水泥和固化剂加固淤泥的抗硫酸盐侵蚀性对比研究

于帅帅[1]，魏芳海[2]，王梓奥[3,4]，汪学正[3,4]，李　凯[3,4]，罗晓青[3,4]

（1. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司，浙江 宁波 315299；
2. 舟山市水运工程质量安全服务中心，浙江 舟山 316021；3. 北京中岩大地科技股份有限公司，北京 100043；
4. 天津中岩大地材料科技有限公司，天津 300380）

摘要：针对现有研究多集中于水泥加固土抗硫酸盐侵蚀性能，而对新型固化剂材料加固土关注不足的问题，进行了两种材料加固土的抗侵蚀性能对比试验研究。采用不同硫酸盐浓度与两种侵蚀方式，对不同侵蚀龄期下两种加固土进行了系统测试，通过观察表观形貌、测定无侧限抗压强度、计算耐蚀系数，并结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)微观结构分析，综合揭示了其性能演变规律与侵蚀破坏机制。结果表明：低浓度硫酸盐(≤3 000 mg/L)对两者影响较小，性能降幅均小于 20%；而高浓度(≥8 000 mg/L)侵蚀下，水泥土迅速劣化，并随龄期加剧，无侧限抗压强度最大下降 100%，耐蚀系数最低降至 0。相比之下，固化土的抗侵蚀性能更优，其在半浸泡长期作用下耐蚀系数最低仅为 0.49。固化土抗侵蚀性能整体优于水泥土，主要原因是固化土内部铝相水化产物含量较低，有效抑制了后期膨胀性产物二次钙矾石的生成。

关键词：抗硫酸盐侵蚀；固化土；水泥土；淤泥；半浸泡；全浸泡；侵蚀机理

中图分类号：U652.2；TU411　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0190-08

Comparative study on resistance to sulfate attack of sludge stabilized with cement and solidifier

YU Shuaishuai[1], WEI Fanghai[2], WANG Ziao[3,4], WANG Xuezheng[3,4], LI Kai[3,4], LUO Xiaoqing[3,4]

(1. CCCC Third Navigation Engineering Co., Ltd. Ningbo Branch, Ningbo 315299, China;
2. Zhoushan Water Transport Engineering Quality and Safety Service Center, Zhoushan 316021, China;
3. Beijing Zhongyan Dadi Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China;
4. Tianjin Zhongyan Dadi Material Technology Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

Abstract: To address the issue that most existing studies mainly focus on the sulfate attack resistance of cement-stabilized soil, while insufficient attention has been paid to soil reinforced by new curing agents, this paper conducts a comparative experimental study on the sulfate erosion resistance of soil stabilized with the two materials. With different sulfate concentrations and two erosion modes adopted, systematic tests are carried out on the two stabilized soils at different erosion ages. By observing surface morphology, testing unconfined compressive strength, calculating the sulfate resistance coefficient, and analyzing microstructure via scanning electron microscopy (SEM), the performance evolution law and erosion failure mechanism are comprehensively revealed. The results show that low sulfate concentrations (≤3, 000 mg/L) have little effect on both types of stabilized soil, with performance degradation rates all less than 20%. Under high-concentration sulfate erosion (≥8, 000 mg/L), cement-stabilized soil deteriorates rapidly, and the degradation intensifies with erosion age, its unconfined compressive strength decreases by up to 100%, and the sulfate resistance coefficient drops to a minimum of 0. In comparison, stabilized

收稿日期：2025-11-10　　**录用日期：**2025-12-12

作者简介：于帅帅(1991—)，男，工程师，研究方向为施工技术管理、固化土施工技术管理。

soil presents superior erosion resistance, with its minimum corrosion resistance coefficient reaching only 0. 49 under long-term semi-immersion conditions. Stabilized soil overall outperforms cement soil in erosion resistance. This is mainly attributed to the lower content of aluminum-phase hydration products inside stabilized soil, which effectively inhibits the formation of expansive secondary ettringite in the later stage.

Keywords: sulfate resistance; stabilized soil; cement soil; sludge; semi immersion; full immersion; erosion mechanism

随着沿海基础设施建设的不断发展，各类港口、海岸及防护工程等沿海结构均面临着海水中侵蚀性离子的腐蚀威胁[1]。海水中侵蚀性离子主要为氯离子(Cl^-)、硫酸根离子(SO_4^{2-})和镁离子(Mg^{2+})，这些侵蚀性离子会与地下构筑物基础中的水化产物发生化学反应，并改变其内部微观结构，从而降低其承载力和耐久性，缩短工程使用寿命，并威胁结构安全[2-3]。其中，硫酸盐侵蚀因其产物具有膨胀性，对基础结构的破坏作用尤为显著，已成为该领域研究的焦点之一[4-6]。

当前，针对硫酸盐侵蚀土体改良材料的研究，绝大部分集中于传统的水泥土体系。低浓度硫酸盐侵蚀研究中，Chen 等[7]发现浸泡在含有 SO_4^{2-} 地下水中的水泥土试块的抗压强度高于蒸馏水中的试块；宁宝宽等[8]通过试验模拟了 SO_4^{2-} 等各种侵蚀性离子影响，发现较低浓度 SO_4^{2-} 能够在一定程度上提升水泥土强度。高浓度硫酸盐侵蚀研究中，韩鹏举等[9]通过模拟不同 SO_4^{2-} 溶液中浸泡后的表观特征和抗压强度变化规律，揭示了腐蚀环境对水泥土的化学作用机理；傅小茜等[10]发现了硫酸盐溶液中的水、SO_4^{2-} 与水泥土之间发生的物理、化学作用影响了水泥土的微观结构。夏正兵[11]研究了水泥土力学性能在 SO_4^{2-} 侵蚀下的变化规律，发现当 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 共存时，其腐蚀性较强。霍海峰等[12]研究了不同浓度的溶液对水泥土抗压强度的影响，水泥土的抗压强度随着 SO_4^{2-} 浓度的增加而先增大后减小。这些成果为揭示水泥基材料的硫酸盐侵蚀机制奠定了重要基础。

与水泥土相比，以工业副产物为主要成分的新型固化剂所制备的固化土，因其具有更显著的经济和环保效益[13]，正日益受到工程界的关注。然而，现有研究对其在严酷硫酸盐环境下的长期耐久性，尤其是与水泥土的对比性性能演化规律与机理，尚缺乏系统深入的探讨，一定程度上制约了该环保材料在沿海及盐渍土地区的推广应用。

鉴于此，为探究水泥和固化剂材料对固化淤泥土体的抗硫酸盐侵蚀性的影响，通过设计不同浓度硫酸盐溶液、全浸泡与半浸泡干湿循环两种侵蚀制度，以及多个侵蚀龄期，系统分析两种材料的宏观性能(包括表观形貌、无侧限抗压强度、耐蚀系数)，并结合微观结构测试，总结其侵蚀机理。研究旨在为沿海、盐渍土地区工程建设中固化材料的科学选择与耐久性设计提供重要参考。

1　试验设计

1.1　试验材料

试验所用淤泥取自天津临港海岸线滩涂吹填海相淤泥，主要化学成分包括 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 及其他碱金属氧化物，淤泥的硫酸根含量为 1 685. 5 mg/kg，淤泥土的物理力学性质见表 1。

表 1　淤泥土物理力学性质

Tab. 1　Physical and mechanical properties of silty soil

天然含水率/%	密度/(g·cm^{-3})	土粒比重	液限/%	塑限/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
67. 0	1. 63	2. 72	62. 5	34. 0	2. 03	15. 7	6. 6

固化材料-水泥(PII 52. 5 水泥)：筛余率(45 μm)为 1. 3%，比表面积为 360 m^2/kg。

固化材料-固化剂(C 型固化剂)：由天津中岩大地材料科技有限公司研制一种无机水硬性胶凝材料，工业副产物比例高于 60%，主要成分为 CaO、SiO_2、AlO_3、SO_3，筛余率(45 μm)为 0. 2%，

比表面积为 472 m^2/kg。

Na_2SO_4 分析纯：由天津某化学试剂公司生产，Na_2SO_4 含量≥99%。

1.2 试验方案

选取现场代表性淤泥，分别制备水泥土(cement soil，CS，采用 PII 52.5 水泥)和固化土(solidified soil，SS，采用 C 型固化剂)试件。固化材料掺入比(固化材料干质量与淤泥湿质量之比)设定为 15%，水灰比为 0.6：1。试件标准养护 7 d 后，置于不同浓度硫酸钠溶液中进行侵蚀试验，侵蚀方式包括半浸泡(试件 1/2 高度浸没在硫酸盐溶液中)和全浸泡(试件完全浸没硫酸盐溶液中)。设定浸泡龄期为 7、28 和 90 d，分别在相应龄期测试其表观变化、无侧限抗压强度、耐蚀系数及微观结构，并与标准养护对照组进行对比。

1.3 试验步骤

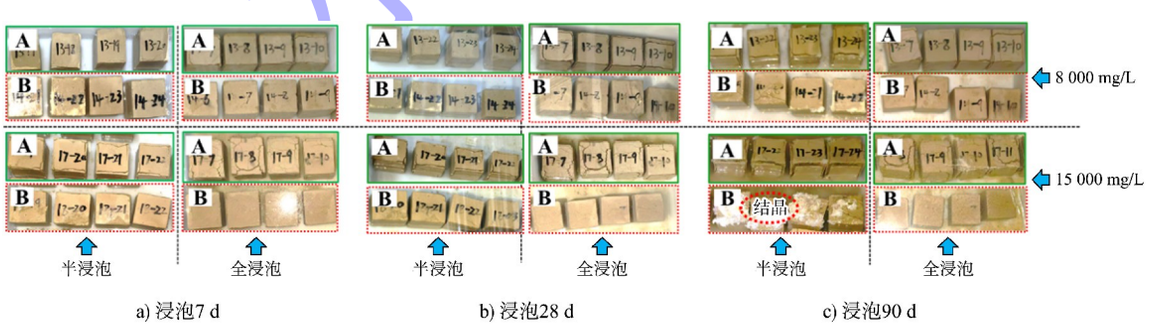
试件成型参照 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》[14] 进行，固化材料掺入比为 15%，先将固化材料按水灰比 0.6∶1 制成浆液，再加入称量好并调节至液限含水率的淤泥中，通过强制搅拌把固化材料和淤泥混合均匀，然后装入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 试模中，经振动台振实、刮平，置于标准养护箱中养护 7 d。脱模后，将试件分别浸泡于 300、1 500、3 000、8 000 和 15 000 mg/L 的硫酸钠溶液中，溶液温度控制在(20 ± 1)℃。每种浓度下设半浸泡与全浸泡两种方式，浸泡龄期分别为 7、28 和 90 d，每 5～7 d 更换 1 次溶液，并设置标准养护组作为对照。

分别在 7、28 和 90 d 龄期时，观察并测试试件的表观变化、无侧限抗压强度、耐蚀系数及微观结构。其中，耐蚀系数是评价硫酸盐对于试件侵蚀影响最重要的评价指标之一[15]，参考 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》[16]，耐蚀系数定义为硫酸盐侵蚀后试件的抗压强度与标准养护试件抗压强度的比值。

2 抗侵蚀性能结果

2.1 表观变化

水泥土试件(A)与固化土试件(B)在不同浓度硫酸盐溶液、不同浸泡时间及不同浸泡侵蚀方式作用下，其外观侵蚀程度各异。为简明呈现，仅展示外观发生显著变化的试件对比照片。试件在 8 000 与 15 000 mg/L 硫酸盐浓度浸泡下出现明显表观变化，其他低硫酸盐浓度(＜8 000 mg/L)未见有明显变化。8 000 与 15 000 mg/L 硫酸盐浓度下，不同浸泡时间和侵蚀浸泡方式下试件的表观变化见图 1。



a) 浸泡7 d　　b) 浸泡28 d　　c) 浸泡90 d

图 1　不同浸泡时间和侵蚀浸泡方式下试件的表观变化

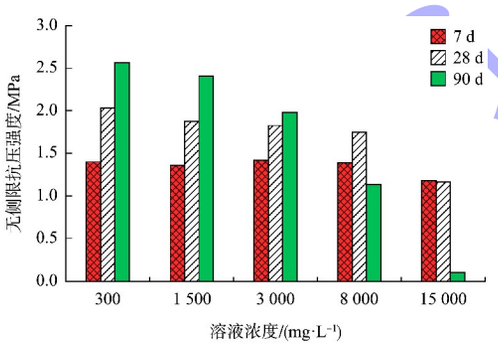
Fig. 1　Apparent morphology changes of specimens under different immersion durations and erosion modes

浸泡 7 d 试件表观变化见图 1a)，水泥土在半浸泡与全浸泡条件下均出现明显裂缝，裂缝宽度随硫酸盐浓度增加而增大，且相同浓度下，全浸泡试件的裂缝大于半浸泡试件；固化土外观无明显变化。浸泡 28 d 试件表观变化见图 1b)，水泥土裂缝数量和宽度相较于 14 d 有显著增加(破坏程度随龄期加剧)，相同浓度下，全浸泡试件的裂缝仍大于半浸泡试件，固化土外观无明显变化。浸泡 90 d 试件表观变化见图 1c)，水泥土外观破坏程度(裂缝数量与宽度)随浸泡浓度和时间进一

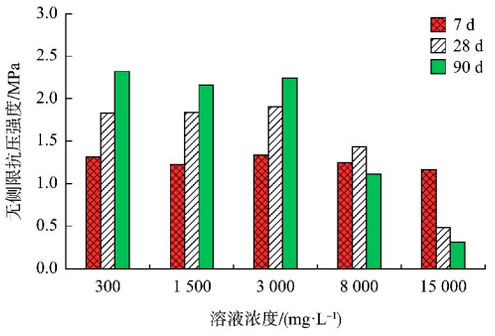
步增加，但半浸泡破坏程度大于全浸泡；固化土只在半浸泡时出现轻微裂缝，且试件表面存在明显的硫酸盐结晶，全浸泡外观无明显变化。在相同侵蚀条件(包括浸泡浓度、侵蚀方式及龄期)下，水泥土试件的侵蚀损伤程度显著大于固化土。

2.2　无侧限抗压强度

水泥土的无侧限抗压强度变化见图 2。水泥土试件在半浸泡下，见图 2a)，7 d 无侧限抗压强度随硫酸盐浓度增加呈先增后降趋势，而 28 和 90 d 的无侧限抗压强度则随硫酸盐浓度增加而下降。7、28 和 90 d 最大强度分别为 1.42、2.03 和 2.56 MPa，对应浸泡硫酸盐浓度全部≤3 000 mg/L。全浸泡下，见图 2b)，7、28 和 90 d 的最大的无侧限抗压强度分别为 1.34、1.91 和 2.33 MPa，对应的浸泡硫酸盐浓度全部≤3 000 mg/L，超过此浓度，无侧限抗压强度随着全浸泡龄期的增加而快速下降。8 000 与 15 000 mg/L 硫酸盐浓度下，7 和 28 d 水泥土半浸泡无侧限抗压强度大于全浸泡，90 d 时，全浸泡固化强度大于半浸泡，与表观变化规律相一致。



a) 半浸泡

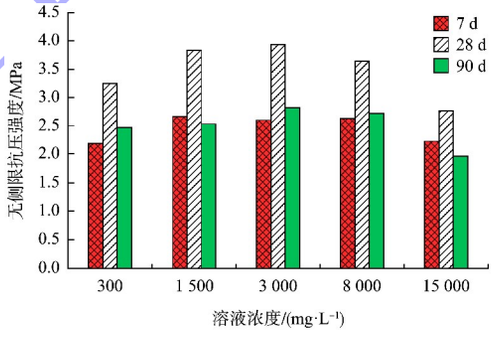


b) 全浸泡

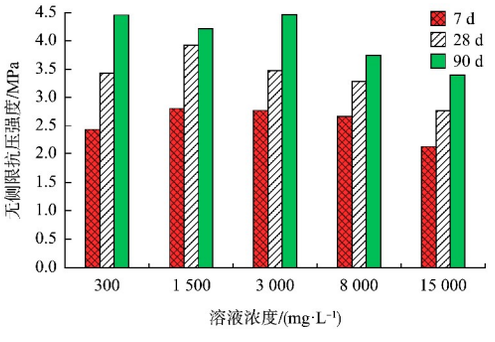
图 2　水泥土的无侧限抗压强度变化

Fig. 2　Variation of unconfined compressive strength of CS

固化土的无侧限抗压强度变化见图 3。由图 2、3 可知，相同条件下，固化土试件的无侧限抗压强度明显高于水泥土试件。固化土试件半浸泡条件下，见图 3a)，7、28 和 90 d 无侧限抗压强度随硫酸盐浓度增加先增长降低，7、28 和 90 d 最大强度分别为 2.66、3.92 和 2.82 MPa，分别为水泥土的 1.88、1.93 和 1.10 倍，对应浸泡硫酸盐浓度约为 3 000 mg/L，90 d 下固化土无侧限抗压强度相对于 28 d 略有降低。全浸泡条件下，见图 3b)，相同硫酸盐浓度的固化土无侧限抗压强度随着龄期的增长而不断增加，7、28 和 90 d 对应的最大无侧限抗压强度分别为 2.80、3.92 和 4.46 MPa，分别为水泥土的 2.08、2.05 和 1.91 倍，对应浸泡硫酸盐浓度约为 3 000 mg/L。8 000 与 15 000 mg/L 硫酸盐浓度下，固化土无侧限抗压强度在 90 d 时，固化土全浸泡固化强度大于半浸泡，与表观变化规律相一致。



a) 半浸泡



b) 全浸泡

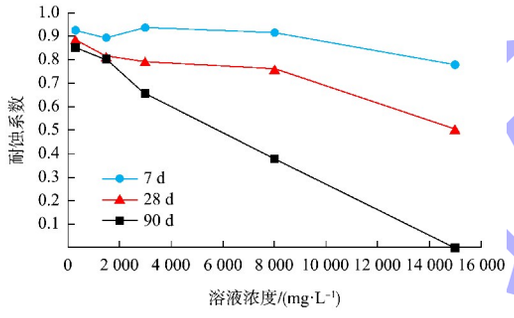
图 3　固化土的无侧限抗压强度变化

Fig. 3　Variation of unconfined compressive strength of SS

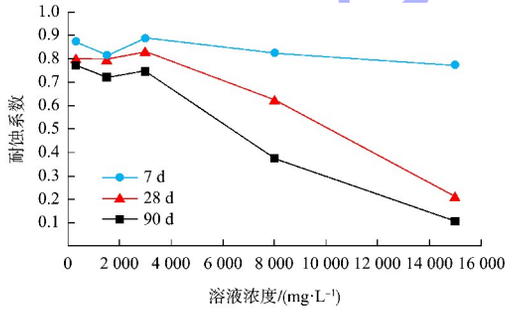
2.3　耐蚀系数

耐蚀系数建立起硫酸盐浓度与龄期对固化土

开裂风险的临界关系，为不同工况下安全、合理地选用固化材料提供了重要数据支撑。水泥土的耐蚀系数变化见图 4。可以看出，水泥土试件的耐蚀系数在所有测试龄期(7、28 和 90 d)下均小于 1.0，说明不同浓度硫酸盐侵蚀下，水泥土无侧限抗压强度相较于标准养护均有所下降，且随硫酸盐浓度增加而显著下降(最低值接近 0 MPa)。低浓度硫酸盐(≤3 000 mg/L)浸泡时，半浸泡平均耐蚀系数为 0.84，全浸泡耐蚀系数为 0.81；高浓度硫酸盐(≥8 000 mg/L)浸泡时，半浸泡平均耐蚀系数为 0.54，全浸泡耐蚀系数为 0.49。水泥土试件出现表观变化时均发生在高浓度硫酸盐溶液中，在半浸泡条件下，水泥土 28 d 耐蚀系数≤0.66 和 90 d 耐蚀系数≤0.38 时试件表观发生变化；全浸泡条件下，28 d 耐蚀系数≤0.63 和 90 d 耐蚀系数≤0.37 时试件表观发生变化。



a) 半浸泡

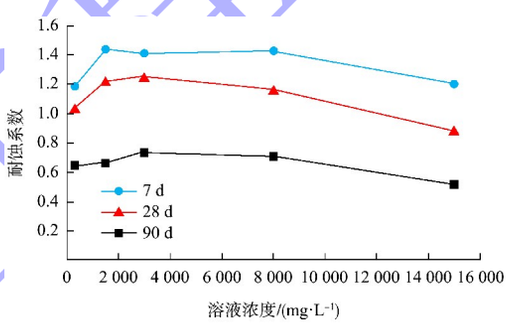


b) 全浸泡

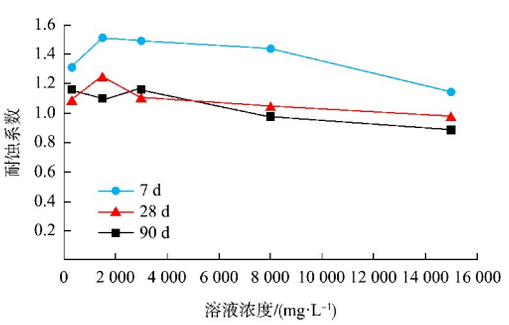
图 4　水泥土的耐蚀系数变化

Fig. 4　Variation of corrosion resistance coefficient of CS

固化土的耐蚀系数变化见图 5。从图 5a)可以看出，在半浸泡条件下，相同硫酸盐浓度中耐蚀系数随龄期延长持续下降；在各测试龄期(7、28 和 90 d)，耐蚀系数均随浓度增加呈先上升后下降的趋势，3 个龄期对应的平均耐蚀系数分别为 1.33、1.11 和 0.65，且峰值始终稳定出现于 3 000 mg/L 附近。90 d 半浸泡后耐蚀系数显著降低至 0.51 以下，此时固化土表观开始出现明显侵蚀现象。在全浸泡条件下，见图 5b)，7 d 龄期时耐蚀系数先升后降，最高达 1.51；而 28 和 90 d 龄期时则随浓度增加缓慢下降，平均耐蚀系数均保持在 0.85 以上，表明全浸泡下固化土具有更优异的抗硫酸盐侵蚀性能，所受影响相对较小。低浓度硫酸盐(≤3 000 mg/L)浸泡时，半浸泡平均耐蚀系数为 1.06，全浸泡耐蚀系数为 1.24；高浓度硫酸盐(≥8 000 mg/L)浸泡时，半浸泡平均耐蚀系数为 0.98，全浸泡耐蚀系数为 1.08，均远远高于同条件下的水泥土。



a) 半浸泡



b) 全浸泡

图 5　固化土的耐蚀系数变化

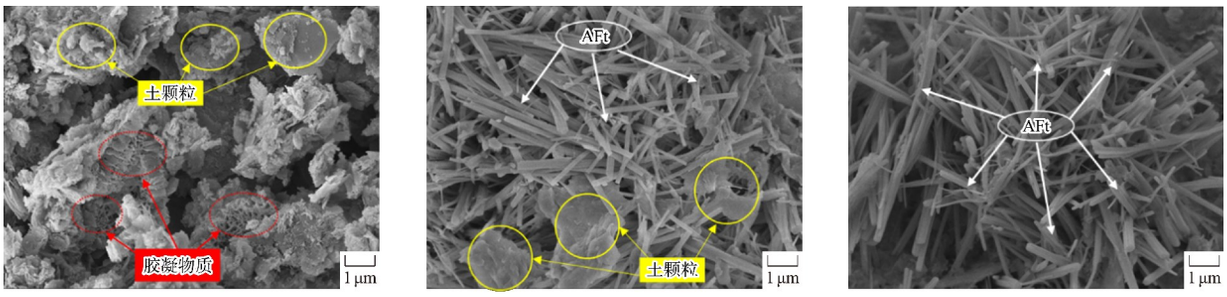
Fig. 5　Variation of corrosion resistance coefficient of SS

2.4　SEM 分析

通过以上测试方法可以看出，半浸泡的长期侵蚀影响程度大于半浸泡，为了更好地分析试件的形貌，侵蚀方式选为半浸泡，硫酸盐浸泡浓度为 15 000 mg/L。为了分析半浸泡方式下浸泡龄期对水泥土和固化土微观形貌的影响，进行了扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)

测试。

硫酸盐半浸泡不同龄期水泥土的 SEM 图见图 6。可以看出，硫酸盐半浸泡 7 d 时，水泥土内部无钙矾石(Alumina-Ferrite-tri，AFt，高硫型水化硫铝酸钙，俗称钙矾石)晶体，土体结构并未开裂；硫酸盐半浸泡 28 和 90 d 时，水泥土内部的 AFt 明显增多，并且土颗粒明显减少直至无土颗粒，此时水泥土强度急剧下降并明显开裂，主要原因是高浓度 SO_4^{2-} 与水泥土内部逐渐开裂的水化产物发生二次水化反应生成大量的 AFt，二次水化反应所产生 AFt(二次 AFt)的膨胀破坏性远高于正常水化反应产生的 AFt[17]。

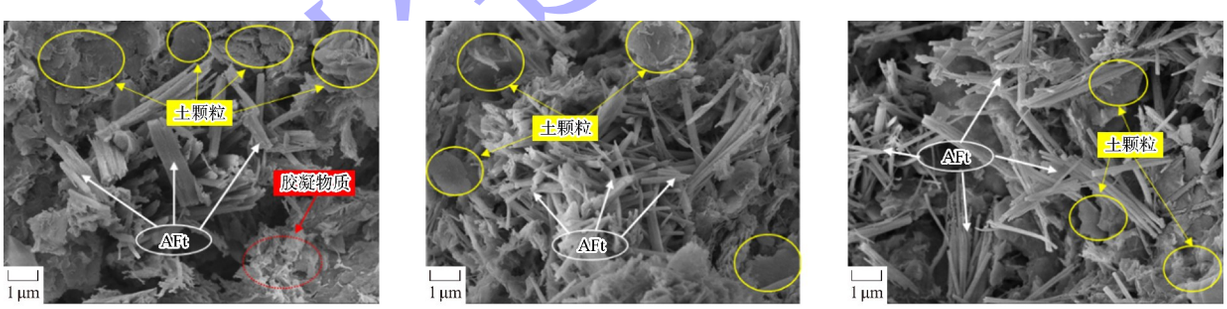


a) 半浸泡7 d　　b) 半浸泡28 d　　c) 半浸泡90 d

图 6　硫酸盐半浸泡不同龄期水泥土的 SEM 图

Fig. 6　SEM images of CS at different ages under sulfate semi-immersion

硫酸盐半浸泡不同龄期固化土的 SEM 图见图 7，硫酸盐浸泡浓度为 15 000 mg/L。可以看出，7 d 硫酸盐半浸泡时产生一定量的一次 AFt，固化土结构并未破坏，这部分 AFt 主要是固化土内部常规水化反应生成，并未有外部 SO_4^{2-} 参与反应。随着半浸泡龄期的增加，AFt 生成量不断增多，固化土强度增大，未出现开裂；硫酸盐半浸泡 90 d 时，固化土内部主要为 AFt，并有少量的土颗粒，固化土出现轻微开裂，硫酸盐溶液中有少部分 SO_4^{2-} 参与水化反应生成二次 AFt。



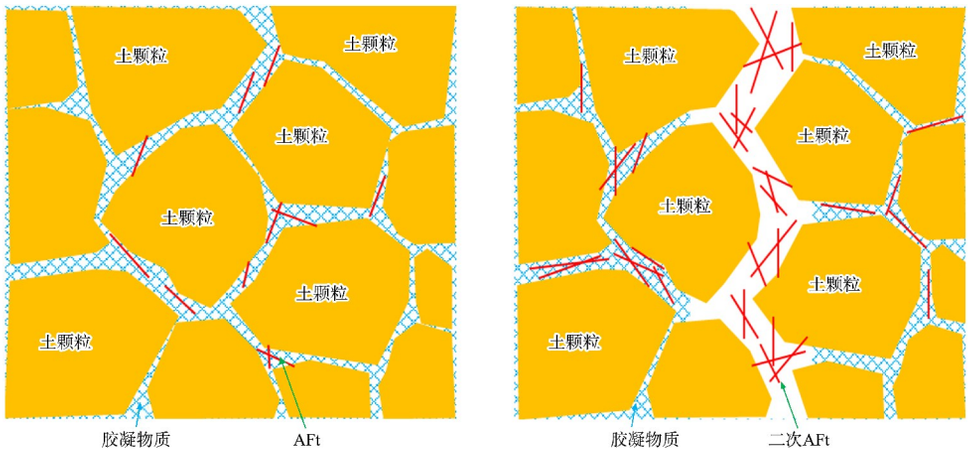
a) 半浸泡7 d　　b) 半浸泡28 d　　c) 半浸泡90 d

图 7　硫酸盐半浸泡不同龄期固化土的 SEM 图

Fig. 7　SEM images of SS at different ages under sulfate semi-immersion

3　侵蚀机理讨论

通过对比水泥土和固化土硫酸盐侵蚀后不同龄期的表观变化、无侧限抗压强度、耐蚀系数以及 X 射线衍射(X-ray diffraction，XRD)、SEM 微观变化，从微观角度上分析硫酸侵蚀对固化土和水泥土的破坏机理，硫酸盐侵蚀破坏机理示意图见图 8。硫酸盐侵蚀之前，见图 8a)，固化材料与淤泥发生一系列持续的水解水化反应，产生大量胶凝物质(C-S-H、C-A-H、C-A-S-H 等)和 AFt 晶体，这些水化产物可发挥土颗粒胶结、孔隙填充与颗粒包裹三重作用，在土壤内部形成骨架支撑，使淤泥具有整体结构，并随着龄期的增加，强度持续稳定增长。



a) 硫酸盐侵蚀前　　b) 硫酸盐侵蚀后

图 8　硫酸盐侵蚀破坏机理示意图

Fig. 8　Schematic diagram of sulfate erosion failure mechanism

当高浓度硫酸盐(≥8 000 mg/L)侵蚀时，见图 8b)，SO_4^{2-}会与试件内部的水化产物发生二次水化反应，二次 AFt 晶体大量生成会对试件结构产生破坏，其反应方程式见式(1)、(2)。适量的一次 AFt 生产量对于土体缝隙的密实具有促进作用，可以提高固化土体强度，但当二次 AFt 生成量超过一定量后，固化强度开始下降，试件逐渐出现开裂，高浓度的 SO_4^{2-} 会沿着裂隙进入固化土体内部，二次 AFt 生成量不断增加，试件侵蚀破坏程度加剧，固化强度消耗殆尽，试件完全破坏。

$$SO_4^{2-}+C-A-H+H_2O\rightarrow AFt+OH^- \quad (1)$$

$$SO_4^{2-}+C-A-S-H+H_2O\rightarrow AFt \quad (2)$$

相同条件下，水泥土的硫酸盐侵蚀破坏程度高于固化土，主要是因为水泥土早期水化产物中产生较多的 C-A-H 和 C-A-S-H 等铝相水化产物，为大量生成二次 AFt 提供了基础。长期半浸泡相对于全浸泡来讲，除受 SO_4^{2-} 的侵蚀作用外，还伴随试件的干湿循环作用，进一步加速了土体的侵蚀进程，并会在试件表面析出具有膨胀作用的硫酸盐晶体，极大增加了侵蚀的影响程度。

4　结论

1）硫酸盐浓度对试件侵蚀影响随浓度增加明显。低浓度(≤3 000 mg/L)对水泥土与固化土性能影响均较小，性能衰减幅度小于 20%；而在高浓度(≥8 000 mg/L)环境下，水泥土仅 7 d 即出现表观开裂，强度与耐蚀系数急剧下降，劣化程度随浓度与龄期加剧，最终可降至接近 0。固化土虽性能有所降低，但整体结构保持稳定，耐久性更优，整体性能优于水泥土。

2）固化土抗侵蚀性能全面优于水泥土。在低浓度半浸泡条件下，固化土无侧限抗压强度最高为水泥土的 1.93 倍，全浸泡时达 2.08 倍；半浸泡与全浸泡下两者的平均耐蚀系数分别为 0.84、1.06 和 0.81、1.24。高浓度环境下，两者性能差距进一步扩大。

3）侵蚀破坏具有明显时变特征。短期(≤28 d)全浸泡损伤程度大于半浸泡；长期(>28 d)则半浸泡破坏更严重。这一规律与干湿循环引起的物理侵蚀叠加 SO_4^{2-} 化学侵蚀共同作用有关。

4）微观机理表明，高浓度硫酸盐环境中 SO_4^{2-} 与试件中铝相水化产物发生反应，大量生成二次钙矾石，导致体积膨胀、开裂，是性能劣化的主要原因。

参考文献：

[1] 李梦幻. 海水入侵对水泥土抗压强度的影响规律及细观机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
LI M H. Study on the influence law and microscopic mechanism of seawater invasion on the compressive strength of cemented soil[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.

[2] 闫楠, 杨俊杰, 刘强, 等. 海水环境下水泥土强度衰减过程室内试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 115-124.

YAN N, YANG J J, LIU Q, et al. Laboratory test on strength deterioration process of soil cement in seawater environment[J]. China civil engineering journal, 2017, 50(11): 115-124.

[3] 何军拥, 田承宇, 吴永明. 硫酸盐侵蚀下自密实混凝土的性能分析[J]. 水运工程, 2014(8): 56-60.
HE J Y, TIAN C Y, WU Y M. Performance analysis of self-compacting concrete subjected to sulfate attack[J]. Port & waterway engineering, 2014(8): 56-60.

[4] 韩鹏举, 白晓红, 任杰, 等. 硫酸镁腐蚀环境对水泥土强度的影响[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(1): 46-49.
HAN P J, BAI X H, REN J, et al. Influence of $MgSO_4$ corrosive environment on strength of soil cement[J]. Corrosion & protection, 2009, 30(1): 46-49.

[5] 韩鹏举, 张文博, 刘新, 等. 氯化镁对水泥土早期强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1173-1178.
HAN P J, ZHANG W B, LIU X, et al. Early strength of cemented soils polluted by magnesium chloride[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(6): 1173-1178.

[6] 刘慕宸, 崔自治, 宋鑫. 硫酸钠-干湿-冻融共同作用对水泥土性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12977-12984.
LIU M C, CUI Z Z, SONG X. Effects of sodium sulfate on properties of cement-soil under dry-wet and freeze-thaw cycles[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(29): 12977-12984.

[7] CHEN D, LIAO Y D, JIANG C H, et al. The mechanical properties of coastal soil treated with cement[J]. Journal of Wuhan University of Technology (materials science edition), 2013, 28(6): 1155-1160.

[8] 陈四利, 江国龙, 王军祥, 等. 酸碱环境下硫酸钠侵蚀对水泥土的力学特性影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(4): 451-456.
CHEN S L, JIANG G L, WANG J X, et al. Effect of sodium sulfate erosion on mechanical properties of cemented soil under acid or alkali condition[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(4): 451-456.

[9] 韩鹏举, 刘新, 白晓红. 硫酸钠对水泥土的强度及微观孔隙影响研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2555-2561.
HAN P J, LIU X, BAI X H. Effect of sodium sulfate on strength and micropores of cemented soil[J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(9): 2555-2561.

[10] 傅小茜, 冯俊德, 谢友均. 硫酸盐侵蚀环境下水泥土的力学行为研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 659-662.
FU X Q, FENG J D, XIE Y J. Mechanical behavior of soil cement under ambient with sulfate conditions[J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(S1): 659-662.

[11] 夏正兵. 硫酸根侵蚀下水泥土力学性能的试验研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(6): 121-125.
XIA Z B. Experimental study on compressive strength of cement soil under sulfate attack[J]. Structural engineers, 2018, 34(6): 121-125.

[12] 霍海峰, 王文博. 盐溶液对于水泥土抗压强度和电阻率的影响[J]. 中国民航大学学报, 2017, 35(6): 52-56.
HUO H F, WANG W B. Effect of salt solution on compressive strength and resistivity of cement soil[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(6): 52-56.

[13] 郭少华, 詹世佐, 康天蓓, 等. 固化建筑渣土力学和路用性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(11): 4261-4269.
GUO S H, ZHAN S Z, KANG T B, et al. Experimental study on mechanical properties and road properties of solidified construction waste soil[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2024, 43(11): 4261-4269.

[14] 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[15] 汪朝成. 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验方法探讨[J]. 水运工程, 2010(11): 30-34.
WANG C C. Test method for concrete's resistance to sulphate attack[J]. Port & waterway engineering, 2010(11): 30-34.

[16] 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
Standard for test methods of long-term performance and durability of concrete: GB/T 50082-2024[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024.

[17] 谷坤鹏, 王成启. 海工高性能混凝土常用胶凝材料抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. 水运工程, 2010(12): 8-13.
GU K P, WANG C Q. Resistance to sulfate corrosion of commonly used cement pastes of high-performance concrete for marine engineering[J]. Port & waterway engineering, 2010(12): 8-13.

(本文编辑　王传瑜)

水运工程