

干湿循环与侵蚀耦合作用下碱渣固化淤泥的强度与损伤

何俊,朱元军,李文静

(湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北武汉 430068)

摘要:为揭示干湿循环与侵蚀耦合作用对固化淤泥性质的影响,以碱渣、矿渣、电石渣为固化剂对疏浚淤泥固化处理,开展了毛细浸润干湿循环与蒸馏水、海水、硫酸镁等侵蚀耦合作用下固化淤泥外观、无侧限抗压强度及损伤研究,探究了耦合作用规律、机理和最优固化剂掺量。结果表明:硫酸镁侵蚀与干湿循环耦合作用下试样外观破损最严重、强度降低最明显;增加矿渣掺量可提高固化淤泥耐久性,当矿渣掺量分别为20%和15%时,碱渣掺量不宜超过25%和35%;多次干湿循环与海水和硫酸镁侵蚀耦合作用导致试样随应变迅速达到损伤破坏状态;干湿循环与海水侵蚀耦合作用导致试样中生成较多钙矾石和氯化钠结晶,并随循环次数的增加氯化钠结晶增多、试样不均匀性增强、中孔和大孔数量增多;干湿循环与硫酸镁侵蚀耦合作用导致水化硅酸钙等水化产物减少,碱渣掺量过高时还形成膨胀性的二水硫酸钙析出,导致固化淤泥耐久性下降;毛细浸润干湿循环与侵蚀耦合作用对固化淤泥产生严重的宏观和微观损伤。

关键词:固化淤泥;碱渣;毛细浸润;干湿循环;侵蚀作用;无侧限抗压强度;损伤

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)01-0094-10

Strength and damage of silt solidified with soda residue under coupling effect of dry-wet cycle and erosion// HE Jun, ZHU Yuanjun, LI Wenjing (School of Civil Engineering, Architectural and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to reveal the impact of the coupling effect of dry-wet cycles and erosion on the properties of solidified silt, dredged silt was solidified with soda residue, slag and carbide slag as solidifying agents. The appearance, unconfined compressive strength and damage of solidified silt were studied under the coupling effect of capillary infiltration wetting-drying cycles and erosion environments such as distilled water, seawater and magnesium sulfate, and the coupling action laws, mechanisms and optimal solidifying agent dosages were explored. The results show that the coupling effect of magnesium sulfate erosion and wetting-drying cycles results in the most serious appearance damage and the most significant reduction in strength of the specimens. Increasing the slag content can improve the durability of the solidified silt. When the slag contents are 20% and 15%, respectively, the soda residue content should not exceed 25% and 35%. The coupling effect of seawater and magnesium sulfate erosion with multiple wetting-drying cycles causes the specimens to quickly reach the damage and failure state with the increase of strain. The coupling effect of seawater erosion and wetting-drying cycles leads to the formation of more ettringite and NaCl crystals in the specimens. With the increase in the number of cycles, the NaCl crystals increase, the inhomogeneity of the specimens is enhanced, and the numbers of mesopores and macropores increase. The coupling effect of magnesium sulfate erosion and wetting-drying cycles results in the reduction of hydration products such as calcium silicate hydrate. Expansive $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ precipitates when the soda residue content is too high, leading to a decline in the durability of solidified silt. The coupling effect of capillary infiltration wetting-drying cycles and erosion causes serious macroscopic and microscopic damages to solidified silt.

Key words: solidified silt; soda residue; capillary immersion; dry-wet cycles; erosion; unconfined compressive strength; damage

河道和湖泊的定期疏浚产生了数量可观、含水率高且可能含有污染物的淤泥。目前,化学固化是

处理淤泥的常用方法^[1-3],可将废弃淤泥转化为满足工程要求的土工材料。为评价工程服役寿命,必须

基金项目:国家自然科学基金项目(41772332)

作者简介:何俊(1977—),女,教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:hjunas@163.com

对土工材料的耐久性进行研究。大量研究表明,干湿循环^[4-6]、海水及硫酸盐侵蚀^[7-10]都会极大地影响固化土的耐久性。固化淤泥受地下水位波动、潮汐变化、降雨及暴晒等影响而处于干湿交替环境,导致其耐久性出现弱化。Zhang 等^[4]发现,随干湿循环次数的增加,固化淤泥质量和密度降低,无侧限抗压强度(以下简称“强度”)先略有增加然后减小。范祥等^[5]对玄武岩纤维-石灰-火山灰固化淤泥的研究发现,强度随干湿循环次数增加明显劣化,但纤维与土的相互作用能缓解部分干湿循环造成的强度损失。海水中侵蚀性离子的长期侵蚀造成固化淤泥强度劣化,例如 Pham 等^[7]将水泥固化土浸泡在清水和海水中,发现海水盐浓度增大会加快劣化速度,水泥土桩直径减小时劣化速度增大。 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 是 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》中规定的水土腐蚀性重点评价的离子,对固化土有较强的侵蚀性。韩鹏举等^[9]将水泥固化土浸泡在不同浓度的硫酸镁中,发现试样强度随浓度增大而减小,强度与环境中离子浓度相关。He 等^[10]利用碱渣-矿渣对软土进行固化,发现清水和氯化钠溶液中浸泡试样的强度随侵蚀时间增加而增大,而硫酸镁溶液侵蚀使试样强度降低。

在实际工程中,固化淤泥可能同时遭受干湿循环与侵蚀作用,耦合作用研究逐渐受到重视。黄伟等^[11]开展了干湿循环与硫酸盐耦合作用下水泥改性膨胀土性质的试验研究,发现硫酸盐侵蚀使改性土劣化,进而造成干湿循环作用更加明显;干湿循环产生的裂隙为侵蚀溶液进入试样内部提供渠道,生成大量钙矾石晶体造成改性土开裂。徐丽娜等^[12]对硫酸钠侵蚀与干湿循环耦合作用下纤维水泥土的试验研究发现,侵蚀溶液浓度和干湿循环次数的增加使水泥土结构疏松,质量损失率和强度变化率增大,峰值及残余应力减小。李艺隆等^[13]研究了干湿循环与海水侵蚀耦合作用对胶结钙质砂的影响,发现 Mg^{2+} 可提高试样强度,但干湿循环后 Cl^- 和 Na^+ 大量残留,盐结晶不断累积形成拉应力,在 21 次循环后强度降低至初始强度的 30%。丁庆军等^[14]对干湿循环与硫酸镁侵蚀耦合作用下水泥-矿渣凝胶体微结构的试验研究发现,硫酸镁侵蚀对水化硅酸钙凝胶有脱钙和脱铝作用,干湿循环加速 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 进入浆体,从而使侵蚀破坏更加剧烈。Li 等^[15]通过干湿循环与硫酸盐侵蚀试验模拟矿井水对回填材料性质的影响,发现低浓度硫酸钠促进水合作用,而高浓度硫酸钠则生成石膏和钙矾石等侵蚀产物,并伴随有硫酸钠晶体膨胀作用造成回填材料的强度降低。

上述固化土干湿循环与侵蚀耦合试验研究多将

试样浸没于液体中,但实际工程中毛细浸润方式也是一种常见工况。当固化土在地下水位以下时,侵蚀性物质在压力渗透和浓度差作用下进入固化土,此时适合采用浸没方式;而对于地下水位以上的固化土,水和侵蚀性物质以扩散和毛细管吸收形式向上迁移,采用毛细浸润方式模拟湿循环更恰当。前期研究发现,固化淤泥在海水环境中发生干湿循环时,毛细浸润方式的湿循环比浸没方式使试样强度降低更显著,毛细浸润成为干湿循环更危险的方式,但目前对此方式研究较少,特别是不同侵蚀环境和以废弃物为固化剂时固化淤泥的毛细浸润干湿循环耐久性、干湿循环与侵蚀耦合作用的机理还缺乏系统研究。本文以地下水位界面处的固化土为研究对象,针对氨碱法制碱过程中产生的废弃物(碱渣)作为固化剂的资源化利用,采用碱渣、矿渣和电石渣作为固化剂(以此为固化剂的固化淤泥简称为“碱渣固化淤泥”),开展毛细浸润干湿循环与不同侵蚀环境耦合模拟试验。

1 试验材料与方案

试验用土为武汉巡司河疏浚淤泥,颜色为灰黑色,含水率为 160%~180%,液限和塑限分别为 55%和 38.7%,黏粒、粉粒和细砂质量分数分别为 14.4%、76.9%和 8.7%,为流塑状态高液限黏土。淤泥主要矿物为石英、白云母和伊利石。所用固化剂为碱渣、矿渣和电石渣,其中矿渣为胶凝材料,主要矿物为硅酸钙和碳酸钙;碱渣和电石渣用于激发矿渣的活性,碱渣的主要矿物为碳酸钙、二水硫酸钙和氯化钠,电石渣的主要矿物为氢氧化钙^[16]。

试验时先将淤泥干燥并研磨过 2 mm 筛后,加水至设定含水率 70%;将固化剂经 60℃烘干并过 1 mm 筛后与淤泥充分搅拌,密封静置 24 h 后制样。在内径 3.9 cm、高度 8 cm 的模具内壁均匀涂抹凡士林,然后将混合料分 3 层装入模具,采用分层击实法制样,排出混合料中的空气,对每层刮毛处理后加入另一层混合料。制样击实功与标准轻型击实试验击实功相同。将试样放入温度(20±2)℃、湿度(98±1)%的标准养护箱中养护至预设龄期。一部分试样用于测试试样强度,采用 YSH-2 型无侧限抗压仪(变形速率为 1 mm/min)测试;另一部分试样用于开展毛细浸润干湿循环与侵蚀耦合试验。

耦合试验时,将试样放入温度为(60±5)℃烘箱干燥 24 h;然后在烧杯底部从下向上依次放入透水石、滤纸和试样,向烧杯中轻轻注入侵蚀溶液,直至液面浸润试样底部以上 3 cm,用保鲜膜密封烧杯后放入温度(20±2)℃、湿度 40%的养护箱中浸润

24 h,完成 1 次干湿循环^[15]。重复干湿循环过程,观察试样表面形态并称量质量,达到设定循环次数后测定试样强度。

核磁共振试验时,将混合土分 2 层装入内径 1.8 cm、高 3 cm 的亚克力模具中击实,将标准养护箱内养护 28 d 的试样放入温度为(60±5)℃烘箱干燥 1 h,再放在底部放置透水石和滤纸的烧杯并注入侵蚀溶液至试样 1/3 高度处浸润 12 h,完成 1 次干湿循环。由于核磁共振测试时试样尺寸较小,其干湿循环过程与前述干湿循环过程略有不同。将完成干湿循环后的试样装入核磁共振仪(MicroM12-025VR)试样管中测试,反演得到弛豫时间分布曲线。X 射线衍射(XRD)试验时,取强度试验后的试块,在 60℃烘箱中烘干后研磨过 0.075 mm 筛,采用 CuK α 辐射为 0.154 nm 的 BrukerD8Advance 系统进行 XRD 测试,扫描速度为 5°/min,扫描范围为 5°~75°。

干湿循环与侵蚀耦合试验方案见表 1,其中固化剂掺量定义为固化剂与干土质量比。参考 He 等^[10,16]及预试验结果,矿渣掺量选为 15% 和 20%,电石渣设为矿渣掺量的 40% 以达到较好的激发效果;为更多消纳和利用碱渣,其掺量选为 20%~45%。设置蒸馏水、海水和硫酸镁(MgSO₄)溶液等 3 种浸润环境。海水由质量分数为 3.5% 的海水素配制,用以模拟天然海水,其 pH 值介于 7.8~8.5 之间。硫酸盐质量分数大于或等于 1% 时为强腐蚀性(GB/T 50046—2018《工业建筑防腐设计标准》),故选用 1% 硫酸镁溶液。蒸馏水用于与侵蚀环境对比。由于前几次干湿循环对耐久性的影响显著而

表 1 干湿循环与侵蚀耦合试验方案

试样编号	固化剂掺量/%			毛细浸润环境
	碱渣	矿渣	电石渣	
S20G20	20	20	8	硫酸镁
S25G20	25	20	8	蒸馏水,海水,硫酸镁
S30G20	30	20	8	硫酸镁
S35G15	35	15	6	蒸馏水,海水,硫酸镁
S40G15	40	15	6	硫酸镁
S45G15	45	15	6	蒸馏水,海水,硫酸镁

后续干湿循环影响较小^[5],本文在试样养护 28 d 后开展 0~7 次干湿循环试验。

2 试验结果和分析

2.1 外观劣化特征

图 1 为干湿循环与侵蚀耦合作用下部分试样的外观(各分图中从左至右分别为循环 1、3、5、7 次的试样)。对比不同环境可知:在蒸馏水环境中,试样 S25G20 表面相对光滑和完整,但循环次数的增加导致 S35G15 和 S45G15 表面逐渐变得粗糙,出现微裂纹和孔洞等细微缺陷,其中试样 S45G15 破损更严重。在海水环境中,试样上部表面有少量盐渍析出,试样 S25G20 仍完整光滑;试样 S35G15 和 S45G15 破损比蒸馏水环境中严重,试样 S35G15 从第 5 次循环开始顶部松散并发生膨胀,底部逐渐被侵蚀、剥落,试样 S45G15 顶部出现较长裂隙,底部发生大面积脱落。相对于蒸馏水和海水环境,硫酸镁环境对试样的侵蚀和劣化最严重,试样 S25G20 底部浸泡区从第 3 次循环开始出现表层起皮鼓胀,液面以上发生膨胀,而试样 S35G15 和 S45G15 底部浸泡区侵蚀非常严重,试样 S45G15 在第 3 次循环以后出现分层断裂、强度丧失。另外,试样 S45G15 在分层击实界面处也有明显破损,虽然制样时在界面处刮毛处理,但仍为试样的薄弱部位,该部位在干湿循环过程中更易被侵蚀劣化。

对比硫酸镁环境下不同掺量试样可知:当矿渣掺量为 20%、碱渣掺量从 20% 增至 30% 时,随着循环次数的增加,试样上下不均匀现象逐渐显现,例如试样 S30G20 在第 7 次循环后中部明显膨胀,下部直径最小,但整体完整性强于矿渣掺量为 15% 的试样;当矿渣掺量为 15%、碱渣掺量增大时,试样 S40G15 完整性较好,但中部膨胀最明显,而试样 S45G15 外表破损非常严重。这表明,矿渣作为主要胶凝材料,其掺量增加对提高干湿循环与侵蚀耦合作用下固化淤泥耐久性的效果显著,而碱渣掺量不宜过大。

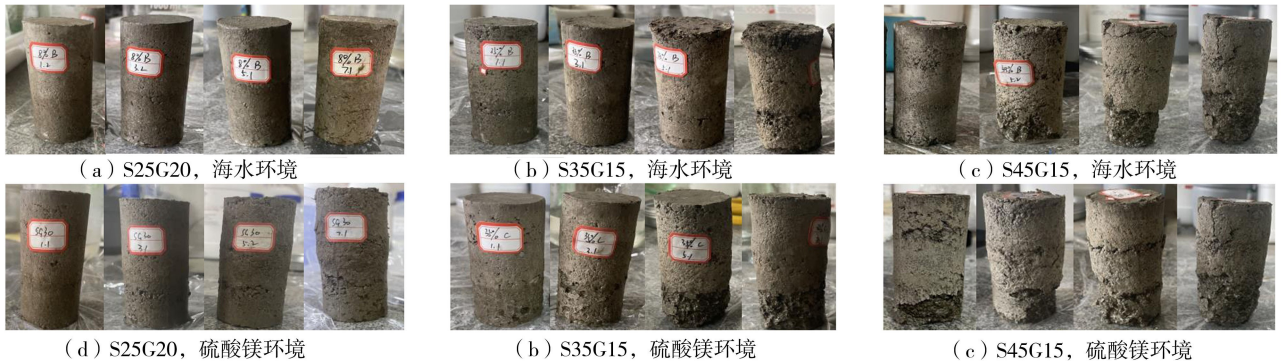


图 1 干湿循环与侵蚀耦合作用下部分试样的外观

2.2 质量损失率

图2为试样质量损失率与干湿循环次数的关系,其中质量损失率为循环前后质量之差与循环前质量的比值,正值表示循环后试样质量减小,反之则表示试样质量增大。由于试样S45G15在海水和硫酸镁环境中5次或3次循环后断裂,图中只给出断裂前的结果。在3种环境下,第1次循环后试样S25G20和S35G15的质量损失率有不同程度的增大,随着循环次数的增加,试样质量损失率逐渐减小,7次循环时质量损失率均为负值。结合图1可发现,这些试样虽然在浸泡区有破损和脱落,但质量损失不大,而液面以上区域内试样吸水膨胀导致多次循环后质量增大。与试样S25G20和S35G15不同,试样S45G15在第1次循环后质量损失率即显著减小,在多次循环过程中始终为负值。虽然该试样有破损,但循环后造成试样膨胀、松散,浸润时吸入大量水,导致其质量大于循环前的质量。另外,循环次数为7时,试样S25G20和S35G15在海水环境下质量损失率均有所增大,表明循环次数达到7次时试样质量减小,这可能与海水环境下多次循环试样发生较严重的破损有关;3种环境下试样质量损失率有一定波动和误差,但多次循环后硫酸镁环境下试样质量损失率最小,即硫酸镁环境与干湿循环耦合作用使试样最为松散、质量增大最明显。

对比硫酸镁环境下不同掺量试样的质量损失率(图2(d))可知,除试样S20G20、S25G20和S35G15表现出第1次循环后质量损失率有不同程度的增大、然后逐渐减小以外,其他试样的质量损失率都随

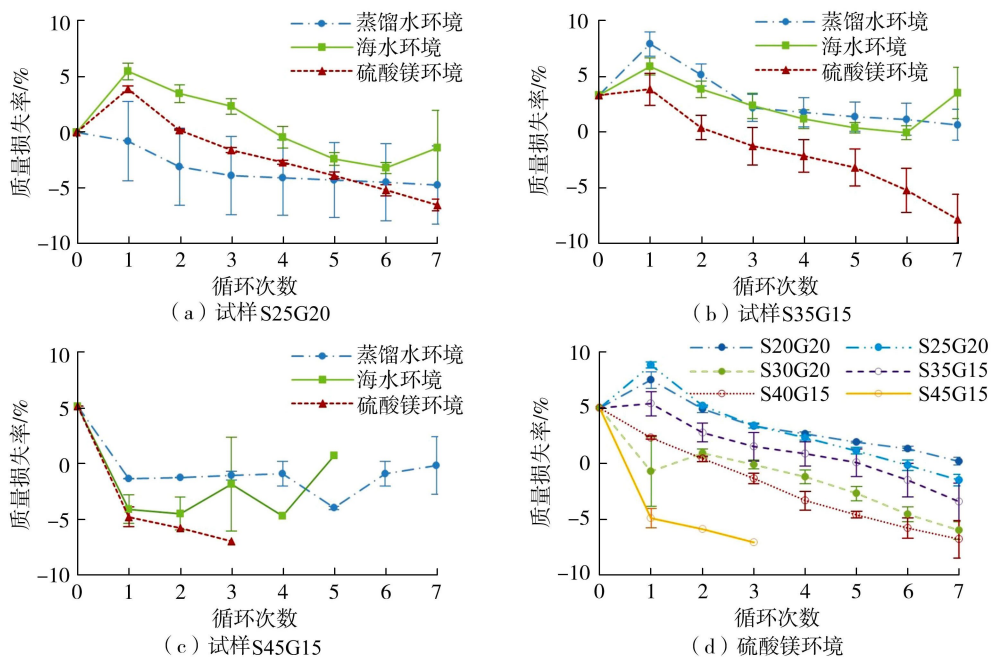


图2 侵蚀环境和固化剂掺量对质量损失率的影响

循环次数的增加而减小。虽然试样S20G20在循环次数较少时质量损失率略低于试样S25G20,但总体上看,当矿渣掺量固定时质量损失率随碱渣掺量的增大而减小,即碱渣掺量越大则试样质量增大越明显。

第1次循环后试样损失率的增大(或试样质量减小)发生在试样完整性好的情况下,其原因在于这些试样初始强度较高、致密性较好,经历第1次干燥失水质量减小,浸润吸水时吸入的水量有限,故其质量小于循环前试样的质量。质量损失率随循环次数的增加而减小,这是由于试样在干湿循环与侵蚀耦合作用下,试样变得松散、孔隙增大,浸润过程中毛细吸水量增大,造成试样质量逐渐增大。

2.3 应力-应变曲线和强度

图3为试样代表性应力-应变曲线。在3种环境下的7次循环过程中,试样S25G20破坏应变为1%~3%;从趋势上看,与蒸馏水环境相比,含有侵蚀性离子浸润环境下峰值较低,破坏应变有所增大,且这种现象在多次循环后表现较明显。这表明多次干湿循环与侵蚀的耦合作用造成强度降低、塑性增强。其他试样(如试样S45G15)也有类似的应力-应变特征。

图4为不同侵蚀环境下的试样强度。在蒸馏水环境下,试样强度随循环次数的增加而减小,且第1次循环使强度降低显著;在海水和硫酸镁环境下,相同循环次数时,试样强度均小于蒸馏水环境,即干湿循环与侵蚀的耦合作用造成强度进一步降低。当固化剂掺量一定时,虽然试样强度有所波动,但总体

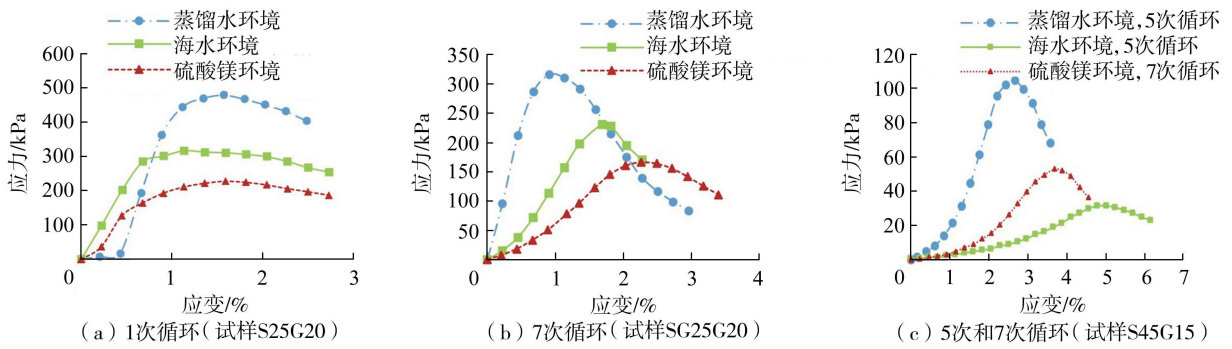


图3 试样代表性应力-应变曲线

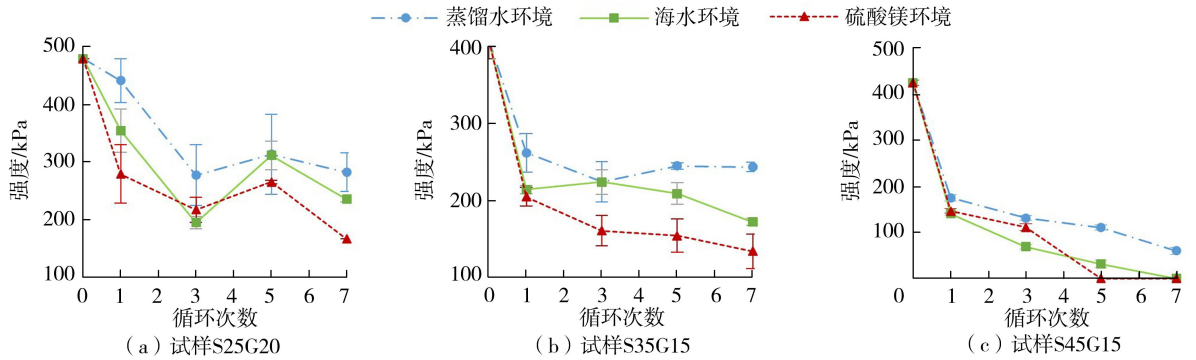


图4 不同侵蚀环境下的试样强度

上干湿循环与硫酸镁侵蚀耦合作用使强度降低更显著。例如,试样 S45G15 在蒸馏水、海水和硫酸镁环境下经历第 1 次循环后强度分别为循环前强度的 41.1%、33.2%和 34.4%,1 次循环造成强度大幅下降,海水和硫酸镁环境下强度下降更多;第 7 次循环后蒸馏水环境下强度为 63.4 kPa,为循环前强度的 14.2%,而海水和硫酸镁环境下试样分别于第 7 次和第 5 次循环时发生断裂、强度丧失。

图 5 为硫酸镁环境下不同固化剂掺量的试样强度。当矿渣掺量为 20%时,循环前试样强度随碱渣掺量的增加而增大;试样 S30G20 的强度随循环次数的增加而显著降低,试样 S20G20 和 S25G20 的强度下降速度则较慢,表明其抗耦合作用劣化的能力强于试样 S30G20,与图 1 中试样外观劣化规律一致。当矿渣掺量为 15%时,循环前不同碱渣掺量试样强度相差不大,碱渣掺量从 35%增至 45%时强度从 408.1 kPa 增至 425.6 kPa;试样 S35G15 的强度随循环次数的增加降低最少,第 7 次循环后强度为循环前强度的 32.9%;其次为试样 S40G15,第 7 次循环后强度为循环前强度的 6.4%;耦合作用对试样 S45G15 的强度影响最大,从第 5 次循环开始试样强度丧失。当矿渣掺量一定而碱渣掺量过大时试样耐久性降低,这是由于碱渣中存在较多的 SO_4^{2-} 生成膨胀性水化产物钙矾石^[17],在干湿循环与侵蚀耦合作用下可能导致水化产物发生转化、强度减小。综合外观和强度来看,当矿渣掺量为 20%时,碱渣

掺量不宜超过 25%;当矿渣掺量为 15%时,碱渣掺量不宜超过 35%。

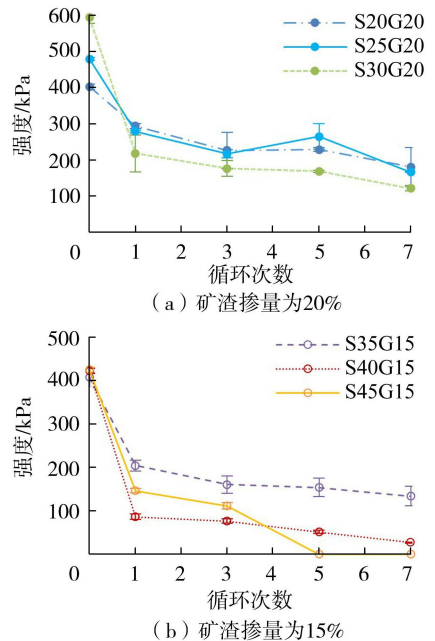


图5 硫酸镁环境下的试样强度

2.4 干湿循环与侵蚀耦合作用损伤

干湿循环与侵蚀耦合作用造成固化土性质的改变,可以用损伤进行分析^[17-19]。借鉴冻融与荷载耦合作用引起岩土材料损伤的研究^[20],以标准养护 28 d(即干湿循环前)作为第 1 种损伤状态,耦合作用后受荷作为第 2 种损伤状态,得到固化土干湿循环与侵蚀耦合作用和受荷损伤变量 D 的表达式^[20]:

$$D = 1 - \frac{E'}{E_{28}} \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^m \right] \quad (1)$$

其中 $m = 1/\ln(E'\varepsilon_f/\sigma_f)$

式中： ε 为应变； E_{28} 为标准养护 28 d 固化土的弹性模量； m 为表征材料损伤演化特征的材料参数； E' 、 ε_f 、 σ_f 分别为耦合作用后试样的弹性模量、破坏应变和强度。式(1)所示损伤变量综合考虑了试样强度、脆性或塑性特征（破坏应变）和抵抗变形能力（弹性模量）等对损伤的影响。

当应变为 0 时，即仅有干湿循环与侵蚀耦合作用损伤(D_0)，则有：

$$D_0 = 1 - E'/E_{28} \quad (2)$$

不同矿渣掺量时最优碱渣掺量试样（即 S25G20 和 S35G15）的 D 与 ε 的关系见图 6。在蒸馏水环境下经历 1 次循环后，受荷初期试样孔隙和微裂纹等缺陷被压实闭合，表现为压密阶段， D 随 ε 的变化较为平缓；之后孔隙和微裂纹不断发展演化，损伤加速，直至 D 变化又趋于平缓，出现宏观裂纹而破坏。在侵蚀环境或多次循环后， D 在受荷初期即迅速增大，其原因在于试样劣化较严重，在较小荷载作用下

即出现孔隙和微裂纹逐渐扩展、损伤加剧。总体来看， D - ε 曲线随循环次数的增加而逐渐上升，干湿循环与侵蚀耦合作用和受荷损伤程度逐渐增大。海水环境下 S35G15 第 7 次循环、硫酸镁环境下 S25G20 和 S35G15 第 7 次循环时， D 迅速达到 0.97 以上，试样很快达到损伤破坏状态。

不同环境下 D_0 与循环次数的关系见图 7。 D_0 随循环次数的增加而增大，试样损伤逐渐加深；总体来看， D_0 在硫酸镁环境下最大，海水环境下次之，蒸馏水环境下最小。试样 S25G20 在侵蚀环境与蒸馏水环境下 D_0 的差异较大，其原因在于试样 S25G20 在蒸馏水环境下干湿循环造成的损伤较弱，相对而言侵蚀环境造成的损伤较显著；而 S35G15 在蒸馏水环境下干湿循环已造成较大损伤，侵蚀环境的影响相对于蒸馏水环境的差异性略小。虽然与蒸馏水环境相比，海水环境下试样 S25G20 在外观上没有明显变化（图 1），但从损伤变量来看，试样内部或微观尺度上可能发生损伤，需从矿物成分和孔隙分布等微观特征来分析。试样 S35G15 经 7 次循环后海水环境下损伤变量大于硫酸镁环境，是由于海水环

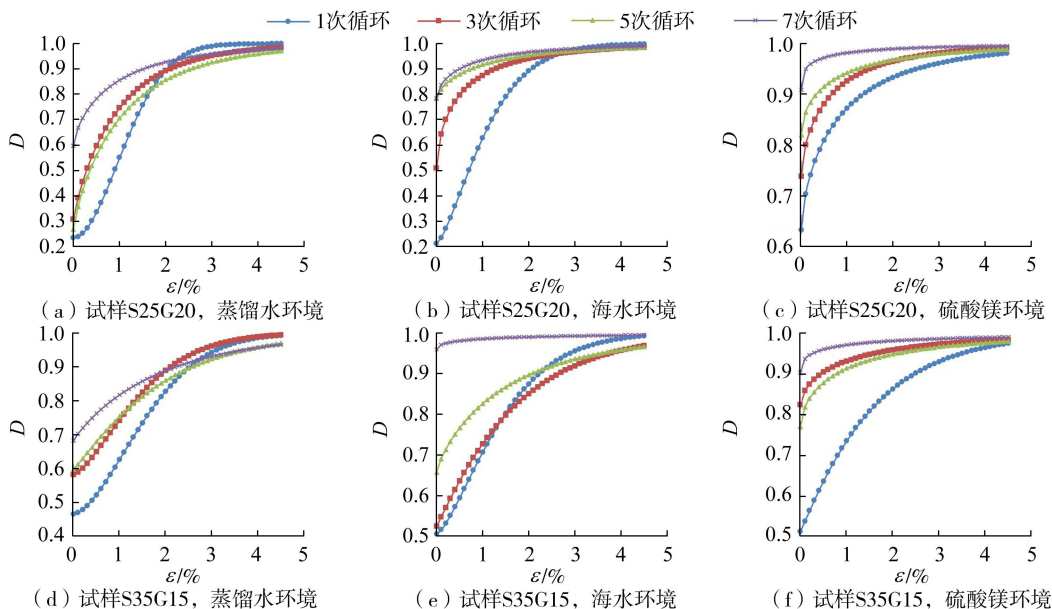


图 6 损伤变量 D 与应变的关系

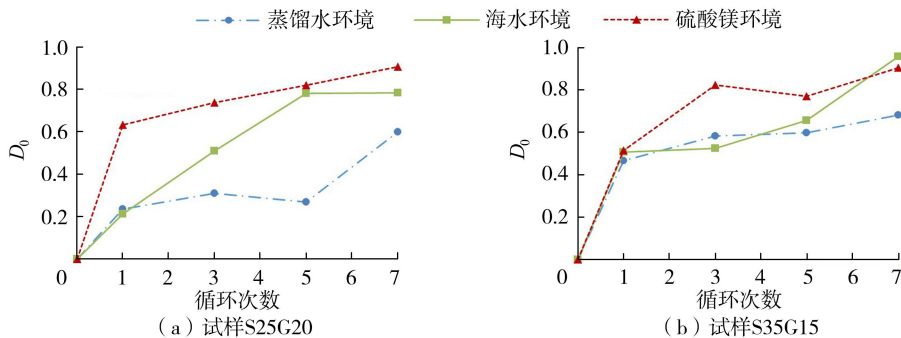


图 7 损失变量 D_0 与循环次数的关系

境下试样上部膨胀显著,造成其抵抗变形能力降低和损伤变量增大。

2.5 干湿循环与侵蚀耦合作用的劣化机理

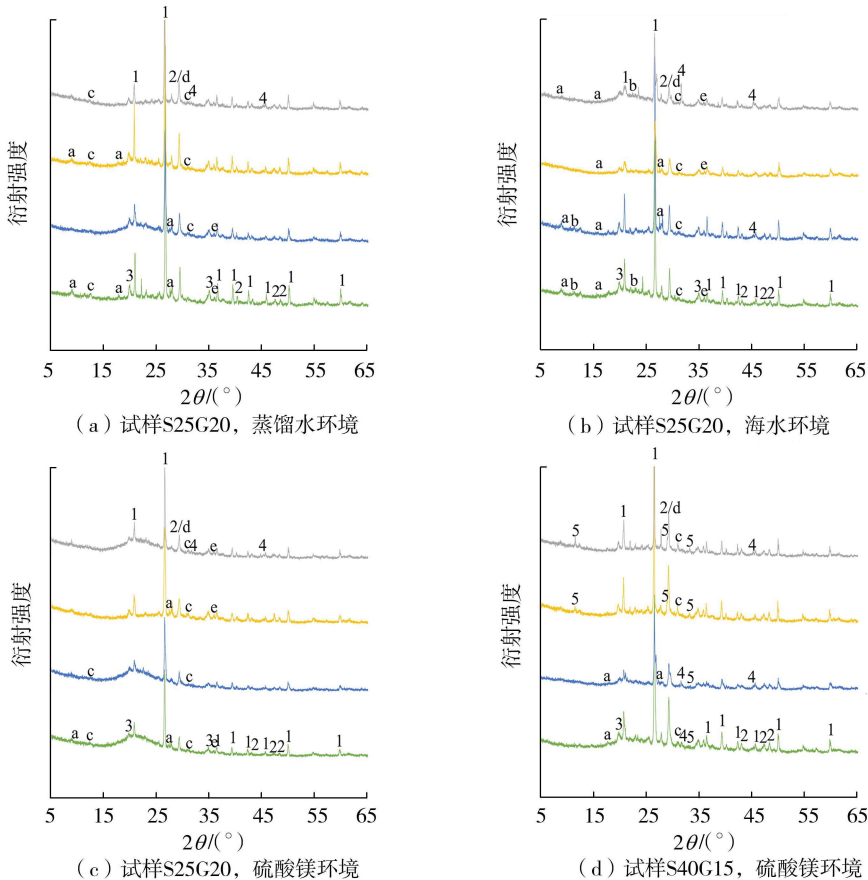
图8为不同环境和固化剂掺量试样的XRD图谱,测试时将试样平均分为上中下三部分,图中展示了上部和下部试块的结果。试样中除来源于淤泥和固化剂的石英、碳酸钙和白云母或伊利石外,还检测到水化铝酸钙(CAH)、水化硅酸钙(CSH)和水化硅酸铝钙(CASH)等,这些矿物在固化淤泥中起到胶结、填充进而增加强度的作用。其中,碱渣和电石渣提供的碱性环境为矿渣的溶解、 Ca^{2+} 与碱性溶液中离子的反应提供了条件^[21]。试样S25G20处于蒸馏水环境时,碱渣中 SO_4^{2-} 促进了钙矾石的生成,下部试块中检测出钙矾石;当循环次数由1次增至7次时,钙矾石衍射峰有所减弱,表明随着循环次数的增加钙矾石转化为其他物质。试样S25G20处于海水环境时,在海水中 Cl^- 的作用下造成试样中有明显的水化铝酸钙衍射峰;由于海水中也存在 SO_4^{2-} ,试样中钙矾石衍射峰较蒸馏水环境中增强,生成的钙矾石造成体积膨胀,对微观结构产生不利影响;CSH等水化产物比蒸馏水环境下有所降低,这是由于侵蚀性离子对水化产物有分解作用^[22],干湿循环

过程为部分含钙产物提供水解条件^[23];另外,试样上部检测出氯化钠,且随循环次数的增加而显著增多,表明毛细浸润方式下海水中氯化钠向上迁移,盐结晶造成试样损伤,从而导致强度降低、损伤加剧。硫酸镁环境下的试样S25G20经多次循环后上部检测出氯化钠衍射峰,表明碱渣中氯化钠向上迁移,可能对微观结构产生不利影响;更重要的是,硫酸镁环境下CSH等胶结能力较强的水化产物的衍射峰减弱,表明CSH发生转化,例如 Mg^{2+} 可能与CSH发生反应,替换其中的钙而生成胶凝性极差的水化硅酸镁(MSH)等物质^[9,15],造成硫酸镁环境下试样破损、强度大幅降低。

与硫酸镁环境下试样S25G20相比,S40G15中CASH等胶结能力较强物质的衍射峰减弱;多次循环后试样中有明显的二水硫酸钙衍射峰,且上部衍射峰强于下部,表明硫酸镁溶液中的 SO_4^{2-} 与试样中 Ca^{2+} 的结合形成具有膨胀性的石膏,从而表现出较差的干湿循环与侵蚀耦合作用耐久性。

试样经历1次循环后质量损失率、强度和损伤变量发生显著变化,故对1次循环后试样的核磁共振测试结果进行分析(图9)。由图9可见,试样孔隙均呈三峰分布,从左至右的最高峰、次高峰和低谷

— 1次循环(下部试块) — 1次循环(上部试块) — 7次循环(下部试块) — 7次循环(上部试块)



1—石英; 2—碳酸钙; 3—白云母或伊利石; 4—氯化钠; 5—二水硫酸钙; a—钙矾石; b—水化铝酸钙; c—CAH; d—CSH; e—CASH。

图8 不同环境和固化剂掺量试样的XRD图谱

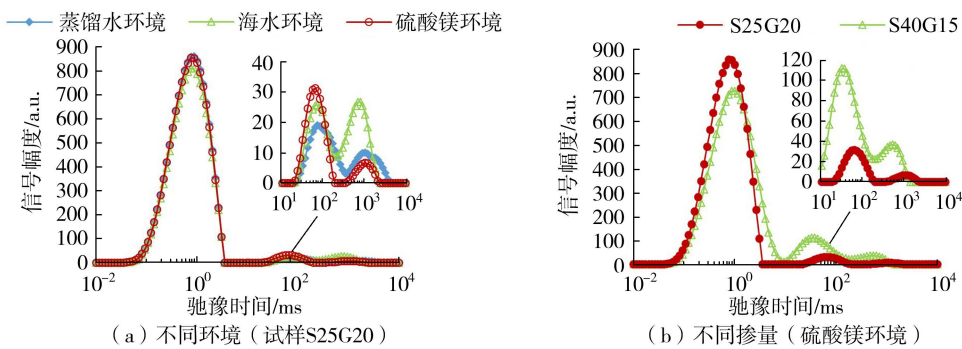


图9 1次循环后试样的弛豫时间分布曲线

分别对应小孔、中孔和大孔分布。对于试样 S25G20,当环境由蒸馏水变为海水时,最高峰有所下降,而次高峰和低峰均升高,表明海水与1次循环的耦合作用使小孔数量减少、中孔和大孔数量增多。其主要原因在于钙矾石和氯化钠结晶使微观结构变得疏松。当环境由蒸馏水变为硫酸镁时,最高峰变化微弱,低峰有所下降,而次高峰升高,表明硫酸镁侵蚀环境与1次循环的耦合作用主要导致中孔数量增多,且大孔数量比海水环境有明显减少。其原因在于硫酸镁环境下 CSH 转化胶凝性极差的 MSH 等物质,颗粒间胶结力显著减小,但仍填充于孔隙中,因此大孔隙变化不明显;而海水环境中生成大量钙矾石和氯化钠结晶,产生较大的膨胀力,导致结构变得疏松,引起大孔数量增多。

与试样 S25G20 相比,试样 S40G15 在硫酸镁环境下经历1次循环后小孔数量明显减少、中孔和大孔数量明显增多,且最高峰有向右移动的趋势,表明 S40G15 孔隙多且孔径大、结构疏松。其原因在于试样 S40G15 中矿渣掺量较低,生成的胶结力较强的 CASH 等水化产物较少,而且碱渣掺量较高导致二水硫酸钙、氯化钠等盐结晶较多,从而产生大量的中孔和大孔。

当固化剂掺量适当时,试样经 28 d 标准养护后,颗粒之间的联结力强、结构致密,宏观力学性质表现良好。在经历1次循环后,干燥过程中水分从试样内部向外部迁移,试样有收缩趋势;随后毛细浸润过程中在基质吸力的作用下水分从试样下部向上部迁移,在侧面和顶部发生蒸发,水带着侵蚀性离子向上迁移,由此产生化学侵蚀和物理侵蚀效应。在化学侵蚀方面, SO_4^{2-} 促进钙矾石等膨胀性水化产物的生成;当有 Mg^{2+} 时还发生脱钙作用,使 CSH 等胶结力较强的水化产物转变为胶结力很弱的 MSH 等物质。在物理侵蚀方面,浸润溶液及废弃物固化剂中的氯化钠、二水硫酸钙盐结晶在试样侧面和顶部聚集。两类侵蚀效应的作用引起试样不均匀膨胀、产生不均匀膨胀应力,颗粒间联结力减弱,中孔和大

孔增多,导致试样强度急剧减小、损伤变量急剧增大。随着循环次数的继续增加,颗粒间的胶结物不断发生转化,盐结晶数量增多,试样经历多次干燥收缩和不均匀吸水膨胀,化学侵蚀和物理侵蚀不断加剧,使原有小孔向中孔和大孔转化并产生裂隙,最终试样强度逐渐下降。

当利用废弃物作为淤泥固化剂时,不仅要考虑浸润环境引起的外部侵蚀作用,还需考虑废弃物可能带来的内部侵蚀。例如,由于碱渣中存在较多的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等离子,若其掺量过大,则可能在没有外部侵蚀作用但发生多次循环时即有氯化钠结晶,且生成的钙矾石发生转化(图 8(a)),导致其抗干湿循环耐久性变差,因此需控制固化剂中碱渣的掺量。另外,在研究侵蚀环境下固化淤泥干湿循环耐久性时,除浸没湿循环外,毛细浸润湿循环是不容忽略的,因为毛细浸润方式下干湿循环与侵蚀耦合作用导致试样在宏观(外观)和微观(矿物成分)上均产生强烈的不均匀性,从而对固化淤泥的耐久性产生严重影响。

3 结论

a. 在蒸馏水、海水、硫酸镁环境下,干湿循环与硫酸镁侵蚀耦合作用造成的试样外观破损最严重、质量增大和强度降低最明显。经历1次循环后,试样强度显著降低,随循环次数的增大,强度缓慢减小。矿渣掺量的增加有助于提高干湿循环与侵蚀耦合作用下固化淤泥的耐久性,但碱渣掺量不宜过大,否则碱渣中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等带来的内部侵蚀与外部侵蚀会共同导致耐久性变差。当矿渣掺量为 20% 时,碱渣不宜超过 25%;当矿渣掺量为 15% 时,碱渣不宜超过 35%。

b. 结合破坏应变、弹性模量和强度所得的损伤变量分析发现,除蒸馏水环境、1次循环后试样在低应变时存在压密阶段而表现为损伤变量随应变变化平缓以外,其他环境或多次循环时损伤变量均随应变迅速增大至接近于 1,侵蚀环境与多次循环的耦合作用导致试样迅速达到损伤破坏状态。

c. 与蒸馏水环境相比,干湿循环与海水侵蚀耦合作用导致试样中生成较多钙矾石和氯化钠结晶,并随循环次数的增加氯化钠结晶增多、试样的上下不均匀性增强,中孔和大孔增多,导致其在干湿循环与侵蚀耦合作用下发生劣化;干湿循环与硫酸镁侵蚀耦合作用导致中孔增多、CSH 等水化产物减少并可能生成膨胀性二水硫酸钙,固化淤泥的强度大幅降低。地下水位附近毛细吸水方式下的干湿循环与地下水中侵蚀性离子的耦合作用会对固化淤泥产生严重的宏观和微观损伤。

参考文献:

[1] 章荣军,董超强,郑俊杰,等. 絮凝剂和缓凝剂对水泥固化疏浚淤泥浆效率的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (10): 1928-1935. (ZHANG Rongjun, DONG Chaoqiang, ZHENG Junjie, et al. Influences of flocculant and retarder on solidification efficiency of cement in treatment of dredged mud slurry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (10): 1928-1935. (in Chinese))

[2] 祝琨,李长明,狄龙飞,等. 黄河淤泥固化改性材料力学性能与微观结构试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (1): 99-103. (ZHU Jun, LI Changming, DI Longfei, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructures of modified Yellow River sludge materials[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (1): 99-103. (in Chinese))

[3] 谭鹏,谢振文,邓奇春,等. 复合固化高液限土的力学及水稳性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (5): 1298-1308. (TAN Peng, XIE Zhenwen, DENG Qichun, et al. Mechanics and water stability of composite solidified soil with high liquid limit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (5): 1298-1308. (in Chinese))

[4] ZHANG Xichen, FANG Xiangwei, LIU Jindong, et al. Durability of solidified sludge with composite rapid soil stabilizer under wetting-drying cycles[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01374.

[5] 范祥,吉恒港,蒋少武,等. 玄武岩纤维-石灰-火山灰联合固化淤泥的强度特性[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (12): 4613-4624. (FAN Xiang, JI Henggang, JIANG Shaowu, et al. Strength characteristics of solidified silt using combination method of basalt fiber-lime-volcanic ash [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20 (12): 4613-4624. (in Chinese))

[6] KAMEI T, AHMED A, UGAI K. Durability of soft clay soil stabilized with recycled bassanite and furnace cement mixtures[J]. Soils and Foundations, 2013, 53 (1): 155-165.

[7] PHAM V N, TURNER B, HUANG J, et al. Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas[J]. Soils

and Foundations, 2017, 57 (4): 645-654.

[8] 吴燕开,史可健,胡晓士,等. 海水侵蚀下钢渣粉+水泥固化土强度劣化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (6): 1014-1022. (WU Yankai, SHI Kejian, HU Xiaoshi, et al. Experimental study on strength degradation of steel slag + cement-solidified soil under seawater erosion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (6): 1014-1022. (in Chinese))

[9] 韩鹏举,白晓红,赵永强,等. Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 相互影响对水泥土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (1): 72-76. (HAN Pengju, BAI Xiaohong, ZHAO Yongqiang, et al. Experimental study on strength of cement soil under Mg^{2+} and SO_4^{2-} interaction influence [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (1): 72-76. (in Chinese))

[10] HE Jun, LI Zhixiang, WANG Xiaoqi, et al. Durability of soft soil treated with soda residue and ground granulated blast furnace slag in a soaking environment[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (3): 06019018.

[11] 黄伟,汪时机,程明书,等. 水泥改性膨胀土在侵蚀环境下的干湿循环效应研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (2): 649-659. (HUANG Wei, WANG Shiji, CHENG Mingshu, et al. Effect of dry wet cycle on cement modified expansive soil under erosion environment [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37 (2): 649-659. (in Chinese))

[12] 徐丽娜,邓皓允,牛雷,等. 盐干-湿循环作用下低温养护纤维水泥土的力学性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44 (1): 10-19. (XU Lina, DENG Haoyun, NIU Lei, et al. Experimental study on mechanical properties of fiber-reinforced cemented soil with the low temperature curing condition subjected to effect of salt and drying wetting cycles [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44 (1): 10-19. (in Chinese))

[13] 李艺隆,国振,徐强,等. 海水环境下 MICP 胶结钙质砂干湿循环试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56 (9): 1740-1749. (LI Yilong, GUO Zheng, XU Qiang, et al. Experimental research on wet-dry cycle of MICP cemented calcareous sand in seawater environment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56 (9): 1740-1749. (in Chinese))

[14] 丁庆军,叶强,刘凯,等. 干湿循环条件下 $MgSO_4$ 侵蚀对水泥-矿渣胶凝浆体微结构的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2019, 41 (7): 34-42. (DING Qingjun, YE Qiang, LIU Kai, et al. Effect of $MgSO_4$ attack on the microstructure of cement-slag cementitious pastes under dry-wet cycle [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2019, 41 (7): 34-42. (in Chinese))

[15] LI Kexin, LI Xilin, DU Chuanyang, et al. Experimental study on microstructure and erosion mechanisms of solid

- waste cemented paste backfill under the combined action of dry-wet cycles and sulphate erosion [J]. *Materials*, 2022, 15(4):1484.
- [16] 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.
- [17] YU Yuzhen, PU Jialiu, UGAI K. A damage model for soil-cement mixture [J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(3):1-12.
- [18] CHEN Huie, CHEN Zongfang, ZHENG Chuangfen, et al. Damage evolution process of cement-stabilized soil based on deformation and microstructure analysis [J]. *Marine Georesources and Geotechnology*, 2018, 36(1):64-71.
- [19] GENG Kaiqiang, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Damage evolution, brittleness and solidification mechanism of cement soil and alkali-activated slag soil [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25:6039-6060.
- [20] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(11): 2307-2315. (LI Xiping, LU Yani, WANG Yangjun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11):2307-2315. (in Chinese))
- [21] LUO Zhengdong, ZHANG Benben, ZOU Jian, et al. Sulfate erosion resistance of slag-fly ash based geopolymer stabilized soft soil under semi-immersion condition [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01506.
- [22] 万志辉, 戴国亮, 龚维明, 等. 海水侵蚀环境对钙质砂水泥石强度影响及微观结构研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊1):65-69. (WAN Zhihui, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. Strength and microstructure of calcareous sand-cemented soil under seawater erosion environment [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Sup1):65-69. (in Chinese))
- [23] HE Rui, ZHENG Suining, GAN V J L, et al. Damage mechanism and interfacial transition zone characteristics of concrete under sulfate erosion and dry-wet cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255:119340. (收稿日期:2024-01-12 编辑:熊水斌)

.....

(上接第 86 页)

- [22] 龚艳冰. 基于正态云组合赋权的水资源配置方案综合评价方法 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(2):56-61. (GONG Yanbing. Comprehensive evaluation method of water resource allocation schemes based on normal cloud combination weighting [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2):56-61. (in Chinese))
- [23] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(5):80-86. (WANG Fuqiang, YING Zhuohui, LYU Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5):80-86. (in Chinese))
- [24] 陶洁, 王沛霖, 王辉, 等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(6):111-119. (TAO Jie, WANG Peilin, WANG Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in henan section of Yangtze River to Huaihe River water diversion project based on A-NSGA-III algorithm [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(6):111-119. (in Chinese))
- [25] 黄显峰, 王宁, 刘志佳, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度 [J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):51-58. (in Chinese))
- [26] 官诚举, 李伟伟, 郭亚军. 群体评价中的序关系分析法 [J]. *运筹与管理*, 2020, 29(11):152-156. (GONG Chengju, LI Weiwei, GUO Yajun. Rank correlation analysis method in group evaluation [J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(11):152-156. (in Chinese))
- [27] 刘晶, 许月萍, 郭玉雪, 等. 考虑再生水的多种组合情景需水预测及供需平衡分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(3):39-47. (LIU Jing, XU Yueping, GUO Yuxue, et al. Water demand prediction and supply and demand balance analysis of multiple combination scenarios considering the use of reclaimed water [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3):39-47. (in Chinese))
- [28] 方国华, 赵文萃, 李鑫, 等. 南水北调东线工程江苏段水资源调配研究 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4):1-8. (FANG Guohua, ZHAO Wencui, LI Xin, et al. Study on water resources dispatching and allocation in Jiangsu Section of Eastern Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4):1-8. (in Chinese))
- [29] TIAN Ye, CHENG Ran, ZHANG Xingyi, et al. PlatEMO: a MATLAB platform for evolutionary multi-objective optimization [J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2017, 12(4):73-87. (收稿日期:2023-10-24 编辑:骆超)