

养护温度对碱渣-矿渣-电石渣固化淤泥强度性质的影响机制

何俊,吕晓龙,朱元军

(湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北武汉 430068)

摘要:为揭示养护温度对固化疏浚淤泥强度性质的影响机制,利用碱渣、矿渣、电石渣进行疏浚淤泥固化处理,开展无侧限抗压强度(UCS)、加州承载比(CBR)和三轴压缩等试验研究固化淤泥强度性质,并结合X射线衍射和扫描电镜测试探讨养护温度对固化淤泥的作用机理。结果表明:固化淤泥 UCS 与养护温度之间可用指数函数描述,当养护温度从 35℃ 升高至 50℃ 时 UCS 大幅提升,50℃ 与 20℃ 固化淤泥 UCS 之比为 2.4~6.8,养护温度和龄期对低含水率固化淤泥强度的影响更为显著;对于初始含水率为 44% 的固化淤泥,养护温度升高时 CBR 随养护龄期的增幅显著,其值满足高速公路和一级公路路基填料的最小 CBR 要求;当养护温度从 20℃ 升高至 50℃ 时,固化淤泥应力-应变曲线由软化型变为硬化型,50℃ 与 20℃ 时固化淤泥黏聚力之比为 3.8~8.4,内摩擦角之比为 1.1~1.2;随着养护温度的升高,水化氯铝酸钙和水化硅酸钙等产物增多,颗粒团聚现象更显著,从而提升固化淤泥的强度。

关键词:养护温度;疏浚淤泥;碱渣;矿渣;强度;微观结构

中图分类号:TU411

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)05-0058-08

Influencing mechanism of curing temperature on strength properties of silt solidified with soda residue, ground granulated blast furnace slag and carbide slag/HE Jun, LYU Xiaolong, ZHU Yuanjun (School of Civil, Architectural and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To reveal the influencing mechanism of curing temperature on the strength properties of solidified dredged silt, the dredged silt was solidified with soda residue, ground granulated blast furnace slag and carbide slag. Unconfined compressive strength (UCS), California bearing ratio (CBR) and triaxial compressive tests were conducted to investigate the strength properties of solidified silt. The microstructural mechanism was discussed based on X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results show that the relationship between the UCS of solidified silt and curing temperature can be described by an exponential function. The UCS of solidified silt increases significantly when the curing temperature increases from 35℃ to 50℃ and the UCS ratio between 50℃ and 20℃ varies from 2.4 to 6.8. The curing temperature and time have more significant influence on the strength of solidified silt with low water content. For the solidified silt with an initial water content of 44%, the increase of CBR with curing time is significant at high curing temperature, and its value meets the minimum CBR requirement for highway and primary road base. When the curing temperature increases from 20℃ to 50℃, the stress-strain curve of the solidified silt changes from strain-softening to strain-hardening. The ratio of cohesion for the solidified silt at 50℃ to 20℃ varies from 3.8 to 8.4, and the friction angle ratio varies from 1.1 to 1.2. With the increase of curing temperature, the hydration products such as calcium chloroaluminate hydrates and calcium silicate hydrate increase, and the particle agglomeration phenomenon is more significant, leading to the strength increase of the solidified dredged silt.

Key words: curing temperature; dredged silt; soda residue; ground granulated blast furnace slag; strength; microstructure

水环境治理工程和港口建设会产生大量疏浚淤泥,其处理和处置问题给社会经济和环境带来了巨大压力^[1-2]。为改善疏浚淤泥的力学性质、提高其工

程应用价值,通常采用加入水泥、工业副产品和废料等方式对其进行固化处理。矿渣、钢渣、粉煤灰、废石膏、电石渣和碱渣等固体废弃物用作疏浚淤泥的

据设定含水率加水搅拌;将碱渣、矿渣和电石渣60℃烘干并过1 mm筛,与淤泥一起置于砂浆搅拌机中搅拌10 min至均匀,密封静置12 h后制样。开展的试验主要有UCS试验、CBR试验、三轴压缩试验、XRD和SEM测试,试验方案见表1。由于实际应用时疏浚淤泥含水率变化较大,试验选取初始含水率为淤泥液限的0.8、1.2、1.8倍。根据前期试验确定固化剂掺量,选择两种不同配比(配比I:碱渣、矿渣、电石渣、干淤泥质量比为20:10:4:100;配比II:碱渣、矿渣、电石渣、干淤泥质量比为30:6:2.4:100),其中为更多地消纳碱渣,其掺量相对较大;电石渣设定为矿渣掺量的40%,以起到较好的激发效果^[3]。结合工程实际,考虑10~50℃之间4种养护温度。

表1 强度试验方案

试验内容	配比	初始含水率/%	养护温度/℃	养护龄期/d
UCS	I	44,66,99	10,20,35,50	28
	II	44,66,99	10,20,35,50	28
	I	44,99	20,50	14,28,60,90
CBR	I	44	10,20,50	7,14,28
三轴压缩	I	44,66,99	20,50	28

具体试验方法如下:

a. UCS 试验。采用分层击实法在内径为39.1 mm、高为80 mm的钢模具中制样。其中,低、中含水率试样采用击实法制样,将混合土分3层击实,击实功与标准轻型击实试验相同;高含水率试样采用振动法制样,将混合土振动至表面无气泡产生。制备完成后,将试样连同模具用保鲜膜包裹,放入不同温度的水浴养护箱内养护1 d后脱模,然后再以保鲜膜包裹后继续养护至设定龄期。采自YSH-2型应变控制式无侧限抗压强度仪进行测试,变形速率为1 mm/min。需要说明的是,虽有保鲜膜包裹,但在养护过程中仍有部分水透过保鲜膜的边缘进入试样中。

b. CBR 试验。采用TDJ-3型多功能电动击实仪进行轻型标准击实法击实,击实锤质量为4.5 kg,击实筒内径和筒高分别为152 mm和166 mm。制备完成后将试样连同击实筒一起放入不同温度的水浴养护箱养护至设定龄期后,参考GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》在承载比测试仪上进行试验。对配比I混合土的轻型标准击实试验得到其最大干密度为1.433 g/cm³、最优含水率为35.2%,该含水率对应淤泥的初始含水率为47.1%。为与其他强度试验土样一致,选择初始含水率为44%的试样进行CBR试验。

c. 三轴压缩试验。采用TSZ系列全自动三轴仪,参考GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》开展固结不排水剪试验。试样制备和养护方法与UCS

试验相同。围压选为100、200、300 kPa,在不同温度下养护28 d后,真空抽气饱和试样后进行三轴压缩试验。

d. 微观测试。UCS试验完成后取中部小块试样,经60℃烘干并过75 μm筛后,采用日本理学公司的X射线衍射仪(MiniFlex 600)进行XRD测试,扫描速度为5°/min,扫描范围5°~75°,用Jade软件分析矿物成分。UCS试验完成后取中部小块试样,冻干并喷金处理后,采用日本日立公司的高分辨场发射扫描电镜(Hitachi SU8010)进行SEM测试,放大倍数为5 000和20 000倍。

2 试验结果和分析

2.1 UCS

2.1.1 初始含水率和养护温度的影响

养护龄期为28 d时,两种配比固化淤泥UCS与初始含水率 w_0 和养护温度 T 的关系见图2。可以看出,随着养护温度的升高,两种配比试样的UCS均有所提升。当温度从10℃升高至35℃时,UCS提升幅度较小;从35℃升高至50℃时,UCS大幅提升,其规律与石灰固化土一致^[10]。当初始含水率较低时,UCS受温度的影响更显著。例如,当 $w_0 = 44%$ 时,配比I试样在 $T = 10、20、35、50℃$ 时UCS分别为60.8、86.8、205.4、593.8 kPa,养护温度超过35℃后UCS显著提升;当 $w_0 = 99%$ 时, T 从10℃升高至50℃时UCS从21.2 kPa增大至122.8 kPa。总体来看,配比II试样比配比I试样强度高,表明增加碱渣掺量有助于提高固化淤泥的强度,尤其是初始含水率较低时配比II试样强度优势更明显。但当温度从35℃升高至50℃时配比I试样增幅更明显。掺入固化剂使混合土含水率降低等物理作用有助于提高固化淤泥强度。低温时,固化剂与淤泥之间的水化反应速度较慢^[9],物理作用的效果将相对明显,而配比II试样中较大的固化剂总掺量有助于降低混合土含水率,使低温时配比II试样的强度大于配比I试样。碱渣和电石渣可激发矿渣活性,高温时水化反应的速度和程度都将得到提高^[14],而配比I中矿渣掺量较高,因此强度得到大幅提升。当初始含水率从66%减小至44%时,与配比I试样相比,配比II试样UCS大幅提升。配比II试样中碱渣掺量较高、矿渣掺量较低,XRD测试发现含水率为44%时有大量的二水硫酸钙没有参与反应^[22],碱渣在固化淤泥中主要起减小含水率、调节粒度组成等物理作用,且44%为最优含水率附近(配比I和II试样的最优含水率分别为47.1%和44.6%),击实效果更好。因此配比II试样在44%时UCS大幅提升。

与石灰固化软土类似^[13], 固化淤泥强度 UCS 与养护温度 T 的关系可以用指数函数描述, 拟合曲线如图 2 所示, 可见指数函数拟合效果良好。养护温度为 0°C 时的 UCS 随初始含水率的增大而减小; 当初始含水率相同时, 配比 II 试样的 UCS 大于配比 I 试样, 与前述规律一致。配比 I 试样的 UCS 随温度变化更明显。

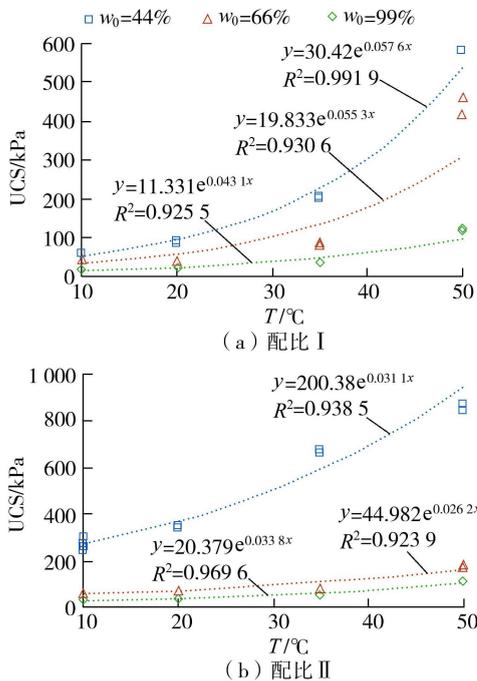


图 2 初始含水率和养护温度对 UCS 的影响

以室温 20°C 下的 UCS 为基准, $10, 35, 50^{\circ}\text{C}$ 养护温度下的 UCS 分别为其 $0.7 \sim 1.0$ 倍、 $1.2 \sim 2.4$ 倍、 $2.4 \sim 6.8$ 倍。

2.1.2 养护龄期和养护温度的影响

两种初始含水率和养护温度条件下, 配比 I 试样 UCS 与养护龄期的关系见图 3。可以看出, 当 $T=20^{\circ}\text{C}$ 时试样 UCS 随养护龄期的变化较小, $w_0=99\%$ 试样的 UCS 均较低 ($17.7 \sim 24.4$ kPa); 当 $T=50^{\circ}\text{C}$ 时 UCS 随龄期变化较大, 养护龄期从 14 d 至 60 d 时 UCS 有较大提升, 高养护温度下低含水率试样 UCS 随养护龄期的变化更显著。例如 $w_0=44\%$ 试样在养护龄期为 $14, 28, 60$ d 时 UCS 分别为 $193.7, 593.8, 1094.4$ kPa, 强度持续提高, 超过 60 d 后强度增长缓慢。这表明养护温度的升高有助于水化反应的不进行, 持续提高固化淤泥的强度。

2.2 CBR

CBR 是反映路基材料强度和承载能力的重要指标。初始含水率为 44% 时固化淤泥 CBR 试验结果见表 2。其中, 未浸水试样在室温 (20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 下实验室直接养护至设定龄期。由表 2 可以看出: ①在其他条件相同的情况下, CBR 随养护龄期的增加而

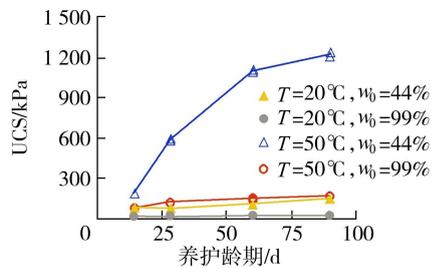


图 3 养护龄期对 UCS 的影响

增大, 养护温度越高时养护龄期对 CBR 的影响越大。例如, 养护温度为 10°C 时, 养护龄期为 7 d 和 28 d 试样 CBR 分别为 11.3% 和 14.0% , CBR 有所增大; 在室温下未浸水试样养护 7 d 和 28 d 时, CBR 值分别为 12.2% 和 27.9% ; 养护温度为 50°C 时, 养护龄期为 14 d 和 28 d 试样 CBR 值分别为 16.6% 和 38.4% , 养护温度升高时 CBR 随养护龄期的增幅更显著, 高温更有利于固化剂与淤泥之间水化反应的进行, 使得固化淤泥承载能力显著提高。②养护龄期越长, CBR 受温度的影响越大。例如, 当养护龄期为 14 d 时, 养护温度为 20°C 和 50°C 试样 CBR 值分别为 15.7% 和 16.6% , 略有增大; 当养护龄期为 28 d 时, 养护温度为 10°C 和 50°C 试样 CBR 值分别为 14.0% 和 38.4% , 后者为前者的 2.74 倍。③根据 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》, 高速公路和一级公路路基填料 CBR 最小强度要求为 8% , 初始含水率为 44% 的配比 I 试样在各养护温度下的 CBR 值均满足要求。

表 2 不同养护龄期和养护温度下试样的 CBR

养护龄期/d	养护温度/ $^{\circ}\text{C}$	CBR/%
7	10	11.3
7	20*	12.2
14	20	15.7
14	50	16.6
28	10	14.0
28	20*	27.9
28	50	38.4

注: * 为未浸水试样

图 4 为试样 UCS 与 CBR 的关系, 可以看出, 二者有良好的线性正相关性。另外, 未浸水试样的 CBR 值较高, 其数据点位于拟合曲线下方, 表明水对固化淤泥的性质有较大影响。

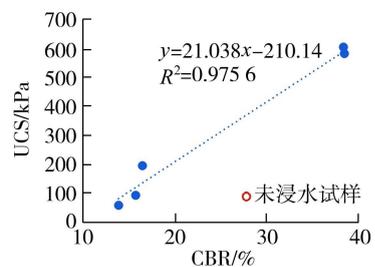


图 4 UCS 与 CBR 的关系

2.3 三轴压缩强度

固化淤泥固结不排水三轴压缩试验的代表性应力-应变曲线见图 5,可以看出:①3 种含水率下, $T=20^{\circ}\text{C}$ 时试样为应变硬化型,偏应力随轴向应变的增大而逐渐增大或趋于稳定; $T=50^{\circ}\text{C}$ 时,试样为应变软化型,初始含水率越低,峰值应力越大,破坏应变越小。②养护温度从 20°C 升高至 50°C 时,峰值应力大幅增加,破坏应变大幅降低,试样从塑性破坏变为脆性破坏,低含水率试样的变幅更大。例如,300 kPa 围压下,初始含水率为 99%、 $T=20、50^{\circ}\text{C}$ 时试样峰值应力分别为 1 468.6、2 056.5 kPa,破坏应变分别为 12.3% 和 8.0%;初始含水率为 44%、 $T=20、50^{\circ}\text{C}$ 时试样峰值应力分别为 2 515.1、5 415.3 kPa,破坏应变分别为 17.2% 和 3.2%,变化幅度大于高含水率试样。

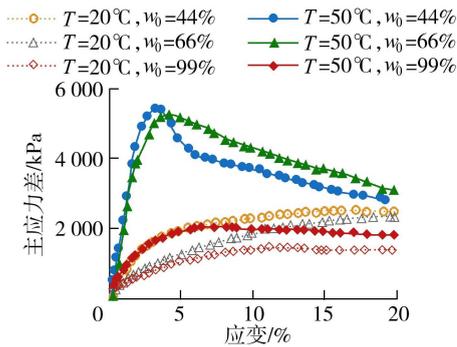


图 5 300 kPa 围压下试样应力-应变曲线

根据无侧限和三轴压缩试验结果得到养护温度为 50°C 和 20°C 时抗压强度之比与围压的关系如图 6 所示,可以看出,随着围压的增加,抗压强度之比有减小的趋势,从无侧限时 的 5.6 ~ 6.8 减小至 300 kPa 围压时的 1.3 ~ 2.2。当含水率一定时,有围压条件下抗压强度之比变化范围不大,例如初始含水率为 44% 试样在 100 ~ 300 kPa 围压下抗压强度之比在 2.0 ~ 2.7 之间;初始含水率为 99% 试样的抗压强度之比略低于 44% 和 66% 试样,在 100 ~ 300 kPa 围压下抗压强度之比在 1.3 ~ 1.5 之间。

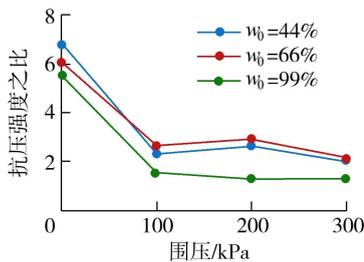


图 6 围压对养护温度为 50°C 和 20°C 时抗压强度之比的影响

试样代表性破坏应力圆和强度包络线见图 7,抗剪强度指标见图 8。其中,UCS 对应的破坏应力圆也用于强度包络线和抗剪强度指标的求取,所得强度指标为总应力指标。从图 7 和图 8 可以看出:①固化淤泥的强度包络线可以用直线拟合,表明摩

尔-库仑强度理论适用于碱渣-矿渣-电石渣固化疏浚淤泥。②随着初始含水率的增加,黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均减小,其中黏聚力降幅更明显,且养护温度越高降幅越大。例如,当 $T=20^{\circ}\text{C}$ 时,初始含水率为 44%、66%、99% 试样黏聚力分别为 18.74、9.54、8.08 kPa;当 $T=50^{\circ}\text{C}$ 时对应的黏聚力分别为 92.22、79.85、30.68 kPa,黏聚力随初始含水率的增大显著减低。 $T=20、50^{\circ}\text{C}$ 时内摩擦角分别在 $46.82^{\circ} \sim 52.72^{\circ}$ 和 $51.18^{\circ} \sim 63.02^{\circ}$ 之间,变化相对较小。③随着养护温度的升高,黏聚力和内摩擦角均增大, 50°C 时初始含水率为 44%、66%、99% 试样的黏聚力分别为 20°C 时的 4.9、8.4、3.8 倍, 50°C 时内摩擦角分别为 20°C 时的 1.2、1.2、1.1 倍。④本文固化淤泥的内摩擦角与一些固化土接近,例如水玻璃-石灰-粉煤灰固化硫酸盐渍土的内摩擦角在 $50^{\circ} \sim 53.5^{\circ}$ 范围内^[23];但与大多数固化土相比,本文固化

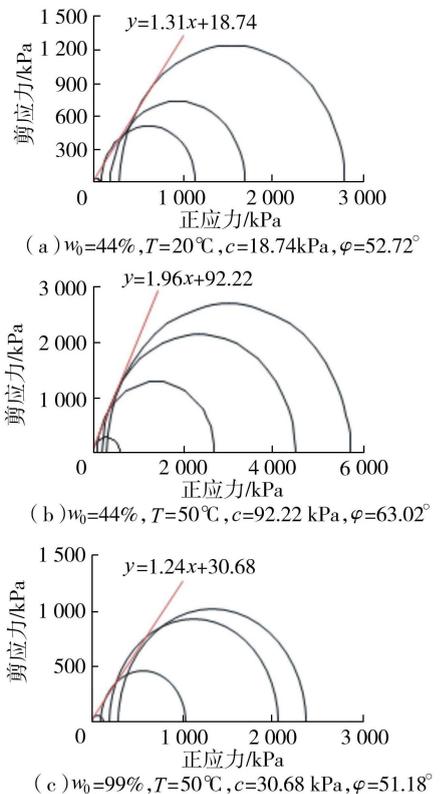


图 7 代表性破坏应力圆和强度包络线

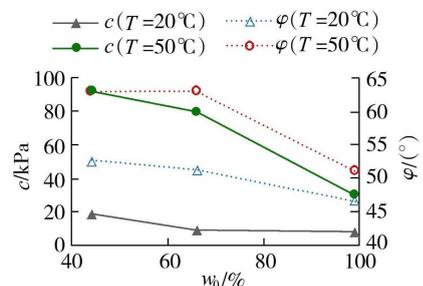


图 8 抗剪强度指标与初始含水率的关系

淤泥的黏聚力较小、内摩擦角较大^[24]。其原因在于本文掺量较大的碱渣在固化淤泥中起到减小含水率和调节粒度组成等作用,并和电石渣一起激发矿渣后,生成水化硅酸钙、钙矾石、水化氯铝酸钙等产物;而水泥固化土中多生成胶结力较强的水化硅酸钙^[25],在低围压下也有较高的强度,导致固化土的黏聚力较大、内摩擦角较小。

2.4 微观作用机制

2.4.1 矿物成分分析

部分试样的 XRD 图谱见图 9,与图 1 所示原材料 XRD 图谱对比可以发现,来源于原材料的石英、白云母、伊利石、钙长石和碳酸钙等矿物在固化淤泥中仍存在,而固化剂中二水硫酸钙和氢氧化钙等衍

1—石英; 2—白云母; 3—伊利石; 4—钙长石;
5—碳酸钙; 7—氯化钠; a—钙矾石; b—水钙沸石;
c—水化硅酸钙; d—水化氯铝酸钙。

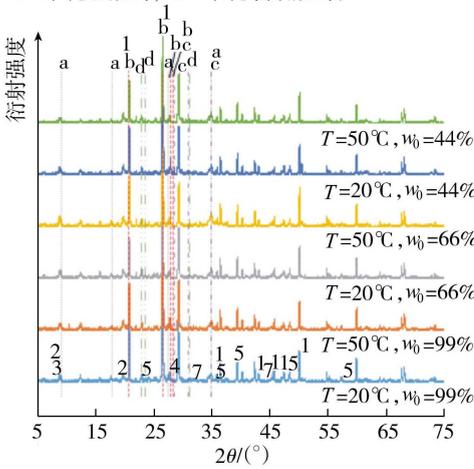


图 9 固化淤泥的 XRD 图谱

射峰消失,反映出这些矿物发生了反应生成新的矿物。碱渣中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 与矿渣中铝酸三钙、电石渣中氢氧化钙等反应可生成钙矾石 ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)^[6],该衍射峰随初始含水率的增加有所增大,尤其是含水率从 44% 增至 66% 时增大较明显,其原因在于初始含水率的增加有利于生成更多的钙矾石,起到填充孔隙的作用。初始含水率一定时,50℃ 试样中石英和白云母/伊利石衍射峰整体上低于 20℃ 试样,而 50℃ 时水化硅酸钙 (CSH) 衍射峰略高,表明在碱渣和电石渣提供的碱性环境和高养护温度下,疏浚淤泥和碱渣中更多的活性 SiO_2 与氢氧化钙发生水化反应生成 CSH,促进了高养护温度条件下固化淤泥强度的大幅提高。20℃ 时氯化钠衍射峰略高于 50℃ 试样,而 50℃ 时试样中水化氯铝酸钙 ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 衍射峰略强,表明养护温度的升高有利于水化氯铝酸钙的生成,其来源于碱渣中的氯盐氢氧化钙等发生水化反应^[4]。另外,固化淤泥中还检测有水钙沸石 ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 衍射峰,其来源于活性 SiO_2 和 Al_2O_3 与钙的水化反应^[24],在固化淤泥中也起到胶结作用。

2.4.2 SEM 分析

代表性试样的 SEM 照片见图 10。对于 $w_0 = 44\%$ 试样,当 $T = 10、20^\circ\text{C}$ 时可在孔隙中和颗粒表面观察到大量针棒状钙矾石,填充于孔隙中,此时颗粒较细小,放大 5 000 倍时不易看到颗粒边界;养护温度从 10℃ 增至 20℃ 时针棒状钙矾石数量增多,颗粒之间由水化产物交织联结形成网络结构,有助于强

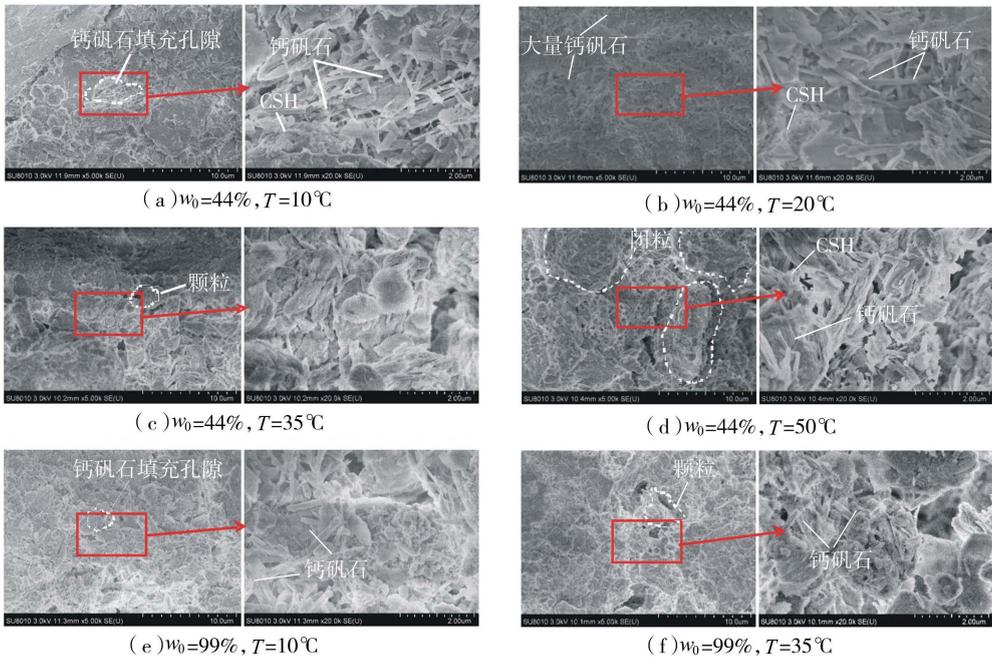


图 10 固化淤泥的 SEM 照片

度的提高。当 $T=35、50^{\circ}\text{C}$ 时,试样中钙矾石形态有所变化,多呈短棒状,且可观察到钙矾石晶体有所减少,其可能原因在于钙矾石的溶解度随温度的升高而加大^[26];养护温度升高时颗粒团聚现象逐渐增强,放大 5 000 倍时可以看到一些颗粒的边界,尤其是 50°C 时试样中出现较大的团粒(粒径约 $10\sim 20\ \mu\text{m}$),团粒的形成有助于固化土强度的提高^[27]。另外,固化淤泥颗粒表面可以观察到絮状不定形 CSH 等物质。养护温度变化时 $w_0=99\%$ 试样也有类似的变化规律,试样中存在较多针棒状钙矾石,但结构较为疏松。

以上分析表明,养护温度的升高对于碱渣-矿渣-电石渣固化疏浚淤泥水化产物的增加具有明显效果,使固化淤泥中细小颗粒变为团粒,增多的 CSH 和水化氯铝酸钙能有效联结颗粒、填充孔隙,从而提高固化淤泥的 UCS、CBR 和抗剪强度指标。在温度较高地区,应用碱渣、矿渣、电石渣固化的疏浚淤泥可表现出良好的强度性质,在实际工程中,可利用其高养护温度下良好的强度性质对设计方案进行优化。

3 结 论

a. 碱渣-矿渣-电石渣固化疏浚淤泥的 UCS 与养护温度之间的关系可用指数函数拟合,当养护温度从 10°C 升高至 35°C 时 UCS 有所提升,从 35°C 升高至 50°C 时 UCS 大幅提升。低含水率固化淤泥试样受温度的影响更大。 50°C 与 20°C 固化淤泥的 UCS 之比为 $2.4\sim 6.8$ 。养护温度越高,固化淤泥的 UCS 随养护龄期的增长越明显。

b. 7 初始含水率为 44% 时固化淤泥的 CBR 随养护龄期的增加而增大,养护温度升高时 CBR 随养护龄期的增幅更显著,各养护温度下试样的 CBR 值满足高速公路和一级公路路基填料 CBR 最小强度要求。

c. 当养护温度从 20°C 升高至 50°C 时,固化淤泥的应力-应变曲线由应变软化型变为应变硬化型,抗剪强度指标增大, 50°C 与 20°C 时固化淤泥的黏聚力之比为 $3.8\sim 8.4$,内摩擦角之比为 $1.1\sim 1.2$ 。

d. 固化淤泥中生成钙矾石、水化氯铝酸钙、CSH、水钙沸石等水化产物,在固化淤泥中起到填充孔隙、连接颗粒等作用;随着养护温度的升高,水化氯铝酸钙和 CSH 等水化产物增多,颗粒团聚现象更显著,从而有效提升固化淤泥的强度。

e. 在本文试验条件下,高温养护对碱渣-矿渣固化疏浚淤泥的强度提升具有良好效果。实际工程应用时可选择在高温气候条件下进行施工养护、采

取保温措施,提高疏浚淤泥固化效果和节约固化成本。

参考文献:

- [1] 迟国梁. 关于新时代流域水环境治理技术体系的思考[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 182-189. (CHI Guoliang. Thoughts on water environmental management technology system in watersheds in the new era[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 182-189. (in Chinese))
- [2] 周苏芬, 黄志文, 王志超. 鄱阳湖黏性底质淤泥固结起动力规律试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 99-104. (ZHOU Sufen, HUANG Zhiwen, WANG Zhichao. Experimental study on initiation law of consolidated cohesive sediment in Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 99-104. (in Chinese))
- [3] YI Yaolin, GU Liyang, LIU Songyu, et al. Carbide slag-activated ground granulated blast furnace slag for soft clay stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(5): 656-663.
- [4] HE Jun, SHI Xiaokang, LI Zhixiang, et al. Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118126.
- [5] 吴燕开, 胡晓士, 胡锐, 等. 烧碱激发钢渣粉在淤泥质土中的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2187-2194. (WU Yankai, HU Xiaoshi, HU Rui, et al. Experimental study on caustic soda-activated steel slag powder in muddy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2187-2194. (in Chinese))
- [6] 史燕南, 占川, 张超杰, 等. 污染淤泥固化稳定化处理及种植性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 89-94. (SHI Yannan, ZHAN Chuan, ZHANG Chaojie, et al. Experiments on stabilizing treatment of polluted silt solidification and planting performance [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 89-94. (in Chinese))
- [7] 李敏, 孟德骄, 姚昕好. 基于温度效应下二灰固化石油污染滨海盐渍土力学特性优化固化需求[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1203-1210. (LI Min, MENG Dejiao, YAO Xinyu. Optimization of requirement for two kinds of ash solidified materials used in oil contaminated saline soil considering temperature sensitivity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1203-1210. (in Chinese))
- [8] 王东星, 高向云, 邹维列, 等. 高温效应下 MgO-矿粉/粉煤灰固化土强度预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 92-97. (WANG Dongxing, GAO Xiangyun, ZOU Weilie, et al. Study on strength predication

- of reactive MgO-slag/fly ash stabilized clay considering high temperature effect [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47 (6): 92-97. (in Chinese)
- [9] 章荣军,郑俊杰,程钰诗,等. 养护温度对水泥固化淤泥强度影响试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (12): 3463-3470. (ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, CHENG Yushi, et al. Experimental investigation on effect of curing temperature on strength development of cement stabilized clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (12): 3463-3471. (in Chinese))
- [10] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. Engineering Geology, 1996, 42 (4): 223-237.
- [11] AL-MUKHTAR M, LASLEDJ A, ALCOVER J F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C [J]. Applied Clay Science, 2010, 50 (2): 191-198.
- [12] AL-MUKHTAR M, LASLEDJ A, ALCOVER J F. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50°C [J]. Applied Clay Science, 2010, 50 (2): 199-203.
- [13] LIU M D, INDRARATNA B, HORPIBULSUKE, et al. Variations in strength of lime-treated soft clays [J]. Ground Improvement, 2012, 165 (14): 217-223.
- [14] ZHANG Rongjun, QIAO Yaqing, ZHENG Junjie, et al. A method for considering curing temperature effect in mix proportion design of mass cement-solidified mud at high water content [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (1): 279-301.
- [15] 陈昌富,韦思琦,蔡焕. 温度变化对水泥土力学性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (1): 190-199. (CHEN Changfu, WEI Siqi, CAI Huan. Effect of temperature change on mechanical properties of cement soil [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20 (1): 190-199. (in Chinese))
- [16] PHETCHUAY C, HORPIBULSUK S, ARULRAJAH A, et al. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer [J]. Applied Clay Science, 2016, 127-128: 134-142.
- [17] 周恒宇,王修山,胡星星,等. 地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42 (8): 2089-2098. (ZHOU Hengyu, WANG Xiushan, HU Xingxing, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42 (8): 2089-2098. (in Chinese))
- [18] SABRIN S, SIDDIQUA S, MUHAMMAD N. Understanding the effect of heat treatment on subgrade soil stabilized with bentonite and magnesium alkalization [J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100287.
- [19] MUHAMMAD N, SIDDIQUA S. Stabilization of silty sand using bentonite-magnesium-alkalinization: mechanical, physicochemical and microstructural characterization [J]. Applied Clay Science, 2019, 183: 105325.
- [20] CONSOLI N C, LEON H B, DA SILVA CARRETTA M, et al. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends [J]. Soils and Foundations, 2019, 59 (5): 1428-1439.
- [21] 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.
- [22] 何俊,吕晓龙,王文鹏. 碱渣-矿渣固化疏浚淤泥含水率控制方法研究[J]. 人民长江, 2023, 54 (7): 196-202. (HE Jun, LYU Xiaolong, WANG Wenpeng. Determination of water content of dredged sludge solidified with alkali slag and blast furnace slag [J]. Yangtze River, 2023, 54 (7): 196-202. (in Chinese))
- [23] 吕擎峰,申贝,王生新,等. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (3): 687-693. (LYU Qingfeng, SHEN Bei, WANG Shengxin, et al. Strength characteristics and solidification mechanism of sulphate salty soil solidified with sodium silicate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (3): 687-693. (in Chinese))
- [24] 李丽华,韩琦培,杨星,等. 稻壳灰-水泥固化淤泥土力学特性及微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2022: 1-12. (LI Lihua, HAN Qipei, YANG Xing, et al. Mechanical properties and micro-mechanisms of RHA-cement solidified sludge [J]. China Civil Engineering Journal, 2022: 1-12. (in Chinese))
- [25] 段晓牧,夏军武,杨建平. 煤矸石细集料对水泥浆体微观结构的影响及其作用机理[J]. 建筑材料学报, 2014, 17 (4): 700-705. (DUAN Xiaomou, XIA Junwu, YANG Jianping. Influence of coal gangue fine aggregate on microstructure of cement mortar and its action mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (4): 700-705. (in Chinese))
- [26] POKHAREL M, FALL M. Combined influence of sulphate and temperature on the saturated hydraulic conductivity of hardened cemented paste backfill [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 38: 21-28.
- [27] MUHMED A, MOHAMED M, KHAN A. The impact of moisture and clay content on the unconfined compressive strength of lime treated highly reactive clays [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40 (12): 5869-5893.

(收稿日期: 2022 - 11 - 03 编辑: 俞云利)