

水泥混掺粉土改性风积沙冻融特性分析

赵昊宇¹,田正宏¹,许健²,鲁洋¹,巩转定³,李佳杰¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 甘肃农业大学 水利水电工程学院 甘肃 兰州 730070;
3. 甘肃水利工程地质建设责任有限公司 甘肃 兰州 730000)

摘要:为探究水泥混掺粉土改性风积沙冻融特性,开展了常规5%水泥掺量与不同含量粉土混掺条件下改性风积沙冻融循环试验,研究冻融条件下其强度衰减与质量体积变化规律。结果表明:经过2次冻融循环,改良风积沙抗压强度及峰值应变与粉土掺量呈正相关关系;随冻融循环次数增加,高粉土掺量与低粉土掺量改良风积沙抗压和抗破坏变形能力下降均较明显;15%粉土掺量改良风积沙结构稳定性最强;随冻融次数增加,单掺水泥与粉土水泥混掺的风积沙体积变化率均呈现下降趋势,但5%水泥+15%粉土掺量下降幅度最低,而单掺5%水泥改良风积沙质量损失率呈线性增加规律;采用强度衰减系数可更加直观有效地反映此类改良风积沙土冻融后的土体强度变化规律。

关键词:冻融循环;改性风积沙;结构稳定性;质量体积变化率;强度衰减系数

中图分类号:TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0107-07

Analysis on freeze-thaw properties of aeolian sands improved by cement-silt mixtures//ZHAO Haoyu¹, TIAN Zhenghong¹, XU Jian², LU Yang¹, GONG Zhuanding³, LI Jiajie¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Water Conservancy Engineering Geological Construction Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: To explore the freeze-thaw properties of aeolian sand improved by cement and silt, a series of freeze-thaw cycle tests were carried out on aeolian sands improved by 5% content of cement mixed with different contents of silt soils. The strength attenuation and mass-volume variation rules of the modified aeolian sands were studied. The results show that the compressive strength and peak strain of the improved aeolian sand are positively correlated with silt content after two freeze-thaw cycles. With the increase of freeze-thaw cycles, the resistance to compression and deformation of modified aeolian sands decrease obviously. The aeolian sand improved by 15% content of silt soils has the most stable structure. In addition, with the increase of freeze-thaw cycles, the volume change rates of modified aeolian sands with single cement mixture and silt cement mixture both present a decreasing tendency. The sample treated with 5% cement and 15% silt shows the lowest decreasing amplitude, and the mass loss rate of the sample improved with 5% cement increases linearly. The coefficient of strength attenuation can directly and effectively reflect the strength change rule of the improved aeolian sands after freeze-thaw cycles.

Key words: freeze-thaw cycle; improved aeolian sand; structural stability; change rate of mass and volume; coefficient of strength attenuation

我国季冻区分布广泛,冻融循环作用引起的土体强度和变形问题十分普遍,冻害问题防治成为工程长期关注的焦点^[1-3]。西北季冻区如甘肃等地因毗邻腾格里沙漠分布着大范围风积沙,具有粒径单一、颗粒黏聚性差特点,很难直接作建筑材料使用^[4-5]。但上述地带修建土木水利工程往往不得不使用风积沙作为建筑材料,因而季冻区风积沙的处

理和资源化利用具有重要工程意义。

常见风积沙资源化利用改良技术是单掺水泥改

性法^[6]。任辉明等^[7]通过室内试验研究了水泥改良风积沙无侧限抗压强度影响因素,发现改良后土体的强度和养护龄期、压实系数、水泥强度等级呈正相关关系;王丽英等^[8]探究并发现盐-冻耦合作用下,水泥改性风积沙无侧限抗压强度与孔隙体积呈负线性规律,弹性模量随冻融次数增加而减小;鲁先龙等^[9]研究了水泥掺量对风积沙地基强度和变形特性的影响,认为风积沙天然含水率与水泥掺量间存在最优比值可显著改善原土体的强度和变形性

能。可以看出,水泥改良此类土体原理是通过生成水化硅酸钙等胶结物质以增强固化、黏结效果。考虑经济性,也有其他掺料改良研究,如王渤^[10]研究不同冻融次数条件下掺黏性土对风积沙单轴抗压强度影响,认为强度提高的本质是黏土颗粒通过结合水膜使沙颗粒间黏结更加紧密;金昌宁等^[11]发现适量粉黏粒掺入可以充填沙粒之间的孔隙,提高整体密实度,但过多粉黏粒掺入则会导致强度指标下降;魏杰等^[12-14]分别对掺细圆砾土、无机胶凝材料的改良风积沙技术进行了研究,认为此类外掺料可改善风积沙级配,提高土体密实度,但对改良土体冻融特性却未提及。综上,目前对冻融循环后风积沙的力学性能研究大多局限于单掺水泥或粉黏土影响,对于混掺水泥和粉土条件下改良风积沙的冻融性能研究却未见报道。

本文针对古浪县生态移民暨扶贫开发项目——黄花滩调蓄供水工程4号蓄水池(子项目)复掺水泥和粉土改良风积沙筑堤技术,研究不同掺比、不同冻融循环周期下,改良风积沙土的无侧限抗压强度、破坏应变、弹性模量变化规律;量化分析各种掺比下改良土的质量损失和体积变化,运用“强度衰减系数”模型对混掺改良沙土的优化掺比和强度变化机理进行分析,以期能为工程技术应用提供依据。

1 试验过程

1.1 试验原料

试验用风积沙取自黄花滩蓄水池外场区。由于该场区长期遭受到风力侵蚀,风积沙颗粒粒径较细,其主要成分为石英、岩屑、长石。级配曲线如图1所示, $d_{10}=0.080\text{ mm}$, $d_{30}=0.097\text{ mm}$, $d_{60}=0.138\text{ mm}$, $C_u=1.725$, $C_c=0.852$,属于级配不良的砂土。

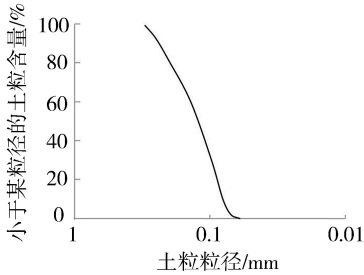


图1 天然风积沙颗粒级配曲线

试验用水泥为海螺牌普通硅酸盐水泥P·O 42.5;由于黄花滩地处冲积平原,上部土层粉质壤土资源较丰富,可为本试验提供粉土来源。

1.2 水泥及粉土掺量选择

根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[16],分别获得单掺水泥量为0、3%、5%、7%改良风积沙土样干密度指标和相对密度,结果如表1所示。

表1 单掺水泥风积沙密度指标

水泥掺量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最小干密度/(g·cm ⁻³)	填筑干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度
0	1.70	1.49	1.63	0.70
3	1.76	1.48	1.69	0.78
5	1.79	1.47	1.72	0.81
7	1.81	1.46	1.74	0.83

按当地相关设计和施工要求,填筑压实度为96%时,应保证相对密度大于0.80。从表1不难发现,掺5%水泥改良风积沙土满足相对密度指标要求,且较掺7%水泥更具经济性。因此,试验选择5%水泥掺量作为水泥改性掺量。

风积沙粒径较单一,颗粒之间黏聚力低。一般经济性考虑通常单掺5%水泥方法,只起到沙颗粒之间黏结改进作用,提升整体密实效果并不明显;混掺适量粉土与水泥,可在不改变颗粒间黏结作用的同时,显著改善孔隙填充密实性。考虑到相同外界功条件下,击实干密度可反应此类材料的混合填充密实效果,本文为选择合理的粉土掺量进行改良,进行了单掺3%~20%粉土的标准击实试验,击实曲线见图2。

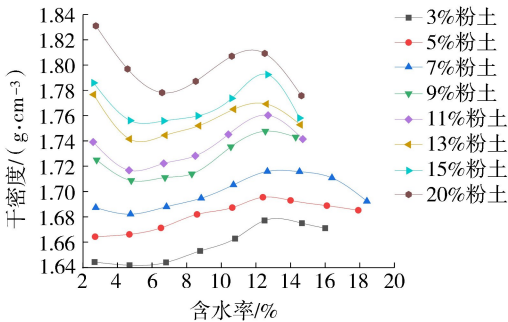


图2 不同粉土掺量下的干密度-含水率曲线

图2表明:单掺粉土掺量超过9%可起到显著提高干密度的效果,且考虑经济性,单掺粉土可起到最佳密实效果的掺量阈值在15%~20%,单掺15%~20%粉土最大干密度的增加量约为单掺13%~15%增加量的1/2,粉土掺量超过20%,密实效果已不显著。因此,为探究经济性水泥掺量5%下不同粉土掺量改性风积沙土的冻融劣化特性,试验选取了4组粉土掺量:5%水泥+0%粉土(基准)、5%水泥+10%粉土、5%水泥+15%粉土、5%水泥+20%粉土。

1.3 试样制备

试验分为冻融循环、无侧限抗压、质量损失与体积变化率的宏观测试。

根据《土工试验方法标准》^[16],分别对上述4组改良风积沙土进行标准重型击实试验,得到各组试样的最大干密度和最优含水率。考虑到试样压实度、含水率的不同会对冻融循环结果产生影响,所有土样均按最优含水率条件下的96%压实度标准控制,分5层击实制样^[17],单个圆柱体样尺寸标准为

直径 $D=61.8\text{ mm}$, 高度 $H=125\text{ mm}$ 。

该类风积沙改良混合土中黏粒含量偏少, 土体颗粒黏结弱, 存在一定随机性。为获取可靠试验规律, 本次试验分别按 0~12 次共六档冻融周期作为加载标准, 每档工况下设 3 个平行样, 累计制作了 84 个试样。制样中确保击实在水泥初凝时间内完成, 从分层制样筒取出的试样为避免水分损失应立即用保鲜膜缠绕, 待试样全部制作完成后, 统一放入恒温恒湿标养室进行 14 d 养护。

1.4 试验方法

冻融试验选用 HDD-II 冻融试验机和 UTM4503 电子万能试验机, 控制精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 每次冻融循环分为 4 段: 降温段 (4 h)、低温保温段 (3 h)、升温段 (4 h)、高温保温段 (3 h), 其中低温温度为 -20°C , 高温温度为 20°C , 累计共 12 个循环。电子万能试验机采用应变加载控制, 速率控制为 1.25 mm/min , 试样加载到累计 20% 应变时停止加载。此外, 为减小试样压缩过程中端部效应, 试验前试样加载面涂抹薄层凡士林。

体积变化率采用 0.01 mm 高精度游标卡尺量测冻结和融化状态下土样直径和高度, 取正交方向高度均值, 单个试样分 5 层^[18] 测量直径取均值, 扣除保鲜膜厚度后得试样体积。

质量损失率和体积变化率分别为

$$\delta_m = \frac{M_0 - M_N}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varepsilon_m = \frac{V_N - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: M_N 和 V_N 分别为 N 次冻融后试样扣除保鲜膜后的质量和体积。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变关系

冻融循环过程中除微观水分相变、迁移外, 还伴随着细观随机性颗粒剥落与结构重组过程。由于改良风积沙土内部黏结力较低, 会出现脆性破坏, 因而无侧限抗压应力-应变曲线存在随机波动性。为此选择 0 次 (基准试样)、1 次、2 次、8 次冻融循环试验数据进行分析, 如图 3、4 所示。

单轴压力加载下, 土体破坏经历了压密阶段、线弹性阶段、非线性强化阶段和软化阶段。由图 3 可看出, 不同粉土掺量试样冻融前后的应力应变均呈应变软化型破坏模式, 表明冻融作用不会改变此类改良土破坏形式。未经冻融, 不同混掺试样峰值应力、破坏应变与粉土掺量正相关。原因是: 粉土填充孔隙加强了沙颗粒间的约束力。此外, 试验表明, 粉土掺量超过 15%, 试样的压密段不及 10% 及以下粉土掺量试样的压密段来得显著, 说明掺入 15% 以上

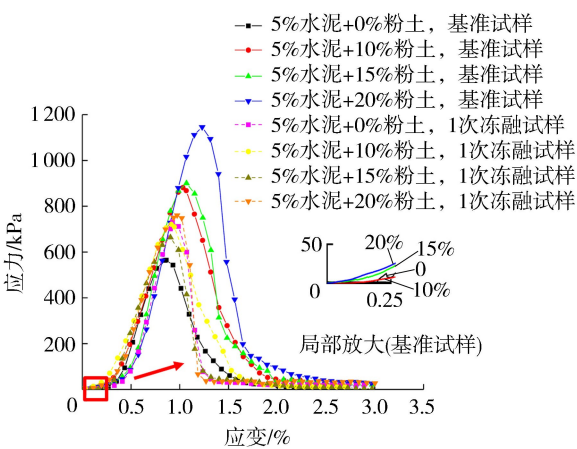
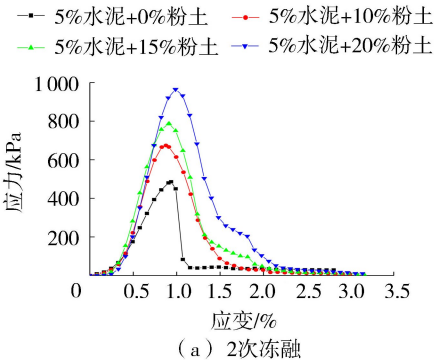
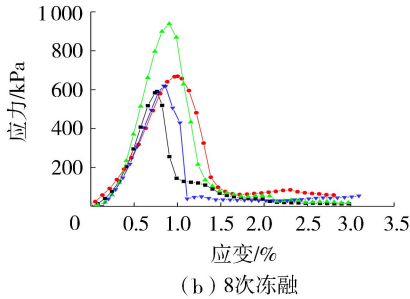


图 3 基准与 1 次冻融应力应变规律



(a) 2 次冻融



(b) 8 次冻融

图 4 不同冻融循环下应力应变规律

粉土即可达到较好孔隙密实效果。

鉴于初期冻融对此类重塑土还具有超固结“压密作用”^[19], 因此试验也表现出初期 1~2 次冻融相较于未冻融时, 不同掺量试样压密阶段变化不明显的特点。同样, 1~2 次冻融后, 不同粉土掺量试样的峰值应力、破坏应变相较于未冻融试样下降明显, 脆性破坏更为显著, 但呈现与粉土掺量正相关规律。其原因在于初期冻融后试样因“压密作用”孔隙比减小, 压缩过程中破坏应变随之减小致使脆性增大 (图 4(a))。8 次冻融后, 应力-应变曲线中软化阶段趋于“陡峭” (图 4(b)), 原因在于试样加载到达应力峰值后迅速形成贯穿裂缝并发生脆性破坏。

2.2 强度变化规律

2.2.1 无侧限抗压强度

统计改良风积沙试样的无侧限抗压强度随冻融循环次数和粉土掺量的变化规律, 如图 5 所示。

异常外(初始结构不稳定),累计12次冻融循环下,随粉土掺量提高,改良土无侧限抗压强度整体呈现升高趋势,但15%粉土掺量最显著。

综上所述表明,15%粉土掺量应该是理想风积沙掺量改良范围。

2.2.2 强度衰减规律

用强度衰减系数 $\frac{S_0}{S_N}$ 对4种掺比的风积沙改良土

强度变化规律进行分析,图6描述4种掺比情况下0次冻融时基准试样的无侧限抗压强度 S_0 与 N 次冻融后试样强度 S_N 的比值随冻融次数的变化情况。

- 5%水泥+0%粉土试验点
- 5%水泥+10%粉土试验点
- ▲ 5%水泥+15%粉土试验点
- ▼ 5%水泥+20%粉土试验点
- 5%水泥+0%粉土试验点
- 5%水泥+10%粉土试验点
- 5%水泥+15%粉土试验点
- 5%水泥+20%粉土试验点

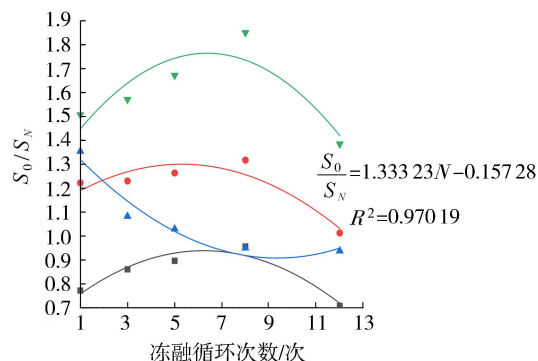
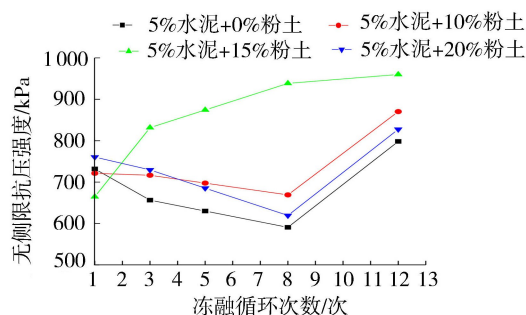
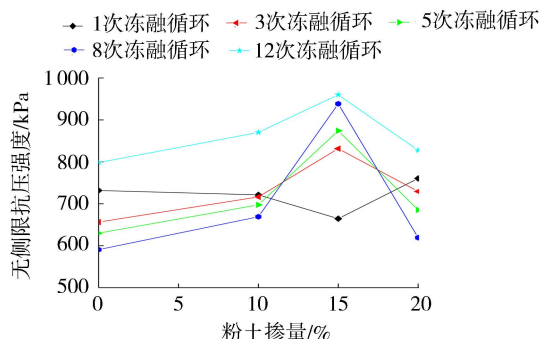


图6 强度衰减系数—冻融次数

图6表明:除5%水泥+15%粉土掺比外,其余3种掺比条件下改良土的强度衰减系数线均呈现:先上升、再缓慢上升、下降的趋势,且5%水泥+0%粉土、5%水泥+20%粉土较5%水泥+10%粉土而言,上升段更为“陡峭”,表现为高、低粉土掺量的改良土在冻融周期较少时(3次)冻融破坏作用更为明显。而5%水泥+15%粉土掺量的改良土:1~3周期内强度衰减系数下降最为明显,3~8周期内下降趋势逐渐减缓,8~12周期趋于稳定,即认为该掺量下改良土的土体结构在前3次冻融过程中获得最快强化,且这种强化趋势在4次冻融时开始减缓,12次时达到平稳。这是因为:5%水泥+15%粉土掺量的改良土较其他3种掺量改良土而言,掺比较优、内部结构稳定,土体颗粒经过复杂的剥落、重组过程后,水泥水化反应较冻融破坏作用占据主要地位,表现为强度增强,随着冻融次数增加,冻融破坏效应累积,水泥水化反减慢,强度变化逐渐平稳。对比图8(a)变形模量随冻融次数变化情况,发现运用强度衰减系数对土体结构抗冻融性的评价与以变形模量为衡量标准的评价趋于一致,且这种一致性在质量、体积变化曲线中也得到了验证(在0~3次冻融循环周期内,质量损失、体积减小幅度最大,随后逐



(a) 无侧限抗压强度—冻融次数关系



(b) 无侧限抗压强度—粉土掺量关系

图5 无侧限抗压强度变化规律

图5(a)表明:随冻融次数增加至8次,5%水泥+15%粉土掺量改良土无侧限抗压强度提高,而其余粉土掺量改良土均呈现下降趋势。这是因为:一方面粉土掺量超过15%时,因粉土颗粒比表面积较大,超量粉土颗粒吸附了更多水泥水化反应用水,阻碍了水泥水化反应进程;另一方面,冻融循环过程中,土颗粒经历剥落重组过程,超量粉土掺量易导致多余粉土颗粒替代砂土颗粒受压^[21-22],同时超量粉土团粒分散了水泥水化物,致使颗粒间抗剪能力下降^[23],故宏观上表现出强度降低。而低于15%粉土掺量充填粒间孔隙效果有限,部分沙颗粒间仍保持着较松散约束力,故在冻融循环作用后,也表现出无侧限强度降低特点。

从图5(a)中还可以发现:前8次冻融循环过程中,10%粉土掺量强度衰减量约为50 kPa,仅为20%粉土掺量强度衰减量的37%,说明“部分颗粒间隙未得到填实”强度削弱因素相较“水泥水化作用减弱和多余粉土颗粒受压”降低强度影响小。而15%粉土掺量下,水泥水化不断发展使颗粒间黏结力增强,粉土填充密实效应显著增强了沙颗粒间约束力,故在冻融过程中表现为结构强化占优势,这与齐吉林等^[20]发现轻微超固结土“冻缩”过程中由于发生超固结效应导致有效应力增加的结论相似。但多次冻融后因水分迁移量较大,所以出现了8次冻融后强度曲线的“上翘现象”^[24],但未及15%粉土掺量强度指标。

从图5(b)可以发现:除一次冻融强度变化规律

渐减小并趋于平稳)。

根据初步拟合回归结果(5%水泥+15%粉土较其他掺量而言拟合效果最明显),该掺量下的试验点分布与幂函数 $\frac{S_0}{S_N} = 1.33323N^{-0.15728}$ 表现出较大的相关性($R^2=0.97$)。

2.3 破坏应变特征

破坏应变为峰值应力(无侧限抗压强度)对应的应变值,它是描述材料脆和塑性的重要指标,同时也是评价土体冻融后无侧限压缩变形特性的重要参数。统计改良风积沙试样破坏应变随冻融循环次数和粉土掺量的变化规律如图7所示。

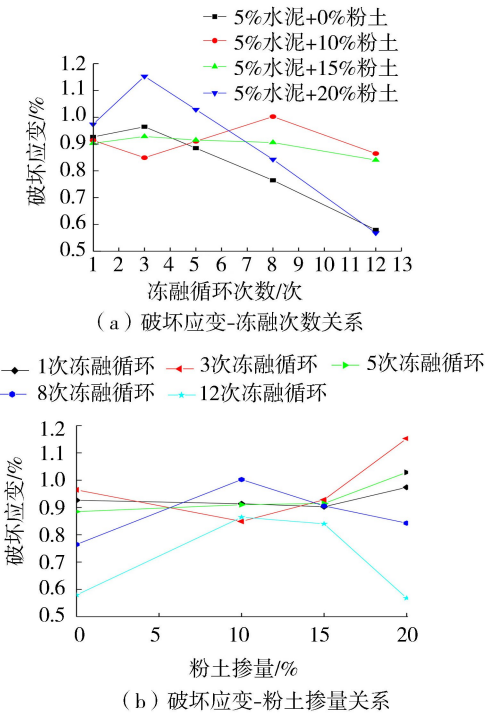


图7 破坏应变变化规律

图7(a)显示:随着冻融循环次数的增加,不同粉土掺量下改良土的破坏应变总体上呈先变大后变小趋势。图7(b)反映了破坏应变随粉土掺量变化情况,可以看出,5次冻融前,随粉土掺量增加破坏应变呈变大的趋势,土样脆性减弱,韧性提高;8次冻融后,粉土掺量<10%时,破坏应变变大,粉土掺量为10%~15%时,破坏应变有降低趋势,粉土掺量为15%~20%时,破坏应变急剧减小,即8次冻融后,粉土掺量和冻融次数的增加共同加剧了试样的脆性破坏。

上述规律的机理在于:由于前期冻融作用破坏了土颗粒间的联结,颗粒变得分散,土体刚度减小,压缩性变大从而导致破坏应变变大,随冻融次数继续增加与自由水迁移,试样发生类似“冻缩”过程^[20],孔隙和裂缝被压缩,表现为破坏应变急剧减小,脆性增强。

相比于5%水泥+15%粉土掺量土样的结构稳定性强、密实性好而不易剥落,单掺5%水泥与混掺5%水泥+20%粉土的土样在冻融作用下,土团体发生剥落形成小颗粒现象更加显著,导致大中孔隙体积减小,试样压密过程不明显,故破坏应变减小。

2.4 弹性模量

弹性模量可反应土体破坏过程中的刚度变化,是评价土体材料抵抗破坏变形能力的重要参数。取应力-应变曲线线弹性阶段的斜率作为本次试验土样的弹性模量。弹性模量随冻融次数、粉土掺量变化如图8所示。

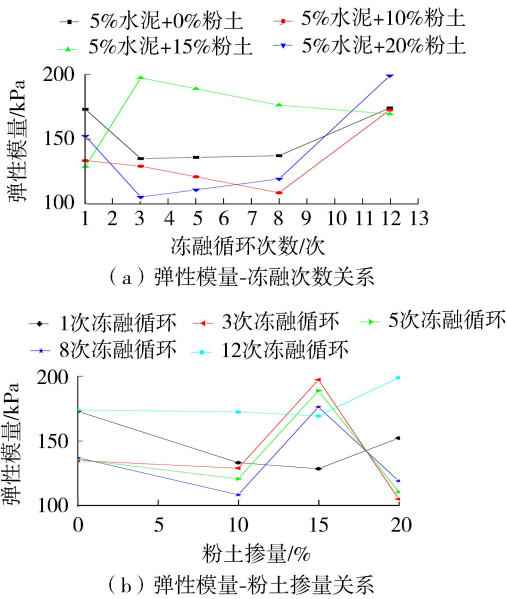


图8 弹性模量变化规律

图8(a)表明:随冻融次数增加,5%水泥+15%粉土掺量的改良土相对于其他掺量的改良土始终保持着较高的弹性模量,且3次冻融循环后,弹性模量变化趋于稳定。原因可能是,粉土掺量15%适中,沙颗粒间密实性较好,土体压缩性低,刚度大,表现出抵抗冻融破坏能力强。

图8(b)表明:随粉土掺量的增加,初次冻融后,弹性模量呈现“峰型”的集中发展趋势,15%粉土掺量风积沙改良土的弹性模量(170~190 kPa)要远高于其他3种掺比改良土的弹性模量(112~130 kPa)。这是因为粉土掺量较少时,粉土起的填充密实效果不明显,内部大量孔隙和裂缝的存在使土体压缩性变大、刚度减小;而粉土掺量过多时,多余的粉土颗粒一方面会阻碍水泥水化反应使水化胶结物质减少,降低颗粒间的黏结力,另一方面,粉土承载力低、压缩变形量大,粉土替换风积沙会增加土体冻融后的压缩变形,降低土体刚度。

2.5 质量损失与体积变化率

试验测试获取了12次冻融循环过程中冻结和

融化状态下的质量损失率 δ_m 和体积变化率 ε_v ,其结果分别如图9和图10所示。

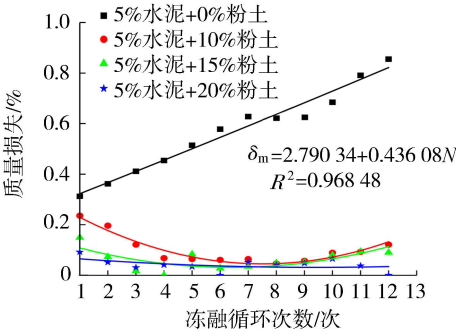


图9 质量损失变化

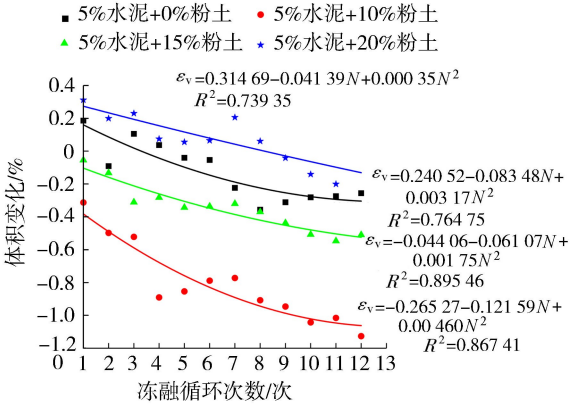


图10 体积变化

图9表明:单掺水泥的风积沙改良土在冻融循环过程中的质量损失率是混掺水泥粉土的风积沙改良土的6~7倍,且随着冻融循环次数增加,其损失幅度呈线性增长; $\delta_m = 2.79034 + 0.43608N$ ($R^2 = 0.97$),而10%粉土、15%粉土、20%粉土的改良土质量损失曲线则比较平缓,12次冻融循环后质量损失率变化保持在0.15%以内。这是因为:粉土较强的保水性减缓了冻融过程中水分的损失;且掺入粉土后,风积沙改良土变得密实,沙颗粒间的约束作用增强,有效改善了冻融过程中表面颗粒剥落的情况。

图10表明:除5%水泥+20%粉土掺比试样在8次冻融前体积变化率为正,其余3种掺比风积沙改良土试样,随冻融次数增加体积变化率均为负且呈现减小趋势,这是因为粉土作为冻胀敏感性土^[25]且具有较强的吸水性,当粉土掺量较多时,产生的体积膨胀可有效减缓土体的“冻缩”效应。此外,4种掺比试样的体积变化率数据基本符合二次曲线拟合效果。其中,5%水泥+20%粉土和单掺5%水泥试样数据点比较离散,拟合偏差稍大,这是因为:单掺水泥不掺粉土的试样颗粒间密实效果不好,导致沙颗粒间约束力较小;而粉土掺量为20%时,多余粉土会吸附部分水分,导致水化胶结物质生成量减少胶结力变弱;相反,5%水泥+10%粉土、5%水泥+15%

粉土掺量的试样数据点则表现较好的拟合效果, R^2 分别为0.86、0.89,进一步观察数据可以发现:5%水泥+10%粉土掺量试样的体积变化率($-0.25\% \sim -1.25\%$)约为5%水泥+15%粉土掺量($-0.1\% \sim -0.4\%$)的3倍,考虑到冻融变形带来的工程安全隐患,认为5%水泥+15%粉土掺量的改良土较其他3种掺比的改良土而言具有更好的抗冻融性。

3 结 论

a. 本文基于5%水泥掺量作为改性基准,试验研究了混掺不同粉土的风积沙力学性能改进效果。结果表明,冻融作用不改变水泥混掺粉土改性风积沙无侧限压缩的脆性破坏模式;合适的粉土掺量有效填充了孔隙、增强了沙颗粒间约束力,混掺5%水泥+15%粉土可达到孔隙密实效果。

b. 1~2次冻融循环时,改良风积沙抗压强度及峰值应变与粉土掺量呈正相关关系;随冻融次数增加,高粉土掺量与低粉土掺量的改良风积沙抗压和抗破坏变形能力下降均较明显;粉土掺量15%改良风积沙颗粒间密实性好,土体压缩性低,刚度大结构稳定性最强。

c. 冻融条件下单掺水泥与水泥粉土混掺的风积沙体积变化率整体上均呈现下降趋势,而5%水泥+15%粉土掺量下降幅度最低。鉴于粉土冻胀敏感特性,局部冻融周期内(4~7次)混掺试样有轻微冻胀现象($\varepsilon_{\text{胀}} \approx 0.2\varepsilon_{\text{缩}}$),单掺水泥试样则无此现象;单掺5%水泥改良风积沙质量损失率随冻融次数呈线性增加规律,混掺改良风积沙冻融表面剥落现象显著改善,12次冻融循环后质量损失率变化保持在0.1%以内。

d. 运用“强度衰减系数”评价此类改良土冻融后的土体强度变化规律与以弹性模量为衡量标准对土体结构抗冻融性的评价趋于一致。

参考文献:

[1] 牟献友,谷攀. 国内风积沙工程特性研究综述[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010,31(1):307-310. (MOU Xianyou, GU Pan. Review on engineering characteristics of wind-blown sand[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2010,31(1):307-310. (in Chinese))

[2] 高菲. 严寒地区高速铁路路基冻胀特性和工程对策[J]. 建材与装饰,2020(5):243-244. (GAO Fei. Freezing heave characteristics and engineering countermeasures of high-speed railway subgrade in cold region[J]. Building Materials and Decoration,2020(5):243-244. (in Chinese))

[3] 武立波,祁伟,牛富俊,等. 我国季节性冻土区公路路基

- 冻害及其防治研究进展[J]. 冰川冻土,2015,37(5): 1283-1293. (WU Libo, QI Wei, NIU Junfu, et al. A review of studies on roadbed frozen damage and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China[J]. Glacier and Permafrost,2015,37(5):1283-1293. (in Chinese))
- [4] ZHANG Hong, WANG Zhiyuan, LIU Rongxing, et al. Study of static mechanical properties of aeolian sand[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,587:976-980.
- [5] SUN Kaihua, ZHANG Rui. Experimental study on the characteristics of aeolian sand paste-like stowing material in coal mine[J]. Advanced Materials Research,2014, 962:1020-1024.
- [6] 王树娟. 掺风积沙水泥复合土力学性能的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [7] 任辉明,曾新迪,师高鹏,等. 水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2017,36(4): 67-72. (REN Huiming, ZENG Xindi, SHI Gaopeng, et al. Experiment research on unconfined compressive strength of cement improved aeolian sand[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2017,36(4):67-72. (in Chinese))
- [8] 王丽英,骆文进,王红梅,等. 盐-冻耦合作用下水泥基风积沙改性土基坑填料的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020,39(9):2912-2918. (WANG Liying, LUO Wenjin, WANG Hongmei, et al. Performance of foundation pit filler with cement-based drift-sand modified soil under salt-freeze coupling effects[J]. Journal of Silicate, 2020,39 (9):2912-2918. (in Chinese))
- [9] 鲁先龙,乾增珍,杨文智,等. 沙漠风积沙地基的水泥固化及其性能试验[J]. 工业建筑,2018,48(3):103-108. (LU Xianlong, QIAN Zengzhen, YANG Wenzhi, et al. Cement-stabilization of aeolian sand foundation and performance test[J]. Industrial Building,2018,48(3): 103-108. (in Chinese))
- [10] 王澍. 不同冻融状态下风积沙改性土力学特性研究 [J]. 铁道建筑技术,2019(5):17-21. (WANG Shu. Study on mechanical properties of aeolian sand modified soil under different freeze-thaw conditions[J]. Railway Construction Technology,2019(5):17-21. (in Chinese))
- [11] 金昌宁,张玉红. 粉黏粒含量对风积沙水稳定性影响的初步探讨[J]. 中外公路,2013,33(4):255-258. (JIN Changning, ZHANG Hongyu. A preliminary study on the effect of silt and clay content on the stability of aeolian sediment[J]. Chinese and Foreign Road,2013,33(4): 255-258. (in Chinese))
- [12] 魏杰. 水泥改良风积沙强度及重载铁路路基风积沙填料变形特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2017.
- [13] 魏杰,张艳召,杨有海. 风积沙掺细圆砾土混合料级配特性研究[J]. 低温建筑技术,2016,38(10):112-114. (WEI Jie, ZHANG Yanzhao, YANG Youhai. Study on gradation characteristics of aeolian sand mixed with fine boulder soil[J]. Cryogenic Building Technology,2016,38 (10):112-114. (in Chinese))
- [14] 梁书奇. 风积沙的工程特性及改良技术研究[R]. 石家庄:河北建设勘察研究院有限公司,2015.
- [15] 郑郑,马巍,李国玉,等. 一个考虑冻融循环作用的结构 性定量参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38 (7):1339-1344. (ZHANG Yun, MA Wei, LI Guoyu, et al. Laboratory study on quantitative parameter of structural characteristics of soils considering effect of freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(7):1339-1344. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程:SL/T 237— 1999[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- [17] 鲁洋,许雷,刘斯宏,等. 一种重塑土分层击样装置及 其制样方法:CN104634636A[P]. 2015-05-20.
- [18] LU Y, LIU S, ZHANG Y, et al. Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 170:102926.
- [19] 郑郑,马巍,邴慧. 冻融循环对土结构性影响的机理与 定量研究方法[J]. 冰川冻土,2015,37(1):132-137. (ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on the structures of soil and a quantitative approach[J]. Glacier and Permafrost,2015, 37(1):132-137. (in Chinese))
- [20] 齐吉琳,马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩 土工程学报,2006(12):2082-2086. (QI Jilin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006(12):2082-2086. (in Chinese))
- [21] 金昌宁,金伟涛. 粉黏粒含量对浸水+环刀法测定干燥 风积沙密度的影响[J]. 中外公路,2018,38(4):24-28. (JIN Changning, JIN Weitao. Influences of change of plasma on density of eolian sand measured by immersional wetting and ring sampler method[J]. Chinese and Foreign Road,2018,38(4):24-28. (in Chinese))
- [22] 金昌宁,张玉红. 粉黏粒含量对风积沙水稳定性影响的 初步探讨[J]. 中外公路,2013,33(4):255-258. (JIN Changning, ZHANG Hongyu. A preliminary study on the effect of silt and clay content on the stability of aeolian sediment[J]. Chinese and Foreign Road,2013,33(4): 255-258. (in Chinese))
- [23] WEI X, LIU H, KU T. Effects of plastic fines content on the engineering properties of cement-stabilized sands[J]. Granular Matter,2021,23(2):1-13.
- [24] 谈云志,吴翱,付伟,等. 改良粉土强度的冻融循环效应 与微观机制[J]. 岩土力学,2013,34(10):2827-2834. (TAN Yunzhi, WU Pian, FU Wei, et al. Strength and micromechanism of improved silt under freeze-thaw cycle effect[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(10):2827- 2834. (in Chinese))
- [25] 刘德欣,华小宁. 温度对粉土冻胀特性的影响试验研究 [J]. 建筑结构,2020,50(增刊2):797-802. (LIU Dexin, HUA Xiaoning. Experimental study on the effect of temperature on the frost heave silty soil[J]. Building Structure,2020,50(Sup2):797-802. (in Chinese))

(收稿日期:2021-02-16 编辑:郑孝宇)