

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0298

复合型早强土壤固化剂固化淤泥强度特性研究

龙开荃^{1,2}, 方祥位¹, 申春妮³, 张熙晨¹, 王明明¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 成都市建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610051;

3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘 要: 淤泥是一种工程性质极差且难以快速固化的土体, 通过无侧向抗压强度试验、固结排水三轴剪切试验、微观测试和压汞试验等研究了复合型早强土壤固化剂 (composite rapid soil stabilizer, CRSS) 固化淤泥的强度发展规律和固化剂掺量对强度的影响, 初步探讨了强度增长的微观机制。研究结果表明: CRSS 固化淤泥强度随养护龄期呈对数发展规律提高, 早期强度发展迅速, 养护 1 h 无侧限抗压强度即可达到 3 MPa; 随固化剂掺量增加, 固化淤泥三轴剪切应力-应变曲线由应变硬化型逐渐向应变软化型发展, 破坏偏应力和黏聚力呈线性增大。微观结构表明固化剂水化产物可胶结土颗粒、填充土体孔隙, 增强土体整体性; 压汞试验结果则进一步通过最可几孔径的联系揭示了固化淤泥黏聚力随固化剂掺量增大而线性增大的机制。CRSS 固化淤泥具有显著快硬高强优势, 可为抢险救灾、应急道路抢通等淤泥快速固化应用提供理论基础。

关 键 词: 复合型早强土壤固化剂; 淤泥快速固化; 抗压强度; 微观机制

中图分类号: TU 449

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 增刊-0309-10

Strength characteristics of sludge solidified by composite rapid soil stabilizer

LONG Kai-quan^{1,2}, FANG Xiang-wei¹, SHEN Chun-ni³, ZHANG Xi-chen¹, WANG Ming-ming¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chengdu Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Sludge is a kind of soil with very poor engineering properties and difficult to solidify rapidly. Through unconfined compressive strength test, consolidated drained triaxial test, micro test and mercury intrusion test, the strength development law of sludge solidified by composite rapid soil stabilizer (CRSS) and the influence of the content of soil stabilizer on the strength are studied, and the micro mechanism of strength development is preliminarily discussed. The results show that the strength of CRSS-solidified sludge increases logarithmically with the curing age, the early strength develops rapidly, and the unconfined compressive strength can reach 3 MPa after curing for 1 h; with the increase of stabilizer content, the triaxial shear stress-strain curve of solidified sludge gradually develops from strain hardening type to strain softening type, and the failure deviatoric stress and cohesion increase linearly. The microstructure shows that the hydration products of stabilizer can cement soil particles, fill soil pores and enhance the integrity of soil. The mercury intrusion test results further reveal the mechanism that the cohesion of solidified sludge increases linearly with the increase of the content of stabilizer through the connection of the most probable pore size. CRSS-solidified sludge has significant advantages of fast hardening and high strength, which provides a theoretical basis for the application of rapid solidification of sludge.

Keywords: composite rapid soil stabilizer; rapid solidification of sludge; compressive strength; micro mechanism

1 引 言

淤泥因其高含水率、高孔隙比和低渗透性而表

现出高压缩性和低强度特性, 工程性质极差, 不能满足工程建设需要。淤泥改性固化方法很多, 目前常用的加固方法主要包括物理加固法、化学加固法

收稿日期: 2022-03-14

录用日期: 2022-07-15

基金项目: 重庆英才创新创业示范团队项目 (2022); 创新特区项目 (No. 20-163-13-ZT-007-060-01)。

This work was supported by the Chongqing Talent Innovation and Entrepreneurship Demonstration Team (2022) and the Innovation Special Zone Project (20-163-13-ZT-007-060-01).

第一作者简介: 龙开荃, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 617341550@qq.com

通讯作者: 方祥位, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊土力学及岩土微生物技术等方面的研究。E-mail: fangxiangwei1975@163.com

和生物加固法等^[1], 其中化学加固法可以实现土体资源化利用, 避免弃土产生, 且固化材料一般比较经济, 固化效果较好, 是使用最为广泛的土体固化方法。

化学加固法主要是利用水泥等化学外加剂与土体发生一系列物理化学反应, 从而改善土体性质, 使之成为稳固持久的固化土。在固化强度方面, 邢伟等^[2]研究发现, 石灰可以增大淤泥土的黏聚力, 但是对内摩擦角的影响不大; 卢雪松等^[3]则指出, 离子固化剂 (ISS) 可降低土体塑性指数, 提高最大干密度, 在最优含水率下, 增大压实度可以增大固化土黏聚力, 但是会减小内摩擦角; 汤怡新等^[4]认为水泥固化土的无侧限抗压强度主要取决于水泥用量, 并提出了简便的经验关系, 指出存在最低水泥用量; 周旻等^[5]用 HAS 固化剂处理疏浚淤泥时也发现存在最低固化剂用量, 超过该用量后强度与固化剂掺量之间存在正相关关系。在固化土养护龄期方面, Kolias 等^[6]研究了粉煤灰-水泥固化土的抗压、抗拉强度特性, 并研究了弹性模量、加州承载比 (CBR) 值等变化规律, 认为养护 90 d 后固化土可以满足工程要求。硫铝酸盐水泥固化淤泥具有显著早强优势^[7], 其固化淤泥在 1~3 d 内能达到可碾压状态, 而硅酸盐水泥则需要 7~14 d^[8]。在固化土强度预测方面, Ning 等^[9]提出了固化粉土结构模型, 认为固化土结构上由土颗粒胶结在一起, 水泥水化产物填充孔隙组成, 并据此提出了理论计算公式, 可分别计算胶结土颗粒和填充水泥含量, 指出填充作用对土体强度增强意义重大。Ho 等^[10]采用基于水灰比的简单经验公式, 对无侧限抗压强度进行了预测, 还得到了固化土强度与割线模量之间的关系。Ge 等^[11]则根据试验结果, 提出了固化土无侧限抗压强度随养护龄期发展的预测模型。除研究固化土强度之外, 杨爱武等^[12]还考察了固化土的体积稳定性和重金属浸出量, 发现以硅酸盐水泥为主剂的固化土强度和体积基本在固化 28 d 后稳定, 重金属浸出则在 14 d 后趋于稳定。不仅硅酸盐水泥能固定重金属, 硫铝酸盐水泥固定 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的能力也得到了证实^[13-14]。丁建文等^[15]用压汞试验对固化疏浚淤泥的孔隙进行了研究, 证实固化试样孔隙会随固化剂掺量增加而减小。

上述固化剂多以硅酸盐水泥为基础胶凝材料, 其固化效果可以满足一般工程需要, 但是固化周期较长, 早期强度不高, 在抢险救灾、应急道路抢通等需要对淤泥快速固化的紧急情况下难以发挥作用。方祥位等^[16]研发了复合型早强土壤固化剂 (CRSS),

该固化剂具有快硬高强特性, 但是固化土强度和力学特性等相关研究工作尚未展开。

本文利用课题组研发的 CRSS 对淤泥进行快速固化, 开展不同龄期固化淤泥的无侧限抗压强度试验和不同固化剂掺量的固结排水三轴试验, 并对不同掺量代表性样品进行微观结构测试和压汞试验, 研究龄期和掺量对固化淤泥强度的影响规律, 探讨强度增长机制, 为该固化剂的工程应用提供理论基础。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验所用固化剂为课题组研制的复合型早强土壤固化剂 CRSS^[16], 该固化剂主要由改性 42.5R 硫铝酸盐水泥 (CSA)、膨胀组分 (石膏等)、早强组分 (锂盐等) 和减薄双电层组分 (离子固化剂) 等以适当配比混合而成, 具有显著早强性能。养护 1 d 时固化土强度几乎是早强型复合硅酸盐水泥固化土强度的 6 倍。

所用淤泥取自福建省福州市长乐区首占镇福平铁路长乐站工地, 土样天然含水率为 59.2%, 天然孔隙比为 1.524, 土粒相对密度为 2.65, 液限、塑限分别为 42.8% 和 23.6%, 塑性指数为 19.2。利用激光粒度仪测得粒径分布曲线如图 1 所示, 细粒组分含量约 70%。

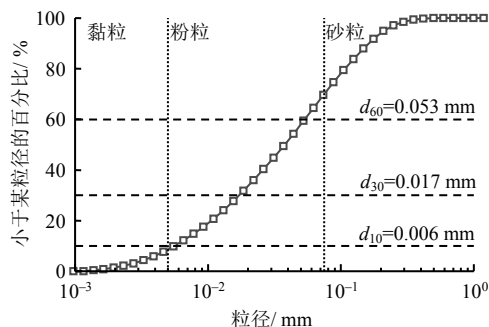


图 1 淤泥粒径分布曲线

Fig.1 Distribution curve of sludge particle size

2.2 试样制备

试验前将淤泥置于 65 °C 烘箱中烘干至恒重, 然后碾碎过 2 mm 筛备用。称取所需固化材料、淤泥和水, 混合后拌匀, 采用分层静压法制样, 控制土壤初始含水率为 45%, 干密度为 1.45 g/cm³。固化剂水化反应迅速, 试样从加水拌合到制备完成需控制在 10 min 以内。

无侧限抗压强度试验试样分两层制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 圆柱体试样; 三轴试验试样分 5 层制备成 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 圆柱体试样。试样成型后立即脱

模养护至相应龄期。

2.3 试验方案

由于 CRSS 具有显著的早强特性，为了研究养护龄期对固化淤泥强度的影响，特别是为了研究固化淤泥早期强度的发展规律，进行 CRSS 掺量为 20%，固化龄期分别为 1、2、4、8、12、24 h 以及 3、7、14、28 d 的无侧限抗压强度试验。为了排除养护期间由于含水率降低引起的强度提高，设置未掺 CRSS 的对照组试验进行对比分析研究。CRSS 的掺量直接影响固化成本和固化效果，进行 CRSS 掺量为 0%、5%、10%、15% 和 20% 固化淤泥的固结排水三轴试验，控制围压为 200、400、600、800 kPa，研究 CRSS 掺量对固化淤泥强度的影响规律。制备不同固化剂掺量试样用于进行微观结构测试和压汞试验，探讨 CRSS 固化淤泥强度增长的微观机制。具体试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案
Table 1 Experimental program

试样编号	CRSS 掺量 / %	养护龄期	试验内容
US	0	1、2、4、8、12、24 h 以及 3、7、14、28 d	无侧限抗压强度试验
CS20	20		
US	0		
CS5	5		
CS10	10	7 d	三轴试验、微观试验、压汞试验
CS15	15		
CS20	20		

2.4 测试方法

根据试验方案对不同养护龄期的固化淤泥进行无侧限抗压强度试验和固结排水三轴试验、扫描电镜试验（SEM）和压汞试验（MIP）。

无侧限抗压强度试验的仪器采用中国北京航天科宇测试仪器有限公司生产的 YZM-IIIC 多功能路面材料强度试验机。试验加载速率为 1 mm/min。每种固化淤泥试样均制备 3 个平行试样，试验结果在剔除平行试样中的异常数据后取算术平均。存在 2 个异常值时重新试验^[17]。

固结排水三轴试验的仪器采用江苏永昌科教仪器制造有限公司生产的 LSY30-1 型应力-应变控制式三轴仪。试验剪切速率为 0.02 mm/min，试样偏应力不随轴向应变变化，或轴向应变达到 18% 时停止试验。

SEM 取不同固化剂掺量试样代表性样品，用导电胶固定在承台上，喷金处理后使用赛默飞 Quattro S 环境扫描电子显微镜进行试验。

MIP 取不同固化剂掺量试样代表性样品，加工成直径不超过 1 cm 的规则碎块，干燥后使用美国康塔公司 PoreMaster-33 型全自动压汞仪进行试验。

3 试验结果与分析

3.1 养护龄期对固化淤泥强度的影响

图 2 给出了试样 CS20 无侧限抗压强度和养护龄期之间的关系。从图中可以看出，固化土无侧限抗压强度随养护龄期增长十分迅速，1 h 强度即有约 3 MPa，3 d 强度即达到 28 d 强度的 87%。固化土强度在 14 d 后基本稳定不变，可维持在约 12 MPa。

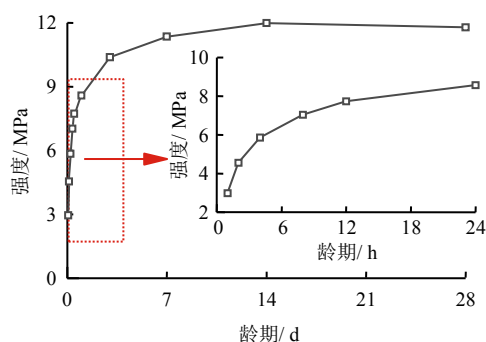


图 2 试样 CS20 强度和龄期的关系
Fig.2 Relationship between strength and age of sample CS20

淤泥属于黏性土，随土体含水率降低，土体表面张力作用使得土颗粒排列紧密造成强度随含水率降低而增大^[18]。CRSS 掺入淤泥中，水化反应使得固化土体内部产生大量水化热，自由水或参与反应，或因水化热蒸发，固化土体含水率迅速减低，强度增大，将这一部分没有考虑水化反应物作用的强度称为干燥强度 S_d ，将考虑水化反应物的填充密实和胶结作用的强度称为水化强度 S_h ，将最终的抗压强度近似分为干燥强度 S_d 和水化强度 S_h 两部分。

干燥强度 S_d 和水化强度 S_h 的确定方法如下：

①测试未加入固化剂试样 US 在不同养护龄期下的含水率和无侧限抗压强度，得到淤泥（干燥）强度与含水率的拟合关系式；②测试不同养护龄期下掺入固化剂的 CS 试样含水率和无侧限抗压强度（总强度），根据固化试样的含水率由步骤①得到的拟合关系式计算得到干燥强度；③总强度减去干燥强度即得到水化强度。

图 3 给出了试样 US 无侧限抗压强度 S 与含水率 w 的关系，二者线性关系显著，线性拟合 R^2 约为 0.991，其拟合表达式为

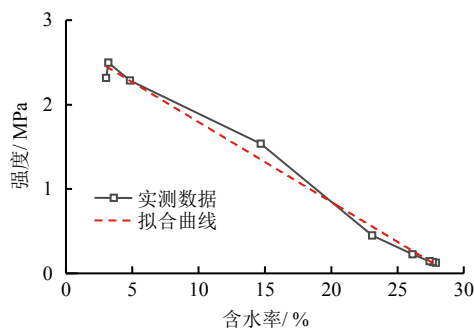


图3 试样 US 强度与含水率的关系

Fig.3 Relationship between strength and water content of sample US

$$S = 2.738 - 9.4w \quad (1)$$

固化试样 CS20 除水化产物外, 主要成分和 US 相同, 可认为试样 CS20 因含水率降低获得的干燥强度与固化土体含水率之间关系近似满足式 (1), 由式 (1) 可根据测得的 CS20 各龄期固化土体含水率计算得到干燥强度 S_d 。图 4 给出了固化土体干燥强度与养护龄期 t 之间的关系。由图可以看到, 固化土干燥强度随养护龄期呈对数规律增长, 这是因为固化剂迅速降低了体系含水率。由此可得到该固化土的干燥强度 S_d 随养护龄期 t 的变化关系式为

$$S_d = \alpha^d + \beta^d \ln(t + \gamma^d) \quad (2)$$

式中: α^d 、 β^d 、 γ^d 为干燥强度试验参数, 对于该试样, 其值分别为 $\alpha^d = 1.259$, $\beta^d = 0.352$, $\gamma^d = 0.147$ 。

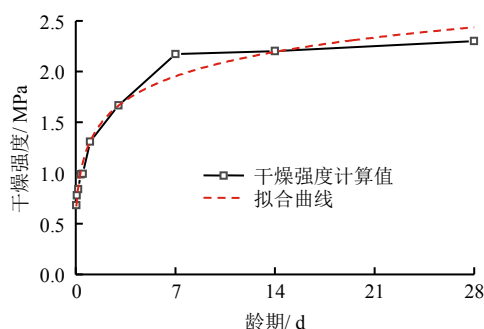


图4 试样 CS20 干燥强度与养护龄期的关系

Fig.4 Relationship between drying strength and age of sample CS20

由无侧限抗压强度试验实测总强度 S_t 减去干燥强度 S_d 即可得到水化强度 S_h , 三者与龄期的关系如图 5 所示。对水化强度单独分析, 图 6 给出了水化强度与养护龄期之间的关系。由图可以看到, 水化强度在 1 d 之内快速增长, 其随养护龄期的变化关系可描述为

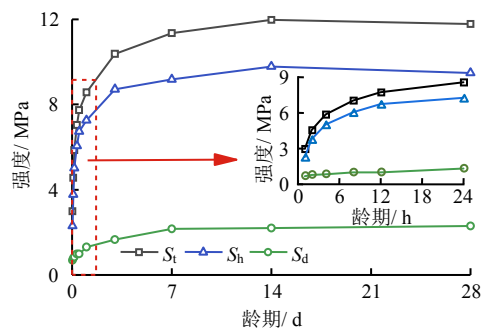


图5 强度与龄期的关系

Fig.5 Relationship between strength and age

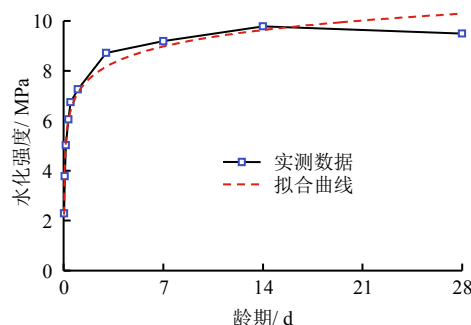


图6 水化强度与龄期的关系

Fig.6 Relationship between hydration strength and age

$$S_h = \alpha^h + \beta^h \ln(t + \gamma^h) \quad (3)$$

式中: α^h 、 β^h 、 γ^h 为水化强度试验参数, 对于该固化土, 其值分别为 $\alpha^h = 7.144$, $\beta^h = 0.943$, $\gamma^h = -0.036$ 。

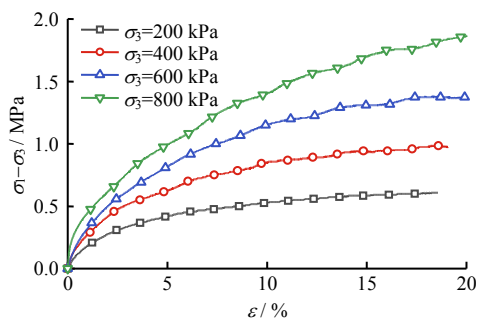
根据式 (2)、(3), 可得到固化土强度 S_t 随养护龄期增长的经验公式为

$$S_t = S_d + S_h = \alpha^d + \alpha^h + \ln[(t + \gamma^d)^{\beta^d} (t + \gamma^h)^{\beta^h}] \quad (4)$$

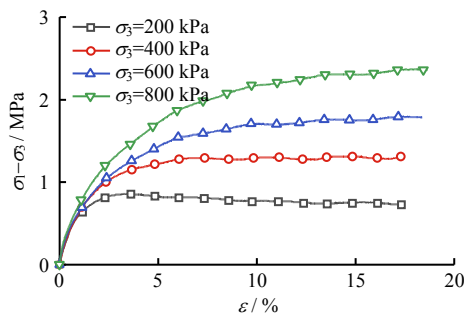
3.2 CRSS 掺量对固化淤泥强度的影响

图 7 给出了不同固化剂掺量下三轴试验的应力-应变曲线。从图中可以看出, 随固化剂掺量增加, 试样强度显著提高, 应力-应变曲线由应变硬化特征逐渐向应变软化特征发展, 而围压对试样的影响则逐渐减小, 应力-应变曲线出现一定交叉现象, 说明试样结构性逐渐增强^[19]。固化剂掺量 0% 试样呈应变硬化破坏; 5% 掺量的试样基本呈理想塑性破坏; 随围压增大, 10% 掺量的试样破坏形态由应变软化特征逐渐过渡到理想塑性; 15% 掺量和 20% 掺量的试样均表现出应变软化特点。

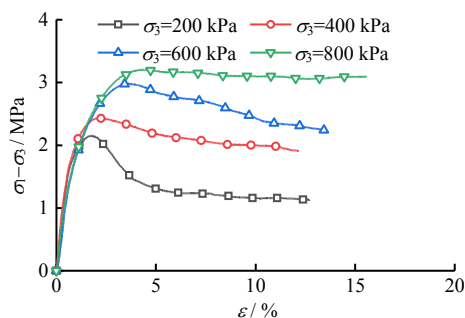
对于应变硬化和理想塑性破坏 (掺量为 0% 和 5%), 应力-应变曲线大致可分为 2 个阶段, 即应力随应变快速增长段和应力随应变缓慢增长段 (硬化破坏) 或应力不变段 (塑性破坏)。固化剂掺量较



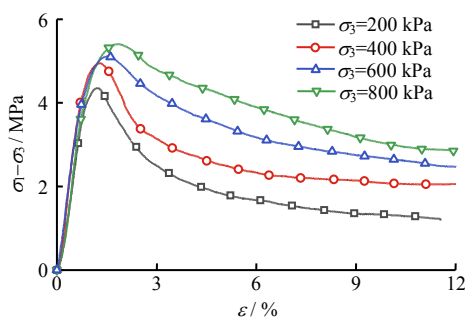
(a) 试样 US



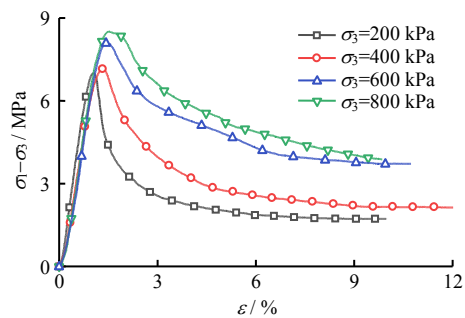
(b) 试样 CS5



(c) 试样 CS10



(d) 试样 CS15



(e) 试样 CS20

图7 三轴应力-应变曲线
Fig.7 Triaxial stress-strain curves

低时, 试样内部未形成有效胶结结构, 土颗粒在外力作用下发生滑移, 颗粒间连接力未明显降低, 而土体孔隙率降低, 土体被挤密, 因此, 初始阶段应力随应变增长较快。后期随应变增加, 土体密度增大速率放缓, 应力随应变缓慢增大甚至不再增大。此时取轴向应变 15% 时对应的偏应力作为破坏偏应力 q_f [20]。

对于应变软化破坏(掺量为 10%、15% 和 20%), 应力-应变曲线大致可分为 3 个阶段, 即应力随应变快速增长段、应力随应变减小段和残余强度段。试样在应力增长段时其固化结构基本保持完好, 对围压敏感性较低, 因此, 出现曲线重叠、交叉现象。应力减小段时, 试样剪切破坏面已经形成, 但是在围压作用下未发生突然崩裂。随着应变增加, 试样在破坏面上的滑动状态逐渐稳定, 应力-应变曲线趋于平缓。随轴向应变继续增加, 试样进入残余强度段, 此时试样上、下两部分分别沿剪切破坏面滑移, 应力基本保持不变。对于应变软化破坏, 取峰值点应力为破坏偏应力。

不同围压下各试样破坏偏应力与固化剂掺量之间的关系如图 8 所示。图中曲线为各 CS 组试样实测数据的线性拟合。从图中可以看到, 相同固化剂掺量下, 围压越大, 试样破坏偏应力越大; 同一围压下, 各 CS 组试样破坏偏应力随固化剂掺量增加近似线性增大。

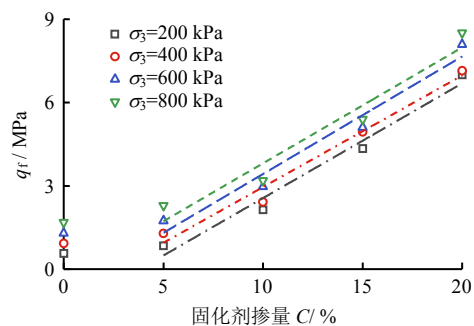


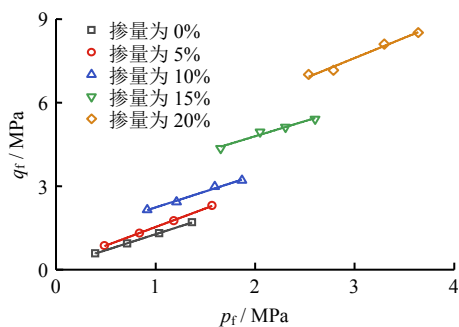
图8 破坏偏应力与固化剂掺量的关系
Fig.8 Relationship between failure deviatoric stress and content of stabilizer

破坏平均应力 p_f 可通过下式计算得出:

$$p_f = \frac{1}{3}(q_f + 3\sigma_3) \quad (5)$$

图 9 为各掺量组试样 q_f 与 p_f 之间的关系。对图中各掺量组试样 q_f 与 p_f 进行线性拟合, 可得到各拟合直线斜率 $\tan \alpha$ 和截距 ξ 。

$$\sin \varphi = \frac{3 \tan \alpha}{6 + \tan \alpha} \quad (6)$$

图9 各掺量组试样 q_r 与 p_r 的关系Fig.9 Relationship between q_r and p_r of samples at different stabilizer contents

$$c = \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \xi \quad (7)$$

式中： φ 为内摩擦角； c 为黏聚力。

根据式 (6)、(7) 可计算得到试样抗剪强度参数^[19]，计算结果如表 2 所示。

表2 试样抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters of samples

试样	$\varphi / (^{\circ})$	c / MPa
US	28.804	0.060
CS5	32.956	0.098
CS10	28.896	0.518
CS15	27.327	1.251
CS20	35.816	1.607

从表 2 中可以看到，内摩擦角与固化剂掺量之间的规律并不明显。这可能是因为固化试样强度较高，对试验设定的围压不敏感。而试样黏聚力 c 随固化剂掺量 C 增大显著增大，试样 CS15 黏聚力约为试样 CS10 的 2.4 倍。已有研究^[4]表明，水泥掺量超过某一临界值后，水泥固化土的无侧限抗压强度与水泥掺量之间存在线性关系。图 10 为试样黏聚力 c 与固化剂掺量 C 之间的关系。从图中可以看到，固化剂掺量超过 5% 以后，随着固化剂掺量增加，黏聚力线性增大，二者关系可描述为

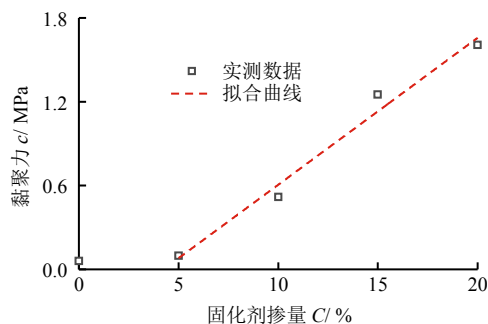


图10 试样黏聚力与固化剂掺量的关系

Fig.10 Relationship between cohesion and stabilizer content

$$c = a + bC \quad (8)$$

式中： a 和 b 为固化土黏聚力参数，分别为黏聚力随固化剂掺量线性增大的截距和斜率，在本文试验掺量范围内，其值分别为 $a = -0.446 \text{ MPa}$ ， $b = 10.5$ 。

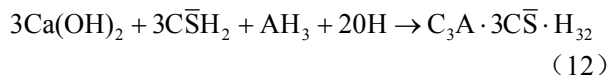
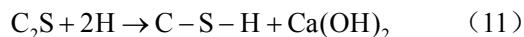
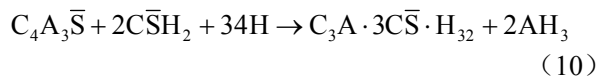
根据摩尔-库仑强度准则可得到考虑固化剂掺量的固化土强度公式为

$$\tau_f = a + bC + \sigma \tan \varphi \quad (9)$$

式中： σ 为法向应力；固化土的内摩擦角 φ 取平均值， $\varphi = 31.249^{\circ}$ 。

3.3 CRSS 固化淤泥微观机制

当 CRSS 作用于淤泥时，固化剂的基础胶凝材料主要发生如下反应^[21-22]：



当 CRSS 作用于淤泥时，减薄双电层组分的离子固化剂迅速与土颗粒表面结合，减小结合水膜厚度，减小土颗粒间隙，使得土颗粒更易被水化产物胶结。石膏等膨胀组分直接参与水化反应(式(10)、(12))，并与锂盐等早强组分共同维持水化反应快速进行，促进膨胀性水化产物钙矾石大量生成，对土体进行密实和胶结，产生水化强度，这是固化土早期强度的主要来源。与此同时，快速的水化反应使得固化体系内迅速产生大量水化热，自由水或参与反应，或因水化热蒸发，固化体系含水率降低易于压实，并产生干燥强度。

扫描电镜可较好地定性分析固化土体的微观形貌特征，图 11 为放大 1 000 倍时，不同掺量固化试样的 SEM 图。从图中可以看到，随固化剂掺量增加，试样微观结构趋于密实。当固化剂掺量为 5% 时，试样存在较多孔隙（如图中虚线所圈），土颗粒之间还未大量胶结，整体呈现絮状或网状连接；当固化剂掺量为 10% 时，土颗粒团聚块体明显增多；当固化剂掺量达到 15%，土体中形成大量胶结块体，整体性增强，此时宏观力学行为上表现为明显的应变软化；当固化剂掺量达到 20% 时，土颗粒胶结程度进一步增强，孔隙显著减小。

图 12 为掺量 20% 固化试样放大 5 000 倍的 SEM 图。从图中可以看到，试样内部形成了大量的柱状结晶产物，这是硫铝酸盐水泥的主要水化产物钙矾

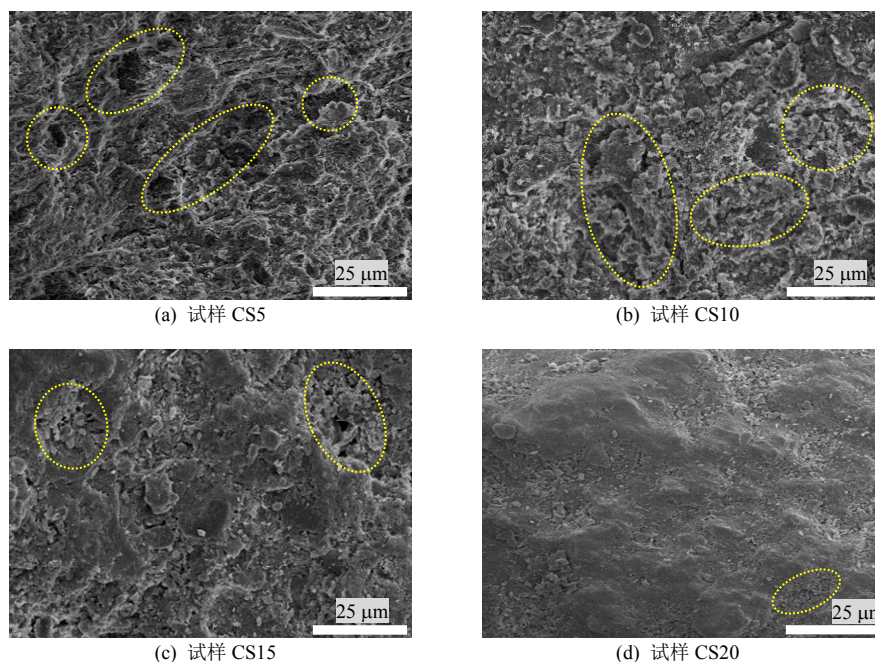


图 11 不同掺量固化试样 SEM 图 (1 000 倍)

Fig.11 SEM images of solidified sludge at different stabilizer contents (1 000×)

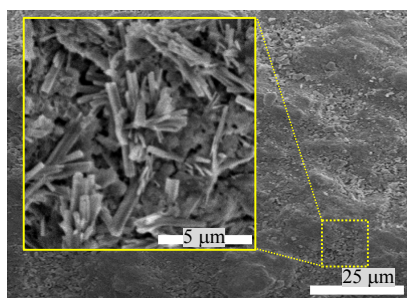


图 12 固化试样高倍数 SEM 图 (5 000 倍)

Fig.12 High magnification SEM of solidified sludge (5 000×)

石^[23]。柱状钙矾石具有膨胀性质^[24],在胶结土颗粒的同时填充土体孔隙,起到密实土体的作用,是造成固化土强度增长的主要水化产物。

SEM 微观图片定性分析了固化土密实程度随固化剂掺量的变化规律,而 MIP 试验结果能定量描述微观孔隙变化。图 13 为压汞试验测得不同 CRSS 固化剂掺量下试样进/退汞体积与压力的关系,汞体积的总量反映了试样内部孔隙率的大小。从图中可以看到,随着固化剂掺量增加,试样内部总孔隙体积逐渐减小,说明 CRSS 固化剂对土体起到了填充孔隙、密实土体的作用,这与图 11 所示微观密实程度随固化剂掺量的变化规律一致。

从图 13 中各试样进/退汞曲线形态上看,进汞曲线整体上呈 S 型。试样 US 曲线斜率开始增大的压力点远小于 CS 固化组试样,且增加幅度大、跨越压力广,说明 CRSS 固化组试样的孔隙体积和孔径大小较素土试样均显著减小。

在退汞过程中,随退汞压力减小,退汞曲线逐渐与进汞曲线偏离,表现出汞滞留现象,即汞不能随压力降低而自行回流。滞留现象一定程度上反映了试样的结构性,而进、退汞曲线分离点对应的压力值则可以反映试样结构性的强弱,越快发生分离(分离点对应压力值大)结构性越强^[25],图 13 表明,随 CRSS 固化剂掺量增加,试样结构性逐渐增强。

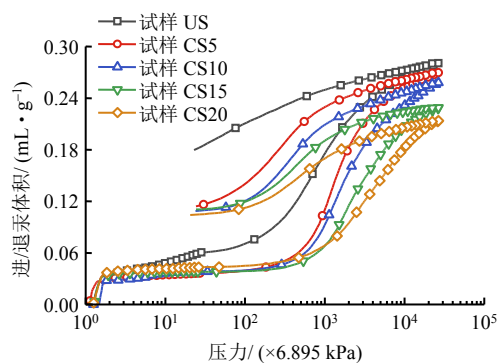


图 13 进/退汞体积与压力的关系

Fig.13 Relationship between mercury intrusion/exclusion volume and pressure

图 14 为各试样的孔径分布曲线,反映了某一孔径孔隙的体积量。各试样在孔径为 200 μm 附近的孔隙体积相似,这是因为在制样过程中试样表面产生了细小裂缝,因此,在低进汞压力下出现了较大进汞体积,不能反映试样内部的真实孔隙情况。曲线中部的波峰为试样真实孔隙分布,该波峰被称作最可几孔径,表示出现几率最大的孔径,也可以表

征土中连通孔道的最小孔径^[26]。可以看到, 试样最可几孔径主要分布在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$, 随着 CRSS 固化剂掺量增加, 最可几孔径逐渐减小。

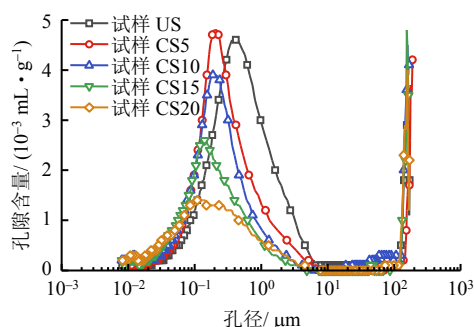


图 14 孔径分布曲线

Fig.14 Pore size distribution

图 15 给出了最可几孔径 d 与固化剂掺量 C 之间的关系。从图中可以看到, 固化剂掺量从 0% 增加到 5%, 最可几孔径减小了约 50%。而 5%~20% 掺量组的最可几孔径随固化剂掺量增加线性减小。

图 15 所示 CS 组固化土的最可几孔径与固化剂掺量之间的关系同 3.2 节中所述黏聚力与固化剂掺量关系相似, 均线性相关。图 16 给出了 4 组固化试样黏聚力 c 与最可几孔径 d 之间的关系。从图中可

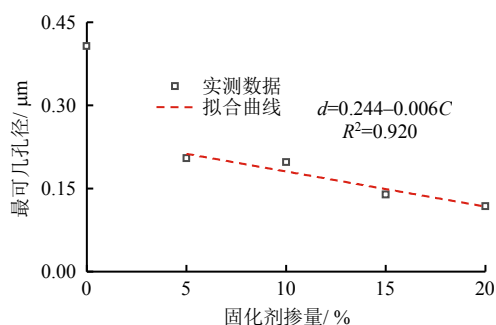


图 15 最可几孔径与固化剂掺量的关系

Fig.15 Relationship between the most probable pore size and stabilizer content

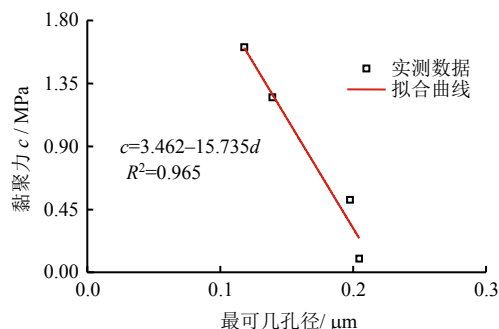


图 16 黏聚力与最可几孔径的关系

Fig.16 Relationship between cohesion and the most probable pore size

以看到, 最可几孔径越大, 试样黏聚力越低, 二者线性关系显著。这是因为固化剂掺量越高, 水化产物越多, 土体越密实, 水化产物更容易将土颗粒胶结为整体, 从而提高固化土强度, 因此, 固化剂对孔隙的填充作用对试样强度提升发挥了重要作用。

4 结 论

本文通过无侧向抗压强度试验、固结排水三轴剪切试验、微观测试和压汞试验等研究了复合型早强土壤固化剂 CRSS 固化淤泥的强度特性和微观机制, 得到如下主要结论:

(1) CRSS 固化剂具有显著快硬高强特点, 其固化试样养护 1 h 强度可以达到 3 MPa, 养护 3 d 即可达到 28 d 强度的 87%, 固化强度随养护龄期呈对数发展规律提高, 给出了固化土强度与龄期的经验公式。

(2) 随着固化剂掺量增加, 试样应力-应变曲线由应变硬化型逐渐向应变软化型发展。试验掺量范围内, 固化土破坏偏应力、黏聚力随固化剂掺量增大线性增大, 给出了抗剪强度与固化剂掺量的经验公式。

(3) CRSS 固化淤泥生成了大量具有膨胀性质的柱状钙矾石等水化产物, 可以填充试样孔隙, 增强试样结构性。固化土黏聚力与最可几孔径和固化剂掺量之间存在线性关系, 较好地揭示了 CRSS 固化淤泥强度增长的微观机制。

参 考 文 献

- [1] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
CAI Guang-hua. Experimental and application studies on soft carbonated and stabilized by reactive magnesia[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [2] 邢伟, 王东星. 石灰改性淤泥的抗压和抗剪强度试验研究[J]. 人民长江, 2016, 47(24): 84-87.
XING Wei, WANG Dong-xing. Experimental study on compressive and shear strength of lime-modified sludge[J]. Yangtze River, 2016, 47(24): 84-87.
- [3] 卢雪松, 项伟, 范文彦. ISS 固化土工程特性试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40(15): 67-69.
LU Xue-song, XIANG Wei, FAN Wen-yan. Test on engineering characteristics of stabilizing soil[J]. Yangtze River, 2009, 40(15): 67-69.
- [4] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研

- 究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
- TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 549-554.
- [5] 周旻, 侯浩波, 李志威. 疏浚淤泥固化改性的工程特性[J]. 工业建筑, 2006, 36(7): 35-37.
- ZHOU Min, HOU Hao-bo, LI Zhi-wei. Engineering properties of dredged sediment modified by HAS stabilizer[J]. **Industrial Construction**, 2006, 36(7): 35-37.
- [6] KOLIAS S, KASSELOURI-RIGOPOULOU V, KARAHALIOS A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement[J]. **Cement and Concrete Composites**, 2005, 27(2): 301-313.
- [7] SUN Xiao-hui, ZHU Wei, QIAN Xue-de, et al. Exploring cementitious additives for pretreatment of high-early-strength sewage sludge from the perspective of the rapid generation of nonevaporable water[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2014, 26(5): 878-885.
- [8] 甘雅雄, 朱伟, 吕一彦, 等. 从水分转化研究早强型材料固化淤泥的早强机制[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 755-760.
- GAN Ya-xiong, ZHU Wei, LÜ Yi-yan, et al. Early-strength mechanism of cementitious additives from perspective of water conversion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 755-760.
- [9] NING Jian-guo, HUANG Xin, GUO Ye, et al. Effects of cement contents on the structure formation of stabilized silt[C]//The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shanghai: IEEE, 2008.
- [10] HO Tsz-on, CHEN Wen-bo, YIN Jian-hua, et al. Stress-strain behaviour of cement-stabilized Hong Kong marine deposits[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 274: 122103.
- [11] GE LOUIS, WANG CHIEN-CHIH, HUNG CHEN-WEI, et al. Assessment of strength development of slag cement stabilized kaolinite[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 184: 492-501.
- [12] 杨爱武, 胡垚. 新型城市污泥固化土工程特性及微观机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 69-78.
- YANG Ai-wu, HU Yao. Study of engineering properties and micromechanism of new municipal sludge solidified soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.1): 69-78.
- [13] NIU Meng-die, LI Guo-xin, WANG Yan, et al. Comparative study of immobilization and mechanical properties of sulfoaluminate cement and ordinary Portland cement with different heavy metals[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 193: 332-343.
- [14] NIU Meng-die, LI Guo-xin, WANG Yan, et al. Immobilization of Pb^{2+} and Cr^{3+} using bentonite-sulfoaluminate cement composites[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 225: 868-878.
- [15] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3591-3596.
- DING Jian-wen, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 3591-3596.
- [16] 方祥位, 龙开荃, 刘汉龙, 等. 一种土壤固化剂材料和快速固化淤泥的方法: 202118001622.7[P]. 2021-03-25.
- FANG Xiang-wei, LONG Kai-quan, LIU Han-long, et al. A soil stabilizer and method for rapidly solidifying sludge: 202118001622.7[P]. 2021-03-25.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50081—2019 Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [18] 常留成, 王红雨, 薛凯喜. 不同干燥温度条件下非饱和红黏土裂隙演化及抗剪强度变化规律研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 368-378.
- CHANG Liu-cheng, WANG Hong-yu, XUE Kai-xi. Change rules of cracks and shear strength in unsaturated red clay under different drying temperatures[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2023, 31(2): 368-378.
- [19] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状 Q_2 黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 383-389.
- FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess Q_2 [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 383-389.

- [20] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [21] 刘晋铭, 欧忠文, 肖寒冰, 等. 功能组分对固化土早期强度的影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 755-761.
- LIU Jin-ming, OU Zhong-wen, XIAO Han-bing, et al. Early strength of stabilized soil affected by functional components[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(3): 755-761.
- [22] WINNEFELD F, LOTHENBACH B. Hydration of calcium sulfoaluminate cements—experimental findings and thermodynamic modelling[J]. **Cement and Concrete Research**, 2010, 40(8): 1239-1247.
- [23] 唐芮枫, 王子明, 兰明章, 等. 缓凝剂对高贝利特硫铝酸盐水泥水化和性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(12): 3763-3769.
- TANG Rui-feng, WANG Zi-ming, LAN Ming-zhang, et al. Effects of retarders on hydration and properties of high-belite calcium sulfoaluminate cement[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2020, 39(12): 3763-3769.
- [24] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1569-1581.
- QIAN Jue-shi, YU Jin-cheng, SUN Hua-qiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2017, 45(11): 1569-1581.
- [25] 张先伟, 孔令伟. 利用扫描电镜、压汞法、氮气吸附法评价近海黏土孔隙特征[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 134-142.
- ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei. Study of pore characteristics of offshore clay by SEM and MIP and NA methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl.2): 134-142.
- [26] 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.
- ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experiment study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(10): 2794-2800.