

冻融循环作用后水泥土及粉煤灰土的力学性能试验研究

张淑玲,倪静,马蕾,李鑫,李枭
(上海理工大学 环境与建筑学院,上海 200093)

摘要:对水泥土及粉煤灰土进行了冻融循环作用后的单轴抗压试验研究,探讨并对比了冻融循环次数、养护龄期、干湿冻融对两种改良土力学性能的影响规律,并分析了冻融循环对改良土的破坏机理。结果表明:冻融循环对削弱水泥土抗压强度的影响随着冻融次数的增加越来越明显,然而对粉煤灰土抗压强度的影响仅在冻融循环初期较显著。改良土的抗冻性能随着养护龄期的增长有不同程度的提高。干冻、湿冻对改良土抗压强度影响明显,相同冻融次数下干冻改良土的抗压强度高于湿冻条件下的抗压强度。通过对水泥土和粉煤灰土破坏机理进行分析,发现粉煤灰掺料的颗粒粒径小于水泥掺料的颗粒粒径,因而填充土体细小孔隙效果更优。由于结冰温度随着毛细孔径的减小而降低,导致粉煤灰土的抗冻性能优于水泥土的抗冻性能。在实际工程中,应根据工程所处环境的不同选取不同的冻土改良方法从而达到工程要求。

关键词:水泥土;粉煤灰土;冻融循环;力学性能;应力-应变关系;养护龄期

中图分类号:TU411

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)04-0196-06

Experimental study on mechanical properties of cement soils and fly ash soils after freeze - thaw cycling

ZHANG Shuling, NI Jing, MA Lei, LI Xin, LI Xiao

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Uniaxial compression tests were carried out on cement soils and fly ash soils after the freeze - thaw cycling. The effects of the number of freeze - thaw cycles, curing period, and moisture condition on the mechanical properties of soils were investigated. The failure mechanism of soils due to freeze - thaw cycling was studied as well. The results indicated that the freeze - thaw cycling decreases the compressive strength of cement soils, especially at a large number of freeze - thaw cycles, whereas decreasing the compressive strength of fly ash soils at an early stage. The frost resistance of soils increases as the curing period increases. For a given number of freeze - thaw cycles, the compressive strength of soils with lower moisture content is greater than those with higher moisture content. Fly ash has smaller particle sizes than cement, and therefore has better performance in filling soil pores. Since the freezing temperature decreases as the pore size decreases, fly ash soils have a better frost resistance than cement soils. In actual engineering project, proper methods used to improve the frozen soils should be chosen according to the different environment of the projects, so as to meet the engineering requirements.

Key words: cement soil; fly ash soil; freeze - thaw cycling; mechanical properties; stress - strain relationship; curing age

1 研究背景

不同工程环境中地基土的力学性能受环境影响

较大。我国季节性冻土分布广泛,寒冬季节低温导致土工构筑物中的土壤水冻结成冰,当气温回升至0℃以上时冻结的土壤开始融化,出现翻浆冒泥、土

收稿日期:2018-03-19; 修回日期:2018-04-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB511102)

作者简介:张淑玲(1993-),女,湖北省孝感市,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

体弱化且强度降低等现象。周而复始的冻融交替作为强化过程,极大地影响着土的结构性^[1-4],是导致土工构筑物破坏的主要原因。为了满足工程要求,对季节性冻土地区的土体进行改良是十分必要的,研究土体及改良土的力学特性对工程具有重要的意义。

目前国内外对土体加固方法的研究主要集中在注浆加固^[5]及微生物灌浆加固^[6]等方面。近年来,国内外学者对冻融循环作用下土体的力学性能进行了一些研究。Bigl 等^[7]对大粒径土和小粒径土在冻融循环状态下的回弹模量进行了探究,结果表明在温度低于 -2℃ 的条件下,土的回弹模量相比融土提高 2~3 个数量级,且含水量改变着冻土的回弹模量,其程度取决于土的类型。Bochove 等^[8]及 Sveistrup 等^[9]研究发现冻融循环改变了粉质黏土的原始内部结构。严晗等^[10]通过试验研究了反复冻融环境对粉砂土动力学特性参数的影响,发现同一动应变水平下,动应力大小与冻融次数、含水率呈负相关,而与围压呈正相关。董晓宏等^[11]进行了冻融下土体抗剪强度变化的研究,发现含水率一定时,黄土的黏聚力和抗剪强度大多在 3~5 次冻融循环之后降到最低值。

关于冻融循环对改良土体力学特性影响的研究相对较少。Arora 等^[12]发现在土体中同时掺加火山灰和粉煤灰可以提高基层土体的稳定性。王天亮等^[13]对冻融条件下水泥及石灰改良土的应力-应变关系展开了探讨,结果表明水泥土的应力-应变曲线为加工软化型,而石灰土的应力-应变曲线为加

工硬化型。

宋爱苹等^[14]通过试验研究了冻融循环条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性。在改良土抗冻性能研究方面,土体所加掺合料种类多为水泥掺料、石灰掺料及水泥加粉煤灰混合掺料,目前对于粉煤灰改良土的抗冻性能研究较少。

针对上述情况,本文对水泥土及粉煤灰土进行了冻融循环后的单轴抗压试验研究,探讨并对比了冻融循环次数、养护龄期、干湿冻融对两种改良土力学性能的影响规律,并分析了冻融循环对改良土的破坏机理。试验研究成果对季侯性冻土地区土体加固有一定的参考意义。

2 试件制备及试验方法

2.1 试验材料及试件制备

试验中所用黄土取自湖北省偏寒地区,取土深度 8~15 m,质地黏重,土体紧实,属黄棕壤土,该类型土的农业垦种历史较长,结构表面常覆有铁、锰胶膜或结核,其物理指标见表 1。

表 1 试验用黄土(素土)的基本物理参数			
天然含水率 $w/\%$	天然密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$
25.2	1.65	48.5	23.92

试验选用水泥及粉煤灰两种掺合料分别对黄土进行改良。水泥为 32.5 级的矿渣硅酸盐水泥,物理性质指标见表 2;粉煤灰为一级低钙粉煤灰,物理性质指标见表 3。

表 2 P. O. 32.5 普通硅酸盐水泥的物理性质指标								
细度/ $\%$	初凝时间/ min	终凝时间/ min	安定性	烧失量/ $\%$	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	90	240	合格	1.02	11.0	32.5	3.5	5.5

表 3 粉煤灰的物理性质指标								
粉煤灰等级	细度/ $\%$	烧失量/ $\%$	需水量比/ $\%$	含水量/ $\%$	$\text{Cl}^-/\%$	$\text{SO}_3/\%$	混合砂浆活性指数	
							7 d	28 d
I	≤ 12	≤ 15	≤ 95	≤ 1.0	≤ 0.02	0.03	≥ 75	≥ 85

试样制备时,先将黄土放入烘箱烘干,置于橡胶垫上用木锤碾碎,过 2 mm 筛备用^[15]。对于水泥土,按天然含水率加入自来水搅拌均匀,静置一夜。取湿土质量 20% 的水泥灰^[16],按 0.5 的水灰比制成水

泥浆,向土中加入水泥浆拌均匀,制样时间不应超过水泥的初凝时间。对于粉煤灰土,取干土质量 20% 的粉煤灰加入土中初拌,按 25% 的含水率加入自来水搅拌均匀,放于密封袋,置于干燥皿中静置一昼

夜,以备制样。

称取拌和土每份 825 g,置于内表面涂抹薄层凡士林的模具内,模具尺寸高度 $H = 200$ mm,直径 $D = 70$ mm。用锤重 2 500 g、落距 30 cm 的击实仪击实 50 次,把拌和土压制成高 $H = 100$ mm,直径 $D = 70$ mm,干密度为 2.14 g/cm^3 的试件。一天后脱模,室温条件下养护至试验要求的龄期。

2.2 试验设备

采用上海建恒仪器有限公司生产的 DR501 冻融循环试验箱(如图 1 所示)对试块进行冻融循环。试验箱温度范围为 $-52 \sim 130^\circ\text{C}$,电源 380V、50HZ,功率 7 kW。冻融循环后,对试块进行单轴抗压试验,采用上海皆准仪器设备有限公司生产的 WDW-Y300D 微机控制全自动压力试验机(如图 2 所示),技术指标:最大试验力 300 kN,试验力测量范围 $0 \sim 300$ kN,试验速度控制范围 $0.01 \sim 50$ mm/min,主机尺寸(长×宽×高)830 mm×530 mm×1 450 mm。



图 1 冻融循环试验箱



图 2 WDW-Y300D 微机控制全自动压力试验机

2.3 试验方案

对水泥土及粉煤灰土试块进行不同冻融循环次数、养护龄期、干湿冻融后的单轴抗压试验,每个条件下制备 3 个试块^[18]。冻融循环次数为 0、3、7、15 及 20 次。养护龄期选择 30、60 及 90 d,待试块养护完成之后进行室内冻融循环。根据季节性冻土区的

温度变化,选取冷冻温度为 -20°C ,融化温度为 20°C ,由于实际温度变化是一个渐变的过程,设定 1 h 内均匀降温至 -20°C ,冷冻恒定为 4 h,设定 1 h 内均匀升温至 20°C ,融化恒定为 4 h,此过程为一个冻融循环周期,每次冻融循环在 10 h 内完成。

干冻情况下,为避免冻融循环过程中试块水分的损失,在试块外套上塑料袋后置于冻融循环试验箱中;湿冻情况下,将养护完成后的试块置于水中浸泡,浸泡时保持试块高出水面 30 mm^[17],试样浸泡 2 d,取出后轻轻擦去表面水分,套上塑料袋,置于冻融循环试验箱中。

对冻融循环后的试块进行单轴抗压试验,数据采集由与试验相匹配的自动数据采集系统完成,所采集数据包括时间、荷载及位移。

3 试验结果与分析

3.1 试块破坏形态

图 3 为在显微镜下观察到的养护 30 d 后水泥土及粉煤灰土的颗粒胶结状况。从图 3 可以看出,无论是水泥土或是粉煤灰土,试块中的土颗粒和水泥或粉煤灰混合均匀、胶结状况良好。由此可知,按文中所述方法制备的试块均可呈现良好的内部颗粒胶结状况。

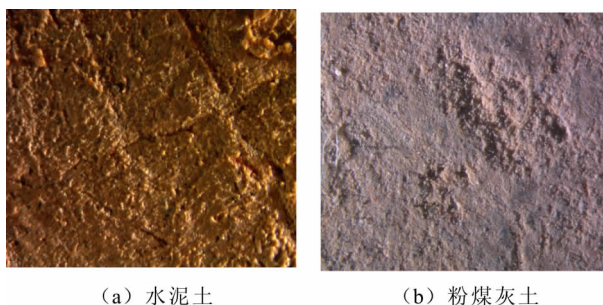


图 3 养护 30 d 后的试块表面照片

图 4 为 30 d 养护龄期且经过 7 次冻融循环的水泥土试块在单轴抗压试验破坏前后的照片。由图 4 可以看出冻融后的水泥土试块存在明显的剪切面,大致呈 60° 角方向破坏。整个破坏过程为:随着压力的逐渐增大,试块表面开始出现细小的裂纹,当压力增大到一定值时,细小裂纹快速增多且均聚集在与水平方向约呈 60° 的方位,最终形成大贯通裂缝,导致试块的破坏。

图 5 为 30 d 养护龄期且经过 7 次冻融循环的粉煤灰土试块在单轴抗压试验破坏前后的照片。由图 5 可以看出粉煤灰土试块在施加压力后表面会出

现剥落现象。

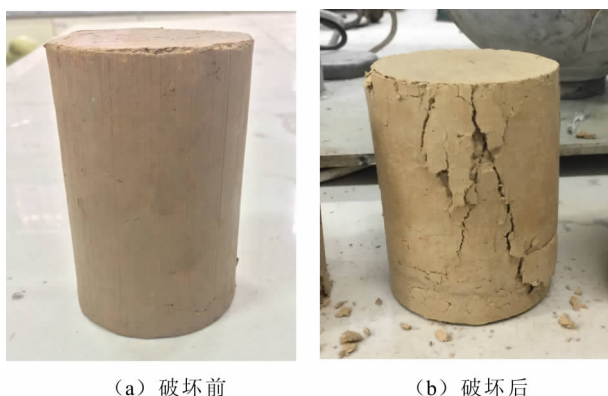


图4 水泥土试块的破坏形态

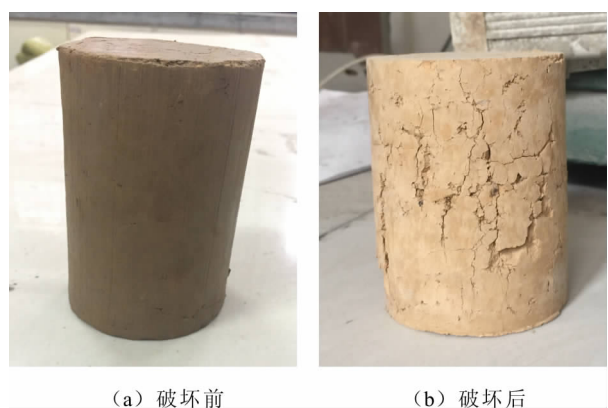


图5 粉煤灰土试块的破坏形态

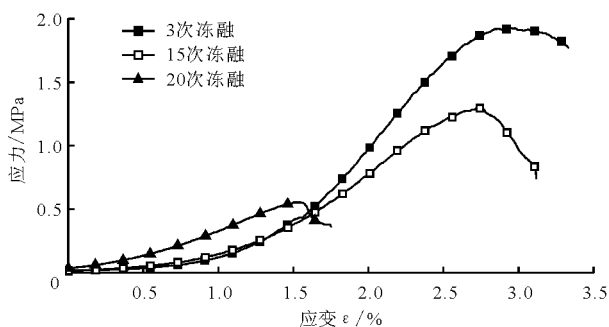


图6 30 d龄期水泥土的应力-应变曲线

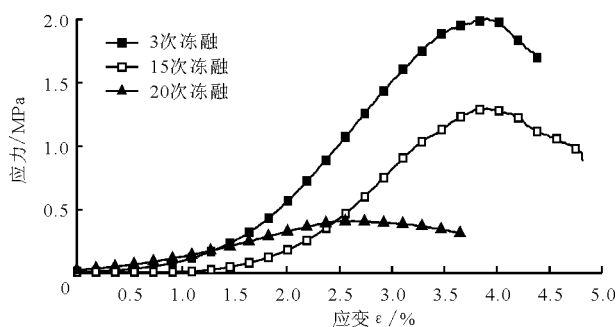


图7 60 d龄期水泥土的应力-应变曲线

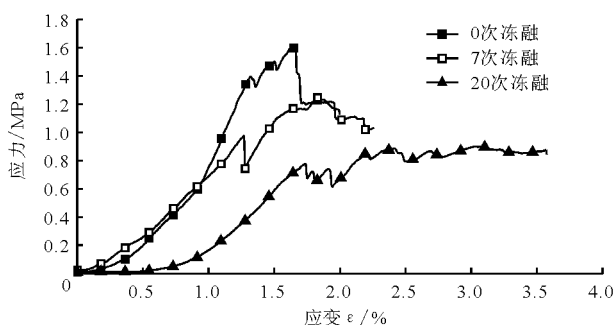


图8 30 d龄期粉煤灰土的应力-应变曲线

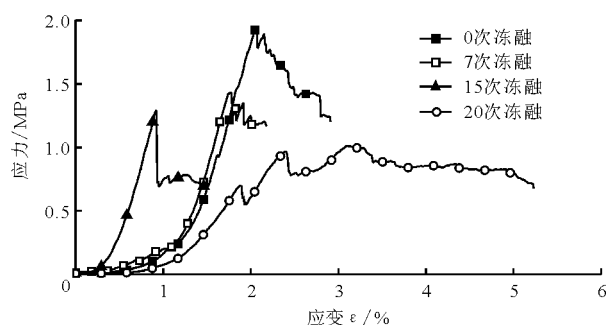


图9 60 d龄期粉煤灰土的应力-应变曲线

3.2 水泥土及粉煤灰土的应力-应变关系曲线

图6是水泥土在30 d养护龄期下,进行3、15及20次干冻冻融循环后,对试块进行单轴抗压试验得到的应力-应变关系曲线。由图6可知,随着冻融循环次数的增加,水泥土的抗压强度有所降低,3次冻融循环后的抗压强度为1.93 MPa,为20次冻融循环后抗压强度0.55 MPa的3.5倍。

图7是对60 d养护龄期的水泥土进行3、15及20次干冻冻融循环后,在单轴抗压试验中获得的应力-应变关系曲线。与图6类似,图7中3次冻融循环后的抗压强度为2.01 MPa,为20次冻融循环后抗压强度0.41 MPa的4.9倍。

图8和9是粉煤灰土分别在30 d及60 d养护龄期干冻条件下,进行不同冻融循环次数后,在单轴抗压试验中获得的应力-应变曲线。由图8和9可知,随着养护龄期的增长,粉煤灰土抗压强度有所提高,60 d养护龄期的粉煤灰土抗压强度高于30 d养护龄期的粉煤灰土抗压强度。其次,冻融循环次数对抗压强度影响明显,随着冻融循环次数的增加,抗压强度显著降低。30 d养护龄期下冻融0次粉煤灰土的抗压强度为1.61 MPa,为冻融20次粉煤灰土抗压强度0.89 MPa的1.81倍。60 d养护龄期下冻融0次粉煤灰土的抗压强度为1.95 MPa,为冻融20次粉煤灰土抗压强度1.01 MPa的1.93倍。

3.3 冻融循环次数及龄期对试块抗压强度的影响

图 10 为不同龄期,不同冻融循环次数干冻条件下水泥土的抗压强度变化曲线。从图 10 中可以看出,随着冻融循环次数的增大,水泥土的单轴抗压强度有明显的下降趋势,且下降幅度与冻融循环次数有关。在 0 到 15 次冻融循环过程中,抗压强度下降速率较小,曲线斜率较缓和;在 15 次冻融循环后,水泥土抗压强度降低幅度较大。说明较少的冻融循环次数对水泥土抗压强度影响相对较小,随着冻融次数的增加,冻融循环作用对水泥土强度的影响越来越明显。其次,由图 10 中还可看出,在相同的冻融循环次数下,60 d 养护龄期的水泥土抗压强度均高于 30 d 养护龄期的水泥土抗压强度,说明随着龄期的增长试块的抗冻性能有所提高。

图 11 为不同龄期,不同冻融循环次数干冻条件下粉煤灰土的抗压强度变化曲线。与水泥土类似,随着冻融循环次数的增大,粉煤灰土的单轴抗压强度下降明显,但下降幅度与水泥土并不相同。在 0 到 7 次冻融循环过程中,抗压强度下降速率较大,在 7 次冻融循环后,粉煤灰土抗压强度降低幅度较小,说明冻融循环作用对粉煤灰土的初期强度影响较大。此外随着龄期由 30 d 增长为 60 d,粉煤灰土抗压强度在各个冻融循环次数下均有增长,说明龄期的增长有益于试块抗冻性能的提高。

3.4 水泥土和粉煤灰土破坏机理分析

在冻融条件下,当温度降低至试块毛细孔内水份的结冰温度时,水由液态变为固态,其体积增大

9%。体积的增大会对毛细孔壁产生膨胀应力,当膨胀应力大于改良土之间的胶结强度时,就会在毛细孔隙周围产生微小的不可逆的裂缝。当温度升高固态水开始融化时,原毛细孔隙由于体积增大,附近区域的水份迁移填充。当温度再次降低到结冰温度时,原有的裂缝将进一步扩大。随着冻融次数的增加,冻融反复进行,微小的裂缝损伤累积扩大、连通,最终导致了改良土冻融循环的破坏。

图 12 为 90 d 龄期水泥土在干、湿两种冻融条件下分别进行 0 和 15 次冻融循环后获得的单轴抗压试验结果。由图 12 可知,在相同的冻融循环次数下,干冻水泥土试块的强度均高于湿冻水泥土试块的强度,说明湿冻条件下的高含水率降低了水泥土试块的强度。

有研究表明^[19],水在毛细孔中的结冰温度和毛细孔径有关,如水在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙中结冰温度为 $-2\sim-3^{\circ}\text{C}$,在 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙中为 $-8\sim-10^{\circ}\text{C}$,在小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙中为 $-30\sim-40^{\circ}\text{C}$,随着孔隙孔径的降低,冻结冰点下降。粉煤灰掺料的颗粒极细,在与土体搅拌制样时容易进入到土体孔隙间,使大孔隙变为小孔隙。水泥的颗粒直径大于粉煤灰^[18],所以水泥填充土体小孔隙效果不及粉煤灰好,导致粉煤灰土的孔隙率小于水泥土的孔隙率,则粉煤灰土的冰点要低于水泥土的冰点,抗冻性能要优于水泥土。

图 13 为 60 d 养护龄期下水泥土和粉煤灰土在不同冻融循环次数下的应力-应变曲线。

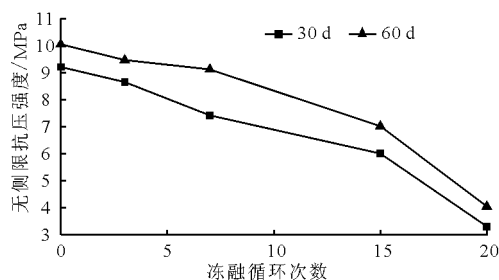


图 10 水泥土抗压强度随冻融循环次数的变化

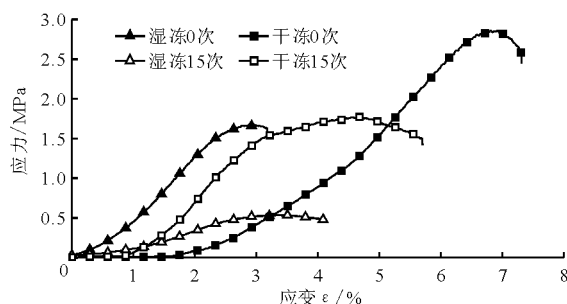


图 12 干、湿冻融水泥土的应力-应变关系曲线

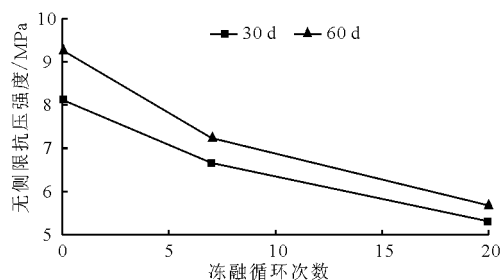


图 11 粉煤灰土抗压强度随冻融循环次数的变化

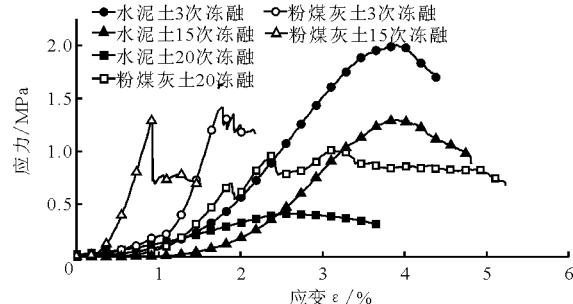


图 13 水泥土与粉煤灰土的应力-应变关系曲线对比

由图13可知,在3次冻融循环后水泥土的抗压强度高于粉煤灰土的抗压强度;15次冻融循环后水泥土的抗压强度几乎和粉煤灰土抗压强度相等;在20次冻融循环后,粉煤灰土的抗压强度反而高于水泥土的抗压强度。图13与图11、12中的结果相一致,即水泥土抗压强度降低幅度随冻融循环次数的增加而增加,而粉煤灰土抗压强度降低幅度随冻融循环次数的增加而减小,因而在一定冻融循环次数后,粉煤灰土抗压强度会高于水泥土抗压强度。

4 结 论

本文通过对冻融循环后的水泥土及粉煤灰土进行单轴抗压试验,分析研究了不同因素影响下改良土的力学性能,得到如下结论:

(1)改良土的单轴抗压强度随着冻融循环次数的增加而呈现不同程度的降低。冻融循环作用对水泥土强度的影响随着冻融次数的增加越来越明显,而冻融循环作用仅在初期对粉煤灰土的强度影响较大。

(2)改良土的抗冻性能随着养护龄期的增长有不同程度的提高。干冻、湿冻对改良土单轴抗压强度影响明显,相同冻融次数下干冻改良土的抗压强度高于湿冻条件下的抗压强度。

(3)通过对水泥土和粉煤灰土破坏机理进行分析,发现粉煤灰掺料的颗粒粒径小于水泥掺料的颗粒粒径,因而填充土体细小孔隙效果更优。水在毛细孔中的结冰温度与毛细孔径有关,结冰温度随着毛细孔径的减小而降低,因而粉煤灰土的抗冻性能优于水泥土的抗冻性能,表现在经历冻融循环次数较少时水泥土的单轴抗压强度大于粉煤灰土的单轴抗压强度,达到20次冻融循环次数后粉煤灰土的抗压强度反而要高于水泥土的抗压强度。

参考文献:

- [1] 王威娜,支喜兰,毛雪松,等. 冻融循环作用下路基土回弹模量试验研究[J]. 冰川冻土,2010,32(5):954-959.
- [2] 王 泉,马 巍,张 泽,等. 冻融循环对黄土二次湿陷特性的影响研究[J]. 冰川冻土,2013,35(2):376-382.
- [3] 马 巍,徐学祖,张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报,1999,21(2):158-160.
- [4] 穆彦虎,马 巍,李国玉,等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(12):1919-1925.
- [5] 秦前波,方引晴,骆行文,等. 深层高压注浆加固古滑坡滑动带试验及效果分析[J]. 岩土力学,2012,33(4):1185-1190.
- [6] 彭 劫,何 想,刘志明,等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1769-1774.
- [7] BIGL S R, BERG R L. Testing of materials from the Minnesota cold regions pavement research test facility [J]. Compaction,1996.
- [8] BOCHOVE E V, PRÉVOST D, PELLETIE R F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil. [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(5):1638-1643.
- [9] SVEISTRUP T E, HARALDSEN T K, LANGOHR R, et al. Impact of land use and seasonal freezing on morphological and physical properties of silty Norwegian soils[J]. Soil & Tillage Research, 2005,81(1):39-56.
- [10] 严 晗,王天亮,刘建坤,等. 反复冻融条件下粉砂土动力学参数试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(3):683-688.
- [11] 董晓宏,张爱军,连江波,等. 反复冻融下黄土抗剪强度劣化的试验研究[J]. 冰川冻土,2010,32(4):767-772.
- [12] ARORA S, AYDILEK A H. Class F fly-ash-amended soils as highway base materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(6):640-649.
- [13] 王天亮,刘建坤,田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1733-1737.
- [14] 宋爱苹,张亚飞. 冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J]. 中外公路,2017,37(3):221-223.
- [15] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JGT E40-2007[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79-2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [17] 陈四利,史建军,于 涛,等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程学报,2014,22(2):343-349.
- [18] 曹智国,章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015(S1):3446-3454.
- [19] 任建章,尹红娣. 粉煤灰对混凝土抗冻性的影响[J]. 黑龙江交通科技,2008(10):23-24.