

文章编号:1671-1637(2013)04-0016-06

冻结速度对冻融黄土物理力学性质的影响

周志军¹, 杨海峰², 耿楠¹, 叶万军³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075;
3. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:将冻结速度分别设定为 3.33、1.67、1.11、0.83 °C · h⁻¹, 在封闭条件下对不同含水率土样进行冻融循环, 测试了不同冻结速度时土样的含水率、干密度、液塑限、抗剪强度及压缩性, 分析了冻结速度对冻融黄土物理力学性质的影响规律。试验结果表明: 经过冻融循环后, 试样含水率普遍较初始含水率大, 随着冻结速度的增大, 含水率的增幅呈降低趋势; 当含水率较低时, 冻结速度对试样干密度影响较小, 当含水率较高时, 随着冻结速度的增大, 试样干密度降低; 土样液限随着冻结速度的增大呈增大趋势, 塑限无明显变化; 粘聚力随着冻结速度的增大总体呈增大趋势, 内摩擦角随冻结速度的变化规律与试样含水率密切相关; 冻融后黄土的压缩性较未冻结土样强, 且随着冻结速度的增大, 土样的压缩模量增大。

关键词:路基工程; 黄土; 冻结速度; 干密度; 液塑限; 粘聚力; 内摩擦角

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A

Influence of freezing speed on physical and mechanical properties of freezing-thawing loess

ZHOU Zhi-jun¹, YANG Hai-feng², GENG Nan¹, YE Wan-jun³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Communications Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Freezing speed was set to 3.33, 1.67, 1.11, 0.83 °C · h⁻¹ respectively, and freezing-thawing cycles were conducted on soil samples with different water contents under closed condition. The water contents, dry densities, liquid-plastic limits, shear strengths and compressibilities of soil samples under different freezing speeds were tested, and the influence rules of freezing speed on the physical and mechanical properties of freezing-thawing loess were analyzed. Test result indicates that the water contents of soil samples after freezing-thawing cycle are larger than those of initial soils, and the growth of water content decreases with the increase of freezing speed. When water contents are lower, the influences of freezing speed on the dry densities of soil samples are less. When water contents are higher, the dry densities of soil samples decrease with the increase of freezing speed. The liquid limits of soil samples increase with the increase of freezing speed, and plastic limits change little. Cohesive force increases with the increase of freezing speed, and the change rule of internal friction angle with freezing speed is closely related with water content. The compressibility of soil sample after freezing-thawing cycle is higher than that of unfrozen soil, and compression modulus increases with the increase of freezing speed. 2 tabs, 13 figs, 15 refs.

收稿日期: 2013-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172262)

作者简介: 周志军(1975-), 男, 江苏泰兴人, 长安大学副教授, 工学博士, 从事特殊土路基工程研究。

Key words: subgrade engineering; loess; freezing speed; dry density; liquid-plastic limit; cohesive force; internal friction angle

Author resume: ZHOU Zhi-jun(1975-), male, associate professor, PhD, +86-29-85355787, 5974100@qq.com.

0 引 言

黄土在中国分布面积约 63 万平方公里,其结构可视为有一个单粒、集粒或凝块等骨架单元共同形成的空间结构体系。随着黄土地区大量高速公路建设,修筑过程中不可避免的利用挖方黄土进行路基填筑。由于排水设施的不完善,路面及农田等外部水的渗入,黄土路基在低温作用下常常发生冻融,由于水体冻结后的体积膨胀率高达 0.09,极易在岩土体内造成胀缩裂缝,此外,冻结作用还会引起路基内水分迁移^[1]。

针对岩土体在低温作用下的冻融试验已有相关研究,其中岩体冻结研究主要集中在单个裂隙充水后的冻胀问题,土体的冻结主要考虑路基的融沉^[2-3]及其对边坡稳定性的影响^[4-5]。路基的融沉主要体现在土体的干密度和体积变化,连江波等在封闭系统下对不同初始条件的黄土进行多次反复冻融循环(最多冻融循环 50 次),研究了黄土孔隙比和渗透系数的变化规律^[6];毕贵权等通过补水条件下的冻融循环试验,得出了冻融循环对土体干密度、变形及含水率的影响规律^[7-9];影响边坡稳定性的主要因素是冻融土体抗剪强度指标,即粘聚力和内摩擦角,宋春霞等以兰州黄土为研究对象,将土样在封闭系统下经历一个冻融循环,得到了干密度对冻融土样前期固结压力和粘聚力的影响规律^[10];Wang 等通过单

轴和三轴试验,得到了原状土和冻融土抗剪强度指标的差异性^[11-13];马巍等分析了冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响^[14];冻融对土力学性质改变的主要原因是改变了土的结构性,齐吉琳等将一定干密度的饱和兰州黄土进行一次冻融循环后,分别进行土力学试验和电子显微镜图像的定量分析,从微观结构定量分析中解释力学性质的变化规律^[15]。

以上研究主要针对冻融后的试样,开展了含水率、干密度及强度等物理力学指标测试,并分析了土体冻融后的力学变化规律与微观结构的相关性。试验过程中含水率主要以天然含水率进行控制,冻结速度往往设定为常量。由于中国冻土分布范围较广,各个地区温度变化速度差异较大,本文将冻结速度设定为 4 种工况,分别测试了不同冻结速度时土样的含水率、干密度、液塑限、抗剪强度及压缩性等指标,分析了冻结速度对冻融黄土物理力学性质的影响规律。

1 试验简介

按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)制作原状土样。试样取自陕北地区黄陵县,为 Q₂ 黄土,含有虫孔和少量羌石,呈深黄、棕黄及微红色。土样的物理性质见表 1,试样的颗粒分析结果见表 2。

表 1 Q₂ 黄土物理性质

Tab. 1 Physical properties of Q₂ loess

干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	塑限 w _p /%	液限 w _L /%	塑性指数 I _p /%	液性指数 I _L /%	体积/cm ³
1.51~1.62	10.87~11.14	15.40~17.43	31.2~34.4	13.77~16.00	-0.47~-0.31	100.0~100.1

表 2 Q₂ 黄土颗粒分析

Tab. 2 Particle analysis of Q₂ loess

土粒粒径/mm	>2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075	<0.075
某粒组颗粒质量/g	3.06	5.10	43.95	57.89	38.42	8.20	100.48
该粒组质量分数/%	1.17	1.96	16.87	22.22	14.74	3.15	39.90

试样冻结在恒温冷冻箱(天津市港源试验仪器厂出产的 DWX-150-30 低温试验箱)中完成,试样放在 20℃左右的室温条件下进行融化。试验过程中,冻结速度分别为 3.33、1.67、1.11、0.83℃·h⁻¹,即在 12、24、36、48 h 内温度从 20℃线性降到-20℃。冻结

完毕后,将试样放在 20℃干燥器中 12 h 进行融化。

2 试验结果分析

2.1 冻结速度对黄土含水率的影响

针对天然土样进行不同冻结速度下的冻融试

验,不同取样筒中天然土样的初始含水率 w 分别为 10.87%、11.05%、11.13%、11.14%。含水率与冻结速度的关系见图 1,含水率增量 Δw (冻融后土样含水率与初始含水率的差值)与冻结速度的关系见图 2。

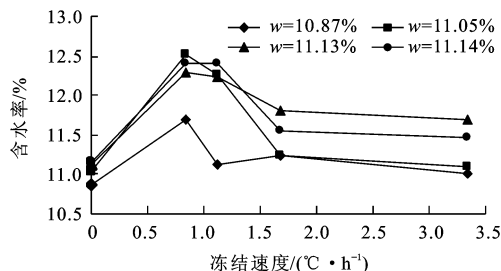


图 1 含水率与冻结速度的关系

Fig. 1 Relation between water content and freezing speed

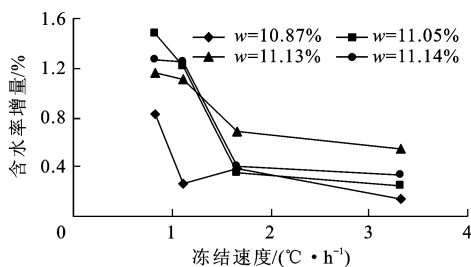


图 2 含水率增量与冻结速度的关系

Fig. 2 Relation between increment of water content and freezing speed

由图 1、2 可以看出:冻融后土样的含水率普遍较初始含水率大,随着冻结速度的增大,含水率的增幅呈降低趋势,其主要原因是土在冻结过程中,环境水分向冻结峰面迁移,致使土体的含水率增大,随着冻结速度的增大,即冻结时间的缩短,环境水分迁移量减小。

2.2 冻结速度对黄土干密度的影响

针对原状土样采用增湿法配制不同含水率试样。增湿完毕后,用环刀进行取样,同时测试其含水率。不同取样筒中土样含水率分别为 11.0%、16.9%、18.8%、23.5%,对应的土样初始密度分别为 1.751、1.756、1.762、1.768 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。图 3 为冻融循环后土样干密度与冻结速度之间的关系曲线。由图 3 可见:随着未冻融土样含水率的增大,初始干密度增大,其主要原因是土样增湿过程中,水的渗入对黄土的大孔隙结构产生了破坏,致使土体变密实。当含水率较低时,冻结速度对试样干密度影响较小,当含水率较高时,试样干密度随冻结速度的增大而降低,且含水率越大,土样干密度降低越明显,其主要原因是,当冻结速度较低,土体温度从正温降低到负温时,水分冻胀作用对试样的体积影响不明显,当冻结速度较快时,试样内的水分来不及迁移到

表面就被冻结,冻胀作用使得土体体积增加,且含水率越大,试样冻胀量越大,相应的干密度减小。

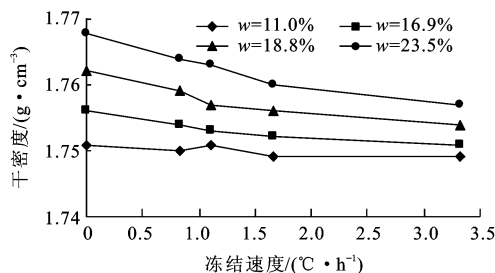


图 3 干密度与冻结速度关系

Fig. 3 Relation between dry density and freezing speed

2.3 冻结速度对黄土液塑限的影响

首先对天然黄土开展液塑限试验,在此基础上,配制不同含水率试样进行冻融,然后开展相应的液塑限试验,其中塑限采用搓条法,液限采用锥式液限仪法。液塑限与冻结速度的关系见图 4,塑性指数与冻结速度的关系见图 5。

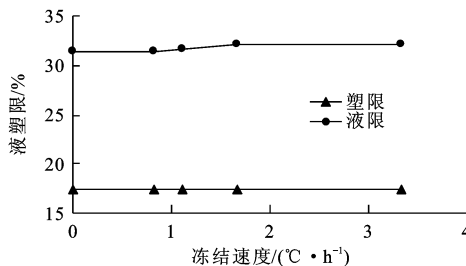


图 4 液塑限与冻结速度的关系

Fig. 4 Relation between liquid-plastic limit and freezing speed

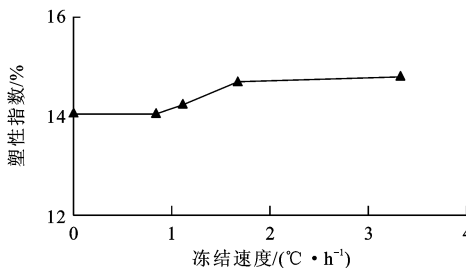


图 5 塑性指数与冻结速度的关系

Fig. 5 Relation between plastic index and freezing speed

由图 4、5 可见:不同冻结速度下土样塑限的变化规律不明显,其主要原因是采用搓条法得出试验数据误差比较大,其次塑限含水率相对较低,冻结状态时体积膨胀量较小,对黄土结构的影响比较小;土样经过冻融后,随着冻结速率的增大液限有增大趋势,但增幅很小,这是因为土冻结后,土中水结冰体积膨胀。冻结速度较快时,土体内的水分来不及迁移到黄土表面就冻结,且土样液限含水率较大,孔隙中水冻结后,冻胀力使得土体内颗粒间的接触点增

多,比表面积增大,相应比表面能增大,土中弱结合水增多,土样塑性指数增大。

2.4 冻结速度对黄土抗剪强度的影响

针对不同冻结速度下冻融土样开展直剪试验,

试样抗剪强度试验曲线见图 6。根据图 6 计算出土样的抗剪强度指标,图 7、8 给出了抗剪强度指标与冻结速度的关系,图 9、10 给出了抗剪强度指标与土样含水率的关系。

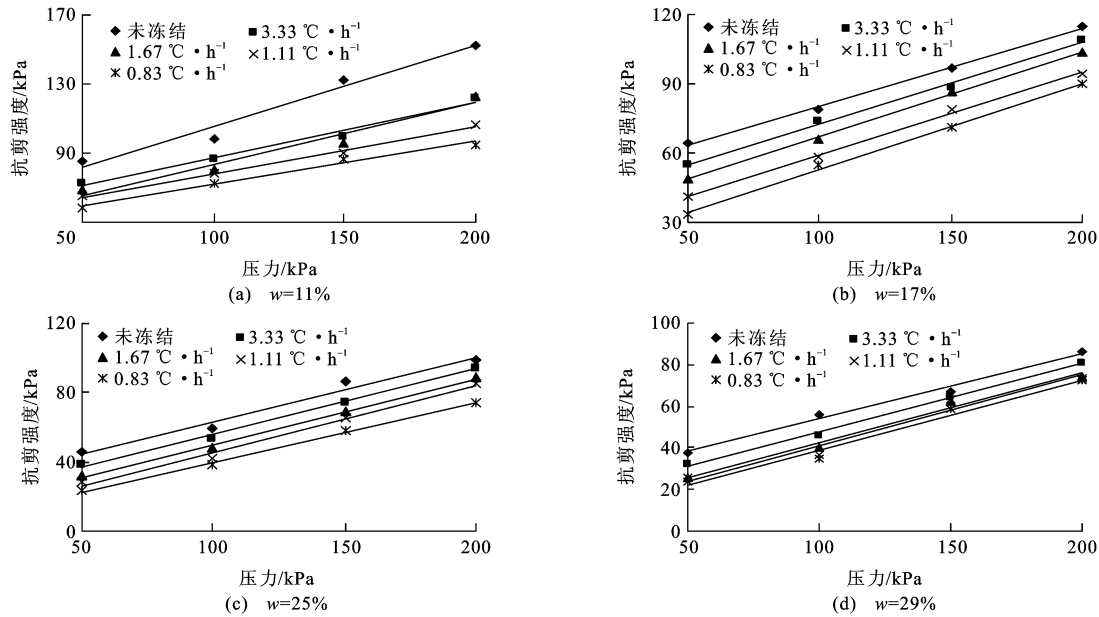


图 6 不同含水率试样直剪试验结果

Fig. 6 Direct shear test results of different water content samples

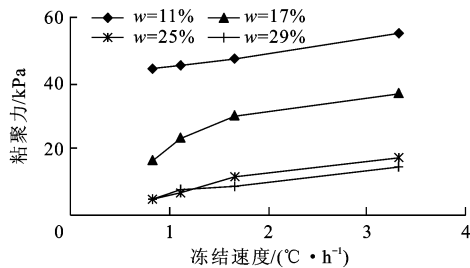


图 7 粘聚力与冻结速度的关系

Fig. 7 Relation between cohesive force and freezing speed

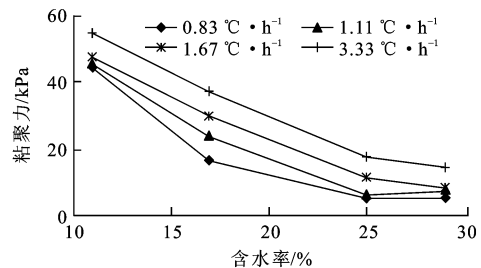


图 9 粘聚力与含水率的关系

Fig. 9 Relation between cohesive force and water content

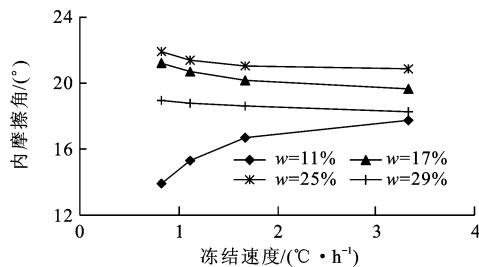


图 8 内摩擦角与冻结速度的关系

Fig. 8 Relation between internal friction angle and freezing speed

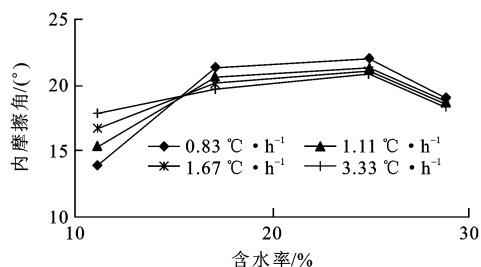


图 10 内摩擦角与含水率的关系

Fig. 10 Relation between internal friction angle and water content

由图 7~10 可见:同一含水率情况下, Q_2 黄土的抗剪强度随着冻结速度的增大呈增大趋势,但冻融后的试样抗剪强度均位于天然土样的下方,即经过冻融后土样的抗剪强度均比未冻结土样抗剪强度

低;含水率相同时,粘聚力随着冻结速度的增大总体呈增大趋势,内摩擦角随冻结速度的变化规律与试样含水率密切相关,当含水率为 11% 时,液性指数小于 0,土体处于坚硬状态,随着冻结速度的增大试

样内摩擦角增大,当含水率在 17%~29% 范围内,即土体处于塑性状态时,试样内摩擦角随着冻结速度的增大而减小,其中含水率为 29% 时,试样内摩擦角随着冻结速度的变化幅度最小,仅为 3.79%;同一冻结速度下,含水率对试样的粘聚力影响较大,当含水率从 11% 增大到 25% 时,试样粘聚力降低幅度为 67.81%~88.27%,当含水率从 25% 变化到 29% 时,粘聚力降低幅度仅为 10.37%~26.14%,而

试样内摩擦角则随着含水率的增大先增大后减小,即在含水率为 25% 左右时内摩擦角达到最大值。

2.5 冻结速度对黄土压缩性能的影响

将不同含水率试样分别放置在不同冻结速度试验箱中进行冻结,针对冻结后试样开展压缩试验,压缩曲线见图 11。根据压缩曲线计算出试样的压缩模量,并建立压缩模量与冻结速度、含水率之间的关系曲线,见图 12、13。由图 12、13 可得如下结论。

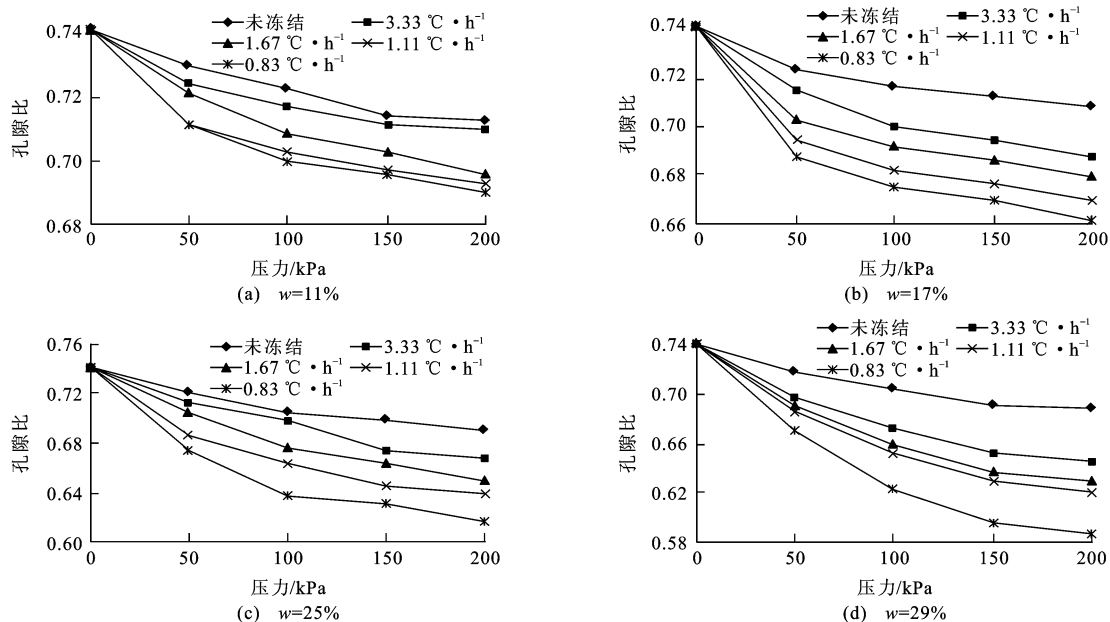


图 11 不同含水率试样压缩试验曲线

Fig. 11 Compression test curves of different water content samples

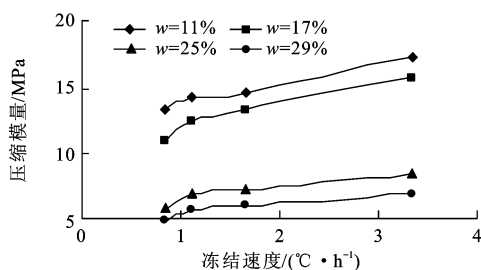


图 12 压缩模量与冻结速度的关系

Fig. 12 Relation between compression modulus and freezing speed

(1) 冻融后土样的压缩曲线均处于未冻结土样压缩曲线之下,即冻融土的压缩性均高于未冻结土,且冻结速度越低,试样压缩曲线越陡,相应的试样压缩性越高。其主要原因是:土体在冻结过程中,由于水分迁移,使得土体冻结面的含水率增大,增大了土体的孔隙体积;冻结速度越小,迁移水分迁移越严重,土体体积膨胀量越大。

(2) 压缩模量随着冻结速度的增大而增大,其增大幅度在 30.00%~47.62% 之间;同一冻结速率

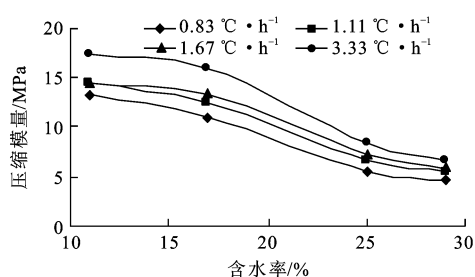


图 13 压缩模量与含水率的关系

Fig. 13 Relation between compression modulus and water content

下,压缩模量随着含水率的增大而减小,其中含水率从 11% 变化到 25% 过程中,压缩模量显著减小,降低幅度达 50.00%~58.06%;含水率从 25% 变化到 29% 时,压缩模量降低幅度较小。

3 结 语

冻结后的土样含水率普遍较初始含水率高,且冻结速度越大,环境水分迁移量越小,相应的含水率增量降低;当土样初始含水率较高时,冻结速度越

大,试样体积增加,对应的干密度减小。不同冻结速度下土样的塑限变化不明显,液限有增大趋势,相应的塑性指数增大。 Q_2 黄土抗剪强度随着冻结速度的增大呈增大趋势,但均小于未冻结土抗剪强度,其中内摩擦角随着冻结速度的变化规律与试样含水率密切相关,当含水率较低时,随着冻结速度的增大内摩擦角增大,当含水率较高时则相反。冻融循环后土样的压缩性均比未冻结土强,土样的压缩模量随着冻结速度的增大而增大,即抵抗外荷载的能力增强。

参考文献:

References:

- [1] 沈珠江. 抗风化设计——未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 866-869.
SHEN Zhu-jiang. Weathering resistant design—an important aspect of future development of geotechnical engineering design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 866-869. (in Chinese)
- [2] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1409-1412.
YANG Geng-she, ZHANG Quan-sheng, PU Yi-bin. Preliminary study on meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1409-1412. (in Chinese)
- [3] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2502-2508.
XU Guang-miao, LIU Quan-sheng, PENG Wan-wei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2502-2508. (in Chinese)
- [4] 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, 2003, 22(增2): 2690-2694.
QI Ji-lin, ZHANG Jian-ming, ZHU Yuan-lin. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2690-2694. (in Chinese)
- [5] 齐吉琳, 程国栋, VERMEER P A. 冻融作用对土工程性质影响的研究现状[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 887-894.
QI Ji-lin, CHENG Guo-dong, VERMEER P A. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(8): 887-894. (in Chinese)
- [6] 连江波, 张爱军, 郭敏霞, 等. 反复冻融循环对黄土孔隙比及渗透性的影响[J]. 人民长江, 2010, 41(12): 55-58, 62.
LIAN Jiang-bo, ZHANG Ai-jun, GUO Min-xia, et al. Influence of iterative freezing-thawing on void ratio and permeability coefficient of loess[J]. Yangtze River, 2010, 41(12): 55-58, 62. (in Chinese)
- [7] 毕贵权, 张 侠, 李国玉, 等. 冻融循环对黄土物理力学性质影响的试验[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(2): 114-117.
BI Gui-quan, ZHANG Xia, LI Guo-yu, et al. Experiment of impact of freezing-thawing cycle on physico-mechanical properties of loess[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010, 36(2): 114-117. (in Chinese)
- [8] 李国玉, 马 巍, 李 宁, 等. 冻融对压实黄土工程地质特性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 5-7, 20.
LI Guo-yu, MA Wei, LI Ning, et al. Experimental research on impact of freezing and thawing on geotechnical properties of compacted loess [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 5-7, 20. (in Chinese)
- [9] 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): 2695-2699.
YANG Cheng-song, HE Ping, CHENG Guo-dong, 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(S2): 2695-2699. (in Chinese)
- [10] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086.
SONG Chun-xia, QI Ji-lin, LIU Feng-yin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1080, 1086. (in Chinese)
- [11] WANG Da-yan, MA Wei, NIU Yong-hong, 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.
- [12] 杨 平, 张 婷. 人工冻融土物理力学性能研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 665-667.
YANG Ping, ZHANG Ting. The physical and the mechanical properties of original and frozen-thawed soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 665-667. (in Chinese)
- [13] 汪仁和, 张世银, 秦国秀. 冻融土工程特性的试验研究[J]. 淮南工业学院学报, 2001, 21(4): 35-37, 46.
WANG Ren-he, ZHANG Shi-yin, QIN Guo-xiu. Studies of the engineering properties of freezing thawed soil[J]. Journal of Huainan Institute of Technology, 2001, 21(4): 35-37, 46. (in Chinese)
- [14] 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.
MA Wei, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 158-160. (in Chinese)
- [15] 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): 2082-2086.
QI Ji-lin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082-2086. (in Chinese)