

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.3013

液体石蜡改性水泥土的冻融性能与机理分析

韦璐, 胡俊杰, 黄坤, 胡学奥

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为缓解冻融循环对水泥土力学性能的劣化现象, 利用相变材料能量转换特性, 提出一种添加液体石蜡的解决方案。首先, 通过无侧限抗压强度试验, 发现液体石蜡掺杂质量分数为3%时的水泥土抗压强度最高, 比素水泥土提高了约7%。然后, 经过冻融循环试验, 发现相同次数下, 液体石蜡水泥土的外观较素水泥土的劣化慢, 且质量和强度损失较少, 但无侧限抗压强度较高。最后, 通过扫描电镜实验对比分析素水泥土和液体石蜡的微观形态, 揭示了冻融循环下水泥土的损伤机理及液体石蜡对水泥土的改良机理。研究表明, 液体石蜡的掺入可显著改善水泥土的冻融劣化现象, 且经过冻融循环后的液体石蜡水泥土强度损失比素水泥土的少8.56%, 说明液体石蜡改良效果显著。

关键词: 水泥土; 冻融循环; 抗压强度; 液体石蜡; 扫描电镜

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)03-0010-07

引文格式: 韦璐, 胡俊杰, 黄坤, 等. 液体石蜡改性水泥土的冻融性能与机理分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(3): 10-16.

Analysis of the Mechanical Properties of Liquid Paraffin-Cemented Soil Under Freeze-Thaw Cycles

WEI Lu, HU Junjie, HUANG Kun, HU Xueao

(College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: To alleviate the degradation of the mechanical properties of cement-soil brought about by freeze-thaw cycles, a solution involving the addition of liquid paraffin has thus been proposed by utilizing the energy conversion characteristics of phase change materials. Firstly, based on the results of unconfined compressive strength tests, it is found that the compressive strength of cement soil reaches the highest point with a mass fraction of 3% liquid paraffin added, which is about 7% higher than that of plain cement-soil. Subsequently, freeze-thaw cycling tests reveal that under the same number of cycles, the appearance of liquid paraffin cement soil deteriorates slower than that of plain cement soil, with a less loss of quality and strength, yet a relatively higher unconfined compressive strength. Finally, a comparison and analysis are made of the micro-structure of cement soil and liquid paraffin through scanning electron microscopy experiments, revealing the damage mechanism of water soil under freeze-thaw cycles as well as the improvement mechanism of liquid paraffin on cement soil. The research results show that the addition of liquid paraffin helps to significantly improve the freeze-thaw degradation of cement soil, with the strength loss of liquid paraffin cement soil 8.56% less than that of plain cement soil after freeze-thaw cycles, which verifies the remarkable improvement effect of the liquid paraffin.

收稿日期: 2024-12-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(42402272); 安徽省科研编制计划基金资助项目(2023AH050177); 安徽省住房与城乡建设科学技术计划基金资助项目(2023-YF036)

作者简介: 韦璐, 女, 安徽建筑大学副教授, 博士, 主要研究方向为道路工程, E-mail: weilu@ahjzu.edu.cn

Keywords: cement-soil; freeze-thaw cycle; compressive strength; liquid paraffin; scanning electron microscopy

1 研究背景

随着对水泥土的深入研究,冻融循环作用下的水泥土研究显得愈发重要。已有研究发现,水泥土在一定程度上可以提高路基土在冻融循环下的强度和抗冻能力,但长期的冻融循环作用会对水泥土的内部结构和性能造成损伤^[1-3]。孙韬^[4]研究发现,水泥土的抗剪强度随着冻融循环次数的增加而减小,且冻融循环会使水泥土内部的水泥基胶结物流失;崔宏环等^[5]引入了破坏应变能密度概念,发现水泥土的破坏应变能密度随着冻融循环次数的增大而减小,表明冻融循环会加剧试样的损伤程度。为改善冻融循环作用对水泥土的损伤问题,在水泥土中添加外加剂是最有效、最快捷的解决措施^[6-9]。徐丽娜等^[10]在水泥土中加入玄武岩纤维,试验结果表明玄武岩纤维的加入可有效降低水泥土的强度损失率,提高其抗冻性能;胡建林等^[11]探究了铁尾矿砂水泥土的抗冻耐久性,结果表明铁尾矿砂可以提高水泥土的抗冻性能,降低其变形程度。

近年来,相变材料因其独特的能量转换特性成为改良材料的研究热点,其主要通过自身相态变化从周围环境吸收或者释放热能,从而达到控制温度的效果。目前,相变材料应用在季冻区路基工程的研究较少,其掺入到路基土中可以通过自身控温性质预防或延缓路基病害的产生,相较于其他材料,相变材料的热稳定性效果更好、速率更快,并且可以解决热量在时间上的不匹配问题^[12-14]。黄英豪等^[15]以膨胀土为研究对象,选用石蜡基相变材料对其进行改良并进行冻融试验,发现石蜡基相变材料可以改良土体的冻融性能;朱怀太等^[16]提出采用膨胀石墨-正十四烷(EG-C14)复合相变材料改良黄土,试验结果显示EG-C14能减缓冻融循环期间土体内部温度的变化速率,从而有效控制土体的胀缩变形,减轻冻融循环对土体微观结构的破坏。郑永杰等^[17]利用液体石蜡和微胶囊两种相变材料,采用不同配比加入黄土中进行一系列试验,结果显示液体石蜡可以提高土体破坏时的韧性,在提升土体热稳定性方面优于微胶囊的。

目前已有文献多数只研究了水泥和相变材料分别掺入路基土中对冻融循环作用下路基土力学性能的影响,而在路基土中加入水泥或相变材料均可发挥

材料本身的性能优势,提升其抗冻性能,因此希望将二者都掺入路基土中共同发挥作用,进一步提升其性能。基于此,本文研究了液体石蜡掺杂质量分数对水泥土无侧限抗压强度的影响^[18],并在较优掺杂质量分数的基础上,开展冻融循环试验,具体分析冻融循环作用下,液体石蜡水泥土的外观、质量和强度变化情况,通过对两种水泥土进行扫描电镜实验,对比分析了两种水泥土微观形态上的差异,以探究水泥土冻融循环下的损伤机理,以及冻融循环下液体石蜡对水泥土的改良机理。

2 试验

2.1 试验材料

试验所使用的土取自合肥某路基,属于砂土,其物理性质见表1。按照《公路土工试验规程》,将土样置于自然环境中进行风干处理,随后碾碎,最终筛取粒径为2 mm的土样,土样的颗粒级配曲线如图1所示。试验所采用的水泥是P.O·42.5普通硅酸盐水泥,化学成分主要为SiO₂、CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃等,物理性质见表2。试验所用相变材料为PCM-A-5液体石蜡,外观上是无色无味的,且无腐蚀性和毒性,相变温度为5℃,具体参数见表3。

表1 土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of the soil

指标	天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	塑限/%
取值	16	1.875	1.4	18.30
指标	塑性指数 I _p	风干含水率/%	固体颗粒比重	液限/%
取值	13.68	8	2.66	31.98

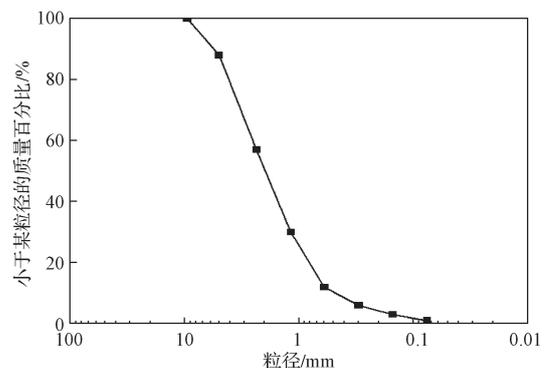


图1 土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of the soil

表2 硅酸盐水泥的性能指标

Table 2 Performance indicators of Portland cement

指标	细度/ ($m^3 \cdot kg^{-1}$)	初凝时 间/min	终凝时 间/min	安定 性	3d抗压 强度/MPa	3d抗折 强度/MPa
取值	368	184	265	合格	26.3	5.6

表3 液体石蜡性能参数

Table 3 Performance parameters of liquid paraffin

指标	相变温 度/ $^{\circ}C$	使用温 度/ $^{\circ}C$	相变潜热/ ($J \cdot g^{-1}$)	比热容/ ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	材质	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
取值	5	-40~ 120	210 ± 10	2	有机 材料	0.88

2.2 试块制备及养护

试验所采用的水泥掺杂质量分数为15%，水灰质量比为1.0，压实度为95%，液体石蜡的掺杂质量分数为0%，3%，5%，8%。试块尺寸选用半径为50 mm、高100 mm的圆柱体试块。所有试块被放置于标准养护箱中进行养护，养护龄期设为28 d。

2.3 试验方案

为探究加入液体石蜡掺量对水泥土强度的影响规律，试验设计水泥掺杂质量分数为15%，采用液体石蜡掺杂质量分数分别为0%，3%，5%，8%，将试验分成4组，每组制备3个平行试件，结果取平均值以减小误差。基于所得试验结果，最终确定液体石蜡的掺杂质量分数为3%，水泥掺杂质量分数为15%，并设计一组空白对照组，待养护28 d后，开展冻融循环试验，试块用A-X-X的格式编号，如A-0-3中A表示28 d养护龄期，0代表液体石蜡掺杂质量分数为0%，3代表冻融循环次数为3次，制备的水泥土试块及编号见图2。



a) 素水泥土 b) 液体石蜡水泥土
图2 素水泥土和液体石蜡水泥土试块

Fig. 2 Test blocks of the plain cement soil and liquid paraffin-cement soil

取出养护完成的试块，将其置于设定为-20 ℃的低温冻融试验箱中冷冻6 h；之后，将试块转移至20 ℃的恒温水浴养护箱中融解6 h；此过程每12 h为1次完整的冻融循环，通过重复上述步骤，即可完成多次冻融循环试验。

3 试验结果与分析

3.1 液体石蜡掺杂质量分数对水泥土强度的影响

试验所得不同液体石蜡掺杂质量分数下的水泥土无侧限抗压强度见图3。

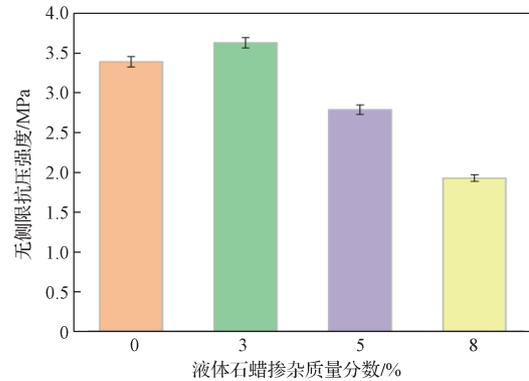


图3 不同石蜡掺量下的水泥土抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of cement-soil with different paraffin content added

从图3可以看出，随着液体石蜡掺杂质量分数的增加，液体石蜡水泥土的抗压强度先增大后减小。当液体石蜡的掺杂质量分数为3%时，液体石蜡水泥土的抗压强度达峰值，相较于未掺入液体石蜡的水泥土，其无侧限抗压强度增长率约为7%。试验结果表明，在水泥土中适量添加液体石蜡可以提高其抗压强度；当添加的液体石蜡质量分数超过3%时，再继续添加液体石蜡会减弱水泥土抗压强度。观察液体石蜡水泥土的微观结构，进一步分析发现添加的液体石蜡通过以下方式影响水泥土的性能，影响机制见图4。

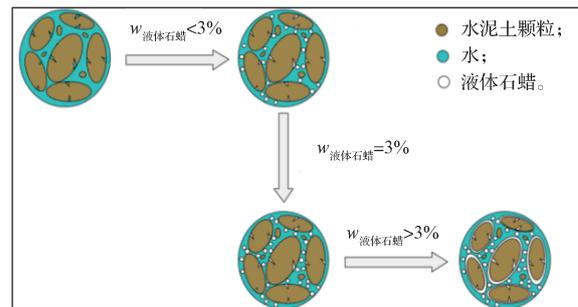


图4 液体石蜡的影响机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the influence mechanism of liquid paraffin

如图4所示，当液体石蜡掺杂质量分数小于3%时，液体石蜡的掺入填充了水泥土中的孔隙，且随着液体石蜡掺杂质量分数的增加，土体孔隙被填充部分逐渐增多，减缓了水泥土中部分水泥的水化反应速率，延长了水泥土的硬化时间，使水泥土中的水泥有足够的时间充分进行水化反应，从而提高了水泥土的强度和耐久性；又由于液体石蜡具有润滑

特性,随着液体石蜡掺杂质量分数的增大,逐渐降低了水泥土颗粒之间的摩擦阻力,使其均匀分布,从而提高了水泥土的密实性及强度。当液体石蜡掺杂质量分数等于3%时,液体石蜡的填充作用和润滑作用得到中和,此时两种作用达到了最佳平衡状态,填充作用和润滑作用都得以充分展现。当液体石蜡掺杂质量分数大于3%时,其对水泥土的影响逐渐减弱,甚至产生负面影响,这主要是因为液体石蜡是一种烷烃,当其加入水泥土中,通常不会与水泥或土体发生化学反应,又由于土体中孔隙的容量有限,无法容纳加入的过量液体石蜡,进而导致多余的液体石蜡一部分从土体表面渗出,还有一部分渗入孔隙中,而渗入孔隙中的多余液体石蜡会在水泥土颗粒表面形成一种凝胶状物质的物理阻隔层,其可能阻止水泥土中部分水泥的粘结和水化反应,从而降低了水泥土的强度^[15,17]。

3.2 冻融循环对试块的影响

图5所示为冻融循环作用下两种水泥土的外观。

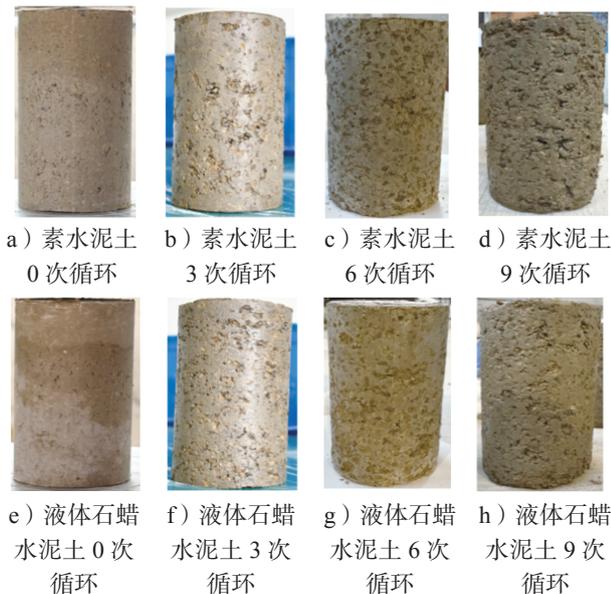


图5 冻融循环作用下的两种水泥土外观

Fig. 5 Appearance of two types of cement soil under freeze-thaw cycles

从图5可以看出,经历3次冻融循环后,素水泥土试块的外表面开始显现出细小且相对较为集中的裂纹,随着冻融循环次数不断增加,这些裂纹逐渐扩展,且数量慢慢增多;冻融循环6次后,素水泥土试块外表面几乎布满了裂纹,且试块上下底面边缘出现土体细小颗粒掉落;当冻融循环9次后,素水泥土试块表面的裂纹显著增大,试块下底面边缘出现了微小土块的脱落。相较之下,添加液体石蜡的水泥土试块的整体外观显得更加光滑圆润,冻融循环3次后,

液体石蜡水泥土试块的外表面出现了少量细微裂纹,且相对比较分散;冻融循环6次后,液体石蜡水泥土试块的表面裂纹相对增多,且集中出现在外表面中部,试块出现极少量土颗粒掉落;冻融循环9次后,液体石蜡水泥土试块的外表面充满裂纹,上下底面边缘出现细小土体颗粒掉落。

为此,引入了质量变化率以便直观观测并评估冻融循环给两种水泥土试块带来的土体颗粒脱落、结构破坏等损伤,图6为试验得到的冻融循环次数与土块质量变化率关系变化曲线。

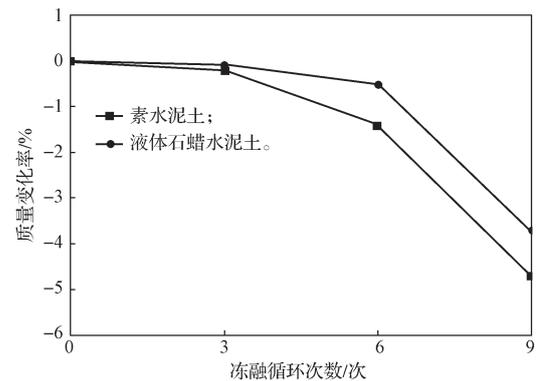


图6 冻融循环次数与质量变化率关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between the number of freeze-thaw cycles and the mass change rate

由图6可得,当冻融循环作用3,6,9次后,素水泥土试块和液体石蜡水泥土试块的质量变化率分别为-0.20%和-0.08%、-1.40%和-0.50%、-4.70%和-3.73%,素水泥土的质量损失率比液体石蜡水泥土的分别高了0.12%,0.90%,0.97%。从图6可以看出,当冻融循环次数从3次增加到6次时,液体石蜡水泥土的曲线斜率明显小于素水泥土的;而当循环次数从6次增加到9次时,液体石蜡水泥土的曲线斜率仅略小于素水泥土的;总体来看,液体石蜡水泥土的曲线斜率始终小于素水泥土的。这一结果表明,当循环次数较小时,液体石蜡的掺入可以有效减小冻融循环作用带来的质量损失,而循环次数较大时,液体石蜡的掺入仍可小幅减小质量损失。当两种水泥土经历相同次数的冻融循环作用时,液体石蜡水泥土的质量损失始终小于素水泥土的质量损失。

3.3 冻融循环对无侧限抗压强度的影响

试验所得冻融循环次数与无侧限抗压强度的关系曲线如图7所示。由图可以得出,与未经冻融循环的试块相比,经历冻融循环后的素水泥土试块和液体石蜡水泥土试块的无侧限抗压强度分别损失了32.95%和24.39%,液体石蜡水泥土试块的无侧限抗压强度损失比素水泥土的少8.56%。液体石蜡水泥土试块的无侧限抗压强度曲线始终位于素水泥土试块

的上方,当循环次数从0次增加到3次时,曲线的斜率最大,两种水泥土试块的无侧限抗压强度下降速率均达到峰值;当循环次数从3次增加到6次时,无侧限抗压强度的下降速率显著减缓,曲线斜率明显减小;而当循环次数从6次增加到9次时,曲线斜率相较于3~6次冻融循环阶段的略有增加,即无侧限抗压强度下降速度也略微增大。这一结果说明,相同次数的冻融循环作用下,液体石蜡水泥土的抗压强度要高于素水泥土的,即液体石蜡水泥土的抗压能力要优于素水泥土的,且在3~6次冻融循环阶段时的影响最为显著。

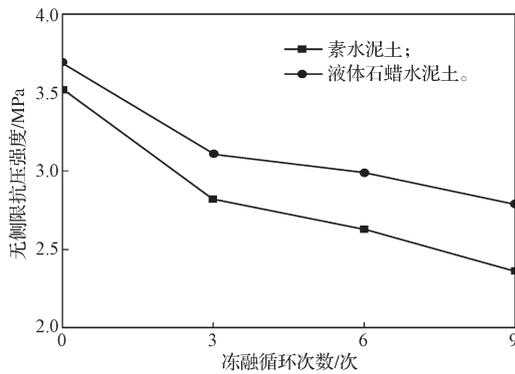


图7 冻融循环次数与无侧限抗压强度关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between the number of freeze-thaw cycles and the unconfined compressive strength

3.4 冻融机理分析

为了更清晰地观察素水泥土和液体石蜡水泥土在经历不同冻融循环次数下的微观形态变化,对两种水泥土试块进行了扫描电子显微镜试验,图8为冻融循环作用下的两种水泥土的微观形貌。

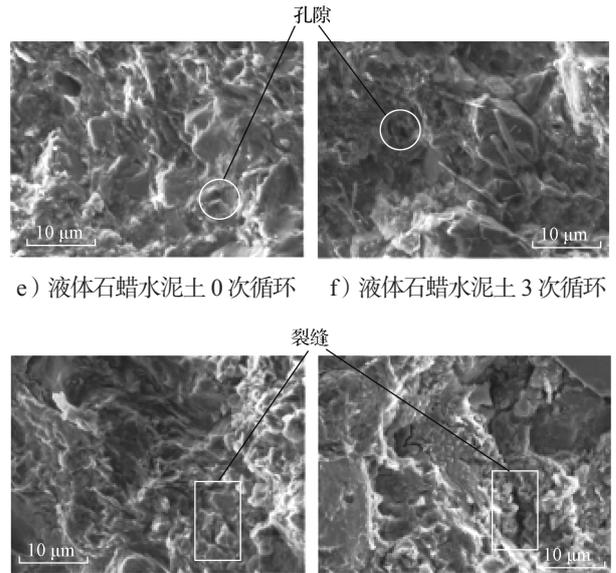
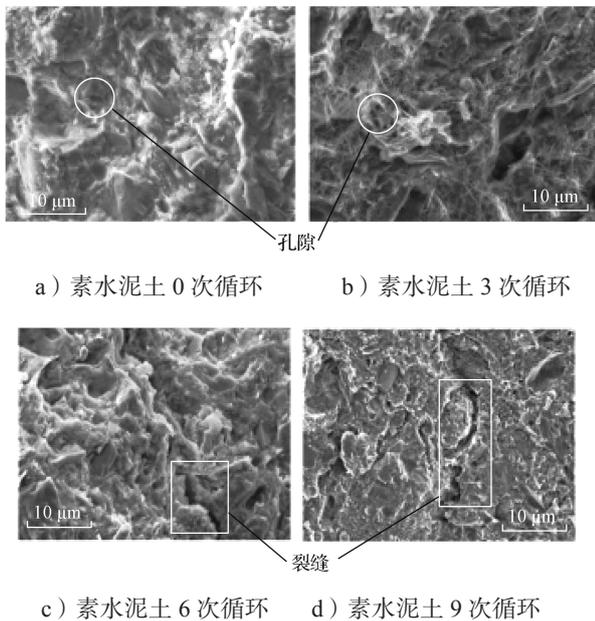


图8 冻融循环作用下两种水泥土的微观形貌

Fig. 8 Microscopic morphology of two types of cement soil under freeze-thaw cycles

由图8可以看到,两种水泥土的微观结构基本相似,均由较大的土颗粒构成骨架,细小土颗粒填充到较大土颗粒间的孔隙当中,土颗粒间存在部分水泥水化反应的产物。液体石蜡水泥土表面有类似凝胶状物质包裹,使其表面相比于素水泥土的更为光滑。随着冻融循环次数增加,素水泥土和液体石蜡水泥土内部的孔隙面积、大小随之增大,孔隙不断扩展,连接贯通直至形成裂缝。对比两种水泥土的微观形态发现,相同冻融循环次数下液体石蜡水泥土的孔隙面积、大小的增长率,以及裂缝的扩展速率,均显著慢于素水泥土的。

从微观角度进一步分析,得出两种水泥试件的冻融循环损伤机理,如图9所示。

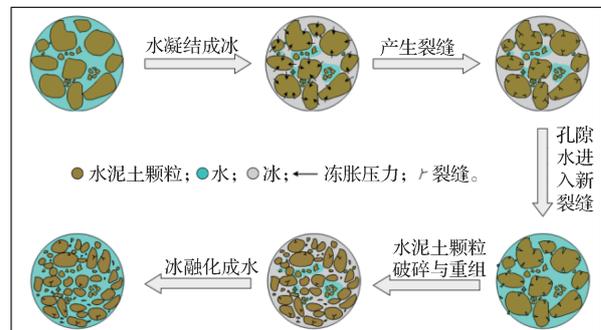


图9 冻融循环损伤机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the freeze-thaw cycle damage mechanism

如图9所示,当温度降低至0℃时,水泥土发生冻结作用,其孔隙水由液态水转变成固态冰,体积相应增大,产生了一定的膨胀应力。由于固态冰形成时

受孔隙的影响,多数为不规则的形状,这就导致了固态冰不规则部分与土体接触部位出现应力集中现象,产生冻胀压力,易使接触位置产生裂缝;当温度升至0℃以上时,固态冰又融化成液态水,融化而来的液态水向着新产生的裂缝处迁移,使其内部又产生了静水压力,导致水泥土颗粒破碎和重组。如此反复,因受到冻融循环作用,水泥土受到累积损伤,从而遭到破坏^[19]。水泥土中的初始孔隙主要以微孔为主,随着冻融循环次数的增加,微孔所占比例不断下降,而介孔、大孔所占比例不断上升,导致水泥土内部孔隙的面积、增长率也随之增大,但增长速率却呈现先增后减的趋势^[20]。

水泥土添加液体石蜡后,冻融循环作用下的改良机理如图10所示。

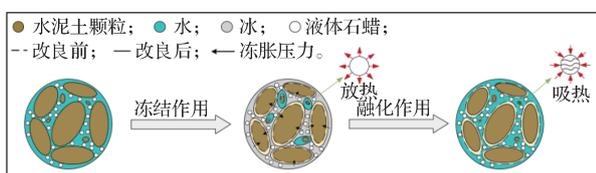


图10 冻融循环下液体石蜡的改良机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the improvement mechanism of liquid paraffin under freeze-thaw cycles

如图10所示,当水泥土受到冻结作用时,液体石蜡通过相变释放和存储的热量与外界低温相互抵抗,延缓了液态冰凝结成固态冰这一过程的发生,削弱了固态冰的冻胀压力,因此水泥土失水减少,从而使土颗粒间的孔隙变小;而当水泥土受到融化作用时,液体石蜡通过相变吸收周围环境的热量并储存,此外由于冻结阶段失水减少,相应的水泥土融化阶段吸收热也减少,从而水泥土颗粒间的孔隙变化进一步减弱^[21]。总的来说,液体石蜡随着周围环境的冷热波动,通过相变潜热的形式吸收或释放热量,从而调控水泥土试块内部的温度场,提升土体的热稳定性,减少或减弱土颗粒的胀缩和孔隙水的重复冻融作用,一定程度上可以减缓水泥土受到的冻融损伤。

4 结论

本文以液体石蜡改良水泥土冻融性能,进行了无侧限抗压强度试验、冻融循环试验和扫描电镜试验,分析液体石蜡改良水泥土的最优掺杂质量分数和冻融循环作用下水泥土试块的外观、质量、强度和微观形态的变化规律,主要结论如下:

1) 3%质量分数的液体石蜡掺入水泥土中,可以显著提高水泥土的无侧限抗压强度,证明适量地掺入液体石蜡对水泥土的力学性能有增强作用。

2) 冻融循环次数相同时,液体石蜡水泥土的质量损失较小,且外观劣化速度更慢,反映了液体石蜡的加入对水泥土的抗冻性能有显著改善。

3) 与素水泥土相比,相同冻融循环次数下,液体石蜡水泥土的抗压强度更高,强度损失较少,表明液体石蜡的掺入能够有效减缓冻融循环对水泥土强度的影响。

4) 从微观形态来看,相同冻融循环次数下,液体石蜡水泥土的孔隙面积、大小的增长率以及裂缝的扩展速率均低于素水泥土的,进一步证明液体石蜡的掺入对改善水泥土的抗冻耐久性具有积极作用。

参考文献:

- [1] SHAFIEIA, AMINPOUR M, HASANZADEHSHOOILIH, et al. Mechanical Characterization of Marl Soil Treated by Cement and Lignosulfonate Under Freeze-Thaw Cycles: Experimental Studies and Machine-Learning Modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(6): 200.
- [2] LIU C, BERARD C, DENG L J. Engineering Behavior of Cement-Treated Stiff Clay Subjected to Freezing/Thawing Cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 206: 103743.
- [3] 侯 芮. 环境侵蚀对水泥土疲劳特性影响的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
HOU Rui. Experimental Study on Effects of Environmental Erosion on the Fatigue Property of Cement-Soil[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [4] 孙 韬. 冻融循环对水泥土三轴强度指标与裂隙演化规律的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 127-132.
SUN Tao. Influence of Freeze-Thaw Cycles on Mechanical Properties and Fracture Evolution of Cement-Soil[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021, 38(8): 127-132.
- [5] 崔宏环, 张振寰, 何静云, 等. 冻融循环下路基改良土力学特性及破坏应变能密度研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5): 1957-1963.
CUI Honghuan, ZHANG Zhenhuan, HE Jingyun, et al. Research on Improved Subgrade Soil Mechanical Properties and Failure Strain Energy Density Under Freezethaw Cycles[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5): 1957-1963.
- [6] SHI X, YANG P, LI L, et al. Strength and Microscopic Pore Structure Characterization of Cement-Fly Ash Stabilized Organic Soil Under Freeze-Thaw Cycles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 420: 135635.

- [7] ZHANG J S, SHU Y H, ZHANG J J. Experimental Study on Dynamic and Static Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol Fiber Cement Soil Under Salt Freezing Cycle[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, 224: 104224.
- [8] LI H B, KANG X R, LI S, et al. Characterization and Mechanism Study of Sulfate Saline Soil Solidification in Seasonal Frozen Regions Using Ternary Solid Waste-Cement Synergy[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 427: 136263.
- [9] 王海飙, 陈冲. 纳米 CaCO_3 对冻融循环水泥土力学性能影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(29): 348-353.
WANG Haibiao, CHEN Chong. Experimental Study on the Strength of Cement Soil Impacted by the Nano- CaCO_3 Under the Cycling of Freeze-Thaw[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(29): 348-353.
- [10] 徐丽娜, 牛雷, 张颖, 等. 冻融循环作用下玄武岩纤维水泥土力学性质研究[J]. *工业建筑*, 2020, 50(3): 109-113.
XU Lina, NIU Lei, ZHANG Ying, et al. Effect of Freeze-Thaw Cycling on the Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Cemented Soil[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(3): 109-113.
- [11] 胡建林, 高鹏飞, 张玉龙. 冻融循环作用下铁尾矿砂水泥土强度及变形特性研究[J]. *森林工程*, 2022, 38(5): 121-127, 136.
HU Jianlin, GAO Pengfei, ZHANG Yulong. Study on Strength and Deformation Characteristics of Cement Soil of Iron Tailing Sand Under Freeze-Thaw Cycles[J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(5): 121-127, 136.
- [12] WANG Y, JASIM D J, MOHAMMAD SAJADI S, et al. Experimental Study of Phase Change Material (PCM) Based Spiral Heat Sink for the Cooling Process of Electronic Equipment[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15(7): 102793.
- [13] MAO W J, MA B, XU J Y. Phase Change Material Coated Geotextile for Temperature Regulation of Subgrade Soil[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 81: 110438.
- [14] CHEN Y, HUANG Y H, WANG S, et al. Effects of Phase Change Materials on the Freeze-Thaw Performance of Expansive Soil[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(7): 04023206.
- [15] 黄英豪, 陈永, 朱洵, 等. 相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(11): 1994-2002.
HUANG Yinghao, CHEN Yong, ZHU Xun, et al. Experimental Study and Micro-Mechanism Analysis of Freeze-Thaw Performance of Expansive Soils Improved by Phase-Change Materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(11): 1994-2002.
- [16] 朱怀太, 欧尔峰, 姜琪, 等. 冻融作用下复合相变材料改良黄土力学特性研究及机理分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2024, 44(3): 715-724.
ZHU Huaitai, OU Erfeng, JIANG Qi, et al. Study on the Mechanical Properties and Mechanism Analysis of Loess Improved by Composite Phase Change Materials Under Freeze-Thaw Conditions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(3): 715-724.
- [17] 郑永杰, 张翥, 雒志利, 等. 冻融循环下相变材料改良黄土路基物理力学特性研究[J]. *公路*, 2022, 67(8): 36-43.
ZHENG Yongjie, ZHANG Xiao, LUO Zhili, et al. Study on the Physical and Mechanical Properties of Loess Subgrade Improved by Phase Change Materials Under Freeze-Thaw Cycles[J]. *Highway*, 2022, 67(8): 36-43.
- [18] 周丽萍. 寒区复合水泥加固土的力学性质及损伤特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
ZHOU Liping. Study on the Mechanical Properties and Damage Characteristics of Soil Consolidated with Cold Region Composite Cement[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [19] 张经双, 段雪雷. 冻融循环下不同龄期水泥土损伤特性和能量耗散[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2144-2151.
ZHANG Jingshuang, DUAN Xuelei. Effects of Freeze-Thaw Cycles on Damage Characteristics and Energy Dissipation of Soil-Cement at Different Ages[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7): 2144-2151.
- [20] 程禹翰. 不同服役环境下黄土基水泥土物理力学特性及其计算模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
CHENG Yuhan. Study on the Physical and Mechanical Properties and Calculation Models of Loess-Based Cement-Soil Under Different Service Environments[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [21] 唐少容, 杜鹏, 李昊天, 等. 由石蜡基相变材料和煤渣改良的粉砂土的冻融性能[J]. *中国粉体技术*, 2024, 30(1): 123-131.
TANG Shaorong, DU Peng, LI Haotian, et al. Freeze-Thaw Properties of Silty Sand Modified by Paraffin-Based Phase Change Materials and Cinder[J]. *China Powder Science and Technology*, 2024, 30(1): 123-131.

(责任编辑: 廖友媛)