移时间,包含水灰比、含水率等参数的纯水泥固化土早期强度发展模型,并未考虑引入絮凝剂及预压压力的影响。以上都是研究纯固化方法处理流泥的强度发展模型,而对理化复合法处理流泥强度发展模型的研究较少。由于理化复合法处理流泥的过程中有固结和固化两个过程,两

个过程互相影响且存在复杂的相互作用关系,固结过程促进固化过程而固化过程又抑制固结过程。现有的常规强度预测模型通常未能充分考虑固结与固化过程之间的耦合作用,因此在实际应用中难以准确预测处理后流泥的强度发展,特别是缺少预压压力对强度的影响。鉴于此,本文将提出一种考虑预压压力的强度发展模型,能够更全面地反映这两种过程的动态交互关系,并实现对流泥处理后强度的发展进行预测。

具体而言,本研究重点分析预压压力对理化复合法处理流泥(改性流泥)强度的影响机制,尤其关注在早中期强度发展过程中,养护龄期、等效初始含水率、固化剂掺量等关键因素的作用规律与影响特征。通过试验数据的拟合与分析,本文进一步推导并建立了强度发展的时变函数模型,旨在实现对改性流泥强度演化的预测。该模型将为流泥处理过程的优化设计提供理论依据,并为工程应用中的强度控制与预测提供科学支持。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本文试验所用流泥取自湖北省钟祥市镜月湖清淤工程淤泥。絮凝剂选用阴离子聚丙烯酰胺絮凝剂(anionic polyacrylamide,简称APAM)、固化剂选用普通硅酸盐水泥(ordinary Portland cement,简称OPC)、高炉矿渣(ground granulated blast-furnace slag,简称GGBS)。仪器采用自制加载制样装置、标准静态加载架。所用固化剂为硅酸盐水泥与高炉矿渣按质量比1:1混合而成的复合固化剂。絮凝剂由阴离子聚丙烯酰胺与水按质量比为1:500混合而成。

2.2 试验步骤

(1)提前将阴离子聚丙烯酰胺(APAM)与水按照质量比1:500进行搅拌后静置一段时间,待阴离子聚丙烯酰胺全部溶解,备用。

(2)取流泥试样,先通过烘干或添加水的方式将原始流泥含水率调整为试验所需含水率。

(3)将相应含水率的流泥与固化剂混合,利用搅拌机搅拌。

(4)向混合泥浆中加入事先准备好的絮凝剂溶液,先进行人工手动搅拌将混合泥浆与絮凝剂充分接触;然后用机器搅拌,以60 r/min的转速搅拌3~4 min,同时观察,直至出现较大絮团且有清液析出为止。

(5)将混合泥浆置于自制加载制样装置中,如

图 1 所示,用砝码按照设计压力堆载对处理后的流泥进行预压。其中,20 kPa 组一次施加 20 kPa;40 kPa 和 60 kPa 组分级加载,每次施加 20 kPa,间隔 30 min。6 h 沉降稳定,规定此时为养护龄期为 0 的时刻。从加入固化剂到堆载开始的时间严格控制在 20 min,从而保证相同龄期不同试样的固化剂反应时间基本一致。

(6) 同时在标准养护条件(温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 95%以上)养护至相应龄期后将硬化的改性流泥试样脱模取出,测试试样的无侧限抗压强度、孔隙比和含水率等指标。

(7) 将试样脱模取出,取试样同一位置(上部)截取 10 cm,将两端刮平。调试静力加载架速率设置为 1 mm/min ,将试样放置于加载托盘上开始进行无侧限抗压强度测试,并观察实时应力-应变曲线和试样开裂情况,出现峰值拐点后可停止试验,保存数据以进行后续处理。

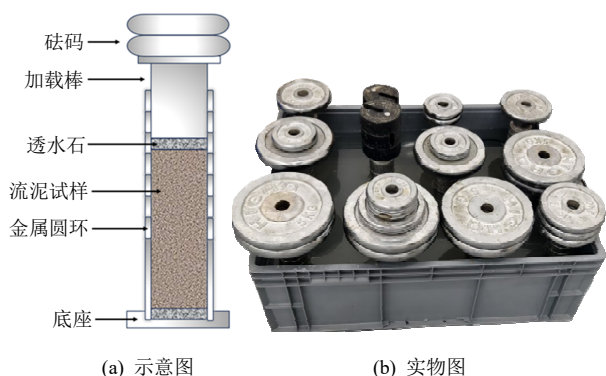


图 1 自制加载装置
Fig.1 Self-made loading device

2.3 试验方案

本文以等效初始含水率 w_0 (混合泥浆中水与土颗粒的质量比)、固化剂掺量 A_w 、预压压力 p (养护期间持续施加在试样上的压力) 和养护龄期 t 为主要研究变量,探讨其对改性流泥强度及其演变规律的影响。共设计了 4 组含水率,固定絮凝剂掺量为 0.125%,每组合含水率持续施加 4 个不同预压压力,试样在标准养护条件下(温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 95%以上)养护,并测试 9 个龄期的无侧限抗压强度,其中无预压压力的试样取 7、14 d 和 28 d (无预压组因含水率较高,最早约 7 d 才成型,为保证文中改性流泥强度均为无侧限抗压强度,该组龄期采用 7、14 d 和 28 d)。同时设置了 15%、12.5%、10%、7.5% 的固化剂掺量梯度,并测试 9 个龄期的无侧限抗压强度,探究固化剂掺量的影响。具体试验工况见表 1。

表 1 试验工况
Table 1 Program for the experiments

编号	固化剂掺量 $A_w/\%$	等效初始含水率 $w_0/\%$	预压压力 p/kPa	养护龄期 t/d
A1	10.0	120	0	7, 14, 28
A2			20	
A3			40	
A4			60	
B1	10.0	150	0	7, 14, 28
B2			20	
B3			40	
B4			60	
C1	10.0	180	0	7, 14, 28
C2			20	
C3			40	
C4			60	
D1	10.0	210	0	7, 14, 28
D2			20	
D3			40	
D4			60	
E1	15.0	180	60	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 7, 14, 28
E2	12.5			
E3	7.5			

3 理化复合法处理流泥强度变化规律

3.1 养护龄期对改性流泥强度的影响规律

图 2 呈现了养护龄期对理化复合法处理的改性流泥强度的影响。由试验结果可知,改性流泥强度随养护龄期的延长呈逐步增长的趋势。在 0~3 d 的早期阶段,改性流泥强度增长速率较快,强度随时间增加呈现出较为陡峭的上升趋势;而 3 d 之后,强度增长速率逐渐减缓,曲线趋于平缓。

这一现象可能源于固化剂的水化反应特性。在水化反应初期,固化剂化学活性高,且初始水化反应物浓度充足,使得反应分子能够高频碰撞并相互作用,从而促使水化反应较为剧烈地进行。然而,随着养护龄期的延长,水化反应速率逐渐放缓。一方面,水化反应物浓度不断下降,同时水化产物逐渐积累,这些因素共同导致反应速率降低;另一方面,水化产物会包裹固化剂反应物,阻碍后续的水化反应进程,最终反应趋于平衡^[18]。

从宏观角度来看,试样的无侧限抗压强度增长速率表现为前期快速增长,后期增速逐渐趋缓,当龄期足够长时,强度增长应趋于平缓。这一结果与众多学者的研究保持一致^[19-20]。

3.2 预压压力对改性流泥强度的影响规律

在固化剂掺量恒定的条件下,预压压力对养护龄期分别为 14 d 和 28 d 的改性流泥强度的影响如图 3 所示。不难看出,改性流泥强度随预压压力增大

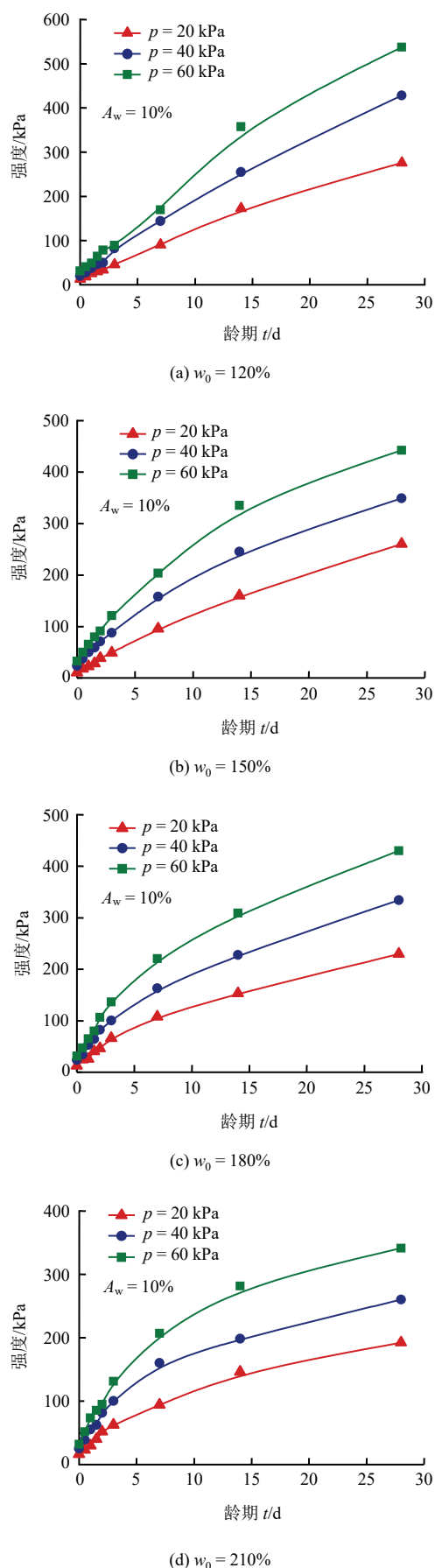


图2 不同等效初始含水率流泥各龄期的强度
Fig.2 Strength at various curing ages of slurry-like mud with different equivalent initial water contents

而近似呈线性增长趋势。究其原因, 可能有以下 3 方面:

(1) 预压压力与土体结构及性能之间存在显著关联, 随着预压压力的增大, 土体内部孔隙水的排出量呈现上升趋势, 沉降量显著增加, 这直接导致土体孔隙尺寸减小, 土颗粒骨架所承受的应力增加, 且土颗粒之间的相互作用增强^[21]。

(2) 在相同等效初始含水率情况下, 随着预压压力的增加, 试样排水量增大, 养护后含水率 (即改性流泥中水与土颗粒的质量比) 降低。由于固化剂掺量保持不变, 相当于水灰比随压力增大而减小。根据既有研究, 水灰比的减小会促使土体强度增加。

(3) 改性流泥内颗粒平均距离会随着预压压力的增大而减小, 使得固化剂水化产物的连接杆变短。这种微观结构的变化, 增强了固化剂对土体的胶结作用, 进而提升了改性流泥的强度^[22]。

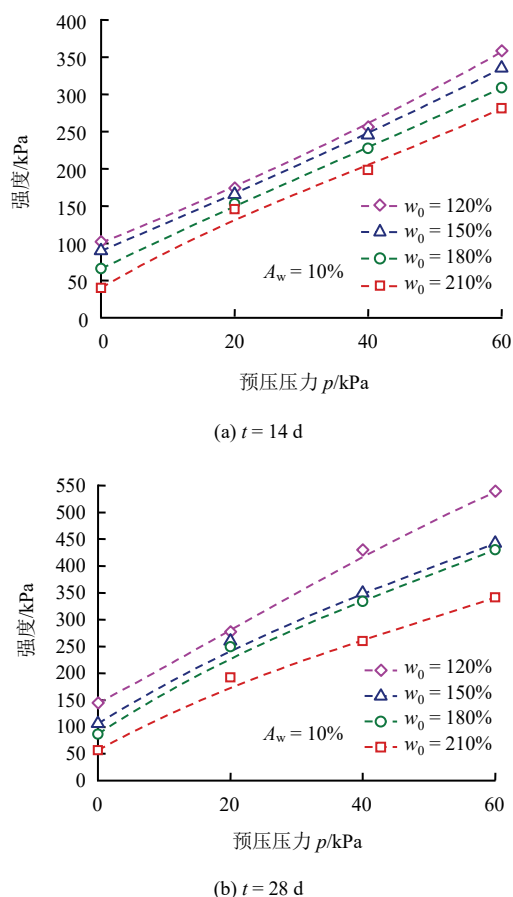


图3 预压压力对改性流泥强度的影响
Fig.3 Effect of preloading pressure on the strength of modified slurry-like mud

3.3 等效初始含水率对改性流泥强度的影响规律

如图 4 所示, 在相同预压压力及固化剂掺量条件下, 改性流泥强度随等效初始含水率升高呈递减

趋势。其可能的原因为：一方面，预压过程中土体排水固结的效果受初始含水率制约，在同等压力条件下，随着等效初始含水率的升高，养护后土体含水率相应增加(如图 5 所示)，导致土体结构性弱化，颗粒间相互作用弱；另一方面，高含水率环境抑制固化剂水化反应进程，胶凝产物生成量减少，固化效应随含水率升高而衰减，上述因素共同导致改性流泥强度下降。值得注意的是，预压荷载可以部分抵消等效初始含水率升高对强度的负面影响，不能完全消除其不利作用。

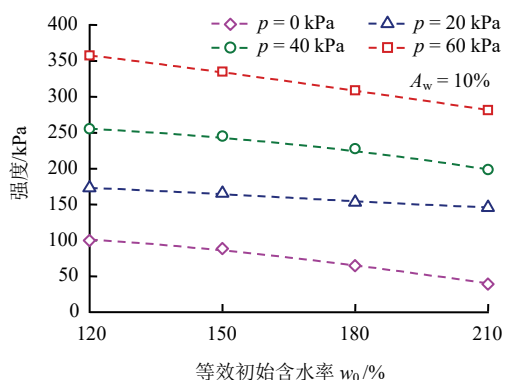
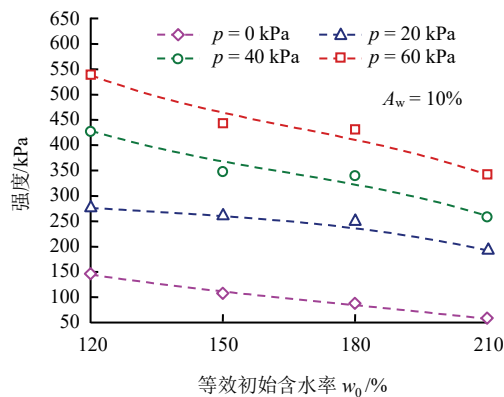
(a) $t = 14 \text{ d}$ (b) $t = 28 \text{ d}$

图 4 等效初始含水率对改性流泥强度的影响

Fig.4 Effect of equivalent initial water content on the strength of modified slurry-like mud

对比图 4 中不同龄期强度曲线可见，28 d 强度—等效初始含水率曲线斜率显著大于 14 d 曲线，表明等效初始含水率对改性流泥强度的影响随养护龄期延长而增强，呈现明显的时效依赖性。

3.4 固化剂掺量对改性流泥强度的影响规律

由图 6 可见，固化剂掺量与改性流泥强度增长率之间呈现显著的正相关性，随着固化剂掺量的增加，强度增长速率逐渐增大，具体表现为曲线斜率明显增加，即曲线更陡峭。其可能的原因是，在相

同养护龄期、预压压力条件下，固化剂掺量的增加直接提升了反应物浓度，加剧水化反应进程，促使水化产物生成速率加快，生成更多的水化产物，进而显著增强固化效应，宏观表现为强度增加^[23-24]。此外，不同固化剂掺量下改性流泥强度均呈现随龄期前期快速增长，后期增速逐渐趋缓的发展规律，表明固化剂掺量主要影响强度发展的幅值参数，而对其随养护龄期的演变规律未产生显著影响。

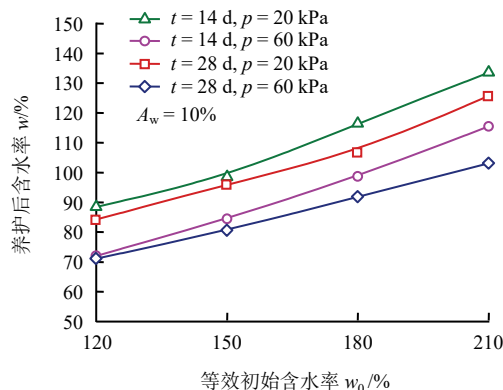


图 5 等效初始含水率与养护后含水率之间的关系

Fig.5 Relationship between equivalent initial moisture content and moisture content after curing

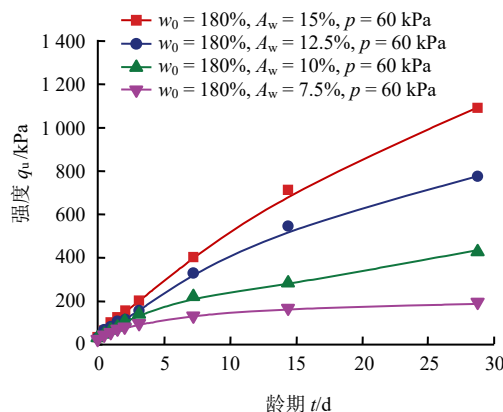


图 6 不同初始含水率流泥各龄期的强度

Fig.6 Strength at various curing ages of slurry-like mud with different initial water contents

由图 7 可以看出，改性流泥的强度随固化剂掺量的增加呈显著增长态势。同时，养护龄期越长，强度增长幅度越大，曲线斜率显著增大(如 $t = 28 \text{ d}$ 曲线斜率明显大于 $t = 3 \text{ d}$)。这表明在长期养护条件下，固化剂掺量对强度的提升效果更为突出，其内在机制可能为：随养护龄期的延长，水化反应更趋充分，胶结物质生成量增加，进而强化了固化效应，体现了固化剂掺量与养护龄期对改性流泥强度发展的协同影响。

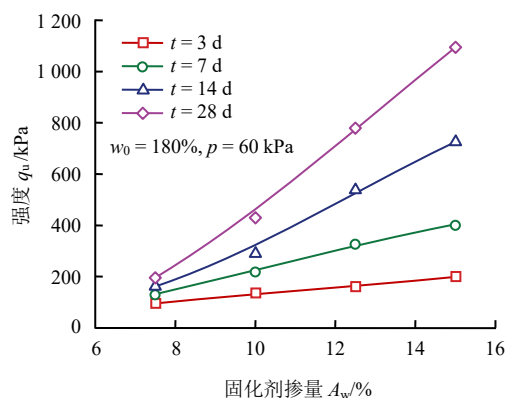


图7 固化剂掺量对改性流泥强度的影响

Fig.7 Effect of curing agent dosage on the strength of modified slurry-like mud

4 理化复合处理流泥的强度发展模型

4.1 模型建立

既有研究表明, 改性流泥强度随龄期增长普遍呈现前期快速增长、后期增速逐渐趋缓的增长特性, 其发展规律可采用双曲线、对数、指数等函数模型进行表征。如图2所示, 经理化复合处理的改性流泥强度发展曲线呈现显著的双曲线特征, 且由于受到预压压力影响, 当养护龄期 $t=0$ 时改性流泥强度 $q_{u,0} \neq 0$ (即曲线纵轴截距不为0), 则其强度与龄期的函数关系可表示为

$$q_u(t) = q_{u,0} + q_{u,c} \frac{t}{a+t} \quad (1)$$

$$q_{u,\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} q_u(t) = q_{u,0} + q_{u,c} \quad (2)$$

式中: $q_u(t)$ 为养护龄期 t 时刻的无侧限抗压强度 (kPa); $q_{u,0}$ 为曲线截距, 物理意义为流泥在某一预压压力下固结完成时的无侧限抗压强度 (kPa), 这里取预压 6 h 试样的无侧限抗压强度; $q_{u,c}$ 为改性流泥固结后由固化剂作用的最终强度 (kPa); $q_{u,\infty}$ 为模型预测的经理化复合处理的改性流泥的最终强度 (kPa); a 为由固化作用产生的强度达到 $1/2 q_{u,c}$ 时的养护龄期 (d)。式中所有强度均为无侧限抗压强度。拟合效果如图8、9所示。

由图8、9可以看出, 参数 $q_{u,0}$ 、 $q_{u,c}$ 、 a 都是与 w_0 、 A_w 、 p 有关的参数。分析可得图10, 可以看出参数 $q_{u,c}$ 随着压力 p 的增加而增加, 且与固化剂掺量和水灰比的比值 $A_w/(w_0/A_w)$ 成正相关, 其相关系数大于 0.98, 拟合效果良好, 其具体函数关系式为

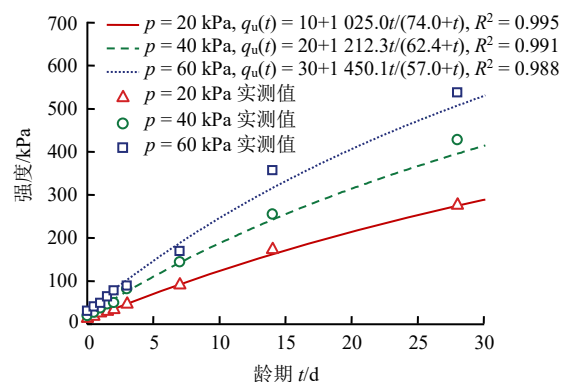
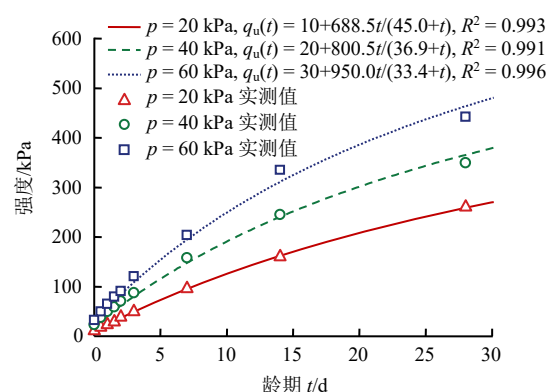
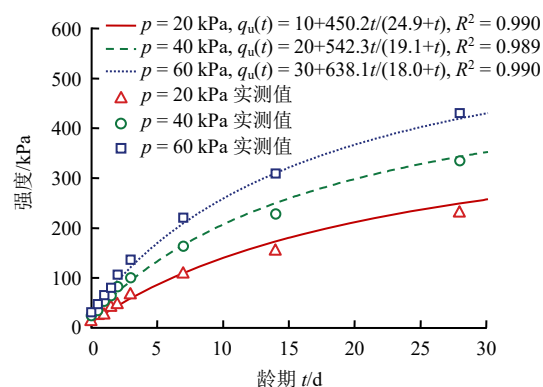
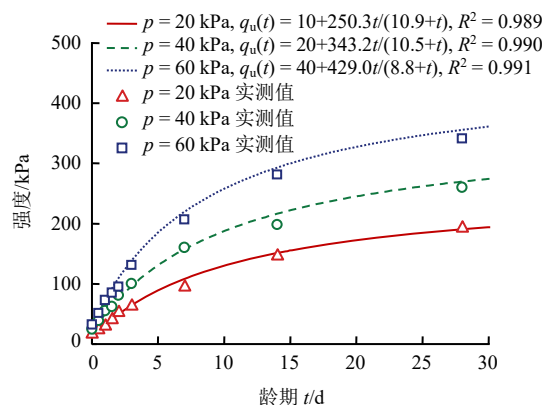
(a) $w_0 = 120\%$ (b) $w_0 = 150\%$ (c) $w_0 = 180\%$ (d) $w_0 = 210\%$

图8 $A_w = 10\%$ 的改性流泥的强度发展实测值与预测值
Fig.8 Measured and predicted values of strength development for modified slurry-like mud with $A_w = 10\%$

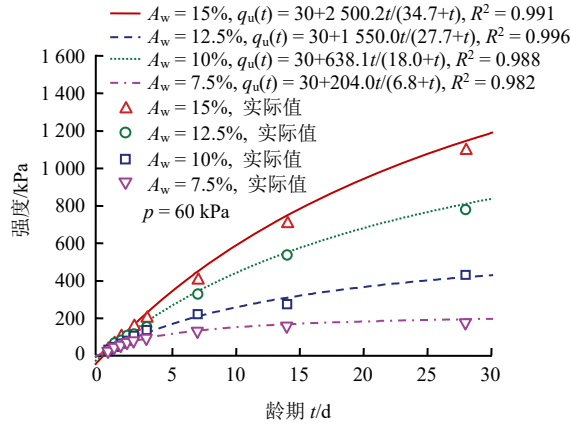


图9 $A_w=7.5\%\sim 15\%$ 的改性流泥的强度发展实测值与预测值

Fig.9 Measured and predicted values of strength development for modified slurry-like mud with $A_w=7.5\%\sim 15\%$

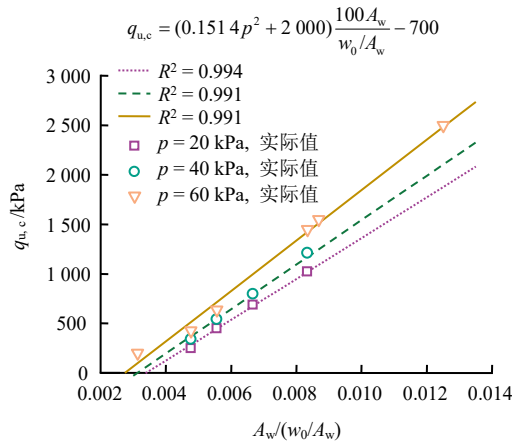


图10 参数 $q_{u,c}$ 与 w_0 、 A_w 、 p 的关系

Fig.10 Relationship of parameter $q_{u,c}$ with w_0 , A_w and p

$$q_{u,c} = (bp^2 + c) \frac{100A_w}{w_0/A_w} - d \quad (3)$$

本试验得出 $b = 0.1514$, $c = 2000$, $d = 700$, 根据流泥种类的不同, b 、 c 、 d 的取值不同。

由图 11 可知, 参数 a 与初始含水率 w_0 和试样水灰比 w_0/A_w (其中 w_0 、 A_w 都用%表示) 的乘积呈现指数关系, 随着 $w_0 \times w_0/A_w$ 的增大而增大; 同时参数 a 与预压压力 p 呈线性相关, w_0 、 A_w 相同时, a 随着 p 的增大而减小, 宏观表现为, 随着预压压力增加改性流泥强度发展进程加快, 可更快达到最终强度, 在强度-龄期曲线上具体表现为拐点位置提前出现, 即强度增长速率转变的时间节点更早来临。其具体函数关系式为

$$a = (-p + m) \exp(nw_0^2/A_w) \quad (4)$$

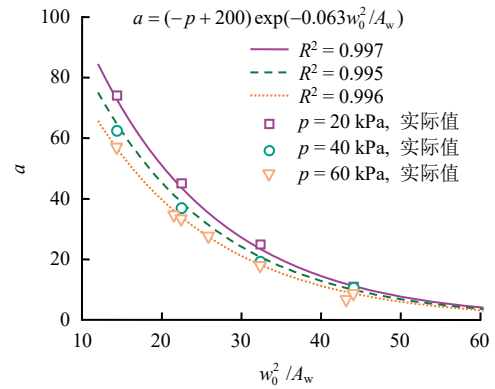


图11 参数 a 与 w_0 、 A_w 、 p 的关系

Fig.11 Relationship of parameter a with w_0 , A_w and p

本试验得出 $m = 200$, $n = -0.063$, 根据流泥种类的不同, m 、 n 取值不同。

当养护龄期 $t = 0$ 时, 试样无侧限抗压强度 $q_{u,0}$ 对应固结过程完成时刻的强度。此时固化反应历时较短, 固化剂的胶结作用与孔隙填充效应尚未充分发挥, 故试样强度主要由固结过程控制。试验采用圆环式排水装置, 土体在侧限条件下的固结过程属于典型的 K_0 固结。 K_0 固结试样的无侧限抗压强度 q_u 与竖向有效应力 σ'_v 之间的关系式为

$$q_u = k\sigma'_v \quad (5)$$

如图 12 所示, 本文 $k = 0.5$, 固结完成时预压压力 p 与竖向有效应力相等, 则 $q_{u,0}$ 与 p 的具体函数关系式为

$$q_{u,0} = 0.5p \quad (6)$$

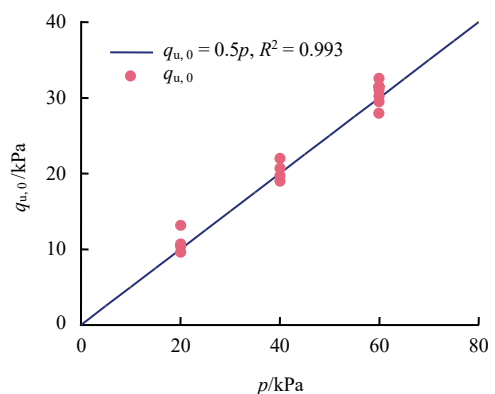


图12 参数与 p 的关系

Fig.12 Relationship of parameter $q_{u,0}$ with p

将式 (2) ~ (4) 代入式 (1) 中, 得到考虑压力的理化复合处理流泥的强度发展模型为

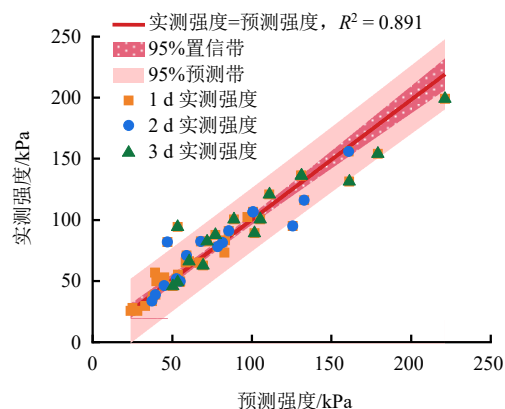
$$q_u(t) = kp +$$

$$\left[(bp^2 + c) \frac{100A_w}{w_0/A_w} - d \right] \frac{t}{(-p + m) \exp(nw_0^2/A_w) + t} \quad (7)$$

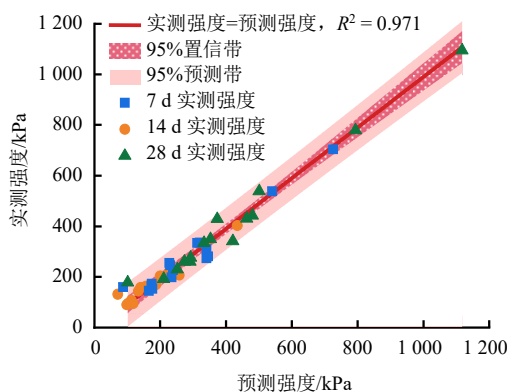
式中: 参数 k 、 b 、 c 、 d 、 m 、 n 均可通过拟合分析试验数据获得。

4.2 模型验证

图 13 为不同工况下改性流泥 1、2、3、7、14 d 及 28 d 龄期无侧限抗压强度的实测值与预测值的拟合关系。图中置信带能反映模型预测的可靠性, 条带越窄, 模型预测越精准。由于预测带不仅包含模型本身误差还涵盖了试样个体差异带来的随机性, 其宽度显著大于置信带。模型决定系数 R^2 均大于 0.8 的参考阈值, 表明本文构建的考虑压力的理化复合处理流泥的强度发展模型能较好地预测改性流泥的强度发展规律, 可以为实际工程应用提供一定理论参考。



(a) $t = 1, 2, 3$ d



(b) $t = 7, 14, 28$ d

图 13 预测强度与实测强度之间的关系

Fig.13 Relationship between predicted and measured strengths

5 结 论

本文通过开展一系列室内试验, 探究了养护龄期、预压压力、等效初始含水率、固化剂掺量对理化复合处理流泥强度特性的影响, 并提出了一种强度发展模型, 具体结论如下:

(1) 改性流泥强度与养护龄期呈双曲线关系, 强度呈现前期增长较快、后期增速逐渐趋缓的规律。

(2) 预压压力对改性流泥强度影响显著, 强度随预压压力增大近似呈线性增长。

(3) 等效初始含水率对改性流泥强度产生负面影响, 强度随其增加而减小, 且龄期越长影响越明显。

(4) 固化剂掺量显著影响改性流泥强度, 随掺量增加, 强度增长速率加快, 强度提升显著。

(5) 通过分析试验数据, 提出一种包含养护龄期 t 、预压压力 p 、等效初始含水率 w_0 、固化剂掺量 A_w 的理化复合处理流泥的强度发展模型, 可以为工程实践中强度的预判提供参考依据, 为研究理化复合处理流泥的固结固耦合理论研究提供理论基础。

参 考 文 献

- [1] 彭涛, 武威, 黄少康, 等. 吹填淤泥的工程地质特性研究[J]. 工程勘察, 1999(5): 1-5.
PENG Tao, WU Wei, HUANG Shao-kang, et al. Study on engineering geological properties of dredged sludge[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1999(5): 1-5.
- [2] BERILGEN S A, BERILGEN M M, OZAYDIN I K. Compression and permeability relationships in high water content clays[J]. *Applied Clay Science*, 2006, 31(3-4): 249-261.
- [3] XU G Z, GAO Y F, YIN J, et al. Compression behavior of dredged slurries at high water contents[J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2015, 33(2): 99-108.
- [4] 顾欢达, 顾熙. 河道淤泥的轻质化处理及其工程性质[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(9): 63-66.
GU Huan-da, GU Xi. Air foamed lightweight soil with river sludge and its engineering properties[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(9): 63-66.
- [5] 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.
ZHANG Chun-lei, GUAN Fei-fan, LI Lei, et al. The progress in the reutilization treatment and disposal of dredged sediments in China[J]. *Environmental Engineering*,

- 2014, 32(12): 95-99.
- [6] ZHANG R, ZHENG Y, ZHENG J J, et al. Flocculation-solidification combined method for treatment of hydraulically dredged mud at extra high water content[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15: 1685-1698.
- [7] 徐志豪, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝固化联合真空预压处理高含水率淤泥(浆)试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(5): 10-18.
- XU Zhi-hao, ZHANG Rong-jun, ZHENG Jun-jie, et al. Experimental study on flocculation solidification combined with vacuum preloading treatment of dredged mud with high moisture content[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2021, 43(5): 10-18.
- [8] 郑耀林, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝-固化联合处理超高含水率吹填淤泥浆的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3107-3114.
- ZHENG Yao-lin, ZHANG Rong-jun, ZHENG Jun-jie, et al. Experimental study of flocculation-solidification combined treatment of hydraulically dredged mud at extra high-water content[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(8): 3107-3114.
- [9] ZHANG R J, DONG C Q, LU Z, et al. Strength characteristics of hydraulically dredged mud slurry treated by flocculation-solidification combined method[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 228: 116742.
- [10] 章荣军, 蒋达飞, 郑俊杰. 絮凝调理对淤泥(浆)固结特性的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 1-6.
- ZHANG Rong-jun, JIANG Da-fei, ZHENG Jun-jie. Effect of flocculation conditioning on consolidation characteristics of mud(slurry)[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2021, 49(7): 1-6.
- [11] 雷华阳, 包一琳, 冯双喜. 真空预压联合碱渣处理疏浚淤泥加固效果及机理[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(增刊 2): 32-37.
- LEI Hua-yang, BAO Yi-lin, FENG Shuang-xi. Reinforcement effects and mechanisms of vacuum preloading combined with alkaline residue treatment on dredging sludge[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2024, 46(Suppl.2): 32-37.
- [12] ZHANG R J, ZHENG Y L, DONG C Q, et al. Strength behavior of dredged mud slurry treated jointly by cement, flocculant and vacuum preloading[J]. **Acta Geotechnica**, 2022, 17(6): 2581-2596.
- [13] XU Z H, ZHANG R J, ZHENG J J, et al. Laboratory and field experimental study on efficiency of vacuum preloading-flocculation-solidification combined method for slurry-like mud treatment[J]. **Acta Geotechnica**, 2024, 19: 5417-5432.
- [14] HORPIBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(4): 439-444.
- [15] ZHANG R J, LU Y T, TAN T S, et al. Long-term effect of curing temperature on the strength behavior of cement-stabilized clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2014, 140(8): 04014045.
- [16] BI J, CHIAN S C. Modelling of three-phase strength development of ordinary Portland cement-and Portland blast-furnace cement-stabilised clay[J]. **Géotechnique**, 2020, 70(1): 80-89.
- [17] LIU S J, ZHANG R J, ZHENG J J, et al. Strength development behavior of cement-treated mud with emphasis on early-stage performance[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2023, 23(9): 04023144.
- [18] 徐日庆, 文嘉毅, 王旭, 等. 台州淤泥质土固化特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 146-153.
- XU Ri-qing, WEN Jia-yi, WANG Xu, et al. Study on curing properties of Taizhou sludge soil[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2019, 46(11): 146-153.
- [19] 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.
- LIU Li-na, GAO Wen-sheng, XU Tong, et al. Study on strength characteristics and models of ready-mixed fluidized solidified soil[J]. **Building Science**, 2023, 39(9): 98-103.
- [20] KANG G, TSUCHIDA T, ATHAPATHTHU A. Engineering behavior of cement-treated marine dredged clay during early and later stages of curing[J]. **Engineering Geology**, 2016, 209: 163-174.
- [21] 邵吉成, 李送根, 张旺兴, 等. 淤泥初始含水率及压实度对固化土强度的影响[J]. 土木工程学报, 2024, 57(11): 57-69.
- SHAO Ji-cheng, LI Song-gen, ZHANG Wang-xing, et al. Effect of initial moisture content and compactness of sludge on strength of solidified soil[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2024, 57(11): 57-69.