

青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验

苏 谦, 唐第甲, 刘 深

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 冻融过程使土体的结构、物理力学性质等发生变化, 导致其工程性质恶化, 影响线路稳定和列车的正常运行。为考察青藏铁路多年冻土区斜坡路基土体的长期稳定性, 针对典型斜坡黏土在冻融循环条件下的主要物理力学性质, 进行试验研究。试验结果表明: 试样经历 10 次冻融后, 其含水量、密度、黏聚力、内摩擦角等物理力学性质趋于稳定。土体冻融最终平衡状态与初始状态相关, 其中初始干密度的影响尤为重要。随冻融循环过程增加, 低密度土体的黏聚力有所提高, 而高密度土体的黏聚力下降, 内摩擦角变化较小。进行冻土斜坡路基稳定性分析时, 建议取土体冻融平衡状态时的参数。

关键词: 土力学; 黏土; 冻融循环; 抗剪强度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 2990 - 05

TEST ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF QINGHAI—TIBET SLOPE CLAY UNDER FREEZING-THAWING CYCLES

SU Qian, TANG Dijia, LIU Shen

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: It has become a common understanding that the structure, physico-mechanical properties of soils could be considerably changed by freezing-thawing cycles. With the variation of engineering properties, the normal running train was disturbed by the decline of subgrade stabilization. In order to study the long-term stabilization of slope in frozen soil area of Qinghai—Tibet Railway, a test was conducted under repeatedly freezing-thawing cycles, aiming at the main physico-mechanical properties of the representative clay. The results show that the physico-mechanical characters of the investigated soils become stable after 10 freezing-thawing cycles, such as water content, density, cohesion, internal friction angle and so on. The stable state is dependent on the original state of the soil sample, and the influence of the original dry density is very important. With the repeatedly freezing-thawing cycles, the cohesion of low density clay increases, but the cohesion of high density clay decreases, and the internal friction angle of the clay changes little. It is suggested that the parameters of soil at stable state should be adopted to estimate the stabilization of slope in frozen soil area.

Key words: soil mechanics; clay; freezing-thawing cycles; shear strength

1 引 言

冻土是四相体, 相比于普通土, 其物理力学性质较为复杂^[1]。冻土对温度的敏感性决定了寒区工

程建设不可避免地会扰动已处于稳定态的土体, 大气周期性的温度变化, 导致冻土地基发生冻胀和融沉。铁路的修建破坏了冻土区原有水热等收支平衡, 使冻土温度场、水分场、应力场发生变化, 扰动后冻土的力学性质更为复杂, 加剧了地基土体的冻胀

收稿日期: 2007 - 05 - 10; **修回日期:** 2007 - 07 - 17

基金项目: 青藏铁路建设总指挥部科技攻关项目

作者简介: 苏 谦(1972 -), 男, 博士, 1993 年毕业于西南交通大学道路与铁道工程专业, 现任教授, 主要从事路基工程方面的教学与研究工作。E-mail: suqian@126.com

融沉过程而造成更严重的冰害, 破坏铁路的稳定性。青藏铁路格尔木—拉萨段共有 30 余处典型斜坡路基工点, 在冻融循环作用下的斜坡路基的长期稳定性是影响线路正常运营的关键问题。为对冻土斜坡路基稳定性进行合理评价, 必须深入研究冻融循环作用对斜坡土体强度的影响性。

土体的冻融过程会改变土体颗粒间的结构联结、排列方式, 从而改变土的力学性质。国内外多位学者对冻融循环作用对土体的影响进行了研究。齐吉琳等^[2, 3]通过室内冻融试验分析认为, 反复冻融改变土体力学性质的主要原因是改变了土的结构。在补水的开放系统下, 经多次冻融循环后, 土体的干容重趋于某一定值, 并且与初始干容重无关^[4]。P. Viklander^[5]提出了基于冻融作用的残余孔隙比的概念, 即松散土和密实土经过冻融循环后趋向一个稳定的孔隙比, 土的力学特性也发生相应的变化。目前, 虽然已对冻融循环作用进行了大量研究工作, 但大部分研究都是将黏土用在堤坝、坝体衬砌、挡水墙等方面, 针对孔隙体积、孔隙率、渗透性等指标的变化规律, 就强度而言, 相应的文献资料较少。冻融循环引起土体强度改变的大小将依赖于土的初始状态, 例如土的类型、颗粒大小、密度以及冻融循环的次数^[6]。S. J. Zhang 等^[7]认为, 石灰粉土的剪切强度随冻融循环次数的增加而逐渐衰减, 经历 10 次冻融循环的饱水石灰粉土强度最低。R. W. van Klaveren^[8]的研究结果表明, 冻融循环后土的剪切强度低于未经冻融的土。B. D. Alkire 和 J. M. Morrison^[9]对松散的粉质土和低密度黏土的试验表明, 经过冻融循环, 土的不排水剪切强度有所增加。齐吉琳和马 巍^[10]发现, 冻融作用使超固结土出现黏聚力降低, 摩擦角增大的现象, 综合土的初始状态、冰晶的生长和冻融过程中产生负孔隙水压力导致的有效应力增大等方面, 结合冻融作用对正常固结土的结构强化的分析, 提出了冻融作用对超固结土的结构弱化效应。朱元林^[11]认为冻结粉砂的单轴抗压强度与温度呈幂函数关系。张俊兵等^[12, 13]研究了饱和粉土及黏土的单轴抗压强度, 得到了其强度方程。王大雁等^[14]认为, 随着黏土所经历冻融循环次数的增加, 土的黏聚力逐渐下降, 但冻融循环对土内摩擦角的作用并无规律可循。目前这些研究还不能满足青藏铁路典型斜坡路基稳定性分析和评价的要求。为此, 本试验选取青藏铁路沿线典型斜坡黏性土作为研究对象, 探索在不同干密度及含水量的情况下, 土样的物理力学性质与冻融循环次数的影响规律。

2 土样基本性质及试验方案

根据青藏铁路格尔木—拉萨段斜坡地形、地貌、路基结构形式等, 沿线选取典型斜坡路基工点, 开展了青藏铁路冻土区斜坡冻土路基基本情况调查及钻孔取样工作。根据取样情况, 砂质黏土是斜坡路基土的典型土样之一, 因冻融循环对黏土物理力学性质影响较大, 是为本文主要研究对象。其液限为 31.52%, 塑限为 16.08%, 试验土颗粒分析结果见表 1。

表 1 试验土颗粒分析表

粒径范围/mm	质量百分数/%
>0.05	57.0
0.05~0.005	12.7
<0.005	30.3

本次试验采用重塑土, 根据《土工试验规程》(GB/T50123 - 1999)的试样制备要求制取试样。试样直径 61.8 mm, 高 20 mm。试样含水量考虑 2 种情况, 分别为现场取样平均天然含水量(13.5%)和饱和含水量(20.3%)。试样干密度也考虑 2 种情况, 即高干密度(2.03 g/cm³)和低干密度(1.82 g/cm³)。据此进行正交试验设计, 共分为 3 组: (1) 低密度、天然含水量情况; (2) 高密度、天然含水量情况; (3) 低密度、饱和含水量情况。每组有 7 小组试样, 其中有 6 组分别经过 3, 5, 7, 10, 15, 20 次的冻融循环, 另有 1 组不进行冻融循环试验, 逐步用来作为对比。测量每组试样的质量、平均直径和高度后, 用塑料袋密封, 放入低温试验箱冷冻, 达到指定的冻融循环次数后, 再测量平均质量、平均直径和高度, 然后进行直剪试验。直剪试验为快剪试验, 位移剪切速率为 1 mm/min, 垂直荷载分别为 50, 100, 150, 200 kPa。试样的冻融环境为封闭系统, 无外部水分补给, 试样冻结温度为 -20 °C, 融化温度为 17 °C。为保证试样完全冻结、充分融化, 根据对埋置有温度探头的试样的冻结、融化时间标定, 确定冻结时间为 24 h, 融化时间为 12 h。

3 试验结果及分析

冻融循环过程将使土的物理力学性质发生变化^[4], 反复的冻融循环改变了土体的性状, 使得土体从不稳定态向新的动态稳定平衡状态发展。在封闭系统中, 土体的物理力学性质, 如含水量、干密

度、黏聚力、内摩擦角等，受冻融循环次数影响，存在平衡冻融次数，即超过平衡冻融次数后，土体的物理力学性质趋于稳定，达到平衡状态(指受冻融影响较弱)。

由于土样处在封闭系统，冻融循环作用使土样内部的水分重分布，试样含水量随着冻融循环次数的增加而逐渐降低。天然含水量和饱和含水量情况下，表 2 给出了不同冻融循环次数对应的试样含水量。

表 2 不同冻融次数对应的试样含水量

Table 2 Sample water contents with different freezing-thawing cycles

冻融循环次数 n /次	天然含水量/%	饱和含水量/%
0	13.65	20.34
3	13.46	18.57
5	13.45	18.02
7	13.44	17.46
10	13.21	16.32
15	13.27	16.10
20	13.23	15.87

为了进一步描述含水量与冻融次数之间的关系，引入一个量纲一的参量——含水量变化率 f ，定义为冻融循环后含水量变化量与未冻融初始含水量之比，即

$$f = \frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： w_0 为每组试样未冻融初始含水量； w_i 为冻融 3, 5, 7, 10, 15, 20 次所对应的试样的平均含水量。

含水量变化率 f 与冻融循环次数 n 的关系曲线如图 1 所示。冻融过程中，水分迁移是导致含水量发生变化的重要原因。土样受低温作用时，表面最先产生冰晶，破坏原有的相平衡，引起内部水分向冻结锋面迁移并冻结，增大了表面的含水量，并且在表面析出冰晶，直到土样完全冻结，体积膨胀。当土样融化时，受热空气影响，表面开始融化，因土样内部温度始终低于表面，水分由表面向内部迁移。土体融化时间始终小于冻结时间，故融化时表面向内部的逆向水分迁移量始终小于冻结时内部向表面的正向水分迁移量。本次试验表明在缺乏外部水分补给的条件下，冻融循环使土体的含水量降低，随着冻融循环次数增加，正向水分迁移量与逆向水分迁移量也达到一动态平衡。在本次试验中，经 10 次冻融作用后，含水量趋于稳定。虽然不同含水量的土样均表现出相同的规律，但是不同的初始含水量得到不同的稳定含水量。说明土样的最终平衡状

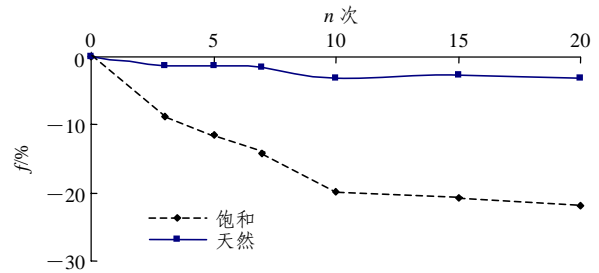


图 1 含水量变化率 f 与冻融循环次数 n 的关系曲线

Fig.1 Relation curves between variation rate of water content f and freezing-thawing cycle numbers n

态也受初始状态的影响，初始含水量越大，含水量变化率越高，相应的变化幅度越大。

通过测量冻融循环后试样的几何尺寸和质量可计算出干密度，每组试样的平均干密度并不相同，为了描述干密度与冻融次数之间的关系，引入一个量纲一的参量——干密度变化率 m ，定义为冻融循环后干密度变化量与未冻融原始干密度之比，即

$$m = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中： ρ_0 为每组试样未冻融原始干密度； ρ_i 为冻融 3, 5, 7, 10, 15, 20 次所对应的试样的平均干密度。

高密度和低密度情况，干密度变化率 m 与冻融循环次数 n 的关系曲线如图 2 所示。 m 为正数时表示干密度增大，反之则减小。当冻融循环次数小于 10 次时，两组试样的干密度都发生变化，而超过 10 次后，干密度基本稳定。这表明土体达到了新的动态平衡状态。

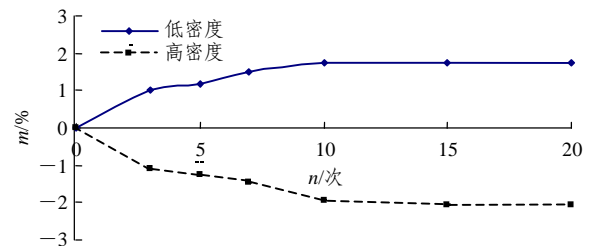


图 2 干密度变化率 m 与冻融循环次数 n 的关系曲线

Fig.2 Relation curves between variation rate of dry density m and freezing-thawing cycle numbers n

初始干密度较低时，反复冻融使得土体更加密实，干密度逐渐增大并趋于稳定。M. A. Othman 和 C. H. Benson^[15]对一种正常固结土的冻融试验表明，在冻结初期，土样发生收缩而非膨胀，冻融循环之后土的密度增大。低干密度的土体内部孔隙率较大，颗粒间胶结作用较弱，最初几次的冻结时产生一定冻胀量；而融化时土体沉降，部分孔隙水排出，总的融沉量大于冻胀量，使土体更为密实；多次冻融

之后, 融沉降与冻胀量相等, 干密度达到稳定。可以认为对于低干密度的土体, 冻融循环作用产生一定的“冻融固结效应”。

初始干密度较高时, 反复冻融使得土体变得疏松, 干密度逐渐减小并趋于稳定。高干密度土体, 颗粒间连结紧密, 抵抗融沉能力较强, 起初几次冻融过程中, 融化下沉量小于冻胀量, 土体体积膨胀; 而多次冻融后, 含水量趋于稳定, 故冻胀量有所减少, 冻胀与融沉形成平衡, 也达到了平衡干密度。可以认为对于高干密度土体, 冻融循环使之疏松。

无论初始干密度大小, 土体经过 10 次以上冻融循环作用后, 其干密度趋于定值, 可称为平衡干密度; 在封闭系统中平衡干密度的大小与初始干密度相关。而在开放系统, 水分由下向上补给情况下, 经过多次冻融循环以后, 土体的干密度趋于某一定值。这一定值与土体的初始干密度无关, 而与土体的种类有关^[4]。

在土力学中被广泛采用的强度理论要推莫尔 - 库仑强度理论, 这一理论认为土的破坏是剪切破坏, 土体抗剪强度可用黏聚力和内摩擦角 2 个指标来表示。内摩擦角主要反映粒间表面的摩擦力和咬合力, 统称内摩擦力, 法向压应力越大, 内摩擦力越大。而黏聚力则反映土粒间的各种物理化学作用力, 包括库仑力、范德华力、胶结作用力等, 这些力的大小由颗粒间的距离和颗粒间胶结物质的胶结力共同决定。试验中, 为了解冻融循环对土抗剪强度的影响, 主要针对黏聚力和内摩擦角进行了研究。

普遍认为, 冻融作用会降低土的强度^[14]。然而本次试验表明, 在冻融循环作用下, 不同初始状态黏性土的抗剪强度变化规律并不相同, 抗剪强度的变化规律依赖于初始状态。E. J. Chamberlain 和 A. J. Gow^[16]认为, 正常固结土在冻融过程中会发生超固结效应。在冻结过程中, 土在冻结峰面附近会产生较大的负孔隙水压力, 使有效应力增大, 土被压缩。当土样融化时, 有效应力减少。在整个过程中, 总应力保持不变。可见, 冻融循环对正常固结土产生超固结效应, 对土的结构具有强化作用, 土的黏聚力会相应地增大。对于超固结的高密度土体, 土体冻结时生长的冰晶破坏了颗粒间的联系, 而融化时已被破坏的连结不可恢复, 反复冻融导致土体结构性的弱化, 使黏聚力降低, 从而降低抗剪强度。本次试验中, 第 2, 3 组未冻土、冻融 10 次后土的抗剪强度线如图 3 所示。低密度情况, 土的抗剪强度随冻融循环次数增加而增大, 而高密度情况则相反, 土的抗剪强度随冻融循环次数增加而减小。

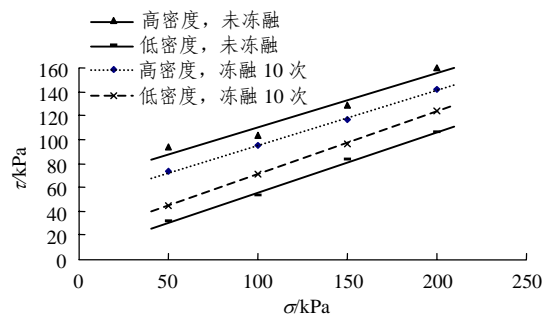


图 3 冻融前后土的抗剪强度线
Fig.3 Shear strength envelopes of soils before and after freezing-thawing cycles

3 组试样的黏聚力 c 与冻融循环次数 n 的关系曲线如图 4 所示。第 1, 3 组, 即低密度、天然含水量情况和低密度、饱和含水量情况, 黏聚力随冻融次数增加而逐渐增大, 当冻融循环次数超过 10 次后, 趋于稳定; 而第 2 组即高密度、天然含水量情况, 黏聚力随冻融循环次数增加而逐渐降低, 当冻融循环次数为 10 次时达到稳定。显然, 土体不断冻胀融沉, 改变了颗粒间原有的联系, 使土体的黏聚力发生改变。低密度的土体受冻融循环作用后, 产生固结效应, 使黏聚力有所提高; 而高密度的土体内部颗粒原有的联系被破坏, 黏聚力下降。

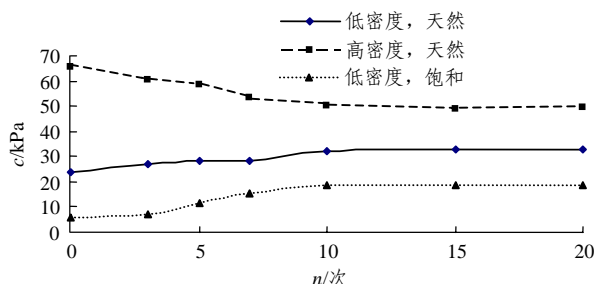


图 4 黏聚力 c 与冻融循环次数 n 的关系曲线
Fig.4 Relation curves between cohesion c and freezing-thawing cycle numbers n

内摩擦角 φ 与冻融次数 n 的关系曲线如图 5 所示。最初 3~5 次冻融循环, 内摩擦角稍有波动, 在 10 次冻融以后, 都能达到稳定值。总体来说, 冻融循环过程对土体黏聚力值的影响较大, 对内摩擦角数值影响较小。

综合分析可知, 高密度、天然含水量情况, 土体强度最高, 低密度、天然含水量情况, 土体强度次之, 而低密度、饱和含水量情况, 土体强度最低。因此, 在施工中, 应注意压实质量控制, 使路基土体达到规定密实度; 在运营和养护中, 应注意保证路基排水系统畅通, 降低土体含水量。从而提高路基抵抗反复冻融循环的能力, 提高路基土体强度, 保证斜坡路基的长期稳定性。在寒区工程建设中,

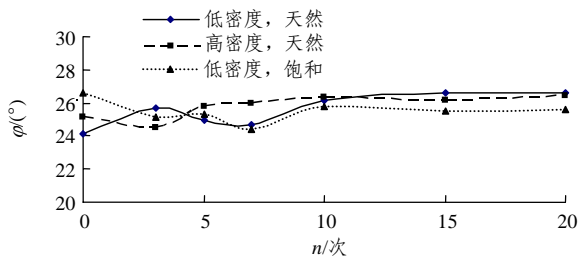


图5 内摩擦角 φ 与冻融循环次数 n 的关系曲线

Fig.5 Relation curves between inner friction angle φ and freezing-thawing cycle numbers n

应考虑反复冻融对土体的影响, 进行冻土区工程设计时, 建议取土体冻融平衡状态时的参数。

4 结 论

通过对青藏线典型斜坡黏土的冻融循环试验, 可以得到如下结论:

(1) 试样含水量随着冻融循环次数的增加而逐渐降低并趋于稳定, 初始含水量越大, 含水量变化率越高。

(2) 冻融循环过程中, 初始干密度较低时, 干密度逐渐增大并趋于稳定; 初始干密度较高时, 干密度逐渐减小并趋于稳定。

(3) 冻融循环过程对土体黏聚力值的影响较大, 对内摩擦角数值影响较小。低密度的土体受冻融循环作用后, 黏聚力有所提高, 而高密度的土体黏聚力下降。

(4) 土体经过 10 次以上冻融循环作用后, 达到平衡状态。在封闭系统中平衡含水量和平衡干密度的大小与初始状态相关。

参考文献(References):

[1] 崔托维奇 H A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林译. 北京: 科学出版社, 1985.(TSYTOVICH H A. Mechanics of frozen soil[M]. Translated by ZHANG Changqing, ZHU Yuanlin. Beijing: Science Press, 1985.(in Chinese))

[2] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 2): 2 690 - 2 694.(QI Jilin, ZHANG Jianming, ZHU Yuanlin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp. 2): 2 690 - 2 694. (in Chinese))

[3] EDWIN J C, ANTHONY J G. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(4): 73 - 92.

[4] 杨成松, 何 平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2 695 -

2 699.(YANG Chengsong, HE Ping, CHENG Guodong, et al. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp. 2): 2 695 - 2 699.(in Chinese))

[5] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471 - 477.

[6] BENOIT G R, VOORHEES W B. Effect of freeze-thaw activity on water retention, hydraulic conductivity, density and surface strength of two soils frozen at high water content[R]. New Hampshire, USA: USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990.

[7] ZHANG S J, LAI Y M, ZHANG X F, et al. Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(3): 295 - 302.

[8] VAN KLAVEREN R W. Hydraulic erosion resistance of thawing soil[Ph. D. Thesis][D]. Washington, USA: Department of Agricultural Engineering, Washington State University, 1987.

[9] ALKIRE B D, MORRISON J M. Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1983, 918: 15 - 21.

[10] 齐吉琳, 马 巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 082 - 2 086.(QI Jilin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2 082 - 2 086.(in Chinese))

[11] 朱元林. 冻结粉砂在常变形速度下的单轴抗压强度[J]. 冰川冻土, 1986, 8(4): 365 - 380.(ZHU Yuanlin. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. Journal of Glaciology and Geocroglogy, 1986, 8(4): 365 - 380.(in Chinese))

[12] 张俊兵, 李海鹏, 林传年, 等. 饱和冻结粉土在常变形速率下的单轴抗压强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2 865 - 2 870.(ZHANG Junbing, LI Haipeng, LIN Chuannian, et al. Uniaxial compressive strength of saturated frozen clay at constant strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp. 2): 2 865 - 2 870.(in Chinese))

[13] 李海鹏, 林传年, 张俊兵, 等. 饱和冻结黏土在常变形速率下的单轴抗压强度[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 105 - 108.(LI Haipeng, LIN Chuannian, ZHANG Junbing, et al. Compressive strength of saturated frozen silt under constant strain rate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 105 - 108.(in Chinese))

[14] 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): 4 313 - 4 319.(WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, 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): 4 313 - 4 319.(in Chinese))

[15] OTHMAN M A, BENSON C H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(2): 236 - 246.

[16] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1981, 15(1/4): 73 - 92.