

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.063



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



SH 固土剂与纤维加筋固化硫酸盐渍土的冻融耐久性

魏丽^a, 刘清雅^a, 常欣欣^a, 柴寿喜^b

(天津城建大学 a. 天津市软土特性与工程环境重点实验室; b. 地质与测绘学院, 天津 300384)

摘要: 冬季冻结与春季融化引起硫酸盐渍土填筑路堤的冻胀开裂、融沉变形和翻浆下沉等工程地质问题。通过开展石灰+纤维+土、石灰+SH 固土剂+纤维+土的冻融试验、无侧限抗压强度试验、SEM 试验和 CT 试验, 优选纤维和 SH 固土剂掺量, 研究纤维加筋固化土的力学性能和微观结构随冻融的变化规律, 阐明 SH 固土剂和纤维对土的冻融耐久性的影响机制。结果表明: 随冻融次数增加, 土的抗压强度呈降幅较大、降幅较小和强度平稳的阶段变化; 随冻融次数增加, 土颗粒的面积比和等效直径均减小, 土颗粒的形态由长条形逐渐趋于圆形; 加筋固化降低了土的孔隙率, 土的小孔隙占比逐渐减小, 中孔隙与大孔隙占比增大; 微裂纹数量增多, 并从试样表面逐渐延伸至内部; 3%SH 固土剂+12%石灰+0.3%纤维加筋固化硫酸盐渍土是较为适宜的配合比; SH 固土剂通过包裹土颗粒和填充土孔隙、纤维与土的界面摩擦作用以及纤维形成的空间网状结构, 共同提高了硫酸盐渍土的力学性能与抗冻融性能。

关键词: 冻融循环; 纤维加筋固化土; SH 固土剂; 抗压性能; 微观结构

中图分类号: TU445; U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Freeze-thaw durability of sulfate saline soil stabilized with SH agent and fiber

WEI Li^a, LIU Qingya^a, CHANG Xinxin^a, CHAI Shouxi^b

(a. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment; b. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, P. R. China)

Abstract: Winter freezing and spring thawing cause engineering geological issues such as frost heave cracking, thaw settlement, and boiling subsidence in sulfate saline soil embankment construction. To this end, freeze-thaw test, unconfined compressive strength test, SEM test and CT test were completed on sulfuric saline soil stabilized with lime, SH agent, and fiber to study the mechanical properties degradation and the microstructure damage characteristics under freeze-thaw conditions, clarifying the influence mechanism of the SH agent and fiber on the freeze-thaw durability of the soil. The results show that the UCS of soil exhibited a stage-wise

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 天津市科技计划项目(20YDTPJC00930)

作者简介: 魏丽(1979-), 女, 副教授, 主要从事盐渍土的改性固化与加筋研究, E-mail: weili_79@126.com。

柴寿喜(通信作者), 男, 教授, E-mail: chaishouxi@163.com。

Received: 2025-02-24

Foundation items: This work was supported by Science and Technology Plan Project of Tianjin (No. 20YDTPJC00930)

Author brief: WEI Li (1979-), associate professor, main research interests: solidification and reinforcement of saline soil, E-mail: weili_79@126.com.

CHAI Shouxi (corresponding author), professor, E-mail: chaishouxi@163.com.

change, with a large decrease, small decrease and stable strength as the number of freeze-thaw cycles increased. With the increase of freeze-thaw cycles, the area ratio and the equivalent diameter of soil particles decreased, some aggregates were broken, and the morphology of soil particles gradually transitioned from elongated to circular. Fiber reinforcement reduces the porosity of soil, and the number of small pores gradually reduced, and the number of medium pores and large pores increased little by little. The number of cracks increases, and they gradually extend from the surface of the specimen into the interior. Sulfate saline soil stabilized with 12% lime, 3% SH agent and 0.3% fiber is a more suitable mix ratio. SH agent wraps soil particles and fills soil pores, as well as the interface interaction between fibers and soil and the spatial network structure formed by fibers, which improves the mechanical properties and freeze-thaw resistance of sulfate saline soil.

Keywords: freeze-thaw cycling; fiber reinforced soil; SH agent; compressive property; microstructure

硫酸盐渍土是一种特殊土,当温度或含水率降低时,硫酸盐吸水生成十水硫酸钠,土发生盐胀。当硫酸盐渍土被浸泡或水流冲刷时,作为土骨架的盐颗粒在短时间内溶解,土孔隙增大,土体溶陷,导致建筑物失稳。除盐胀、溶陷破坏外,西北地区的硫酸盐渍土还遭受着冻融循环作用,导致公路工程出现路面隆起、路堤开裂及塌陷等问题^[1]。因此,必须对硫酸盐渍土改性处理,提高其强度和稳定性,才能应用于工程建设。

在硫酸盐渍土中掺加固土剂,通过物理和化学作用改变土的工程性质,是最常用的处理方法;在此基础上,再掺加纤维,还可提高土的力学性能。柴寿喜等^[2]使用石灰和粉煤灰固化硫酸盐渍土,提高了土的抗压强度和水稳定性,固化土的强度随石灰和粉煤灰含量的增加呈先增大后减小的变化趋势,最适宜的配合比为 8% 石灰+24% 粉煤灰。杨双双^[3]研究发现,石灰掺量对无侧限抗压强度的影响最大,掺入 12% 石灰的硫酸盐渍土的强度增长了约 6 倍。徐鹏飞等^[4]试验发现,SH 固土剂固化盐渍土可保持试样的完整性,减小土的质量和强度损失,具有较好的抗冻融性能。管小龙^[5]基于纤维固化硫酸盐渍土的无侧限抗压强度试验发现,含盐量为 2%,添加 12% 石灰和 0.3% 聚丙烯纤维(纤维长度 12 mm)时,纤维加筋固化土的强度达到峰值。纤维与石灰联合加固硫酸盐渍土,可显著增强土的抗压和抗变形能力;纤维在土中随机分布并形成网状,限制了土颗粒的移动;在一定程度上约束了微裂纹的扩展,从而改善了硫酸盐渍土的盐胀^[6]。

冻融破坏了土颗粒的联结性能,导致土的力学性能劣化^[7]。李生伟等^[8]发现反复冻融减小了盐渍土的密度,增加了孔隙率,改变了土颗粒间的接触方式,土的抗压强度与抗剪强度受冻融次数、含盐类型、含盐量和含水率的影响较大。SHIBI 等^[9]发现,随冻融次数增加,土的抗压强度阶段性减小,即强度降幅较大阶段(冻融 0~2 次)、强度降幅较小阶

段(冻融 3~7 次)、强度稳定阶段(冻融 8~12 次)。徐敏普等^[10]发现,纤维加筋土的抗压强度与冻融次数呈指数函数关系,冻融 5 次时强度降低最快,掺加纤维使土的应力-应变规律趋向于应变软化。Roustaei 等^[11]发现对不同掺量的聚丙烯纤维加筋土进行了 0~9 次冻融试验,结果表明纤维加筋能提高土的抗冻融性能。

水的反复相变与迁移,改变了土颗粒的排列方式,破坏了土颗粒间的联结力。石群等^[12]、Wang 等^[13]借助 SEM 观察发现冻融盐渍土的密实度降低,孔隙增大,孔隙比例和微裂纹比例增加,土颗粒易发生位移,结构变得疏松。马冰^[14]通过石灰固化盐渍土的 SEM 与 CT 试验发现,冻融作用增大了土的孔隙率和孔径,影响土颗粒的连接、排列方式和形态特征,使土的结构发生不可逆的破坏。蔡正银等^[15]、刘治清等^[16]用 Avizo 软件分析 CT 试验结果发现,随干湿和冻融次数的增加,试样内的微裂纹发育深度逐渐增加直至趋于稳定,得出切片裂隙率与试样深度成反比的结论。魏丽^[17]通过 SEM 和 NMR 试验发现,冻融增大了土的孔隙率,改变了土的孔隙分布特征,而掺加纤维可以减少孔隙率的增加,限制孔隙的扩展与连通。

目前,针对石灰+SH 固土剂+纤维联合加筋固化硫酸盐渍土的力学性能及抗冻融破坏机制研究成果还较少,急需开展相关研究。据此,开展石灰、SH 固土剂和纤维联合加筋固化土的无侧限抗压强度试验,探讨冻融对纤维加筋土力学性能的影响。通过 SEM 试验,观察土的微观结构形貌和土颗粒的变化规律;借助 CT 试验,分析土的孔隙分布特征与微裂纹演化规律。建立强度、微裂纹率与冻融次数的数学关系式及强度与微裂纹率的数学关系式,预测冻融作用下纤维加筋固化土的宏观强度与微观结构发展规律。

1 试验概况

1.1 试验材料

1)硫酸盐渍土

试验用土为粉质黏土,取自甘肃省景泰县白墩子村,西气东输工程一线 K2904+556 处。土的物理性质指标列于表 1。

表 1 硫酸盐渍土的物理性质指标
Table 1 Physical property indexes of sulfuric saline soil

含盐 量/%	风干含 水率/%	液限/%	塑限/%	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密 度/(g/cm ³)	颗粒级配/%			
							<0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.075 mm	>0.075 mm
5	3	31.9	19.6	12.3	19.5	1.72	6.5	8.2	42.4	42.9

2)熟石灰

试验使用的熟石灰钙镁含量超过 70%。熟石灰与空气中的二氧化碳和水发生碳化反应,生成真棒状的碳酸钙;火山灰的活性成分与水反应,生成胶结性的水化硅酸钙和水化铝酸钙;同时,熟石灰与硫酸钠在水溶液中发生离子交换,生成石膏或钙矾石^[3],这些固化产物填充到土孔隙,充当土骨架,增大土的密实度,从而增强土的强度和稳定性。但过量的石灰将加剧硫酸盐的反应,使试样发生膨胀。前期开展了 6%、8%、10%、12%、14% 石灰固化硫酸盐渍土的无侧限抗压强度试验,结果表明,随着石灰掺量的增加,土 的强度先增加后减小,12% 石灰掺量时,土的强度最大。14% 石灰固化土试样发生膨胀。因此,试验中采用 12% 的石灰固化硫酸盐渍土^[18]。使用时,将石灰过 1 mm 筛。

3)SH 固土剂

SH 固土剂是一种改性的聚乙烯醇水溶液,无毒、无色,溶液中聚乙烯醇的质量占总溶液质量的 6%,密度 1.09 g/cm³。其主链为疏水性碳-碳键相连的大分子链,此大分子链上有亲水性的羟基和羧基等基团。遇水可无限稀释,黏度低但干燥后黏结强度高,固化反应不可逆。其加固效果主要依赖于物理包覆和孔隙填充机制,确保了固化土的长期稳定性和环境友好性。

4)聚丙烯纤维

聚丙烯纤维是以聚丙烯树脂为原料,通过熔融纺丝或切片拉伸制成的合成纤维。密度 0.91 g/cm³,直径约 20 μm,弹性模量和抗拉强度分别为 3500、500 MPa,断裂延伸率 15%。聚丙烯纤维具有无毒无污染、质轻、抗酸碱性能好、强度高且韧性强等优点。前期试验证实,最佳纤维长度为试样直径的 1/3(试样直径 50 mm,高 50 mm),据此纤维长度采用 17 mm^[19]。

1.2 试样制备

将盐渍土经过风干、研磨、过 2 mm 筛。制样压实度为 96%,制样含水率为 19.5%。称取一定量的土和水,均匀拌和后密封 24 h,以保证土的充分浸

润。制样前,在土中掺加 SH 固土剂、石灰,再额外添加石灰质量 30% 的水(石灰与空气和水固化反映消耗的水)。再掺加聚丙烯纤维,拌和均匀。

以双向静压法制备试样。在模具内壁和垫块上涂抹凡士林,减小筒壁和垫块与土的摩擦力。装入混合料后在制样筒内静压 10 min 后推出。将试样置入养护箱内养护 28 d。

1.3 试验方法

1)冻融试验

冻融试验箱型号 DR-2A,由华南实验仪器有限公司制造。冻融试验方法参照《水电水利工程岩石试验规程》^[20],冻结温度与融化温度分别设置为-20、20 ℃,冻结和融化时间均为 12 h。冻融 1~15 次。

2)无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验仪由南京土壤仪器厂有限公司生产。参照《公路土工试验规程》完成试验。选择 10 kN 的量力环,试验台的上升速度为 1 mm/min,每间隔 0.5 mm,读取量力环变形量,8~10 min 内完成试验。每组工况均设置 6 个平行试样。

3)SEM 试验

SEM 试验设备型号为 TM4000Plus,由日立公司生产。将试样切割成宽 5 mm、高 5 mm、长 10 mm 的土条,掰断土条,将新鲜断面喷金后完成 SEM 观察。获得放大 2 000 与 3 000 倍的影像,观察 SH 固土剂与纤维在土中的形态、土颗粒间的连接方式,再使用 Avizo 的“Interactive Thresholding”、“Label Analysis”计算颗粒面积比、颗粒等效直径和颗粒扁圆度。

4)CT 试验

CT 试验设备型号 nanoVoxel2000CT,由天津三英精密仪器股份有限公司制造。空间分辨率 3 μm/500 nm,像素细节分辨能力 1 μm/50 nm。试样经过 CT 扫描后,首先使用三维成像系统重建软件 Voxelstudio Recon 进行数据环状伪影去除、错位修正、图像降噪处理,使试样呈现更好的清晰度;随后使用 Avizo 软件提取试样的孔隙与微裂纹数据。试验计划见表 2。

表 2 试验计划表
Table 2 Table of test scheme

固化土类型	固化材料掺量/%			冻融次数	试验类别
	石灰	SH 固土剂	纤维质量加筋率		
石灰+纤维+土	12	0	0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4	0	UCS
石灰+SH 固土剂+纤维+土	12	1、2、3、4、5	最优掺量	0~15	UCS
石灰+SH 固土剂+纤维+土	12	最优掺量	最优掺量	0、1、2、5、7、10、12、15	SEM、CT

2 纤维与 SH 固土剂掺量优选

2.1 确定适宜的纤维掺量

不同纤维掺量的石灰+纤维+土的应力-应变曲线和抗压强度曲线如图 1 和图 2 所示。

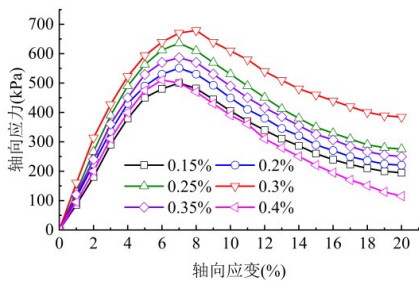


图 1 不同纤维掺量的石灰+纤维+土的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of soil stabilized with lime and fiber under different fiber ratios

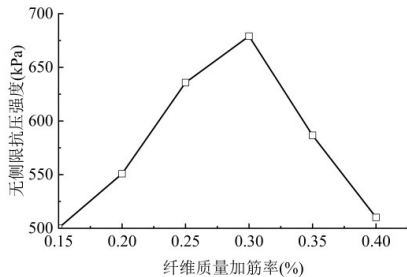


图 2 不同纤维掺量的石灰+纤维+土的无侧限抗压强度
Fig.2 The UCS of soil stabilized with lime and fiber under different fiber ratios

石灰+纤维+土的应力-应变曲线为应变软化型,应变 7% 时,应力最大。土的抗压强度先增大后减小,纤维掺量 0.3% 时强度达到最大值。当纤维掺量超过 0.3%,过多的纤维在土中团聚,如图 3 所示,形成多个薄弱面,使土强度降低。

2.2 优选 SH 固土剂掺量

图 4 为不同 SH 固土剂掺量土的应力-应变曲线。SH 固土剂掺量 1%~5%,土的抗压强度持续增加。与未添加 SH 固土剂的土相比,强度增长率分别为 10.61%、12.87%、12.91%、5.27% 和 4.41%。在 3%SH 固土剂掺量之后,抗压强度增长率明显减小,此时抗压强度已满足路堤填料的工程需求。因此,以 3% 掺量的 SH 固土剂固化含盐量低于 5% 的硫酸盐渍土较为适宜。



图 3 纤维在试样中的分布
Fig.3 Distribution of fibers in the specimen

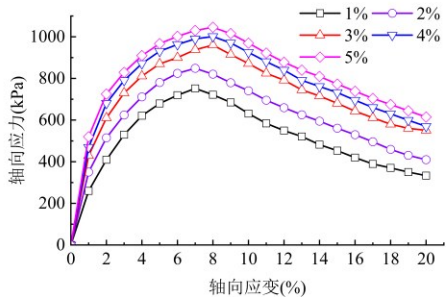


图 4 不同 SH 固土剂掺量的石灰+SH 固土剂+纤维+土的应力-应变曲线
Fig.4 Stress-strain curves of soil stabilized with lime, SH agent and fiber under different SH agent content

SH 固土剂为水溶性高分子材料,含有大量的羟基团,主链上的羟基、羧基与土中的钙、镁、硅等离子产生络合物,吸附于土颗粒,将相邻的土颗粒相互搭接,形成较大的具有黏弹性的土团粒^[5]。此外,如图 5 所示,干燥后的 SH 固土剂为膜状和丝状,包裹土颗粒并填充到土孔隙,这增强了土颗粒之间的黏结性,提高了土的强度与抗变形性能。

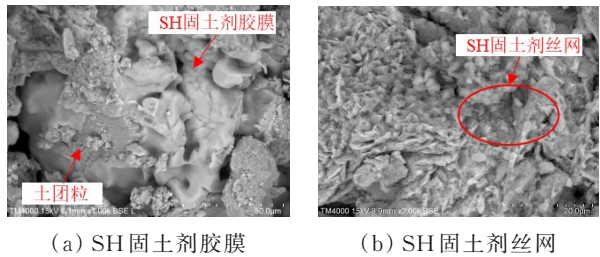


图 5 石灰+SH 固土剂+纤维+土的 SEM 照片
Fig.5 SEM photos of soil stabilized with lime, SH agent and fiber

3 冻融纤维加筋固化土的抗压性能

3.1 抗压强度

为研究SH固土剂对土的抗冻融性能的影响,完成了不同SH固土剂掺量的纤维加筋固化土的无侧限抗压强度试验,结果见图6。

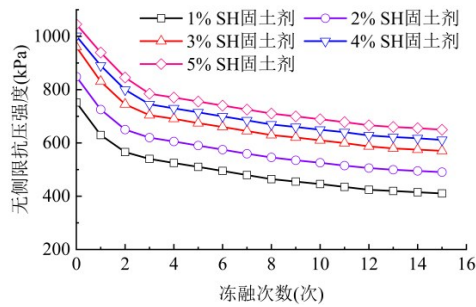


图6 不同SH固土剂掺量的石灰+SH固土剂+纤维+土的无侧限抗压强度

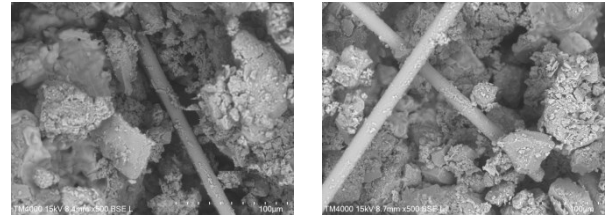
Fig.6 The UCS of soil stabilized with lime, SH agent and fiber under freeze-thaw cycles

不同SH固土剂掺量的加筋固化土的无侧限抗压强度曲线的变化趋势大致相同,随着冻融循环次数的增加,强度呈现分阶段下降的趋势。冻融0~2次,强度下降最为显著;冻融3~11次,强度降低的速度有所减缓;冻融12~15次,强度逐渐稳定。原因在于,冻结过程中,硫酸钠易与水结合形成芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$),体积增大,导致土内产生膨胀应力,反复冻融会加速硫酸钠的溶解-结晶过程,使盐胀效应累积。最后改变土颗粒间的联结性能,使得原本紧密的土团粒分散,土的密实度降低,孔隙率增加,进而导致土的抗压强度下降。多次冻融引起大量的微裂纹萌生,为冰晶提供了充足的空间,减弱了冻胀力对土的破坏,土的结构趋于新的极限平衡,抗压强度逐渐稳定^[17]。

冻融作用下,石灰+SH固土剂+纤维+土的抗压强度随SH固土剂掺量的增加而增大。这是因为,SH固土剂干燥后为膜状和丝状,包裹土颗粒并穿插于孔隙中,从而提升土颗粒间的联结力。此外,干燥后的SH固土剂不再溶解于水,使包裹的土颗粒不吸水^[21-22],这也减小了冻胀对土的破坏,弱化了土的结构损伤。同时,如图7所示,纤维穿插于土中,纤维与土之间的界面摩擦及粘结力在某种程度上限制了土颗粒的移动;纤维相互交织并穿插于土中,形成网状结构,限制土的冻胀。据此,SH固土剂和纤维联合加筋固化作用提高了土的抗冻融性能。

3.2 应力-应变

冻融0、1、2、5、7、10、12、15次后,不同SH固土



(a) 纤维穿插于土中

(b) 纤维相互交织

图7 纤维在土中的分布形态

Fig.7 Distribution form of fibers in soil

剂掺量土的轴向应力-应变曲线见图8。不同冻融次数下,1%~5%SH固土剂掺量土的应力-应变曲线均为应变软化型,破坏形式受冻融次数的影响较小。随应变增加,土的应力先快速增大,至峰值后随应变的增加持续下降,直至趋于平稳。受压过程中,试样发生不同程度的破坏,出现“裂而不断”的现象,破坏后土的残余强度仍较高。相同冻融次数下,随着SH固土剂掺量的增加,纤维加筋土的峰值强度和破坏应变均增大。掺加SH固土剂和纤维,显著增强了土的强度与抗变形性能。

4 纤维加筋固化土的微观结构

4.1 土颗粒变化

图9为冻融0、1、2、5、7、10、12、15次,石灰+SH固土剂+纤维+土的SEM照片。由图9可见,未冻融时,土的结构密实,多为微小孔隙,结构单元体的形态以团聚体为主,单元体的连接方式主要为面-面接触。冻融前2次后,土中出现微裂纹,土的结构开始发生破坏。冻融5~10次后,孔隙数量明显增加且孔径变大,单元体的主要连接方式由面-面接触转变为点-面接触、点-点接触。冻融12次后,土的密实度显著降低,裂纹数量明显增多。这是因为土中的水不断经历着冻结和融化的相变过程。冻结时,水凝结成冰,体积膨胀,破坏了土颗粒之间的黏结力,改变了应力-应变场,微裂纹随之产生;融化时,孔隙逐渐增大,大孔隙增多并相互贯通。随冻融次数增加,微裂纹不断增多、变长、增宽。土中的微裂纹纵横交错,将土切割成形状和大小不同的土块,土的整体性被破坏。

利用Avizo软件处理图像,分别计算颗粒面积比、颗粒等效直径和颗粒扁圆度,见图10。土颗粒面积比(土颗粒面积与整个图像面积之比)越低,表明土颗粒数量越少,孔隙度越高。等效直径(与土颗粒面积相等的圆的直径)描述单个土颗粒的大小,其值越大,意味着土团粒较多,土的粘结性较好。扁圆度(土颗粒的短轴与长轴之比)越大,表示颗粒形状越接近球形,土的结构稳定性越差。

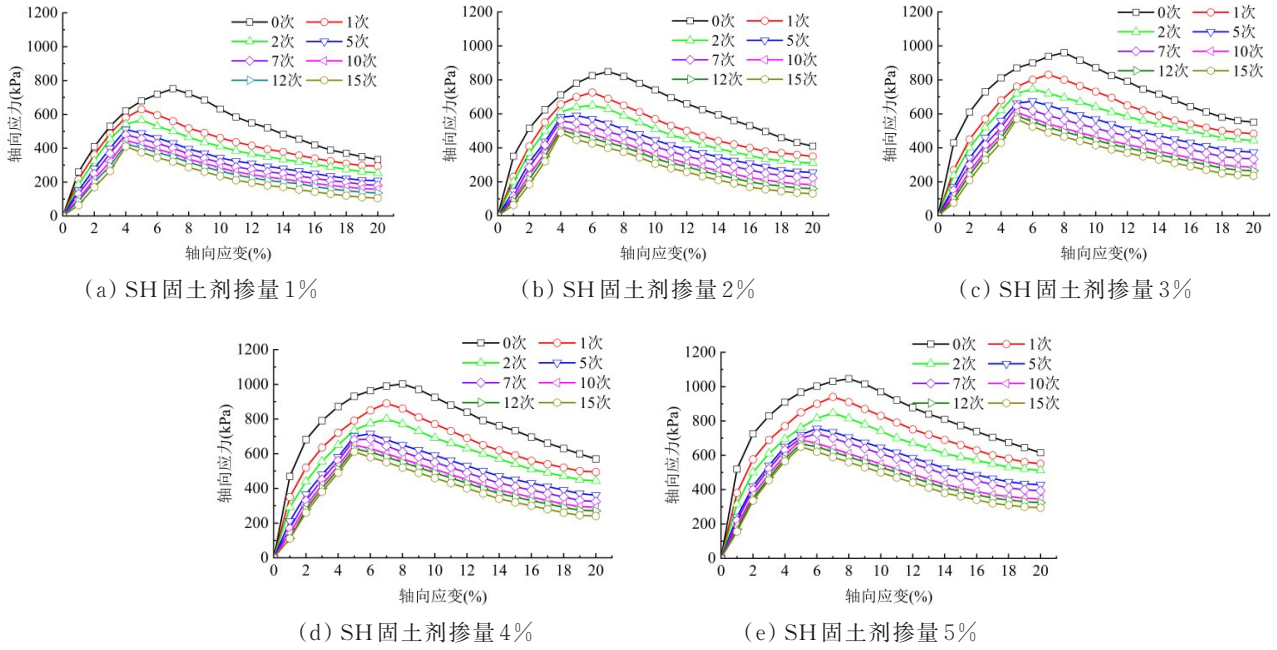


图8 石灰+SH固土剂+纤维+土的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of soil stabilized with lime, SH agent and fiber under freeze-thaw cycles

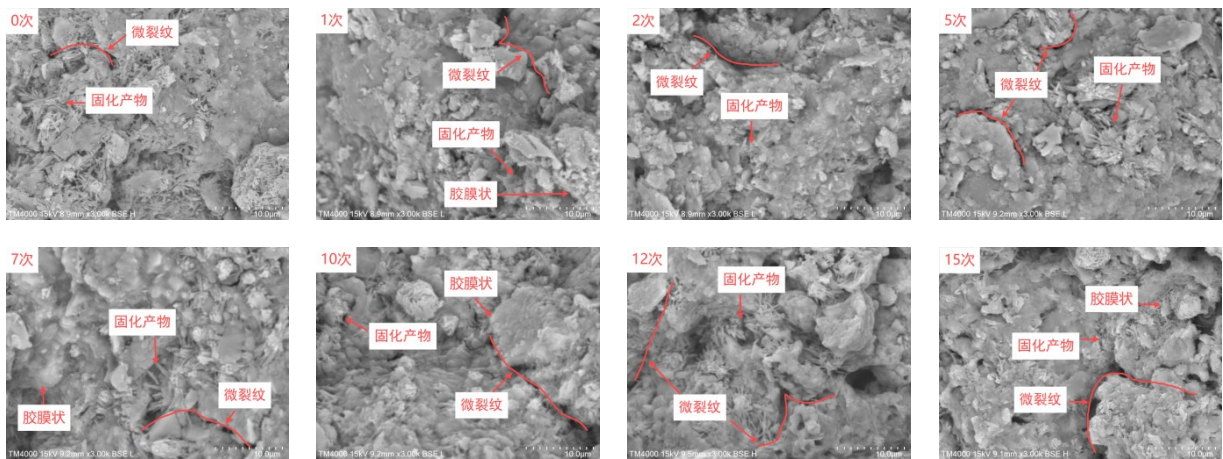
图9 不同冻融次数下石灰+SH固土剂+纤维+土的SEM照片($\times 3000$)

Fig.9 SEM photos of soil stabilized with lime, SH agent and fiber under freeze-thaw cycles

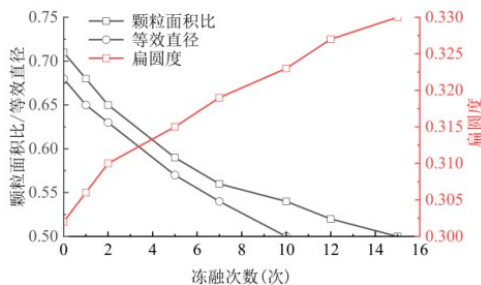


图10 土颗粒的形态参数

Fig.10 Morphological parameters of soil particles

由图10可见,随冻融次数增加,石灰+SH固土剂+纤维+土的颗粒面积比和颗粒等效直径减小。颗粒面积比减小,则孔隙数量增加,土的结构愈加松散。颗粒等效直径减小,说明部分团聚体随冻融

次数的增加发生破碎。扁圆度随冻融次数的增加逐渐增大,有趋于圆形的趋势,但增长较为缓慢。

4.2 孔隙的分布特征

完成CT试验,计算不同冻融次数下大、中、小孔隙百分比,如图11所示。依据孔径大小,将孔隙划分为:小孔隙 $0.04 \mu\text{m} < d \leq 0.4 \mu\text{m}$;中孔隙 $0.4 \mu\text{m} < d \leq 4 \mu\text{m}$;大孔隙 $d > 4 \mu\text{m}$ ^[17]。

随着冻融循环次数的增加,小孔隙的比例逐渐减小,而中孔隙和大孔隙的比例逐渐上升。总体来看,大孔隙比例的增长较慢,经过10次冻融循环后,大孔隙的比例趋于稳定。冻融作用下,水冰相变过程逐渐改变了土的结构,孔隙形态的变化表现为从小孔隙、中孔隙、大孔隙及微裂纹的逐渐演变。冻结过程中,孔隙水结冰产生冻胀力,破坏了土颗粒

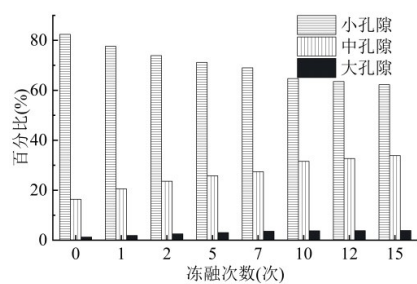


图 11 石灰+SH 固土剂+纤维+土的孔隙分布直方图

Fig.11 Pore distribution of sulfuric saline soil stabilized with lime, SH agent and fiber under freeze-thaw cycles

间的联结,导致原有的小孔隙增大为中孔隙,同时产生新的小孔隙;在融化阶段,孔隙内的冰转化为水,盐分和可溶性矿物质随之溶解并沿着孔隙网络移动,导致土的结构逐渐疏松,孔隙率大幅增加。反复冻融使孔隙不断发育并逐渐形成连通的大孔隙和微裂纹,土的冻融损伤程度不断增加。

4.3 微裂纹变化

将宽度与长度比值小于 0.3 的孔隙定义为微裂纹^[17]。表 3 为微裂纹随冻融次数的演化过程(第 300 层断面)和三维重建后的微裂纹模型。图 12 为微裂纹率(微裂纹体积与试样体积的比值)随冻融次数变化曲线。

表 3 中的微裂纹模型展示了土样中微裂纹的发育状况:微裂纹数量随冻融次数的增加而逐渐增多,主要集中于试样的表层,试样内部的微裂纹数量相对较少。未冻融土样中的微裂纹较少;冻融 1 次、2 次,微裂纹的长度、宽度、数量显著增加;冻融 5~7 次,微裂纹的联通程度明显提升;冻融 10~15 次,新产生的微裂纹减少,已有裂纹的连通性得到进一步加强。

由图 12 可见,冻融 1~2 次,石灰+SH 固土剂+纤维+土的微裂纹率增幅较大;冻融 3~10 次,微裂纹率增加较平缓;冻融 11~15 次,微裂纹率趋于稳定,这与抗压强度的变化规律基本吻合。冻融前 2 次,冻胀作用使微裂纹快速发育;多次冻融后,土颗粒间的粘结力降低,微裂纹的数量持续增多,为冰晶提供了储存空间,使土的冻胀效应近乎消失,微裂纹率逐渐稳定。

4.4 强度与微观结构的相关性

基于逻辑回归算法,石灰+SH 固土剂+纤维+土的抗压强度、微裂纹率与冻融次数的关系见图 13。图 14 为抗压强度与微裂纹率的关系曲线。

石灰+SH 固土剂+纤维+土的抗压强度与冻融次数呈指数关系,微裂纹率与冻融次数呈幂函数关系,拟合程度较高。冻融 15 次的抗压强度实测值为 592.5 kPa,微裂纹率为 3.49%;冻融 20 次时计算

表 3 不同冻融次数下石灰+SH 固土剂+纤维+土的 CT 图像和三维重建后的微裂纹模型

Table 3 CT section and crack model of soil stabilized with lime, SH agent and fiber under freeze-thaw cycles

冻融次数	CT 图像	微裂纹模型
0		
1		
2		
5		
7		
10		
12		
15		

的抗压强度为 590.83 kPa,微裂纹率为 3.65%,这与抗压强度与微裂纹率随冻融的变化规律相吻合。因此,关系式为预测抗压强度随冻融的阶段性变化提供了参考。

冻融过程中土的结构损伤导致强度劣化。以微裂纹率为自变量,冻融土的抗压强度为因变量,建立数学表达式,以表征强度劣化与结构损伤的相关关系。石灰+SH 固土剂+纤维+土的抗压强度与微裂纹率的拟合函数为线性函数,相关系数大于

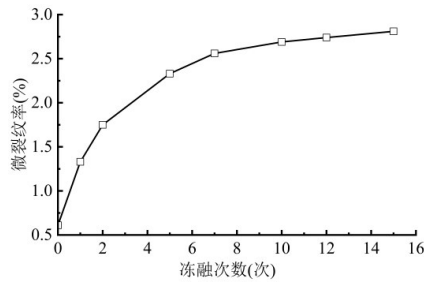


图 12 石灰+SH 固土剂+纤维+土的微裂纹率

Fig.12 Crack ratio of soil stabilized with lime, SH agent and fiber under freeze-thaw cycles

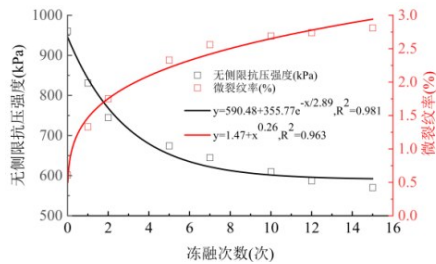


图 13 抗压强度、微裂纹率与冻融次数的拟合曲线

Fig.13 Fitting curves of UCS vs. crack ratio under freeze-thaw cycles

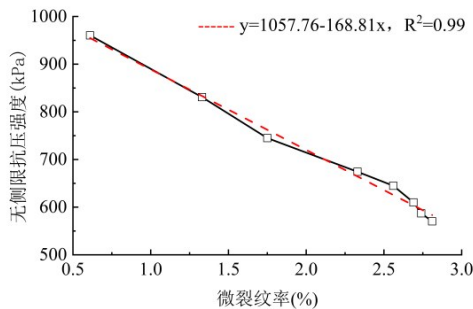


图 14 无侧限抗压强度与微裂纹率的关系曲线

Fig.14 The UCS of soil stabilized with SH agent and fiber vs. crack ratio

0.99, 假设微裂纹率为 2.81, 计算的无侧限抗压强度值为 583.40 kPa, 基本上符合强度的变化趋势。

5 结论

1) 石灰+纤维+土的抗压强度随纤维掺量的增加先增大后减小, 最优的纤维掺量为 0.3%。SH 固土剂掺量 1%~3% 的石灰+SH 固土剂+纤维+土的强度增幅较大, 确定最适宜的 SH 固土剂掺量为 3%。

2) 石灰+SH 固土剂+纤维+土的抗压强度随冻融次数增加呈阶段性降低。即强度降幅较大阶段(冻融前 2 次)、降幅较小阶段(冻融 3~11 次)和强度稳定阶段(冻融 12~15 次), 石灰+SH 固土剂+纤维+土的破坏程度随 SH 掺量增加而减小。

3) 冻融改变了土颗粒的形态与连接方式, 由面-

面接触逐渐向点-面接触及点-点接触转变。随冻融次数增加, 颗粒面积比和颗粒等效直径均减小, 颗粒扁圆度缓慢增加。土颗粒更趋于球形且大颗粒变少, 土的结构稳定性逐渐降低。

4) 石灰+SH 固土剂+纤维+土的孔隙分布特征受冻融影响较大。总体上, 随冻融次数增加, 小孔隙比例逐渐减小, 中孔隙与大空隙比例逐渐增大。微裂纹率随冻融次数增加阶段性增大, 冻融 10 次后趋于稳定。

5) 干燥后的 SH 固土剂为膜状和丝状, 胶膜包裹土颗粒, 形成具有憎水性的土团粒; 胶丝填充孔隙, 提高了土颗粒之间的黏结性。纤维穿插于土颗粒间与土孔隙中, 通过界面摩擦和粘结作用, 制约了土颗粒的位移; 同时, 纤维与土形成的网状结构, 约束了土的冻胀破坏。石灰、SH 固土剂与纤维联合加筋固化硫酸盐渍土, 可提高土的力学性能与冻融耐久性。

参考文献

- [1] 李文涛, 孙章皓, 庄妍, 等. 氧化镁复合水泥固化硫酸盐渍土的力学、膨胀性能及微观机理[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(9): 1840-1848.
LI W T, SUN Z H, ZHUANG Y, et al. Mechanical and swelling properties, as well as micro-mechanism of sulfate-bearing soil stabilized by magnesium oxide and cement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(9): 1840-1848. (in Chinese)
- [2] 柴寿喜, 田萌萌, 魏丽, 等. 石灰粉煤灰固化硫酸盐渍土的水稳定性与微观结构特征[J]. 工程地质学报, 2024, 32(2): 430-439.
CHAI S X, TIAN M M, WEI L, et al. The water stability and microstructure indices of sulphate saline soil stabilized with lime and fly ash [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(2): 430-439. (in Chinese)
- [3] 杨双双. 石灰-聚丙烯纤维改良盐渍土的力学性质及机理分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
YANG S S. Mechanical properties and mechanism analysis of saline soil modified by lime-polypropylene fiber [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [4] 徐鹏飞, 李泽莹, 王银梅, 等. 冻融循环对新型高分子材料 SH 固化黄土力学特性的影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 137-141.
XU P F, LI Z Y, WANG Y M, et al. Impact of freeze-thaw cycles on mechanical properties of loess solidified with new polymer curing agent SH [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 137-141. (in Chinese)
- [5] 管小龙. 石灰与纤维固化硫酸盐渍土特性试验研究

- [D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- GUAN X L. Experimental study on the characteristics of sulphate saline soil solidified with lime and fiber [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023. (in Chinese)
- [6] WEI L, CHAI S X, XUE M L, et al. Structural damage and shear performance degradation of fiber-lime-soil under freeze-thaw cycling [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2022, 50(5): 845-857.
- [7] 魏丽, 杨光, 尚军, 等. 冻融损伤过程中纤维加筋土的抗压性能与裂隙演化[J]. *土木工程学报*, 2024, 57(4): 81-91.
- WEI L, YANG G, SHANG J, et al. Compressive properties and crack evolution characteristics of fiber reinforced soil under freeze-thaw cycling [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(4): 81-91. (in Chinese)
- [8] 李生伟, 杨超. 冻融循环作用下盐渍土病害机理及改良技术综述[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(8): 191-200.
- LI S W, YANG C. Overview on disease mechanism and improvement technology of saline soil under effect of freeze-thawing cycle [J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2020, 51(8): 191-200. (in Chinese)
- [9] SHIBI T, KAMEI T. Effect of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled bassanite and coal ash [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106: 36-45.
- [10] 徐敏普, 孙明瑞, 常成. 冻融循环作用下秸秆纤维加筋土抗压强度试验研究[J]. *盐城工学院学报(自然科学版)*, 2021, 34(2): 6-10.
- XU M P, SUN M R, CHANG C. Experimental study on compressive strength of straw fiber-reinforced soil under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 34(2): 6-10. (in Chinese)
- [11] ROUSTAEI M, ESLAMI A, GHAZAVI M. Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 120: 127-137.
- [12] 石群, 张远芳. 罗布泊天然盐渍土冻融循环后微观结构分析[J]. *工程勘察*, 2016, 44(5): 12-16.
- SHI Q, ZHANG Y F. Microstructure analysis of natural saline soil after freezing and thawing cycle in Lop Nur region [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2016, 44(5): 12-16. (in Chinese)
- [13] WANG J Q, WANG Q, LIN S, et al. Relationship between the shear strength and microscopic pore parameters of saline soil with different freeze-thaw cycles and salinities [J]. *Symmetry*, 2020, 12(10): 1709.
- [14] 马冰. 冻融循环条件下石灰固化盐渍土物理力学性质研究及机理分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- MA B. Physico-mechanical properties and mechanism analysis of lime-solidified saline soil under freezing-thawing cycle conditions [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [15] 蔡正银, 朱洵, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土裂隙演化规律[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1381-1389.
- CAI Z Y, ZHU X, HUANG Y H, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(8): 1381-1389. (in Chinese)
- [16] 刘治清, 宋晶, 杨玉双, 等. 饱和细粒土固结过程的三维孔隙演化特征[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 931-940.
- LIU Z Q, SONG J, YANG Y S, et al. Three-dimensional pores evolution characteristics during consolidation process of saturated fine-grained soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(5): 931-940. (in Chinese)
- [17] 魏丽. 纤维与石灰加筋固化滨海盐渍土的冻融损伤及力学性能退化研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- WEI L. Fabric damage and mechanical degradation of coastal saline soil reinforced with fiber and lime under freeze-thaw cycling [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. (in Chinese)
- [18] 王勇, 李国芬, 黄凯健, 等. 水泥/石灰对滨海盐渍路基土性能的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(5): 165-169.
- WANG Y, LI G F, HUANG K J, et al. Effect of cement and limestone on performance of inshore saline subgrade soil [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 38(5): 165-169. (in Chinese)
- [19] WEI L, CHAI S X, ZHANG H Y, et al. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 300-308.
- [20] SHIMIZU H, MURATA S, ISHIDA T. The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(5): 712-727.
- [21] 任晓峰. SH及石灰加固黄土耐久性试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- REN X F. Experimental study on durability of SH and lime reinforced loess [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [22] 李湘. SH-石灰复合材料加固遗址土的盐蚀风蚀特征 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- LI X. Salt and wind erosion characteristics of earthen site solidified with SH-lime composite materials [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese)