

冻融循环条件下土的融沉性质试验研究

梁波^{1,2}, 张贵生³, 刘德仁²

(1. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 兰州交通大学土木学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 天津市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘要: 多年冻土地区路基病害主要由冻土土体在季节变化条件下的冻融循环造成的。因此, 本文结合青藏铁路清水河、北麓河试验段土质条件, 通过室内试验探讨和研究了不同土质在不同含水率、密实度、荷载条件下, 反复冻融过程中的融沉特性。并探讨了循环融沉系数与融沉系数的关系及表达式, 为进一步深化对融沉特性的认识提供了参考。

关键词: 冻土; 冻融循环; 融沉特性; 融沉系数

中图分类号: TU411.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1213-05

作者简介: 梁波(1964-), 男, 四川人, 教授, 博士生导师。主要从事岩土与地下工程、路基方面的教学与研究。

Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation

LIANG Bo^{1,2}, ZHANG Gui-sheng³, LIU De-ren²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil

Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: The disease of subgrade in permafrost region was mainly induced by frost heaving and thawing circulation of frozen soils because of change of seasons. Considering the different soils in different test sections of Qinghai-Tibet railway from Golmud to Lhasa, the thawing subsidence characters of frozen soils with different water contents, densities and loads under frost heaving and thawing circulation were studied. The relationship between thawing subsidence coefficient and cyclic thawing subsidence coefficient and the formula were discussed too. All these works were beneficial for deep understanding about thawing subsidence characters.

Key words: permafrost; frost heaving and thawing circulation; thawing subsidence character; thawing subsidence coefficient

0 引言

青藏铁路建设中冻土工程核心问题是路基的冻胀和融沉及长期稳定问题。土体的冻胀和融沉是复杂的过程, 涉及水分的迁移、热场(温度场)的变化以及应力场的作用。路基作为建筑物, 在青藏高原这种特定的环境地质条件下, 不可避免长期处于大气—活动层—多年冻土系统的水热相互作用之中^[1-2], 加之高原日温差大和气候巨变的特点, 使得水、热、力的共同作用不断变化着, 正是冻胀与融沉等路基病害的根源。

冻土中的热交换是冻土生存与消融最重要的因素, 防止冻土融化是保持多年冻土稳定的重要措施。但随季节产生的冻融变化是多年冻土区的一个普遍现象。何平^[3]、原喜忠^[4]等分别研究了室内和现场条件下土质因素及其它水热状况对融沉和融沉系数影响。杨成松^[5]研究了冻融循环与干容重和含水率的关系。

通过对青藏公路、东北多年冻土地区既有铁路和俄罗斯西伯利亚贝阿铁路路基主要的病害进行调查研

究表明^[6-8], 多年冻土地区路基病害主要由冻土土体在季节变化条件下的冻融循环造成的。对冻土融沉系数尤其是反复循环条件下的融沉系数研究将显得非常重要, 但这一方面的研究还很少。

因此, 本文针对青藏铁路典型工点土质条件, 通过室内试验探讨和研究了不同土质在不同含水率、密实度、荷载条件下, 反复冻融过程中的融沉特性。并探讨了循环融沉系数与融沉系数的关系及表达式, 为进一步深化对融沉特性的认识提供了参考。

1 试验研究内容及方法

为了了解青藏铁路典型工点土的冻融特性, 分别对青藏铁路沿线清水河、北麓河取地基土进行了室内试验。为了模拟多年冻土一年内冻融交替, 本次试验

基金项目: 铁道部科技开发计划资助项目 (2003G021-B); 重庆交通大学科研启动基金资助项目

收稿日期: 2005-08-29

冻胀、融沉试验结合在一起进行,即冻胀一天,融沉一天,再冻胀一天……,这样更能反应青藏高原多年冻土冷暖季节交替的情形。

在室内模拟试验分析中,考虑到冻胀破坏将破坏土的原状结构,同时考虑到原状土样的制作困难,故采用重塑土样冻结试验测试土的冻胀融沉特性。显然,试验结果与土体实际冻胀性的近似程度取决于试验对土体实际状态的模拟程度。因此,本次室内模拟试验考虑了如下几方面的模拟:

(1) 一维冻胀的模拟。将试验土样装在塑料瓶内。试样直径为11 cm,高度为12 cm,模拟2 m厚后的地基。由于土样向周围的冻胀受到塑料瓶壁的约束,主要发生向上的一维冻胀变形。但由于塑料的刚度较小,侧向允许有一定的变形。

(2) 压实度分别采用0.85, 0.9, 0.95来比较土体密实度对冻胀、融沉的影响。清水河、北麓河地基土的最大干密度分别为 1.85 g/cm^3 和 2.18 g/cm^3 。由此可得对应的干密度。

(3) 考虑相似关系,模拟了附加荷载。路基荷载相应于6.45 m高度的路堤(填筑密度为 2.18 g/cm^3),列车荷载相应于3.7 m高的换算土柱。(以下称地基荷载为自重,路基荷载为小荷载,路基荷载加列车荷载为大荷载)。

(4) 考虑到土体温度在 $-1 \sim -7^\circ\text{C}$ 范围内时,冻胀量约占最大冻胀量95%以上。按冬季和夏季的平均地温,冻融循环温度在 $-7^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 之间变化。

温控试验装置采用重庆试验设备厂生产的WS308-05低温恒温恒湿箱。冻胀筒采用塑料瓶,底部不规则截面部分,填以不冻胀的粗砂,上部截面直径为11 cm。用重型击实筒制作一定含水率、压实度的试样,然后平稳放入塑料筒中,再手工用同种土样塞紧缝隙。制备好的试样用塑料袋扎紧,以防冻融过程中,水分蒸发。为了模拟作用于地基土上的附加荷载,在试样上部放置铁块,以达到规定的荷载。

由于试验条件所限,只做封闭系统下的冻融试验。

观测方案:冻胀一天后,取出读数一次;融化一天,取出读数一次,再继续冻结。

2 冻融循环对土体融沉性的影响

2.1 冻融循环对土体性质的表现影响

土体在冻结过程中,由于水分迁移,使冻结锋面土体的含水率增大,加剧了冻结时的体积膨胀,增大了土体的孔隙体积。同时,在水结成冰体积膨胀的过程中,破坏了土颗粒的原状结构,土颗粒重新排列,见图1。当冻土融化后,土体孔隙中的水在土层表面汇集,向四周流失,孔隙体积增大,土体强度降低,

压缩性增大,见图2。这就是冻融土体发生较大沉降的主要原因。当土体冻结后,土样表面出现一些冰晶。在土体融化后,土样表面出现不同程度的积水。据此可以推测,在冻融过程中,由于水分向冻结锋面迁移,由初始阶段的含水率平均分布,发展到土样下部含水率减小,而上部含水率增大,见图1,2。

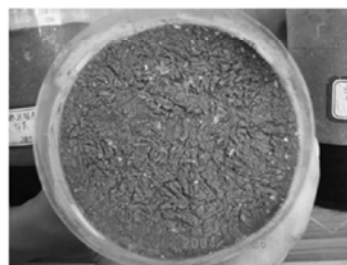


图1 冻结后土样

Fig. 1 Soils under freezing



图2 融化后土样

Fig. 2 Soils under thawing

在青藏铁路多年冻土地区,冻土上限以上的季节融化层及路基本体每年都要经历一次冻融循环,也就是说,每年这些土体都要经过一次结构破坏,再重新组合的过程。一年年地冻融循环,也就是土体结构反复破坏,而又反复组合的过程。这也引起了与路基或地基变形息息相关融沉性的变化,上部荷载的施加更促进了这种变化。

2.2 冻融循环土体融沉性的发展趋势

冻融过程是土体从不稳定态向动态稳定态的发展过程。反复冻融改变了原来土体的性状,使得土体向着新的动态稳定平衡状态发展。在有水分充分补给的条件下,反复冻融作用导致土体密度的变化、颗粒定向化。干密度大的土体经过反复冻融作用后,土颗粒凭自身的粘聚力抵抗沉降变形,使得冻土融化下沉量相对小于冻结过程中发生的冻胀量,密度降低,这种特性更明显地反映在非饱和土中。而对于干密度较小的土体,冻融的过程是土体的密实过程。冻融过程导致土体向密实方向发展,沉降量大于冻胀量。但无论如何,多次冻融循环后,土体达到稳定态,此时冻结过程产生的冻胀量与融化过程中沉降量相抵消,土体保持相对稳定的高度。试验结果与文献[5]所得多次冻融循环后土体干容重趋于某一定值的结论是一致的。

图 3 为清水河粘土在压实度为 0.9, 即干密度为 1.665 g/cm^3 , 含水率分别为 16.4%, 17.7%, 19%, 22% 时, 自重作用下的冻融变化。由图 3 可见, 这 4 个含水率土样, 随着冻融次数的增加, 均沉降变形均大于冻胀变形, 整体表现为沉降变形。含水率越大, 整体沉降变形越大。但当冻融循环超过 10 次后, 除 22% 含水率的融沉量还未收敛外, 其余已开始趋于稳定。

图 4 为北麓河粉质土粘在压实度为 0.9, 即干密度为 1.962 g/cm^3 , 含水率分别为 6.5%, 20.5% 时, 自重作用下的冻融变化。当含水率为 6.5%, 由于其值未达到冻胀起始含水率, 其冻胀、融沉变形并不明显。含水率为 20.5% 的土样从第 7 个冻融循环开始, 冻胀量与融沉量很小, 趋于稳定, 此时干密度为 2.02 g/cm^3 , 据此可以推测含水率超过起始冻胀含水率 ($0.84w_p = 0.84 \times 12.5\% = 10.5\%$) 的各含水率该种土样, 在多次冻融循环后, 都将达到这个干密度。

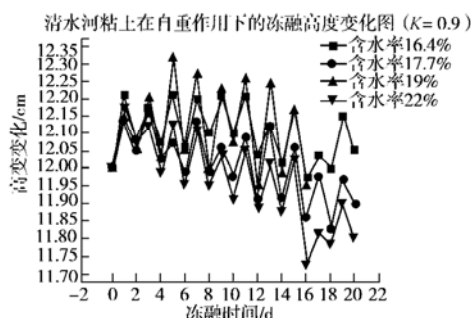


图 3 清水河粘土自重下冻融试样高度变化

Fig. 3 The variation of height of sample of Qingshuihe clay in frost heaving and thawing circulation under self-weight

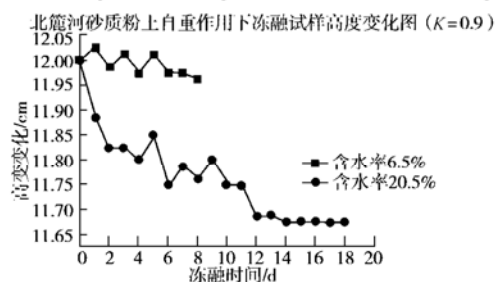


图 4 北麓河粉质粘土自重下冻融试样高度变化

Fig. 4 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under self-weight

2.3 有荷重冻融循环对融沉性的影响

虽然荷载可以抑制冻胀, 这是有利的一面, 但它同时能加大融沉。在有荷重反复冻融循环中, 往往以融沉为主, 融沉量随着含水率的增加而增加, 随着压实度的增大而减小。此外, 无论是在小荷载和大荷载作用下, 均整体表现为融沉, 并随着含水率的增大, 融沉量也增大。开始几次冻融循环融沉变形显著, 随着冻融次数的增加, 变化渐趋平缓。

图 5~6 就表现出了这种融沉性质, 同时也可看出含水率和荷载对冻融循环融沉量影响是很明显的。

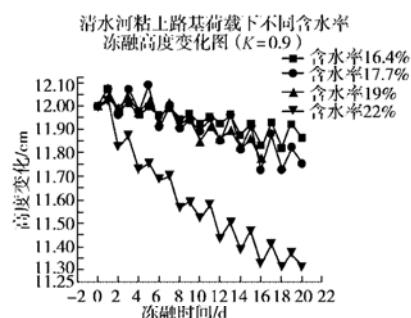


图 5 清水河粘土荷载下冻融试样高度变化

Fig. 5 The variation of height of sample of Qingshuihe clay in frost heaving and thawing circulation under load

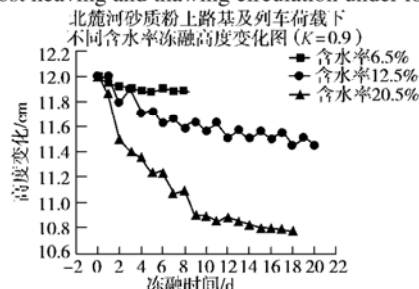


图 6 北麓河粉质粘土荷载下冻融试样高度变化

Fig. 6 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under load

3 冻融循环融沉变形的变化规律

3.1 不同影响因素下冻融循环融沉变形的试验结果

(1) 自重的影响

通过对青藏铁路典型试验段落土的大量多次冻融循环试验, 发现在自重条件下, 冻胀和融沉总变形在增加的同时也较好地满足指数递减, 见图 7, 8。

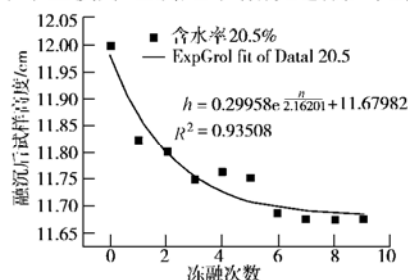


图 7 北麓河粉质粘土自重下试样高度的变化($K=0.9$)

Fig. 7 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under self-weight($K=0.9$)

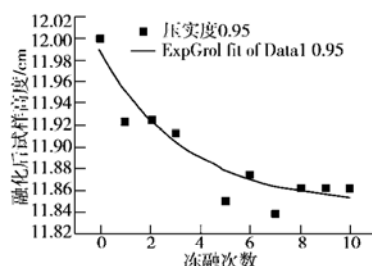


图 8 北麓河粉质粘土自重试样高度的变化(含水率 16.5%)

Fig. 8 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under self-weight($w=16.5\%$)

(2) 荷载的影响

从图 9~11 北麓河粉质粘土和清水河粘土不同荷载作用下, 冻融循环后试样高度与冻融次数的关系可见, 同样含水率下, 随着荷载的增加, 融沉变形越显著。但随着冻融循环次数的增加, 融沉总变形呈指数递减趋势。通过指数回归, 可得 h 、 n 的关系式。

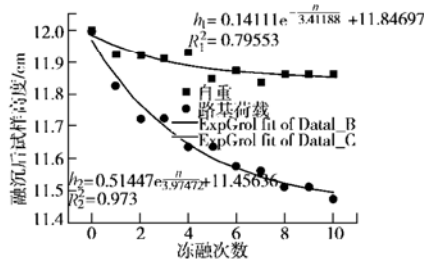


图 9 北麓河粉质粘土不同荷载下试样高度的变化 ($w = 16.5\%$)

Fig. 9 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under different loads ($w = 16.5\%$)

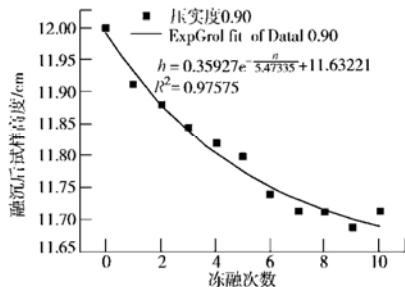


图 10 小荷载下清水河粘土试样高度的变化 ($w = 16.4\%$)

Fig. 10 The variation of height of sample of Qingshuihe clay in frost heaving and thawing circulation under small loads ($w = 16.4\%$)

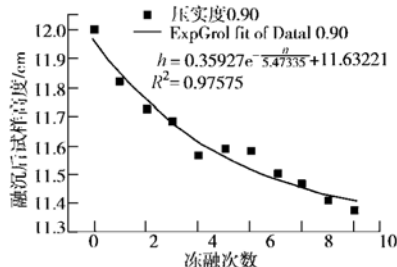


图 11 大荷载下清水河粘土试样高度的变化 ($w = 22\%$)

Fig. 11 The variation of height of sample of Qingshuihe clay in frost heaving and thawing circulation under large loads ($w = 22\%$)

(3) 含水率的影响

从图 12 北麓河粉质粘土在路基荷载 (小荷载) 作

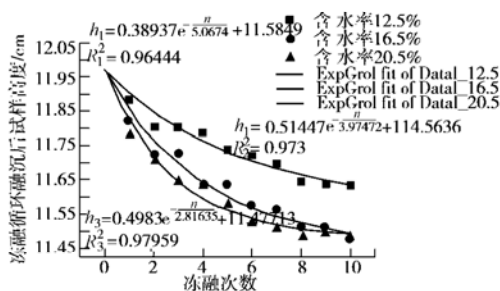


图 12 小荷载和不同含水率下北麓河粉质粘土试样高度的变化

Fig. 12 The variation of height of Beiluhe sample in freezing and thawing circulation with different w water content under small load

用下 (压实度 0.95) 冻融循环融沉后试样高度变化可以看出, 随着含水率的增大, 融沉总变形增大。但总融沉量随冻融次数增加的同时呈指数递减趋势关系。

(4) 土体密度的影响

图 13, 14 给出了不同压实度和含水率为 12.5% 的条件下, 北麓河粉质粘土冻融循环后的试样高度与冻融次数关系。由图可见: 无论是自重作用下, 还是荷载作用下, 随压实度的增加, 融沉总变形减小, 同时随循环次数的增加呈指数减小趋势。这也说明了在路基施工中, 保证路基较高的密实度的重要性。密实度较高的路基, 一方面可减小自身压密变形, 另一方面可以降低其融沉变形, 从而达到减小路基变形的目的。

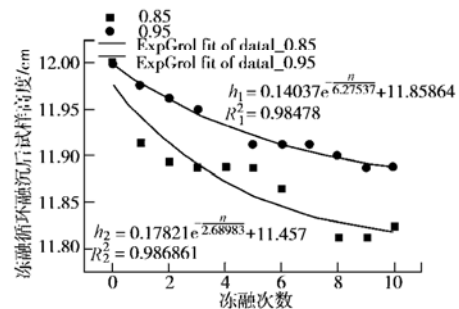


图 13 自重下北麓河粉质粘土试样高度的变化

Fig. 13 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under self-weight

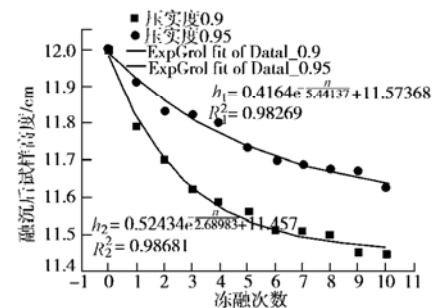


图 14 较大荷载下北麓河粉质粘土试样高度的变化

Fig. 14 The variation of height of sample of Beiluhe silty clay in frost heaving and thawing circulation under large load

此外, 土质对多年冻土的冻胀、融沉特性也有较大影响^[9-10]。

3.2 冻融循环条件下的融沉系数回归研究

综合前述分析可知, 冻胀及融沉总变形大小受到土质、土体密度、含水率、荷载等因素的影响。但无论是从数学的角度看还是从工程实践看, 都可以发现, 经过多次冻融循环后, 随着 n 的增大, h 会最终达到一个稳定的值, 即随着循环次数的增加, 冻融总变形在增加的同时呈指数递减趋势。如 n 次冻融循环后, 融沉 (冻胀) 后试样高度可按指数方式回归为

$$h_n = ae^{-\frac{n}{b}} + h_\infty \quad (1)$$

式中 a 、 b 为分别为回归参数, 见图中的回归系数; h_∞ 为多次冻融循环稳定后的试样高度。

由上式可知, 当 n 不断增大时, h_n 将趋向于 h_∞ 。

对于融沉而言, 前述回归是用经 n 次冻融循环融沉后试样高度进行的, 但在工程实践中, 这一高度和循环次数有关, 但不便于直观的表达融沉变化情况。为了预测冻融循环条件下的融沉变化情况, 这里引进土体的融沉系数 A_0 (很容易从实验室得到) 和循环次数 n 的关系。如果用 A_n 代表 n 次冻融循环后的稳定融化下沉量与土体冻融前的高度 (或称解冻土体高度或稳定融化深度) 之比或称冻融循环融沉系数, 则这一循环融沉系数与冻融循环次数的关系可表达为

$$A_n = \frac{h_0 - h_n}{h_0} \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 中, 可得

$$A_n = A_0 \left(\frac{A_\infty}{A_0} - \frac{a}{A_0 h_0} e^{-\frac{n}{b}} \right) \quad (3)$$

式中 A_∞ 为土样多次冻融循环稳定后的融沉系数; 其余参数意义同上。

由于很难得到最终稳定的融沉系数, 因此, 可以用多次冻融循环基本稳定的融沉系数替代最终稳定的融沉系数, 比如本文可选用第 10 次时的融沉系数 A_{10} 。这样就可以得到任意一次冻融循环后的融沉系数。循环融沉系数还可表达为以下方程式

$$A_n = A_0 \left(1 + \frac{A}{h_0} e^{-\frac{n}{B}} \right) \quad (4)$$

式中 A 、 B 分别为回归参数; 其余参数意义同上。

相应于冻融循环条件下的冻胀问题, 也应该有类似的解决思路。

4 结 论

(1) 不论是大于密度还是小于密度土体, 经过反复多次的冻融过程, 最终融沉量将和冻胀量持平, 达到新的动态平衡状态, 土体密度将趋于某一定值。

(2) 无论是在自重作用下, 还是在荷载作用下, 随着压实度的增加, 融沉总变形呈指数减小趋势。这也说明了在路基施工中, 保证路基较高的密实度的重要性。密实度较高的路基, 一方面可以减小自身压密变形, 另一方面可以降低其融沉变形, 从而达到减小路基变形的目的。

(3) 虽然荷载可以抑制冻胀, 这是有利的一面, 但它同时能加大融沉。随着荷载的增加, 融沉总变形随冻融次数增加的同时呈指数递减趋势的关系。

(4) 冻融循环中, 随着含水率的增大, 融沉总变形随冻融次数增加的同时呈指数递减趋势。但无论影响土体冻融沉降的因素如何变化, 随循环次数的增加, 融沉 (冻胀) 总变形在增加的同时呈指数递减趋势。

上述结论是相应于青藏线典型土质条件得到的试验结论, 现场测试和模型试验将是进一步的研究工作。

参考文献:

- [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, 1973. (Цытович H A. Frozen earth mechanics[M]. ZHANG Chang-qing, ZHU Yuan-ling, translators. Beijing: Science Press, 1973.)
- [2] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin, QIU Guo-qing, et al. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000.)
- [3] 何 平, 程国栋, 朱元林. 冻土融沉系数评价方法[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 608 - 613. (HE Ping, CHENG Guo-dong, ZHU Yuan-ling. The evaluation of thawing-settlement coefficient of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(6): 608 - 613.)
- [4] 原喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地地区路基沉降研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 155 - 158. (YUAN Xi-zhong. Study on thaw settlement of subgrade in permafrost regions in the northern part of Great Xing'an Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2): 155 - 158.)
- [5] 杨成松, 何 平, 等. 冻融作用对土体干容重和含水率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2695 - 2699. (YANG Cheng-song, HE Ping. 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.)
- [6] 臧恩穆, 吴紫汪. 多年冻土退化与道路工程[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1999. (ZANG En'mu, WU Zi-wang. Permafrost degeneration and road engineering[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1999.)
- [7] 铁道部第三勘测设计研究院. 冻土工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994. (The Third Railway Survey & Design Institute. Permafrost engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.)
- [8] 俄罗斯多年冻土区铁路建设考察报告[R]. 铁道部科技司考察报告, 2002. (Science & Technology Office of Railway Ministry. Investigation report about railway construction in Russian permafrost[R]. 2002.)
- [9] 张贵生. 青藏铁路多年冻土路基变形特性及整治措施研[D]. 甘肃: 兰州交通大学, 2005. (ZHANG Gui-sheng. A Study about the settlement properties and measurement of subgrade in permafrost Region along Qinghai-Tibetan Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2005.)
- [10] 刘德仁. 考虑气温变化和冻土蠕变的青藏铁路路基沉降计算与分析[D]. 甘肃: 兰州交通大学, 2005. (LIU De-ren. The calculation and analysis for the settlement of roadbed in Qinghai-Tibet Railway considering influence of warming climate and permafrost creep [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2005.)