

冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究

时 伟¹, 张 亮², 杨忠年¹, 张莹莹¹, 李国玉², 刘学森¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为研究人工配制膨胀土作为深季节冻土室内模型试验材料, 其力学特性随冻融循环的变化规律, 将其与原位膨胀土进行对比。通过两者压缩试验结果的分析可以发现, 有关抗剪强度参数, 两者均表现出随冻融循环次数增加而减小的规律。与原位膨胀土相比, 人工配制膨胀土因受冻融循环次数影响, 内摩擦角下降速率更低, 粘聚力下降的速率更高。两者在动应变相同的情况下, 随冻融循环次数累积, 动剪切模量均减小, 阻尼比均增加, 且阻尼比改变的最大值均发生在第一次冻融循环, 之后冻融循环过程中人工配制膨胀土阻尼比随冻融循环次数增加的变化量大于原位膨胀土, 其变化速率较稳定, 与人工配制膨胀土表现出规律一致性。

关键词: 膨胀土; 人工配制; 冻融循环; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0480-06

Experimental study on mechanical properties of expansive soil of artificial preparation under freeze-thaw cycle conditions

SHI Wei¹, ZHANG Liang², YANG Zhongnian¹, ZHANG Yingying¹, LI Guoyu², LIU Xuesen¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the mechanical characteristics of artificially configured expansive soils as a model material for deep-season thawing experiment in freezing-thawing cycles, they are compared with in-situ expansive soils. Through analysis of the compression test results of the two, the rate of internal friction angle is found to decrease, and so is the rate of cohesion. The artificially prepared expansive soil and the in-situ expansive soil are affected by the number of freeze-thaw cycles. Similarly, when the dynamic strain is the same, the dynamic shear modulus decreases and the damping ratios increases with the number of freeze-thaw cycles, and the maximum value of damping ratio changes occur in the first freeze-thaw cycle. After the freeze-thaw cycle, the damping ratio of artificially-expanded soil increases with the number of freeze-thaw cycles. The amount of change is larger than that of in-situ expansive soil, and the rate of change is relatively stable, which shows a regular consistency with the artificially prepared expansive soil.

Key words: expansive soil; artificial preparation; freeze-thaw cycles; dynamic shear modulus; damping ratio

人工配制膨胀土与原位膨胀土相比物理力学性质更加均一, 各项参数可控性更强, 便于获得, 可以在实验室内完成制备, 广泛应用于边坡工程等膨胀土模型试验中。与膨胀土相关的工程, 如膨胀土边坡工程在施工阶段与使用过程中, 膨胀土的膨胀性是其最显著的工程特性, 这一特性主要由膨胀土所含的粘土矿物种类与含量所决定^[1-4]。膨胀土具有塑形高, 遇水膨胀, 失水干缩的特性^[5], 采用常规粒径判断矿物为粘土矿物的方法不够准

确, 矿物成分标定检测是准确的判断方法^[6]。

冻融循环对膨胀土边坡工程的稳定性影响显著。人工配制膨胀土所表现出的力学特性在冻融循环中要与原位膨胀土保持一致。膨胀土物理力学性质在冻融循环过程中的变化情况受到很多学者的广泛关注和研究。王超通过剪切试验测试经历不同冻融次数下膨胀土的抗剪强度, 发现两者之间呈负相关, 冻融循环会降低膨胀土抗剪强度^[7]。许雷通过无侧限压缩试验测试经历不同冻融

收稿日期: 2018-05-29

修改稿日期: 2019-06-10

基金项目: 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201601)

第一作者: 时 伟(1964—), 女, 硕士, 教授, 主要从事边坡稳定性及深基坑支护研究。E-mail: susan.sw@163.com

通信作者: 张 亮(1993—), 男, 博士生, 主要研究边坡稳定性。E-mail: zhangliang606@163.com

次数下膨胀土的压缩性,发现两者之间呈正相关^[8]。与之类似的是胡莫珍等人以软粘土为研究对象,通过试验研究发现,随着冻融循环次数的累积,土体的压缩模量会呈现降低的趋势^[9]。杨俊、童磊等通过剪切试验测试含砂量不同的膨胀土经历不同冻融次数下的抗剪强度,研究表明经历相同冻融循环次后,膨胀土含砂量越大,内摩擦角越大,黏聚力越小^[10]。黄志全通过动三轴试验,观测了不同的围压条件下膨胀土在动荷载施加过程中的应变(弹性应变与塑性应变),通过分析滞回曲线,对膨胀土动应变与动荷载关系进行了阐述^[11]。膨胀土的膨胀性与其动力特性也存在着一定的联系,毛成选取不同膨胀率的膨胀土进行动三轴试验,分析了膨胀土的膨胀性与其动力特性的关系^[12]。目前关于膨胀土受冻融循环影响的国内外研究,主要集中在膨胀土结构性改变^[13]、静力特性变化^[14-15]等,相对缺乏在冻融循环条件下,膨胀土动力特性的研究。

本文进行膨胀土人工配制的样本土是取自吉图珲高速铁路延吉段的原位膨胀土,主要研究内容是进行膨胀土的人工配制,并对人工配制膨胀土的各项物理力学参数与原位膨胀土进行对比分析,确定最优配比。研究冻融循环条件下人工配制膨胀土与原位膨胀土的静力与动力特性,分析冻融循环对膨胀土各项力学参数的影响规律,对比两种土在试验过程中的差异情况,为人工配制膨胀土在模拟实际工程中应用提供依据。

1 膨胀土的矿物成分研究

1.1 X 射线衍射分析原位膨胀土矿物成分

通过 X 射线衍射(XRD)试验对延吉膨胀土进行矿物的成分及其含量分析。

膨胀土的矿物组成主要有两种,分别为非粘土矿物和粘土矿物,膨胀土中粘土矿物的种类取决于所在地域与其成土历史。^[16]

图 1 为延吉原位膨胀土的 X 射线衍射图谱,将原位膨胀土的 X 射线衍射图谱与各类矿物标准衍射图谱进行比对,最终确定其主要矿物成分是蒙脱石、二氧化硅和钠长石。根据对衍射峰强度与半高宽的定量计算,得出原位土三种主要矿物成分的占比(见表 1)。对其矿物组成进行分析可知,原位土中蒙脱石含量占比最大。本次试验还对同一地段的其它几个取样点的土体进行了对比试验,结果表明该地段原位膨胀土的矿物组成及其相对含量基本一致,故本文所展示的矿物组成

及其相对含量具有代表性。

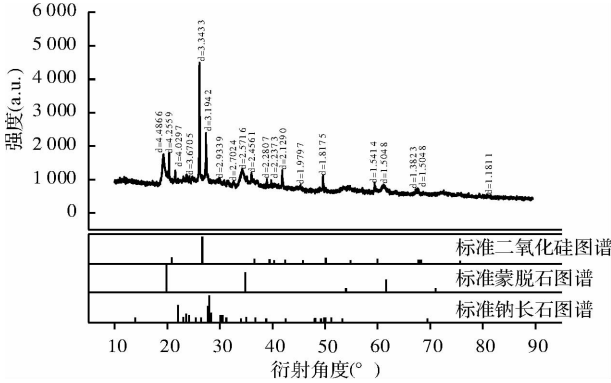


图 1 膨胀土的 X 射线衍射图
Fig. 1 X ray diffraction of expensive soil

表 1 原位土矿物组成及其相对含量(单位:%)
Tab. 1 The components and content of in-situ soil (unit: %)

矿物名称	石英	蒙脱石	钠长石
百分含量%	15.1	65.0	19.9

1.2 膨胀土基本土质学性质与人工配制

通过对延吉原位膨胀土进行基本土工试验,测定其基本土质学性质,详细结果见表 2,本次试验研究的原位膨胀土是自由膨胀率为 80% 的中膨胀性土。根据原位土颗粒级分试验绘制其颗粒级配曲线(见图 2),粒径小于 0.005 mm 的颗粒占 10%,粒径在 0.2~0.06 mm 的颗粒占 70%,该土体级配不良。

表 2 膨胀土土样的物理性质指标
Tab. 2 Physical properties of expansive soil samples

天然含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/g \cdot cm^{-2}$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$
26.8	1.63	53.4	38.4
天然干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	最优含水率 $\omega_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{dm}/g \cdot cm^{-3}$	
1.32	21.5	1.65	

针对原位膨胀土的矿物组成及其相对含量分析结果,以膨润土矿石(蒙脱石矿物含量为 80~90%),钠长石粉,石英粉为主要原料进行膨胀土的人工配制,具体配制方案见表 3。

表 3 膨胀土人工配制的配比方案
Tab. 3 Mineral proportions of artificial expensive soil

编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6
钠长石/%	25.6	22.7	19.9	17.1	14.2	11.4
膨润土/%	55	60	65	70	75	80
石英/%	14.4	17.3	15.1	12.9	10.8	8.6

1.3 人工配制膨胀土物理力学性质与最优配比

1.3.1 人工配制膨胀土自由膨胀率

由表 4 可知, 人工配制膨胀土的膨胀性随蒙脱石含量增大而提高, 4 号试样自由膨胀率为 78%, 与原位膨胀土自由膨胀率最接近。

1.3.2 膨胀土膨胀力试验

为了将原位膨胀土与人工配制膨胀土的膨胀力进行对比, 在试样配制时含水率均采用原位膨胀土天然含水率 26.8% 来制样, 压实度均采用原位膨胀土天然干密度 1.32 g/cm^3 来制样。膨胀力测试在杠杆式固结仪上完成, 试验结果见图 2。将六组人工配制膨胀土的膨胀力随时间的变化曲线与原位膨胀土进行对比可发现, 膨胀力随时间的变化曲线呈现出试验开始阶段变化迅速, 试验后期逐渐趋于平稳。试验初期, 人工配制膨胀土膨胀力变化速率随蒙脱石含量增加显著提高。膨胀力最终稳定值第四组人工配制膨胀土与原位膨胀土最为接近。

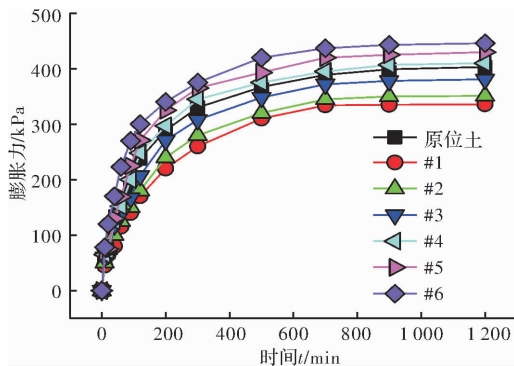


图 2 膨胀力随时间变化曲线

Fig. 2 Curve of time-varying expansion

1.3.3 冻融循环条件下压缩性试验

由于土体压缩性受冻融循环影响较大, 故对冻融循环条件下压缩性进行试验研究。为对原位膨胀土与人工配制膨胀土的压缩性进行对比, 在试样配制时含水率均控制在 26.8%, 压实度以天然干密度 1.32 g/cm^3 进行控制。先将各组试样置于高低温试验箱内完成相应次数的冻融循环后, 开始进行侧限压缩试验, 将人工配制土与原位土的压缩模量随冻融次数的变化曲线绘制于图 3。

各组试样的压缩模量均随冻融循环次数的增加呈现减小的趋势, 证明冻融循环可以使土体的抗压性降低, 且蒙脱石含量越高, 压缩模量降低越快。人工配制膨胀土随着蒙脱石含量的增加, 压缩性显著提高, 通过与原位土对比可知, 在冻融循环条件下, 4 号与 5 号试样的压缩模量与原位膨胀土的压缩模量变化曲线接近。

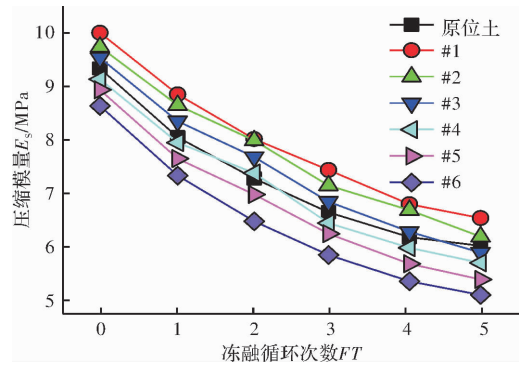


图 3 压缩模量随冻融循环次数变化曲线

Fig. 3 Curve of compression modulus variation

根据对原位膨胀土与人工配制膨胀土在膨胀性、压缩性以及冻融循环条件下的压缩性变化规律试验结果的对比分析, 拟定以膨润土 70%、钠长石 17.1%、石英 12.9% 为矿物配比进行膨胀土的人工配制。

2 冻融条件下土力学特性试验方案

冻融循环是影响深季节冻土区膨胀土边坡稳定性的直接因素, 本次试验考虑 0~7 次不同冻融次数下土体的静力学与动力学试验研究。土体抗剪强度随冻融循环次数累积的变化情况是寒区膨胀土工程的重要静力学参数, 通过温控三轴仪可以进行不同冻融循环次数下的三轴剪切试验, 本次冻融循环均在有围压条件下进行。试验温度循环范围为 $-15 \sim 20^\circ\text{C}$ 。

由于本文针对冻融循环条件下膨胀土与原位土在施加动应变的情况下进行动剪切模量与阻尼比的研究。该试验通过温控动三轴试验仪(见图 4), 在围压为 10 kPa (深季节冻土区冻深平均为 1.6 m) 的应力状态下对经历不同冻融循环次数后的试样进行动荷载施加, 循环荷载采用正弦波波形, 震动频率为 1 Hz, 动荷载的施加采用应变控制, 每级循环 10 次。

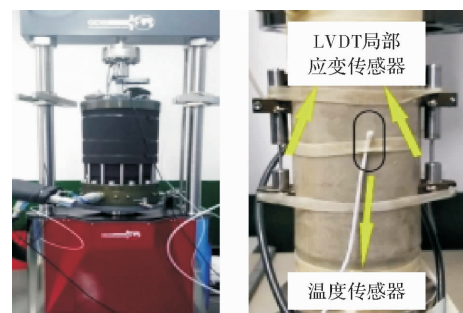


图 4 温控动三轴仪

Fig. 4 Temperature controlled dynamic triaxial apparatus

3 试验结果分析

3.1 冻融循环作用下抗剪强度对比分析

由图5可以看出,原位膨胀土与人工配制膨胀土的抗剪强度在冻融循环条件下均有显著的改变.在围压条件相同的情况下,冻融循环次数的累积使土体抗剪强度降低(见图5a),具体表现为内摩擦角与粘聚力的减小.在围压条件不相同的情况下抗剪强度随冻融次数累积而下降的速率不同,高围压条件下,抗剪强度随冻融循环而下降的速率更快.

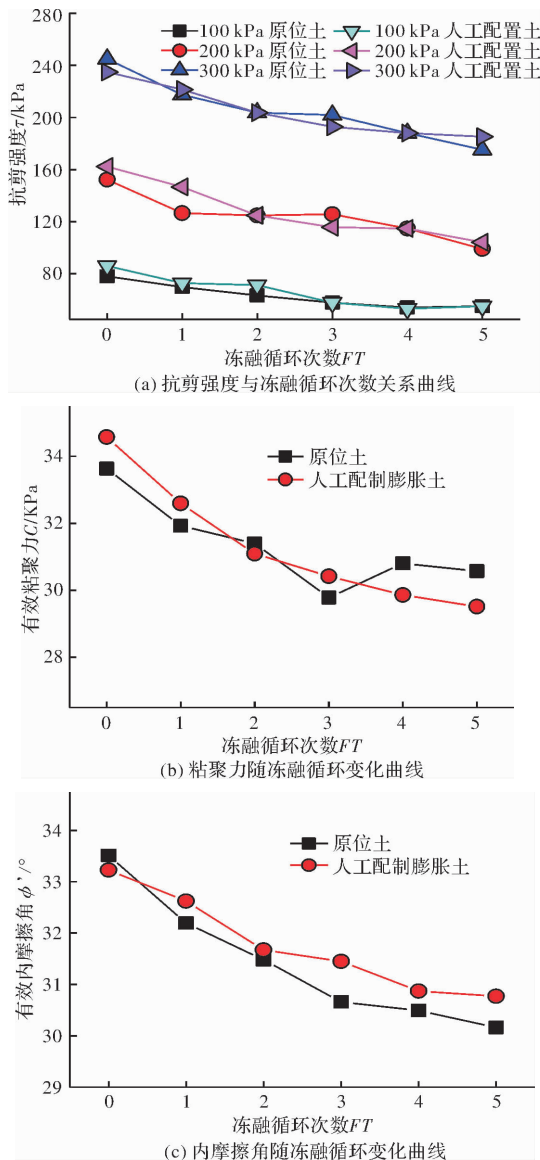


图5 抗剪强度参数与冻融循环次数关系

Fig. 5 Curves of shear strength parameters

由原位膨胀土粘聚力变化曲线可知,随着冻融次数的增加,原位膨胀土粘聚力在前三次冻融循环过程中下降显著,随着冻融循环次数的继续累加,原位膨胀土粘聚力在冻融循环条件下变化幅度越来越小(见图5(b)).人工配制膨胀土抗剪

强度参数随冻融循环的变化规律呈现一致性,人工配制膨胀土粘聚力在冻融循环条件下的变化值高于原位膨胀土,变化速率高于原位膨胀土,人工配制膨胀土粘聚力随冻融次数变化曲线的平顺度更高.由图5(c)可以发现,人工配制膨胀土内摩擦角在冻融循环条件下的变化值低于原位膨胀土,变化速率高于原位膨胀土,人工配制膨胀土内摩擦角随冻融次数变化与原位膨胀土相比更早趋于平稳.

3.2 冻融循环作用下动力特性对比

3.2.1 动剪切模量对比

由图6可知,原位膨胀土和人工配制膨胀土的动剪切模量均受冻融循环影响显著,控制动应变相同时,随着冻融循环次数的累积,两者动剪切模量均表现为减小.这是由于冻融循环会破坏原有的土颗粒骨架结构,使达到相同动应变所需施加的动应力减小,故动剪切模量降低.

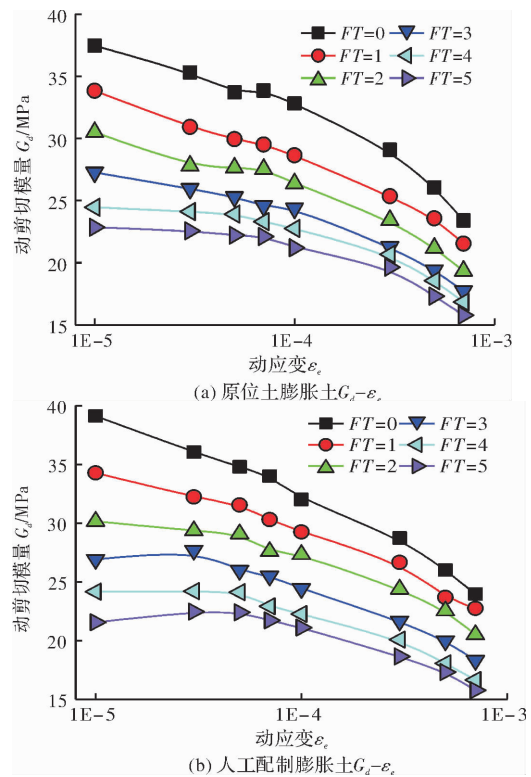


图6 不同累积冻融次数下 G_d - ϵ_e 关系曲线

Fig. 6 Curves of G_d - ϵ_e under different freeze-thaw cycles

由图6(a)可以看出,原位膨胀土动剪切模量在首次经历冻融循环后下降的比重最大,在这之后,随冻融循环次数增加原位膨胀土动剪切模量减小的速率明显降低,在经历三次冻融循环后动剪切模量降低的速率逐渐趋于稳定.通过对比图6b人工配制膨胀土 G_d - ϵ_e 关系曲线可知,人工配制膨胀土在未经冻融循环时动剪切模量略高于原位膨胀土,在前三次冻融循环过程中,人工配制

膨胀土随冻融循环次数增加的下降速率与原位膨胀土接近,在第三次冻融循环后动剪切模量降低速率并未出现明显衰减,而是到第四次冻融循环才开始出现明显下降趋势,相比于原位膨胀土,推迟了一个冻融循环周期,致使经过5次冻融循环后人工配制膨胀土的动剪切模量低于原位膨胀土。

3.2.2 动阻尼比对比

由图7可知,冻融循环对原位膨胀土和人工配制膨胀土的阻尼比均有明显影响,动应变相同条件下,阻尼比随冻融循环次数增加而增加。

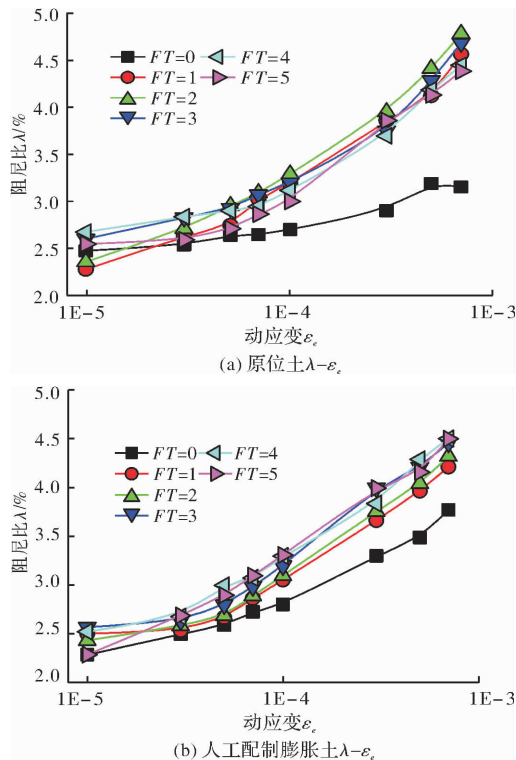


图7 不同冻融循环次数下 λ - $\ln \epsilon_e$ 关系曲线

Fig. 7 Curves of λ - $\ln \epsilon_e$ under different freeze-thaw

分析产生该现象的原因是冻融作用下土体的冻胀融沉破坏了原有的土体结构,使土体内部产生微小裂隙,当动荷载施加时,裂隙阻碍了动力波在土体中的传递,消耗了部分能量,故阻尼比提高。

由图7(a)可以看出,原位膨胀土阻尼比改变的最大值发生在第一次冻融循环,第一次冻融循环后阻尼比随冻融循环次数的增加变化量相对较小,且升高速率较稳定。通过对比图7(b)人工配制膨胀土 λ - ϵ_e 关系曲线可知,人工配制膨胀土阻尼比在首次经历冻融循环后下降的比重最大,之后冻融循环过程中阻尼比随冻融循环次数增加的改变量略高于原位膨胀土,其变化速率较稳定,变化情况与人工配制膨胀土表现出规律一致性。

5 结论

(1)原位土的静力特性方面,内摩擦角与粘聚力与冻融循环次数累积数变化曲线有明显波动,但在多次冻融循环累积后总体趋势呈现降低。动力特性方面,阻尼比最大变量发生在第一次冻融循环,动剪切模量在前三次冻融循环变化较快,之后趋于稳定。

(2)冻融循环对膨胀土物理力学性质有显著的影响,人工配制膨胀土与原位膨胀土变化规律具有一致性,在冻融循环条件下,两者前期各项参数变化较快,随着冻融次数的累积,均逐渐趋于稳定。

(3)人工配制膨胀土因其恒定的矿物成分与固定的颗粒级配,各项力学参数随冻融循环变化的规律性与原位膨胀土相比更加明显。比后课发现,随冻融循环次数的累积,两者动力学特性变化规律存在细微差异,具体表现为:人工配制膨胀土与原位膨胀土相比,在冻融循环初期,动剪切模量降低速率更快,趋于稳定的周期更长;在阻尼比方面,人工配制膨胀土的变化量高于原位土,作为模型试验中使用的材料时应考虑两者差异。

参考文献 References

- [1] MITEHELL J K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1993. 131-160.
- [2] MORGENSTEM N R. Microscopic structure in kaolin subjected to direct shear[J]. Geotechnique, 1967, 17 (4): 309-328.
- [3] LAMBER W T. Structure of compacted clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, 1958, 84 (SM2): 1-34.
- [4] SEED H B, CHAN C K. Structure and strength characteristic of compacted clays[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, 1959, 85(SM5). 87-128.
- [5] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [6] LIAO Shiwen. Expansive soil and railway engineering [M]. Beijing: China Railway Press, 1984.
- [7] 范·奥尔芬. 粘土胶体化学导论[M]. 北京:农业出版社, 1979
- [8] VAN OPPHEN. A introduction to clay colloid chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press,1984.
- [7] 王超. 季冻区哈大高铁边坡冻融滑塌机理研究[D].

- 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- WANG chao, Research on freeze-thaw slumping mechanism of harbin-dalian high-speed railway slope in seasonally frozen soil region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [8] 许雷, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 冻融循环下膨胀土物理力学特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 167-174.
- XU lei, LIU Sihong, LU Yang, et al. Physico-mechanical properties of expansive soil under freeze-thaw cycles [J]. Rock and soil Mechanics, 2016, 37(S2): 167-174.
- [9] 胡莫珍, 谈云志, 吴翩, 等. 冻融循环对改良软粘土压缩特性的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 208-212.
- HU Mozhen, DAN Yunzhi, WU Pian, et al. The effect of freeze-thaw cycles on compressive properties of improved soft clay[J]. Journal of Guangxi University: Nat Sci Ed, 2015, 40(1): 208-212.
- [10] 杨俊, 童磊, 许威. 冻融循环影响风化砂改良膨胀土抗剪强度室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 65-71.
- YANGjun, TONG lei, XU wei. Laboratory research on effect of freeze-thaw cycles to shear strength of weathered sand improved with expansive soi[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 65-71.
- [11] 黄志全, 张茜, 吴超, 等. 膨胀土动力学特性变化规律试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 78-82.
- HUANG Zhi quan, ZHANG Qian, WU Chao, et al. Experimental study on the variational regularity of dynamic characteristics of expansive soil[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(2): 78-82.
- [12] 毛成, 邱延峻. 膨胀土与改性膨胀土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(10): 1783-1788.
- MAO Cheng, QIU Yanjun. Testing study on dynamic properties of expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005 (10): 1783-1788.
- [13] OTHMAN M A, BENSON C H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(2): 236-246.
- [14] QI J, MA W, SONG C. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 397-404.
- [15] SHOOP S, AFFLECK R, HAEHNEL R, et al. Mechanical behavior modeling of thaw-weakened soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 52(2): 191-206.
- [16] 陈忠, 沈明道, 赵敬松, 等. 粘土矿物含量分析中的几个问题[J]. 沉积学报, 1998(1): 137-139.
- CHEN Zhong, SHEN Mingdao, ZHAO Jingsong, et al. Problems on Quantitative Analysis of Clay Minerals[J]. Acta sedimentologica sinica, 1998(1): 137-139.

(编辑 桂智刚)