

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0546

冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响

刘寒冰¹, 张互助^{1,2}, 王 静²

(1. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林建筑大学 交通科学与工程学院, 吉林 长春 130118)

摘 要: 针对自然环境因素对季冻区路基强度与稳定性的影响, 以京哈高速公路四平—长春段沿线的黏质土为研究对象, 对不同含水率的土样进行 0~16 次冻融循环试验。通过室内三轴试验, 分析了冻融次数和含水率对压实黏质土试样力学特性的影响规律, 并探讨了其影响机制。研究表明, 当试样的含水率小于最佳含水率时, 随着冻融次数和含水率的增加, 压实黏质土的应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型转变, 试样的破坏形式逐渐由脆性破坏转为塑性破坏; 压实黏质土的极限强度、弹性模量和黏聚力整体上均随冻融次数的增加而呈衰减趋势, 内摩擦角与冻融次数的关系并无规律可循, 但各个力学参数均在经历 8 次冻融循环后基本趋于稳定; 含水率对压实黏质土的力学性质影响显著, 极限强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加大幅减小。综合考虑冻融循环和含水率对压实黏质土力学性质的影响规律, 建议季冻区路基应做好排水工作以降低路基含水率水平, 并将经历 8 次冻融循环后的力学指标作为工程设计参考值。

关 键 词: 压实黏质土; 冻融循环; 含水率; 应力-应变关系; 弹性模量; 抗剪强度指标

中图分类号: U 416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0158-07

Effect of freeze-thaw and water content on mechanical properties of compacted clayey soil

LIU Han-bing¹, ZHANG Hu-zhu^{1,2}, WANG Jing²

(1. College of Traffic, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;

2. School of Traffic Science and Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: In view of the effect of environmental factor on the strength and stability of subgrade, the clayey soil taken from Siping-Changchun section of Beijing-Harbin expressway was investigated, and its variations of mechanical properties affected by freeze-thaw cycles and water content were thoroughly studied and analyzed in laboratory tests. The influence mechanism was also discussed. The test soil samples with different water contents went through 0 to 16 freeze-thaw cycles, and then the triaxial compression tests were carried out indoor. Results show that with the increasing of freeze-thaw cycles and water contents, the stress-strain curve of the compacted clayey soil changes from strain-softening to strain-hardening when the water content is less than the optimum water content, and the failure mode of the test sample gradually changes from brittle failure form to plastic failure form. The ultimate strength, elastic modulus and cohesion all decrease with the increasing of freeze-thaw cycles, while there is no obvious relationship between the internal friction angle and the freeze-thaw cycle. However, the aforementioned mechanical parameters of the compacted clayey soil all tend to stabilize after 8 freeze-thaw cycles. In summary, the effect of water content on mechanical properties of compacted clayey soil is significant. Ultimate strength, elastic modulus, cohesion and internal friction angle all decrease drastically with the increasing of water content. Based on the consideration of the effect of freeze-thaw cycles and water contents on mechanical properties of compacted clayey soil, the drainage work of subgrade in the seasonal frozen area should be well conducted to keep the subgrade in a lower level of water content, and the engineering design values of mechanical parameters should be those of the soil that undergoes no less than 8 freeze-thaw cycles.

Keywords: compacted clayey soil; freeze-thaw cycle; water content; stress-strain relationship; elastic modulus; shear strength parameter

收稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51308256)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51308256).

第一作者简介: 刘寒冰, 男, 1957 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事道桥结构动态优化设计理论及应用方面的教学与科研工作。

E-mail: lhb@jlu.edu.cn

通讯作者: 王静, 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事道桥结构动态优化设计理论及应用方面的研究工作。E-mail: wangjing0062@sina.com

1 引言

我国季节性冻土区的分布面积为 $5.013 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占国土陆地面积的 53.5%。对于季冻区路基工程而言, 昼夜温差和气候变化引起的冻融循环以及地下水、大气降水和地表水等外部环境变化引起的路基含水率的改变, 严重影响了路基土的工程性质, 伴随冻胀、融沉和强度弱化等一系列特殊现象, 造成路基路面结构产生翻浆、裂缝和错台等道路病害, 给交通行业带来巨大的经济损失。而这种影响的根本原因就是冻融循环及含水率变化作为外界环境扰动的具体形式, 对路基土的力学性质产生了强烈的影响。

目前, 国内外针对冻融循环及含水率对土体力学性质影响的研究主要集中在强度、模量、抗剪强度参数以及应力-应变关系等方面。关于冻融循环和含水率对土体强度与模量的影响, 相关的研究成果很多, 且结论较为统一。研究者普遍认为, 随着研究土体所经受冻融循环次数的增加, 土体的抗压强度^[1-2]、抗剪强度^[3-4]、弹性模量^[5-6]、回弹模量^[7]以及动态模量^[8-10]等力学参数均为先降低然后趋于稳定; 而含水率的影响则表现为随着含水率的增加, 这些力学参数不断降低^[7, 10-15]。冻融循环和含水率对土体抗剪强度参数的影响规律尚未达成一致的认识。在冻融循环影响方面, 有学者认为冻融循环作用后土的黏聚力降低、内摩擦角增大^[16], 也有学者认为黏聚力降低而内摩擦角无规律可循^[17-18], 另有学者认为黏聚力先降低后升高而内摩擦角不变^[19], 以及黏聚力降低而内摩擦角先降低后升高^[20]等。而对于含水率变化产生的影响, 有研究人员认为黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加而降低^[14, 21], 而袁俊平等^[22]试验研究认为黏聚力在最优含水率附近有峰值, 而内摩擦角则是在最佳含水率左侧随着含水率的增大而减小, 在最佳含水率右侧变化不明显。胡海英等^[11]则认为, 黏聚力随着含水率的变化过程不是单调增加或降低, 而是在关系曲线上存在两个特征点, 对内摩擦角的影响规律性不强。在应力-应变关系方面, 王大雁^[6, 17]、常丹^[23]等认为冻融循环作用不会改变应力-应变曲线的形式, 只改变其弹性常数和破坏强度大小, 而严晗等^[18]则认为土的应力-应变曲线随着冻融次数的增加由软化型向硬化型过渡。

综上所述, 尽管目前已对冻融循环与含水率对土体力学性质的影响开展了大量研究, 并取得了一些有益的成果, 但是由于土的应力-应变关系和抗剪

强度参数等与冻融次数及含水率的关系尚未达成共识, 这些研究还不能满足路基工程建设的需要, 特别是针对季冻区路基工程特点, 同时考虑冻融循环与含水率变化对路基土力学性质影响的研究还比较少见。鉴于此, 本文以分布广泛并在路基工程中应用较为普遍的黏质土作为研究对象, 深入研究和分析了冻融循环和含水率对压实黏质土力学特性的影响, 以揭示冻融循环及含水率对路基压实土力学性质的影响规律及作用机制, 为季冻区路基工程的工程实践提供理论依据与技术参考。

2 试验材料和方案设计

试验土样取自京哈高速公路四平至长春段改扩建工程建设项目 CP05 合同段取土场, 按照试验规程^[24]中的有关要求, 对土样进行了颗粒分析、液限塑限联合试验和有机质含量试验。根据试验结果, 将其定名为黏质土。该黏质土的液限为 35.9%, 塑限为 20.6%。通过重型击实试验, 确定土体的最佳含水率为 15.3%, 最大干密度为 1.86 g/cm^3 。

试验试件为直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱形试件。综合考虑规范^[25]中的路床压实度要求以及路基施工时的实际控制含水率, 试验试件按 96% 压实度和最佳含水率采用静力压实法一次成型, 脱模后将符合要求的试件放入试样盘内, 利用称重法在室内或恒湿箱风干或增湿至预定含水率, 然后放入恒湿箱养护 24 h 以上, 待其内部含水率分布均匀后进行冻融循环试验或力学性质测试。

试验试件的冻融循环过程为封闭条件下的冻融试验, 在高低温交替试验箱内完成。鉴于寒区公路路基工作区在冻融循环期内的温度变化范围为 $-17.2 \sim 22.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[26], 本试验冻结过程中的外部环境采用 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 融化过程中的外部环境采用 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 冻结与融化时间均为 24 h。

已有研究表明^[27], 路基含水率的变化范围一般在 8%~20%, 为了分析含水率及冻融次数对路基压实土力学性质的影响, 试验中以 3% 的间隔设置 5 种含水率, 分别为 9.3%、12.3%、15.3%、18.3% 和 21.3%, 各个含水率的试验试件分别经历 0、2、4、6、8、10、12、14 和 16 次冻融循环后, 进行三轴压缩试验测试。

土的三轴压缩试验在 TSZ-1B 全自动三轴仪上进行, 采用不固结不排水试验方法, 加载速率为 0.8 mm/min , 控制应变为 15%, 取用 100、200、300 kPa 共 3 种围压, 试验数据采用计算机程序自动采集并处理。

3 试验结果与分析

3.1 应力-应变关系

3.1.1 冻融循环的影响

图1为不同冻融循环次数条件下压实黏质土的应力-应变关系曲线。从图中曲线可以看出,冻融循环对压实黏质土力学特性的影响十分显著,在同一应力水平下,经历冻融作用后的土样产生的应变较大。

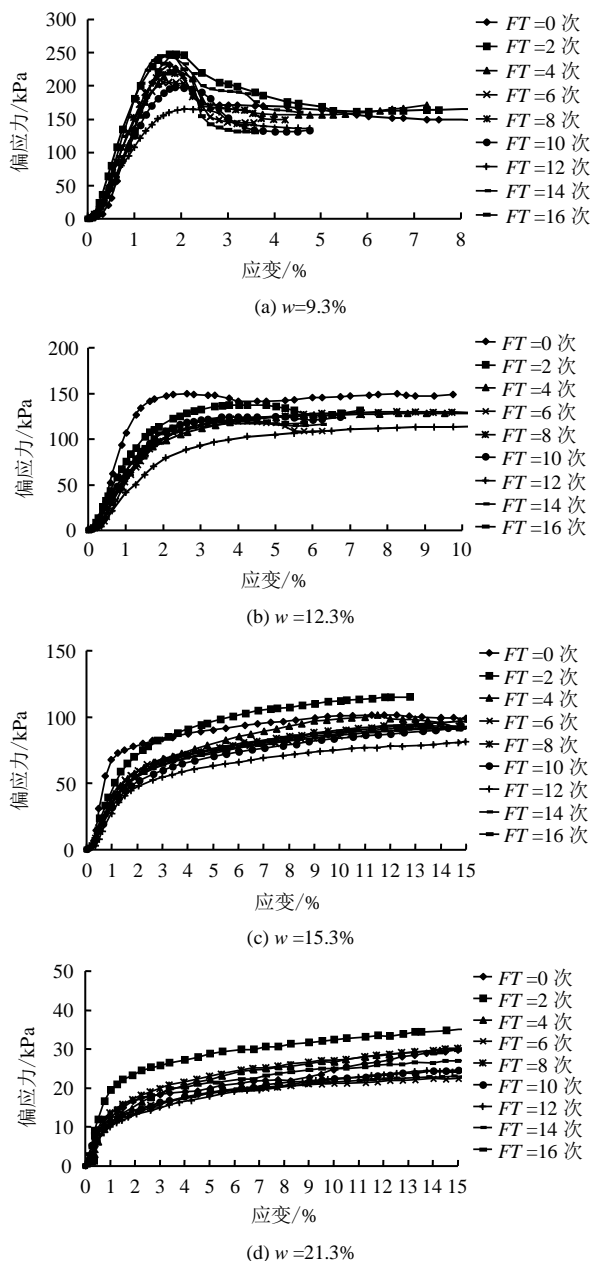


图1 不同冻融次数下压实黏质土的应力-应变曲线
($\sigma_3=200$ kPa)

Fig.1 Curves of stress-strain under different freeze-thaw cycles (confining pressure is 200 kPa)

当含水率 $w=9.3\%$ 时,试验土样的应力-应变曲线由冻融循环前的应变软化型逐渐过渡到冻融循环

后的弱应变软化型;而 $w=12.3\%$ 时,两次冻融循环即使土样的应力-应变曲线由弱应变软化型转变为应变硬化型,试样的破坏形式由脆性破坏向塑性破坏转化; $w \geq 15.3\%$ (最佳含水率) 时,冻融循环前后的应力-应变形式均为应变硬化型。由此,可以基本断定,在最佳含水率之前,冻融循环有使压实黏质土的应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型转变的趋势;而当 $w \geq 15.3\%$ 时,冻融循环对压实黏质土的应力-应变曲线形式没有影响。

3.1.2 含水率的影响

图2为不同含水率条件下压实黏质土的应力-应变关系曲线。由图可见,对于未冻融和经受冻融循环作用的试验试样,路基含水率对其力学性质的影响均十分显著。在同一应变水平下,随着含水率的增加,压实黏质土试样的偏应力均大幅减小。同时,在最佳含水率之前,含水率的增加使试验试样由脆性破坏逐渐向塑性破坏转变,应力-应变曲线由应变软化型逐渐过渡到应变硬化型;而含水率处在最佳含水率及其以上状态的压实黏质土应力-应变曲线均为应变硬化型。

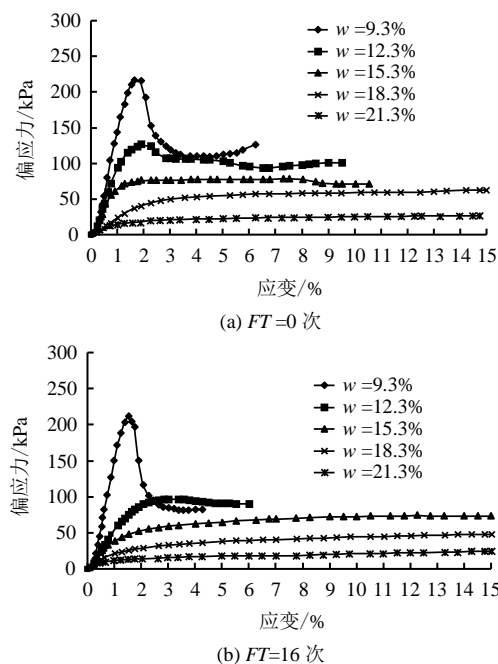


图2 不同含水率下压实黏质土的应力-应变曲线
($\sigma_3=100$ kPa)

Fig.2 Curves of stress-strain under different water contents (confining pressure is 100 kPa)

3.2 承载能力

土的极限强度与弹性模量是表征路基承载能力的两个重要指标。文中土的极限强度取用偏应力峰值(应力-应变曲线为应变软化型时)或15%轴向应变所对应的偏应力值(应力-应变曲线为应变硬化

型时); 弹性模量的确定则是在偏应力-应变曲线上选择呈线性相关部分的应力-应变数据进行线性拟合, 以拟合直线斜率乘以 100 后所得的数值作为试验土样的弹性模量。路基压实黏质土的承载能力随冻融次数及含水率的变化规律如图 3、4 所示。

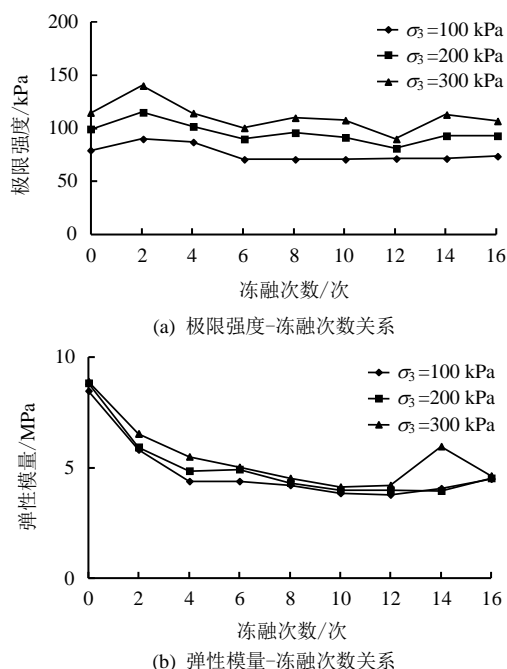


图3 压实黏质土承载能力与冻融次数的关系 ($w=15.3\%$)

Fig.3 Relationships between carrying capacity and freeze-thaw cycles (water content is 15.3%)

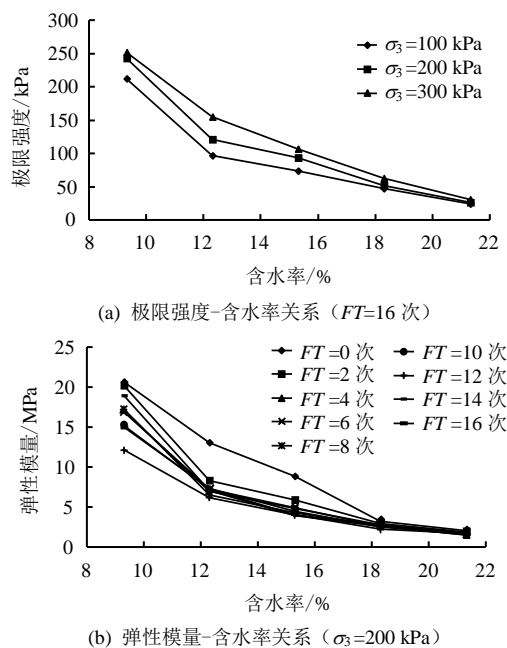


图4 压实黏质土承载能力与含水率的关系

Fig.4 Relationships between carrying capacity and water content

由图3可见, 压实黏质土的极限强度及弹性模量均随着冻融次数的增加呈上下波动起伏变化, 但

整体上呈衰减趋势, 并在经历 8 次冻融循环后基本达到稳定状态。含水率对压实黏质土的承载能力影响显著, 随着含水率的增加, 极限强度和弹性模量均急剧下降 (图 4)。以围压 $\sigma_3 = 200$ kPa 下的弹性模量计算结果为例, 当压实黏质土由最佳含水率增至 21.3% 时, 各冻融次数下弹性模量的降低幅度大为 56.5%~77.0%。

3.3 抗剪强度指标

图 5 给出了不同含水率下压实黏质土的黏聚力、内摩擦角与冻融次数的变化关系。从图中可以看出, 除了含水率为 9.3% 条件下的试验数据曲线波动较大之外, 压实黏质土的黏聚力随冻融次数的发展整体上呈下降趋势, 而内摩擦角则在 $0.40^\circ \sim 7.34^\circ$ 之间波动, 无明显变化规律, 这与文献[17-18]研究结果一致。但是, 在经历 8 次冻融循环后, 除个别含水率土样的黏聚力和内摩擦角随冻融次数的发展波动较大外, 压实黏质土的黏聚力和内摩擦角基本上趋于稳定。

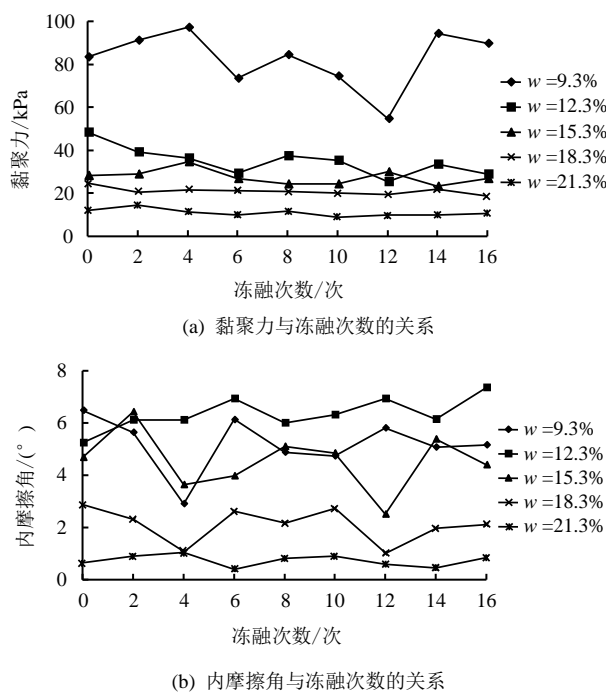


图5 不同含水率下抗剪强度指标与冻融次数的关系

Fig.5 Relationships between shear strength parameter and freeze-thaw cycles under different water contents

图 6 为不同冻融次数下压实黏质土的黏聚力、内摩擦角与含水率的关系。从图中可以看出, 冻融循环前后试验土样的黏聚力随含水率的增加下降趋势明显; 冻融前试验土样的内摩擦角随含水率的增加而降低, 经历冻融循环后, 各冻融次数下试验土样的内摩擦角有所波动, 但在 9.3%~21.3% 含水率

范围内,整体上是呈下降趋势发展的。

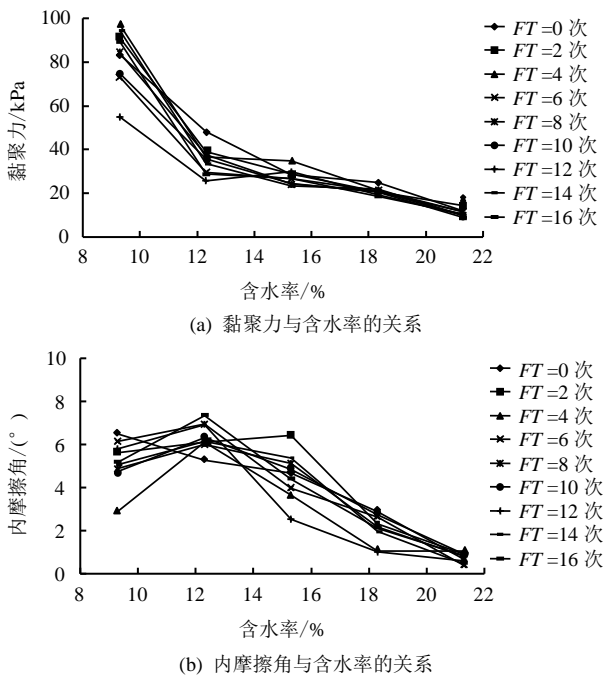


图6 不同冻融次数下抗剪强度指标与含水率的关系

Fig.6 Relationships between shear strength parameter and water content with different freeze-thaw cycles

4 冻融循环及含水率对压实黏质土力学性质影响机制分析

路基压实黏质土是由固体颗粒、水和气体组成的三相体系,固体颗粒构成土的骨架、水与空气充填于土骨架的孔隙中。冻融循环对压实黏质土力学性质产生影响的原因是组成土体的三相介质在冻结和融化过程中具有不同的热物理特性。冻结对土体力学性质的影响主要源自于3个方面:一是由于矿物成分并不单一,土颗粒固体产生的体积收缩并不均匀;二是土体孔隙内部的水分发生冻结会产生约9%的体积膨胀,因受周围土颗粒约束而产生冻胀力,当这种冻胀力超过一定限度时将会破坏土颗粒之间的联结作用,使土颗粒产生位移甚至是破碎变形,并改变孔隙的形态;三是路基土体会在负温度坡降的影响下发生水分迁移,而水分迁移会显著地改变土体的孔隙形态、颗粒排列等内部结构^[28]。土体融化时,孔隙中的冰融解,伴随这一过程的是冻胀力的释放以及水分的迁移和重分布。综上所述,冻融循环对土体的影响主要是由土颗粒不均匀收缩以及土中水的相变和迁移使土体内部结构发生改变而引起的。随着冻融次数的增加,土体内部结构因不断受到扰动而产生损伤,在宏观上表现为土体的极限强度、弹性模量和黏聚力等力学指标不断衰减,

经过多次冻融循环后土体内部结构趋于稳定,土体又达到新的平衡状态,则土体的力学指标的衰减趋于平缓。

含水率对压实黏质土力学性质产生影响的原因是含水率的增加或减小改变了土体的内部结构。当含水率小于12.3%左右时,土粒周围的结合水膜厚度较薄,联结作用较强,润滑作用不明显,土体抵抗外力作用的能力较强,相应地表现为土的极限强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角等力学指标较大;随着含水率的增加,吸附于黏质土细小土粒表面的结合水膜变厚、土体变软,土粒间的水膜联结作用减弱,加之水膜的润滑作用,土颗粒间的阻力减小,相应地表现为力学指标不断降低。

5 结 论

(1) 当试验土样的含水率小于最佳含水率时,随着冻融次数和含水率的增加,压实黏质土的应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型转变,试样的破坏形式由脆性破坏逐渐转为塑性破坏;而当含水率处在最佳含水率及其以上状态时,应力-应变曲线均为应变硬化型,试样的破坏形式为塑性破坏,不会因冻融次数与含水率变化而发生改变。

(2) 压实黏质土的极限强度和弹性模量均随冻融次数的增加呈上下波动起伏变化,但整体上呈衰减趋势,并在经历8次冻融循环后基本趋于稳定状态;含水率对压实黏质土的极限强度和弹性模量影响显著,随着含水率的增加,极限强度和弹性模量急剧下降。

(3) 冻融循环和含水率对压实黏质土的抗剪强度指标影响显著。其中黏聚力随着冻融次数的增加呈下降趋势,而内摩擦角与冻融次数的关系并无规律可循,但两者均在经历8次冻融循环后基本趋于稳定;黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加而大幅减小。

(4) 冻融循环对压实黏质土力学性质的影响机制为冻融循环引起的土颗粒不均匀收缩以及土中水的相变和迁移使土体内部结构发生了改变,而含水率变化则是改变了土体内部的水膜联结作用和水膜润滑作用。

(5) 考虑到冻融循环和含水率对压实黏质土力学性质的影响,建议季冻区路基应做好排水工作以降低路基含水率水平,并将经历8次冻融循环后压实黏质土的力学指标作为工程设计参考值。

参 考 文 献

- [1] XIE S B, QU J J, LAI Y M, et al. Effects of freeze-thaw

- cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet plateau[J]. **Journal of Mountain Science**, 2015, 12(4): 999—1009.
- [2] 张英, 邴慧, 杨成松. 基于 SEM 和 MIP 的冻融循环对粉质黏土强度影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3360—3597.
- ZHANG Ying, BING Hui, YANG Cheng-song. Influences of freeze-thaw cycles on mechanical properties of silty clay based on SEM and MIP Test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp. 1): 3360—3597.
- [3] 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.
- DONG Xiao-hong, ZHANG Ai-jun, LIAN Jiang-bo, et al. Study of shear strength deterioration of loess under repeated freezing-thawing cycles[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2010, 32(4): 767—772.
- [4] 刘寒冰, 王静, 魏海斌, 等. 冻融循环下路基土抗剪强度与塑性指数相关性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(增刊 2): 149—152.
- LIU Han-bing, WANG Jing, WEI Hai-bin, et al. Correlation of subgrade soil shear strength and plasticity index under freeze-thaw cycles[J]. **Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)**, 2011, 41(Supp. 2): 149—152.
- [5] 王静, 刘寒冰, 吴春利. 冻融循环对不同塑性指数路基土弹性模量的影响研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3665—3668.
- WANG Jing, LIU Han-bing, WU Chun-li. Influence of freeze-thaw cycles on elastic modulus of subgrade soil with different plasticity indices[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3665—3668.
- [6] WANG D Y, MA W, NIU Y H, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2007, 48(1): 34—43.
- [7] 毛雪松, 侯仲杰, 王威娜. 基于含水量和冻融循环的重塑土回弹模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3585—3590.
- MAO Xue-song, HOU Zhong-jie, WANG Wei-na. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp. 2): 3585—3590.
- [8] 王静, 刘寒冰, 吴春利, 等. 冻融循环对不同塑性指数路基土动力特性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 633—639.
- WANG Jing, LIU Han-bing, WU Chun-li, et al. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of subgrade soils with different plasticity indices[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 633—639.
- [9] WANG T L, MA C, YAN H, et al. Influence of repeated freeze-thaw on dynamic modulus and damping ratio properties of silty sand[J]. **Sciences in Cold and Arid Regions**, 2013, 5(5): 572—576.
- [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.
- YAN Han, WANG Tian-liang, LIU Jian-kun, et al. Experimental study of dynamic parameters of silty soil subjected to repeated freeze-thaw[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 683—688.
- [11] 胡海英, 王钊. 含水量对压实黏土的变形及强度性能的影响[J]. 公路, 2007, (2): 1—6.
- HU Hai-ying, WANG Zhao. Effects of moisture content on compression deformation and shear strength of compacted clay[J]. **Highway**, 2007, (2): 1—6.
- [12] 彭丽云, 刘建坤, 陈立宏. 非饱和击实粉土的强度和屈服特性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2241—2245.
- PENG Li-yun, LIU Jian-kun, CHEN Li-hong. Strength and yielding characteristics of unsaturated compacted silts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2241—2245.
- [13] 谢伟, 章定文, 杨声. 含水率对路基压实土小应变剪切模量的影响规律[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1273—1280.
- XIE Wei, ZHANG Ding-wen, YANG Sheng. Impact of moisture content on variation of small-strain shear modulus of compacted subgrade soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1273—1280.
- [14] 彭丽云, 刘建坤, 肖军华, 等. 京九线路基压实粉土力学特性的试验[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2007, 31(4): 56—60.
- PENG Li-yun, LIU Jian-kun, XIAO Jun-hua, et al. Mechanics properties of compacted silt on Beijing-Kowloon railway[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University (Natural Science Edition)**, 2007, 31(4): 56—60.
- [15] ZHANG D W, LIU S Y, ZHANG T. Water content and modulus relationship of a compacted unsaturated soil[J]. **Journal of Southeast University (English Edition)**, 2012, 28(2): 209—214.

- [16] 周志军, 钟世福, 梁涵. 冻融循环次数对黄土路用性能影响规律的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(4): 1—6.
ZHOU Zhi-jun, ZHONG Shi-fu, LIANG Han. Test research on change law of highway performance at loess are influenced by number of freeze-thaw cycles[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2013, 33(4): 1—6.
- [17] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313—4319.
WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4313—4319.
- [18] 严晗, 刘建坤, 王天亮. 冻融对粉砂土力学性能影响的试验研究[J]. 北京交通大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 73—77.
YAN Han, LIU Jian-kun, WANG Tian-liang. Experimental research of influences of freeze-thaw on the mechanical properties of silty soil[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University (Natural Science Edition)**, 2013, 37(4): 73—77.
- [19] 董晓宏, 张爱军, 连江波, 等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 887—893.
DONG Xiao-hong, ZHANG Ai-jun, LIAN Jiang-bo, et al. Laboratory study on shear strength deterioration of loess with long-term freezing-thawing cycles[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(6): 887—893.
- [20] 常丹, 刘建坤, 李旭, 等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1496—1502.
CHANG Dan, LIU Jian-kun, LI Xu, et al. Experiment study of effects of freezing-thawing cycles on mechanical properties of Qinghai-Tibet silty sand[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(7): 1496—1502.
- [21] 王林浩, 白晓红, 冯俊琴. 压实黄土状填土抗剪强度指标的影响因素探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 132—135.
WANG Lin-hao, BAI Xiao-hong, FENG Jun-qin. Discussion on shearing strength influencing factors of compacted loess-like backfill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp. 2): 132—135.
- [22] 袁俊平, 詹斌, 陈胜超, 等. 含水率和压实度对路基填土力学特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(2): 98—102.
YUAN Jun-ping, ZHAN Bin, CHEN Sheng-chao, et al. Effects of water content and compaction degree on mechanical characteristics of roadbed[J]. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, 2013, 11(2): 98—102.
- [23] 常丹, 刘建坤, 李旭. 冻融循环下粉砂土屈服及强度特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1721—1727.
CHANG Dan, LIU Jian-kun, LI Xu. Experimental study on yielding and strength properties of silty sand under freezing-thawing cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(8): 1721—1727.
- [24] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [25] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd. JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [26] 韩春鹏, 何东坡, 程培峰, 等. 寒区公路路基温度场的自动监测与特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(3): 21—26.
HAN Chun-peng, HE Dong-po, CHENG Pei-feng, et al. Automatic measure and character of highway subgrade temperature field in cold region[J]. **Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)**, 2011, 31(3): 21—26.
- [27] 覃绮平. 土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D]. 西安: 长安大学, 2005: 103—121.
QIN Qi-ping. Resilience factors of subgrade modulus and its' associated relationship[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005: 103—121.
- [28] 郑卿, 马巍, 郝慧. 冻融循环对土结构性影响的试验研究及影响机制分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1282—1287.
ZHENG Yun, MA Wei, BING Hui. Impact of freezing and thawing cycles on structure of soils and its mechanism analysis by laboratory testing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1282—1287.