

文章编号:1007-2993(2020)05-0290-06

长春地区季节性冻土冻融作用下的力学性质研究

郭红梅

(北京城建勘测设计研究院有限责任公司,北京 100101)

【摘要】 为研究长春地区季节性冻土在冻融循环作用下土体力学参数的变化,通过对典型地层现场采取原状土样进行室内试验的方法,在试验室内完成原状土、一次冻融土、二次冻融土等三种不同状态下土样的物理力学参数测试,对三种不同状态下土样的主要物理力学参数进行对比分析,得到土体在二次冻融循环作用下力学参数的变化规律,同时对土样在二次冻融循环下的冻胀及融沉性进行了试验,对影响地基土土体冻胀性及融沉性的主要因素进行了详细分析,并针对其影响因素提出相应的冻害防治措施建议。

【关键词】 季节性冻土;冻融土;力学性质;冻胀;融沉;防治措施

【中图分类号】 TU 411.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2020.05.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Mechanical Properties by Frozen-thaw of Seasonal Frozen Soil in Changchun Area

Guo Hongmei

(Beijing Urban Construction Exploration & Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China)

【Abstract】 The change of soil mechanical parameters of seasonal frozen soil under freezing and thawing cycles in Changchun area is studied. Soil samples were taken from typical soil layers and tested in the laboratory. The physical and mechanical parameters of soil samples under three different conditions, namely undisturbed soil, primary frost-thaw soil and secondary frozen-thaw soil, had been tested, compared and analyzed. The variation law of mechanical parameters under the action of the second frozen-thaw cycle were concluded. The frost heave and thaw settlement under the action of the second frozen-thaw cycle were also tested, and the main factors affecting the frost heave of foundation soil were analyzed in detail. The corresponding prevention and control measures were put forward according to the influencing factors.

【Key words】 seasonal frozen soil; frozen-thaw soil; mechanical property; frost heave; thaw settlement; prevention and control measures

0 引言

长春市城区内分为松辽波状平原台地及伊通河一级阶地两个地貌单元体。第四系覆盖层分布较为稳定,岩土类型在平面上变化不大,在立面上变化较大,第四系覆盖层厚度不等,在市区中心至周边最厚可达 30 m,一般为 9~15 m,分布特征受地貌及岩性影响,在台地上有下更新统冰水砂砾石、中更新统冲洪积粉质黏土及黏土,河谷平原广布全新统粉质黏土,下部为含砾中粗砂和砂砾石^[1]。

长春地处季节性冻土地区,每年结冻期为 11 月至翌年 4 月,长达 6 个月之久,冻结深度为 1.5~

1.8 m,冻结深度内的土层为粉质黏土、粉土、黏土层,按照《建筑地基基础设计规范》(JGJ118—2011)判别,冻胀类别为弱—强冻胀土。

随着冬冻春融的变化,土体会经历多次的冻融,这种交错不断的作用改变着土体中孔隙结构和固体颗粒的联结,致使土体结构发生较大的变化,严重降低土体的物理力学性质,自然环境冻融对土体的作用是一个长期的过程。为尽快获得冻融循环作用下土体的物理力学性质变化,可以通过室内冻融试验来研究土体冻融特性^[2-3]。

为研究长春地区季节性冻土在冻融循环下土层

作者简介:郭红梅,女,1972 年生,汉族,河北人,博士,教授级高级工程师,主要从事岩土工程工作。E-mail:1297427709@qq.com

力学参数变化,在室内模拟对三种不同状态下(原状土、一次冻融土、二次冻融土)土样的主要力学参数进行试验测试并对结果进行对比分析,同时对二次冻融循环下的的冻胀及融沉性进行了试验,提出相应的冻害防治措施建议。

1 试验方法与内容

对进行分析测试的典型地层在不同的钻孔不同深度进行现场采取原状土样,土样尺寸为 $\phi 110 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。常规土试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行,冻土试验按煤炭行业标准《人工冻土物理力学性质试验》(MT/T5934—1996)进行。此次试验在试验室保湿条件下进行,涉及到两次冻结两次融化,一次冻融未冻土为现场采取的原状土,原状土削制成试验所需尺寸进行,冻结后得到一次冻融冻结土,一次冻融冻结土自然解冻得到的土体称为一次冻融土,一次冻融土在二次冻

融时称为二次冻融未冻土,对二次冻融未冻土削制成试验所需尺寸进行冻结后得到二次冻融冻结土,对二次冻融冻结土自然解冻后得到的土体称为二次冻融土^[4]。试验室条件下用保鲜膜对土体密封后一次、两次冻结至 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。然后在密封保湿条件下进行自然解冻。

具体的物理力学试验性质测试项目有:密度、含水率、孔隙比、塑限、液限、土粒比重、无侧限抗压强度、压缩模量、直接剪切试验,同时还对冻胀力、冻胀率及融沉率进行试验。

2 试验结果及数据分析

2.1 压缩模量试验

未冻土、一次冻融土及二次冻融土的压缩模量试验成果如表 1 所示,各个状态的土样压缩模量随干密度变化关系如图 1 所示。

表 1 压缩模量试验成果表

编号	取土深度 h/m	土层	干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	未冻土	一次冻融土	二次冻融土
				压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa
1#	3.0	黏土	1.554	5.17	6.60	3.23
2#	4.0	粉质黏土	1.480	5.62	3.08	3.41
4#	8.0	黏土	1.108	2.46	2.44	2.89
7#	3.8	黏土	1.593	6.85	2.66	4.24
8#	4.2	粉质黏土	1.688	11.76	4.62	3.33
9#	5.0	粉质黏土	1.590	9.48	3.57	4.72
10#	7.0	粉质黏土	1.533	5.90	4.08	5.23
12#	11.0	粉土	1.624	6.25	4.39	5.48

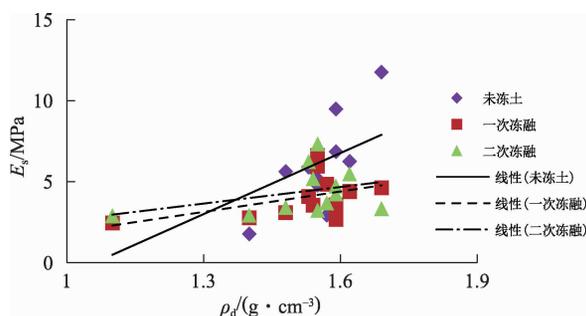


图 1 压缩模量与干密度关系图

从三种状态土的压缩模量试验成果表可以看出,与未冻土的压缩模量相比,冻融后的土样压缩模量随着土样干密度的增大而降低,二次冻融土与一次冻融土的压缩模量数值比较接近。

2.2 无侧限抗压强度试验

未冻土、一次冻融土及二次冻融土的无侧限抗压强度试验成果如表 2 所示,各个状态的土样无侧

限抗压强度随取样深度的变化关系如图 2 所示。

从表 2、图 2 可以看出,冻融后的土样无侧限抗压强度数值要小于未冻土的无侧限抗压强度值;二次冻融土的无侧限抗压强度值比一次冻融土的无侧限抗压强度数值小。

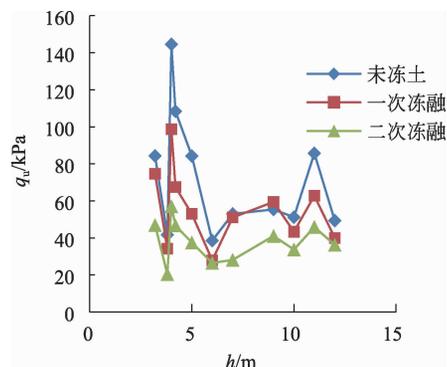


图 2 无侧限抗压强度与深度变化关系图

表2 无侧限抗压强度试验成果表

编号	取土深度 <i>h</i> /m	土层名称	未冻土	一次冻融土	二次冻融土
			无侧限抗压强度 q_u /kPa	无侧限抗压强度 q_u /kPa	无侧限抗压强度 q_u /kPa
1#	3.0	黏土	84.31	74.65	46.96
2#	4.0	粉质黏土	41.69	34.18	20.47
3#	6.0	粉质黏土	38.54	27.92	26.49
4#	8.0	黏土	21.67	17.09	12.04
5#	10.0	粉质黏土	51.23	43.35	33.74
6#	12.0	粉质黏土	49.37	40.01	36.25
7#	3.8	黏土	144.49	98.74	57.10
8#	4.2	粉质黏土	108.37	67.43	46.68

2.3 抗剪强度试验

未冻土、一次冻融土及二次冻融土的直接剪切

试验成果如表3所示,各个状态的土样抗剪强度数值随取样深度的变化关系如图3、图4所示。

表3 直剪试验抗剪强度指标试验成果表

编号	取土深度 <i>h</i> /m	土层名称	未冻土		一次冻融土		二次冻融土	
			黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)
1#	3.0	黏土	36.8	14.5	32.7	13.6	29.8	12.5
2#	4.0	粉质黏土	17.1	12.1	14.2	11.7	13.1	10.9
3#	6.0	粉质黏土	18.0	11.2	16.1	10.8	14.2	10.1
4#	8.0	黏土	22.6	12.3	21.0	11.9	19.8	11.0
5#	10.0	粉质黏土	13.7	11.4	12.4	10.8	11.8	10.4
6#	12.0	粉质黏土	16.2	10.3	15.7	9.6	14.2	9.1
7#	3.8	黏土	33.5	15.6	31.5	14.8	30.0	14.2
8#	4.2	粉质黏土	26.7	13.6	24.8	13.1	22.9	12.7

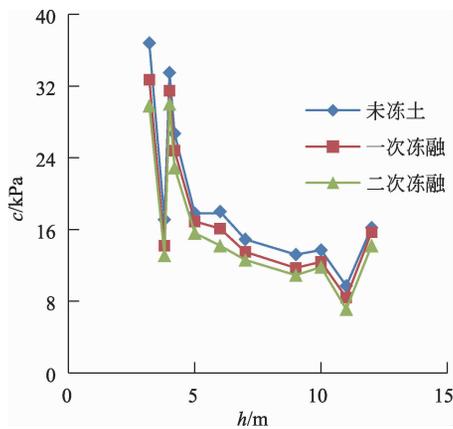


图3 黏聚力随深度变化图

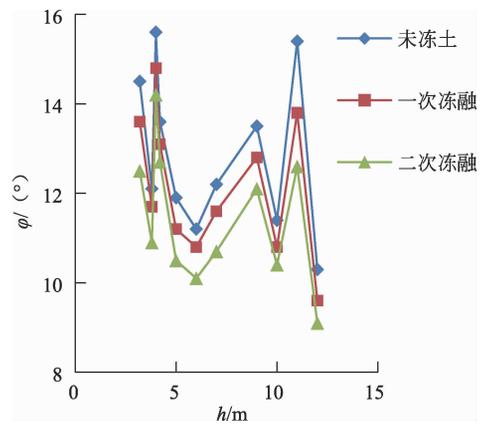


图4 内摩擦角随深度变化图

从表2及图3、图4可以看出,同一深度冻融后的土样抗剪强度指标数值小于未冻土的抗剪强度值,二次冻融土的抗剪强度值比一次冻融土的抗剪强度数值小。冻融作用通过改变土体颗粒之间咬合力和联结能力降低土体黏聚力^[5]。

2.4 冻胀力与冻胀率试验

不同土层的颗粒组成、重力密度和含水率是影响冻胀力和冻胀率的重要因素。土的冻胀性与土颗粒的粒径、矿物成分等因素有关,不同类别的土发生冻胀的敏感程度不同。土中亲水矿物含量较高时,

土的冻胀性会显著增大,这是由于亲水性矿物吸水造成土的含水量增加而引起的^[6]。

未冻土、一次冻融土及二次冻融土的冻胀力与

冻胀率试验成果如表 4 所示,冻胀力与影响因素的变化如图 5—图 8 所示,冻胀率与影响因素的变化如图 9—图 12 所示。

表 4 冻胀力和冻胀率试验结果表

编号	取土深 h/m	土层名称	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	含水量 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	超塑含水量 $w_{ps}/\%$	一次冻结		二次冻结	
							冻胀力 f_{th}/kPa	冻胀率 $r_{th}/\%$	冻胀力 f_{th}/kPa	冻胀率 $r_{th}/\%$
1#	3.0	黏土	1.554	28.2	26.8	1.4	7.86	0.18	10.26	0.43
2#	4.0	粉质黏土	1.480	34.2	22.8	11.4	581.76	5.63	628.93	5.89
3#	10.0	粉质黏土	1.567	31.1	18.7	12.4	363.21	5.14	493.71	6.10
4#	12.0	粉质黏土	1.547	33.9	19.3	14.6	495.28	4.09	630.50	4.28
5#	3.8	黏土	1.593	23.2	24.7	-1.5	6.29	0.26	9.57	0.30
6#	5.0	粉质黏土	1.590	27.7	21.6	6.1	121.07	3.74	132.08	4.16
7#	7.0	粉质黏土	1.533	34.0	19.6	14.4	165.09	4.83	272.08	5.13
8#	9.0	粉质黏土	1.536	31.0	19.8	11.2	235.85	6.73	347.57	7.09

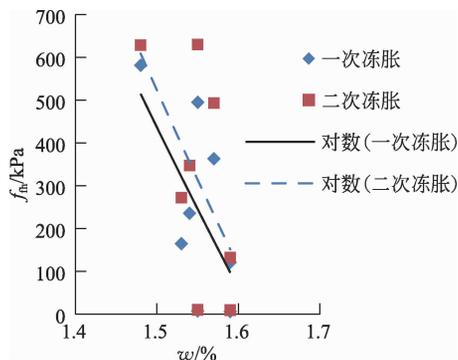


图 5 冻胀力与含水量的关系图

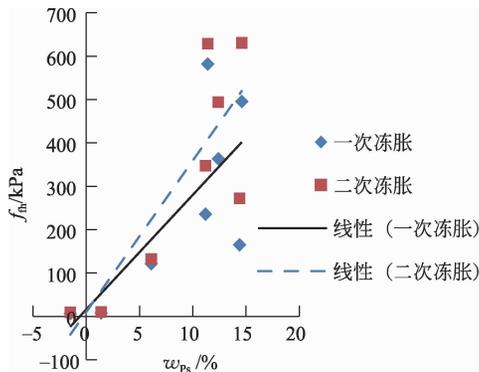


图 6 冻胀力与超塑含水量的关系图

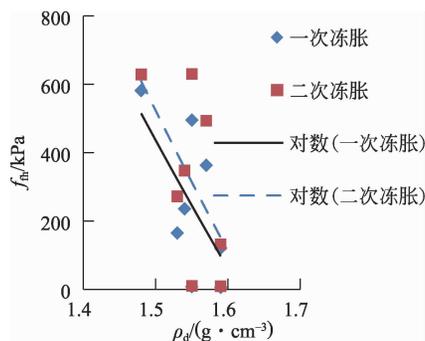


图 7 冻胀力与干密度的关系图

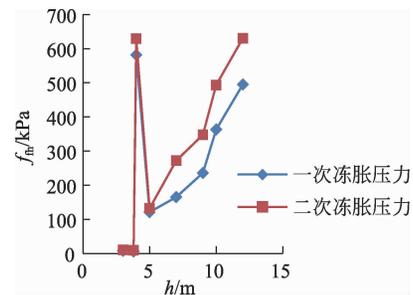


图 8 冻胀力与深度的关系图

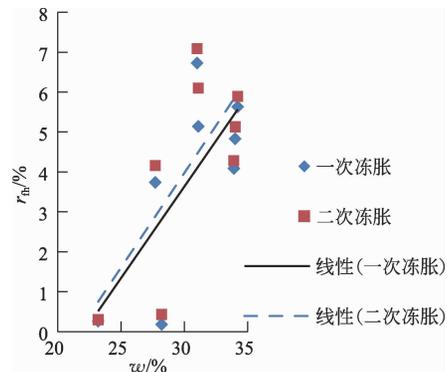


图 9 冻胀率与含水量的关系图

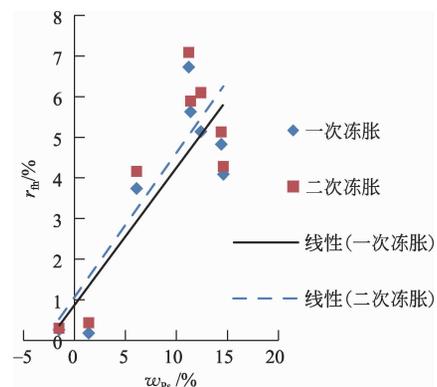


图 10 冻胀率与超塑含水量的关系图

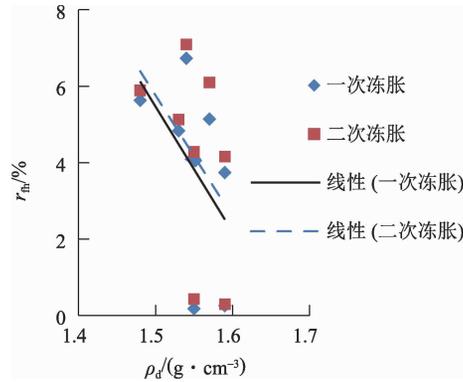


图 11 冻胀率与干密度的关系图

根据试验结果,地面以下 3~4 m 左右的黏性土样冻胀力与冻胀率数值很小,冻胀性不明显,而粉质黏土层冻胀性较明显。冻胀力与冻胀率均随着含水量与超塑含水量的增大而增大,随着干密度的增大而减小。经过一次冻融循环,冻胀力和冻胀率都

略有增加。

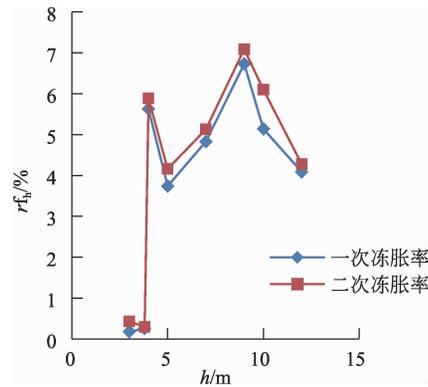


图 12 冻胀率与深度的关系图

2.5 融沉率试验

一次冻结冻土及二次冻结冻土的融沉率试验成果如表 5 所示,融沉率与影响因素的变化如图 13—图 14 所示。

表 5 冻结冻土融沉率试验结果表

编号	取土深度 h/m	土层 名称	干密度 ρ _d /(g·cm ⁻³)	含水量 w/%	一次融沉率 r _{ts} /%	二次融沉率 r _{ts} /%
1#	3.0	黏土	1.55	28.2	4.105	3.610
2#	4.0	粉质黏土	1.48	34.2	7.103	5.713
3#	6.0	粉质黏土	1.40	37.4	7.953	5.668
4#	8.0	黏土	1.10	52.4	6.463	6.800
5#	10.0	粉质黏土	1.57	31.1	6.423	6.780
6#	12.0	粉质黏土	1.55	33.9	9.805	8.280
7#	3.8	黏土	1.59	23.2	0.448	1.873
8#	4.2	粉质黏土	1.69	24.5	0.705	2.593

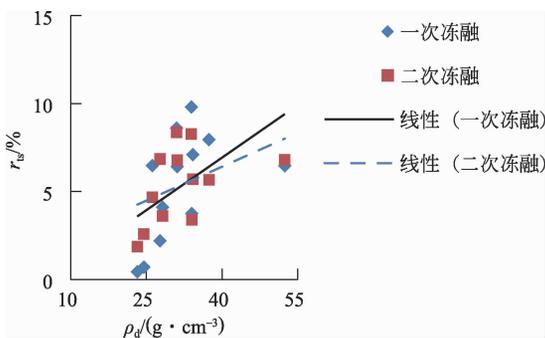


图 13 融沉率与干密度的关系图

冻土的融沉率试验结果表明,冻土的一次融沉率在 0.448%~7.593%之间,二次融沉率在 1.873~8.28%之间。融沉率基本随着含水量增大而增大,随着干密度增大而减小。

试验土样在一次冻结时土体结构在成冰作用下会发生破坏,冻土融化后将重新固结,但此时无外荷

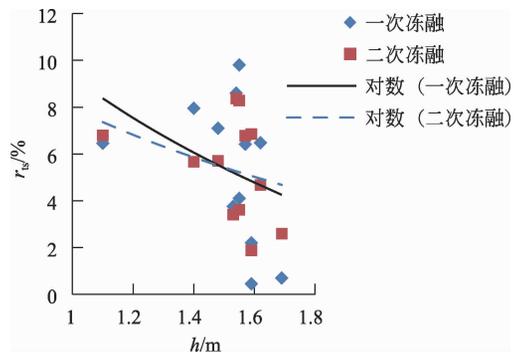


图 14 融沉率与深度的关系图

载作用,土体会变得松散,导致在二次冻结后冻土的融沉率略大于一次冻结土的融沉率。融沉试验是在封闭系统且不加压解冻条件下进行的,而工程的实际情况是土体要承受上部土水压力且是一个开放式的系统,实际的融沉率比试验测得的要大,在设计时应予以考虑,施工时应采取相应的控制融沉措施^[7]。

3 冻胀防治措施

在季节性冻土地区,影响地基土冻胀性的因素主要有气温、土的类别、冻前含水量及地下水位等。冻胀与融沉一般都是不均匀的,季节性冻土每年冻融交替,在地下水水位较高、土中细粒多、承载力差的土层中,冻害尤为严重^[8]。冻害治理应根据不同情况采取相应措施。

当地下水水位较浅时,由于毛细水作用,地下水会在一定深度范围内不断补充水位与细颗粒土,从而导致冻胀量不断增大,此时应先降低地下水位、设置盲沟等,再对地基土进行粗颗粒土换填处理,同时加强排水。地下水位以上的冻胀地层可采用夯实措施,使土体颗粒重组,降低土体孔隙率、透水性和抗渗性能,有效削弱土体冻胀能力,同时在基础外围边侧回填粗砂、中砂、砾石、火山灰和炉渣等非冻胀性材料,以减少冻切力的作用。

当地下水水位较深且地基土冻胀等级为不冻胀或弱冻胀时,地基土冻胀量较小,但当由于雨水或雪水等下渗致地基土含水量增大后,冻胀量就会增加,此时应设置系统排水设施,防止施工和使用期间的雨水、地表水、施工用水、生活污水等侵入地基土增加冻胀危害。当地下水水位较深且地基土冻胀等级为冻胀、强冻胀或特强冻胀时,应采取换填措施,采用透水性较好的粗粒土如级配碎石、砂砾石等换掉部分冻胀细颗粒土,同时加强排水等措施。

4 结论

(1)与未冻土的压缩模量相比,冻融后土样的压缩模量随着土样干密度的增大而降低,二次冻融土与一次冻融土的压缩模量数值比较接近。冻融后土样的无侧限抗压强度数值要小于未冻土的无侧限抗压强度值,二次冻融土的无侧限抗压强度值比一次冻融土的无侧限抗压强度数值小。

(2)冻融作用会改变土层的力学性质,使土体的抗剪强度指标数值变小。同一深度冻融后的土样抗

剪强度指标数值小于未冻土的抗剪强度值,二次冻融土的抗剪强度值比一次冻融土的抗剪强度数值小。

(3)冻胀力与冻胀率均随着含水量与超塑含水量的增大而增大,随着干密度的增大而减小,且经过一次冻融循环,冻胀力和冻胀率都略有增加。融沉率基本随着含水量增大而增大,随着干密度增大而减小。

(4)影响地基土冻胀性的因素主要有气温、土的类别、冻前土体含水量以及地下水位等。季节性冻土地区冻害的治理应查清冻害产生的主要因素并根据不同的情况采取相应措施。

参 考 文 献

- [1] 苏秀杰,宫云成,李国松,等. 长春市城区岩土工程地质浅析[J]. 吉林地质,2008, 27(3):94-96.
- [2] 董晓强,陈瑞锋. 冻融循环作用下土体特性研究进展[J]. 太原理工大学学报,2017, 48(3):275-287.
- [3] 徐韩宝,崔自治,沈素平. 封闭系统条件下银川平原压实砂土的冻融变形[J]. 岩土工程技术,2019, 33(5):263-266.
- [4] 王国亮,苏 贺. 人工冻融土的物理力学性能实验研究[J]. 山东煤炭科技,2008(4):94-95.
- [5] 汪恩良,姜海强,张 栋,等. 冻融作用对土体物理力学性质影响研究进展[J]. 东北农业大学学报,2017, 48(5):82-88.
- [6] 钟敏辉,王少斌. 季节性冻土路基冻胀性分析及治理措施[J]. 铁道建筑,2009(4):96-98.
- [7] 刘瑞锋,胡向东,皮爱如. 人工二次冻融土热力学参数试验[J]. 煤炭学报,2008(5):518-521.
- [8] 潘 博. 防止冻土对建筑物危害措施初探[J]. 科技与企业,2012(4):176.

收稿日期:2019-12-10