

DOI: 10.11779/CJGE201404005

多次冻融条件下土体的融沉性质研究

王天亮^{1, 2}, 卜建清^{1, 2*}, 王 扬³, 徐 磊^{1, 2}, 严 晗⁴

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学科技处, 河北 石家庄 050043; 4. 中铁建工集团西北分公司, 陕西 西安 710119)

摘 要: 以青藏铁路那曲物流中心站场路基填料为研究对象, 通过室内试验深入研究和分析了压实度、荷载以及冻融次数对土体融沉性质的影响规律。研究表明: 第 1 次冻融过程中压实度大的试样的冻胀融沉量小, 而经历多次冻融后压实度大的试样的冻胀融沉量则变大; 多次冻融后较大压实度的试样表现为隆起变形, 而较小压实度的试样则表现为压密变形, 即不同压实度试样在经历多次冻融后压实度趋于某一定值; 存在一临界压实度值, 该值下多次冻融后试样高度不发生变化; 荷载的压密作用在抑制冻胀变形的同时也加剧了试样的融沉变形, 总体变形量随荷载的施加和增大而增大; 补水条件下多次冻融后试样的含水率远远大于初始含水率, 因此应做好防排水措施; 外界水源补给量随冻融次数的增加而减小, 并在经历 3 次冻融后达到稳定, 且冻结过程中的补水量远远大于融化过程中的补水量; 融沉系数随冻融次数的增加先增大而后减小并在经历 5 次冻融后趋于稳定, 因此可将 5 次冻融后的融沉系数作为评价土体融沉性质的指标。

关键词: 深季节冻土; 单向冻结; 开敞系统; 反复冻胀融沉; 融沉系数

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2014)04 - 0625 - 08

作者简介: 王天亮(1981 -), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事冻土力学、路基工程及基坑工程等方面的研究与教学工作。E-mail: wangtl@stdu.edu.cn。

Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles

WANG Tian-liang^{1, 2}, BU Jian-qing^{1, 2}, WANG Yang³, XU Lei^{1, 2}, YAN Han⁴

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University 050043, China; 3. Science and Technology Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. Northwest Corporation, China Railway Construction Engineering Group, Xi'an 710119, China)

Abstract: For the subgrade fillings of Naqu Logistics Center station along Qinghai-Tibet Railway, the influencing rules of compactness, load and freeze-thaw cycles on the thaw subsidence properties are deeply analyzed in laboratory tests. The results show that: compared with that of the 1st freeze-thaw cycle, the frost heave and thaw subsidence deformation of the sample with higher compactness changes from small to large after several freeze-thaw cycles. The samples with higher compactness exhibit heave deformation, while those with lower compactness present compaction after repeated freeze-thaw cycles, namely, the samples with different compactnesses tend to a certain compactness. Meanwhile, there is a critical compactness, with which the height of the samples does not change after repeated freeze-thaw cycles. The compactness effect of load restrains the frost heave deformation and increases the thaw subsidence deformation, and the total deformation increases with the increasing increment of load. The moisture content of the samples is more greater than the initial moisture content after repeated freeze-thaw cycles. The amount of water supply decreases with the increasing increment of freeze-thaw cycles and then becomes steady after 3 freeze-thaw cycles, and the amount of water supply in freezing process is larger than that in thawing process. The thaw subsidence ratio increases first and then decreases to be steady after 5 freeze-thaw cycles with the increasing increment of freeze-thaw cycles, and the thaw subsidence ratio of the 5th freeze-thaw cycle is recommended for assessing the thaw subsidence of soils.

Key words: deep seasonal frost soil; unidirectional freezing; open system; repeated freeze-thaw; thaw subsidence ratio

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB026104); 国家自然科学基金项目(51208320); 河北省自然科学基金项目(E2013210040)

收稿日期: 2013 - 08 - 20

*通讯作者

0 引言

青藏铁路那曲物流中心地处海拔 4500 m 的青藏高原,占地面积达 7500 亩,土壤最大冻结深度为 281 cm,分布有大量粉砂土和粉质黏土,具有强—特强冻胀性。通过病害调查和分析,发现道路路面开裂、路基沉陷、房屋墙体裂缝等由冻胀、融沉所引起的病害频发且普遍存在。国内外大量的工程实践和已有的研究成果^[1-2]也表明多次冻胀、融沉作用是造成冻土区工程构筑物病害频发的主要原因。因此,研究土体的反复冻胀、融沉过程,尤其是对冻土冻胀、融沉特性具有重要意义的融沉系数对深季节冻土区冻害防控具有重要的工程实际意义。

从 20 世纪 60 年代毛细水冻胀理论被提出开始,研究者在冻胀、融沉机理及防控措施方面进行了大量的研究和探索,取得了一定的成果。通过室内试验和理论分析,Morgenstern 等^[3]和 Shoop 等^[4]分别提出了各自的融沉计算模型,并取得了较好的应用效果;Klinova 等^[5]通过室内试验研究了融沉性质与含水率、压实度等因素的相互关系;Tanaka Toshiya 等^[6]通过室内大比例模型试验,研究了土体的融沉特性,在模型试验方面,国内学者陈湘生等^[7]也进行了相关研究;为对比不同地区土体的融沉性质,国内学者程国栋^[8]提出了冻胀指数和融沉指数的概念;田亚护等^[9]、彭丽云等^[10]等分别研究了循环荷载作用下土体的冻胀、融沉变形特性。然而,上述融沉性质的研究均是 1 次冻融,针对多次冻融的研究大多着重在水分、盐分迁移规律方面^[11-14],就多次冻融条件下土体的冻胀、融沉变形性质的研究则较少^[15-17],且部分研究仍局限于三向冻结、封闭系统下的冻融^[17],并不能很好地模拟现场环境下土体的冻融模式。

综上所述,土体的融沉性质尤其是多次冻融条件下土体的融沉性质是评价深季节性冻土区土工构筑物耐久性以及深化冻害防控的重要因素。为此,通过研究多次冻融条件下土体的冻胀、融沉过程和水分迁移规律,深入分析了融沉系数与压实度、荷载、冻融次数的相互关系,为进一步深化对土体融沉性质的认识提供了参考。

1 试验内容及方法

1.1 试样制备及试验方案

(1) 土样的物理性质:土样取自那曲物流中心站场路基填料,为粉质砂土。该土样颗粒大小分布曲线如图 1 所示,小于 0.075 mm 的颗粒含量占 28.4%,属

于冻胀敏感性土质。颗粒比重为 2.70,渗透系数为 5.87×10^{-6} cm/s,最大干密度为 1.89 g/cm³,最优含水率为 11.2%,含盐量为 0.15% (测试的离子主要包括 SO₄²⁻、CO₃、Na⁺、K⁺),冻结温度为-1.03℃。

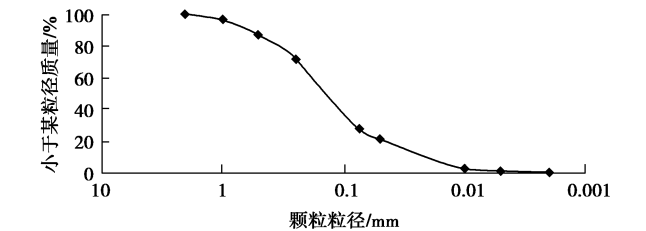


图 1 土样颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Curve of grain size distribution

(2) 试样制备及试验方案:结合现场土体内部温度实测结果,并考虑试样数量,试验仅进行冻融温度在-3.5℃~5℃之间变化的多次冻融试验。试样制备时,将土样按照试验方案(如表 1 所列)的含水率要求加蒸馏水拌匀浸润一昼夜,以保证土样的含水率均匀一致;试验方案的含水率为现场测试所得的含水率,即现场土体含水率高于土体最优含水率;同时,为保证试验精度,每组试验均进行平行试验。所制备试样的高度 $H=10$ cm,直径 $D=10$ cm,于试样筒中分 5 层进行击实,为防止试验过程中水分损失,在试样的顶端放置一层塑料薄膜。

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of test schemes

试样编号	荷载 /kPa	含水率 /%	压实度/%	温度/℃
H0W15D1	0	15.0	90	-3.5/+5
H0W15D2	0	15.0	93	-3.5/+5
H0W15D3	0	15.0	95	-3.5/+5
H1W15D2	5.0	15.0	93	-3.5/+5
H2W15D2	7.5	15.0	93	-3.5/+5
H3W15D2	15.0	15.0	93	-3.5/+5

1.2 试验过程设计

试验在冻胀、融沉试验系统中完成,该系统由试样筒、上下冷浴盘、低温恒温冷浴、保温棉、马氏补水瓶、温度和位移传感器及数据采集终端组成,如图 2 所示。试验过程中,试样筒的侧向约束和上下冷浴盘的单向降温模拟一维冻胀、融沉过程,马氏补水瓶模拟地下水的补给,即开敞系统下的冻胀、融沉试验。同时,采用温度、位移传感器和数据采集系统自动实时地采集试样内部温度以及表面沉降变形。

为了更好地模拟深季节冻土地区一年内冻融交替变化,多次冻胀、融沉试验过程为冻胀 14 h,融沉 12 h,再冻胀 12 h……,共进行 7 次冻融。试样的第一次

冻胀分两个步骤, 即恒温过程和冻结过程。恒温过程中, 将连接上、下冷浴盘的低温恒温冷浴调至+1℃进行恒温, 恒温时间为 14 h。待试样内部整体温度均达到+1℃时, 调节连接上冷浴盘的低温恒温冷浴至-3.5℃, 开始试样的冻结过程, 冻结时间为 14 h。第一次冻胀结束后, 开始融沉过程(调节连接上冷浴盘的低温恒温冷浴至 5℃), 再冻胀、融沉……。试验结束后, 立即拆样, 并测量试样不同高度的含水率。

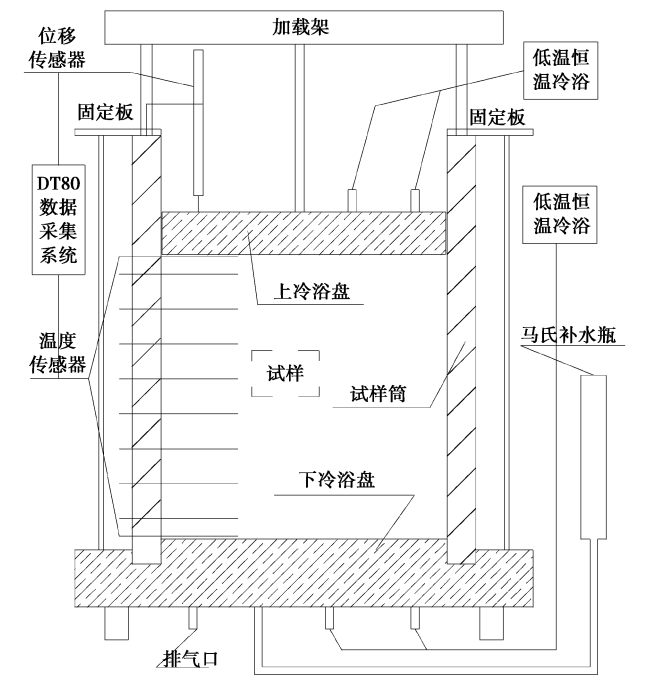
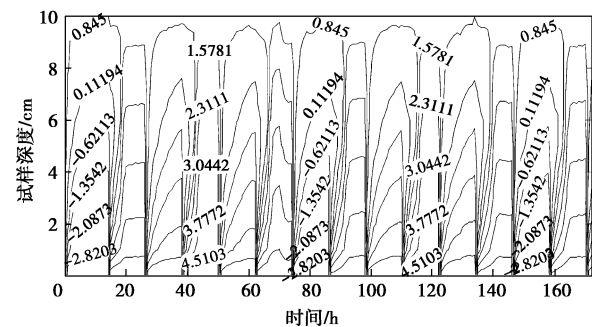


图 2 冻胀、融沉试验装置

Fig. 2 Test device for frost heave and thaw settlement

2 温度变化过程分析

图 3 为多次冻融过程中试样 H0W15D2 内部温度随时间变化的等值线图, 其中纵轴 0 cm 处为试样的冷端(试样顶端, 温度范围为-3.5℃~+5℃), 10 cm 处为试样的暖端(试样底端, 温度为+1℃)。由图 3 可知, 在 7 次冻融过程中(170 h), 每次冻融试样内部温度分布基本相同(见图 3 (a)); 冻结过程中, 以冻结温度-1.03℃为分界线(图 3 (b) 中的虚线), 试样可分为冻土段和未冻土段, 且温度随时间的变化过程大致可分为快速降温阶段(持续 1.5 h)、过渡阶段(持续 8 h)和温度稳定阶段(10 h 以后); 当冻结过程结束后即进入融化阶段(见图 3 (c)), 其温度随时间的变化过程与冻结过程相似, 也可分为快速升温阶段(持续 2 h)、过渡阶段(持续 4 h)和温度稳定阶段(6 h 以后), 并且在快速升温阶段, 试样中间部分为负温, 即有冻土核的存在, 这是一维冻结条件下中间土体来不及融化所导致的。



自重作用下, 压实度较大试样 (见图 4 中的试样 H0W15D2 和 H0W15D3) 每次冻融过程中的冻胀量始终大于融沉量, 多次冻融后试样体积 (高度) 增大, 向松散状态发展并最终表现为隆起变形; 而压实度较小试样 (见图 4 中的试样 H0W15D1) 经历多次冻融后体积 (高度) 减小, 向密实状态发展并最终表现为压密变形。即多次冻融后不同初始压实度试样的压实度将趋于某一定值^[17-18]。

冻胀、融沉过程中, 荷载有效地抑制了土体的冻胀变形, 然而却加剧了土体的融沉变形^[9-10, 17]。相比于自重作用下试样的高度变化 (见图 5 中试样 H0W15D2), 荷载作用下, 多次冻融后试样体积 (高度) 减小, 向密实状态发展并最终表现为压密变形, 且荷载越大压缩量越大 (见图 5)。

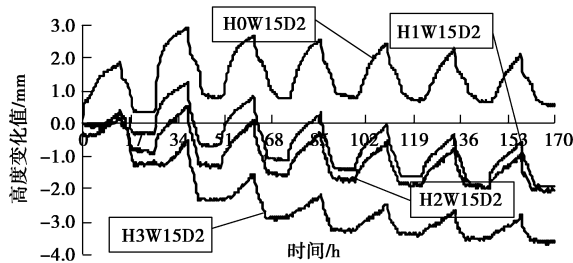


图 5 不同荷载下试样高度变化过程

Fig. 5 Variation of sample height under different loads

3.2 冻胀、融沉过程分步骤分析

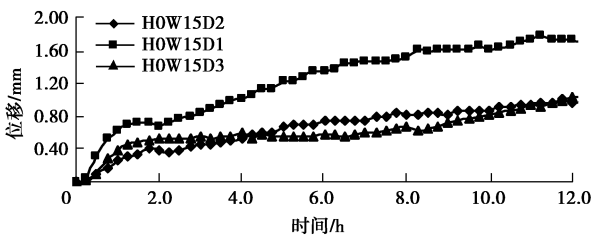
以上所述从整体上更直观地分析了多次冻融后试样高度的变化趋势。然而, 具体到每一次冻胀或融沉, 压实度、荷载对其影响规律则无法分析。为此, 对 7 次冻胀和融沉过程进行了解析和初始化处理, 且限于篇幅, 仅列出第 1, 3, 7 次冻胀和融沉变化过程。

(1) 压实度的影响

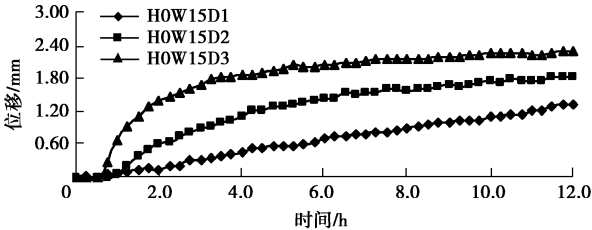
自重作用下, 第一次冻胀过程中试样 H0W15D1 的冻胀量是试样 H0W15D2 和 H0W15D3 的两倍 (见图 6 (a)), 随着冻融次数的增加, 冻胀量随压实度的增加则呈现增大的趋势 (见图 6 (b)), 并逐渐趋于一致 (见图 6 (c)), 这是由于压实度较大的试样经历多次冻融后变得疏松, 而压实度较小的试样则变得密实, 使得几次冻融后压实度较大的试样的冻胀量大于压实度较小试样的冻胀量, 并在经历多次冻融后冻胀量逐渐趋于一致; 而在融沉过程中, 随着冻融次数的增加, 融沉量的变化规律与冻胀量的变化规律基本一致 (见图 7)。

同时, 各次冻胀过程均可划分为冰晶形成 (持续 1 h, 未产生冻胀变形)、变形增长 (持续 6 h) 和变形稳定 (7 h 以后) 3 个阶段 (见图 6); 而各次融沉过程则均可划分为短暂下沉 (持续 0.5 h)、相对稳定 (持续 1.5 h, 冻土核的存在导致下沉缓慢)、压密下沉 (持

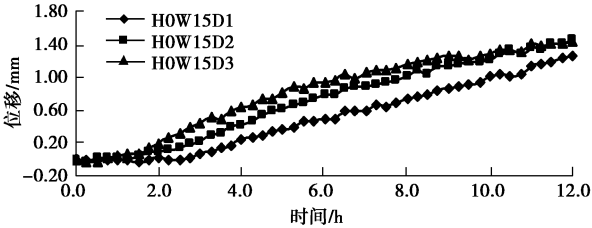
续 4 h) 和变形稳定 (6 h 以后) 4 个阶段 (见图 7)。



(a) 第1次冻胀



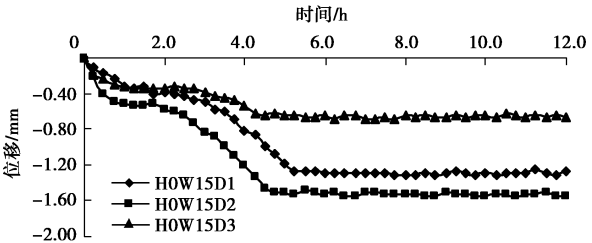
(b) 第3次冻胀



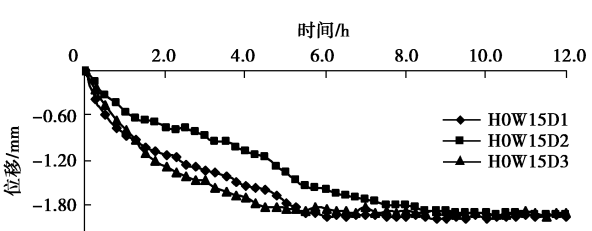
(c) 第7次冻胀

图 6 不同压实度下冻胀量随时间的变化过程

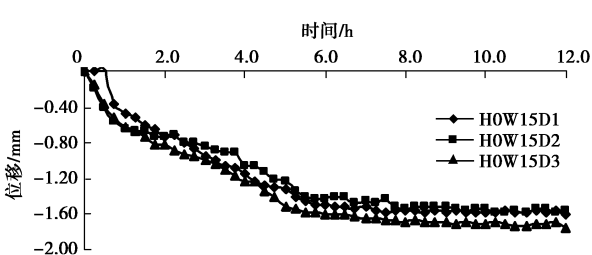
Fig. 6 Variation of frost heaving amount with time under different compactnesses



(a) 第1次融沉



(b) 第3次融沉



(c) 第7次融沉

图 7 不同压实度下融沉量随时间的变化过程

Fig. 7 Variation of thawing subsidence with time under different compactnesses

(2) 荷载的影响

荷载作用下试样的冻胀或融沉变形过程与自重作用下的变形过程相似, 各次冻胀过程也可划分为冰晶形成阶段、变形增长阶段和变形稳定阶段 (见图 8); 而各次融沉过程则划分为短暂下沉阶段、相对稳定阶段和压密下沉阶段 (见图 9)。

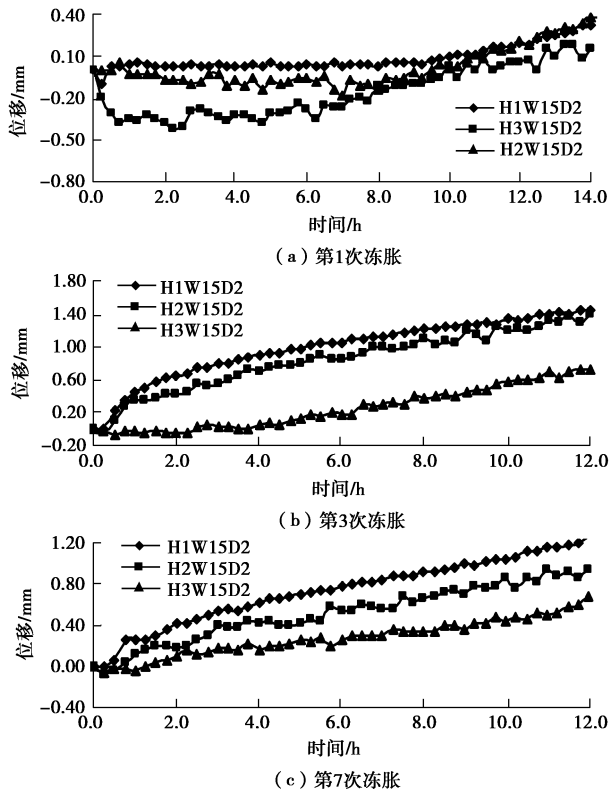


图 8 不同荷载下冻胀量随时间的变化过程

Fig. 8 Variation of frost heaving amount with time under different loads

此外, 荷载作用下的第一次冻胀过程明显区别于自重作用下的冻胀变形发展过程, 这主要是由于冻胀力与顶端荷载相互抵消, 使得试样 H1W15D2 无冻胀变形, 而施加较大荷载的试样 (H2W15D2 和 H3W15D2) 则产生了明显的压密下沉 (见图 8 (a)); 而随着冻结时间的持续增长, 外界水源不断向上迁移并结晶成冰, 各试样逐渐产生了较明显的冻胀变形。随着冻融次数的增加以及外界水源的不断补给, 各个试样均产生了冻胀变形, 但由于荷载的抑制作用, 冻胀变形随荷载的增加而减小 (见图 8 (b)、(c)); 第一次融沉过程中, 较大荷载产生了较大的融沉变形 (见图 9 (a)), 而随着冻融次数的增加, 各次的融沉变形则随着荷载的增大而呈现减小的趋势 (见图 9 (b)、(c)), 这与多次冻融后荷载越大土体的总体变形也越大并不矛盾 (见图 5), 这是由于荷载越大压密变形越大, 土骨架的有效应力也越大, 多次冻融后土体的可压缩量则越小。

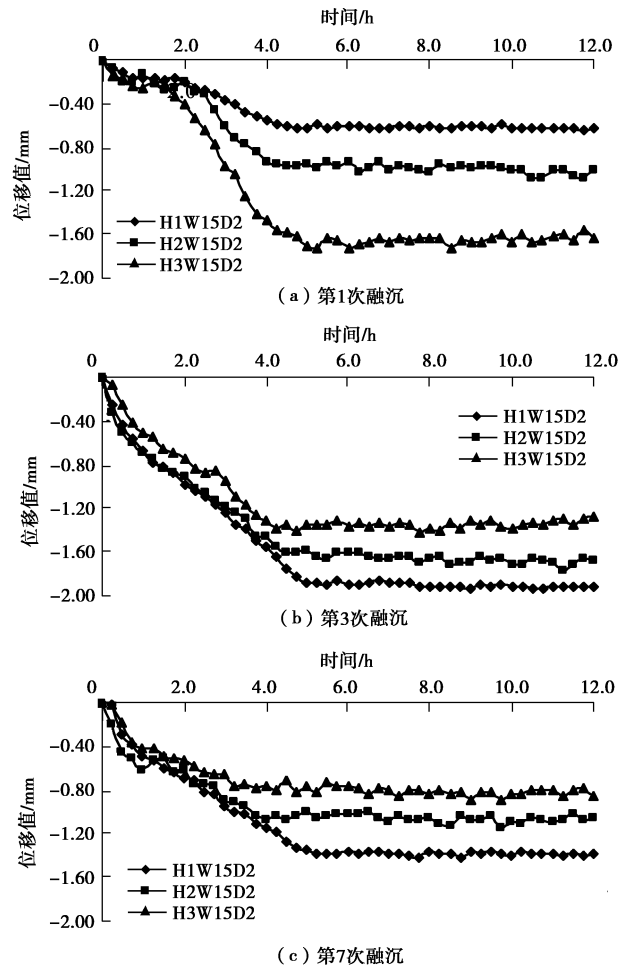


图 9 不同荷载下融沉量随时间的变化过程

Fig. 9 Variation of thawing subsidence with time under different loads

4 水分迁移规律分析

水分迁移作用是导致土体冻胀的主要根源^[12-13], 由于外界水源的补给作用, 多次冻融后试样的含水率明显高于初始含水率 15%, 且试样内部含水率发生了明显的重分布 (见图 10); 多次冻融后含水率的增幅随压实度和荷载的增大而减小, 且荷载作用下含水率的增幅明显小于自重作用 (见图 10 (b)), 这说明荷载的压密作用有效地抑制了外界水源的补给。

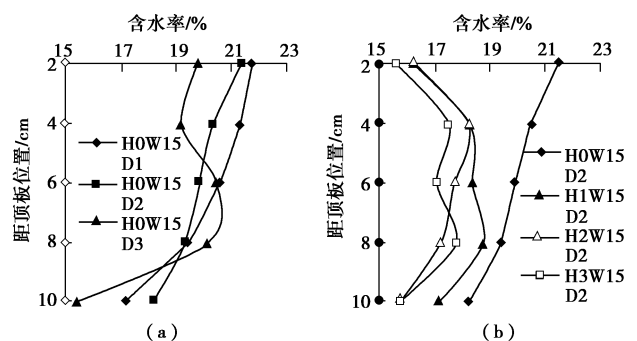


图 10 不同压实度和荷载条件下试样内部含水率分布

Fig. 10 Water distribution under different compactnesses and loads

通过将各次冻胀、融沉过程中的补水量进行分析整理,得到补水量随冻融次数的变化关系,如图 11 和图 12 所示。由图可知,各试样的补水量随冻融次数的增加而减少,并在经历 3 次冻融后达到稳定状态;同时,最大补水量值均出现在第 1 次冻融过程中,且冻胀过程中的最大补水量是融沉过程的 3 倍左右,由此可见负温下的温度梯度所产生的吸力远远大于正温下的温度梯度所产生的吸力。

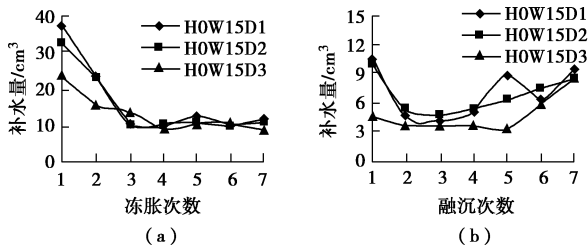


图 11 不同压实度下补水量与冻融次数的关系

Fig. 11 Relationship between amount of moisture migration and freeze-thaw cycles

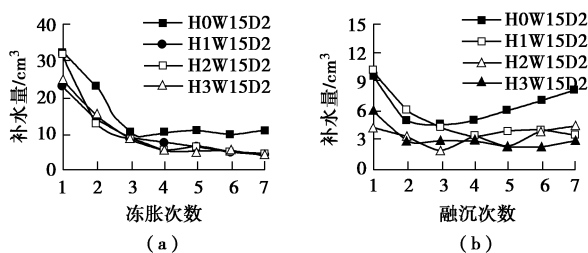


图 12 不同荷载下补水量与冻融次数的关系

Fig. 12 Relationship between amount of moisture migration and freeze-thaw cycles

5 融沉性质影响因素分析

5.1 融沉系数影响分析

冻胀量、融沉量是土体冻胀、融沉变形的基本特征值,但为了比较不同地区土的融沉特性,本文引用融沉系数(δ)分析各影响因素对土体融沉特性的影响规律。其中,融沉系数为一定时间内土样融化下沉量与试样初始高度的比值,即

$$\delta = \frac{\Delta h_0}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

式中 δ 为融沉系数(%); Δh_0 为试样融化下沉量(mm); h_0 为试样初始高度或上次冻融结束后试样高度(mm)。

由式(1),可得到各次冻融后试样的融沉系数,如图 13 所示。由图 13 可知,各试样的融沉系数均随

冻融次数的增加先增大而后减小,并在经历 5 次冻融后达到稳定,且最大融沉系数均出现在第 2 次冻融过程中。同时,在经历 2 次冻融后,随着压实度和顶端荷载的增大,各次融沉系数均逐渐降低。

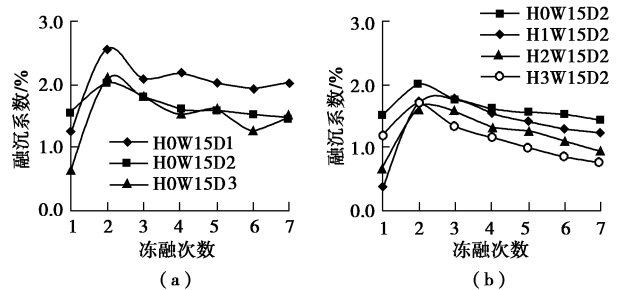


图 13 融沉系数与冻融次数的关系

Fig. 13 Relationship between thawing subsidence ratio and freeze-thaw cycles

5.2 总体变形量影响分析

图 14 给出了 7 次冻融后总体变形量与荷载的关系曲线。由图可知,在顶端荷载为 0 kPa 时(即自重作用下),经历多次冻融后土体表现为隆起变形(变形量为正值),而随着荷载的施加和增大,变形量呈现先增大(负值增大)而后平稳的趋势,这与融沉系数(经历 2 次冻融后的,见前文 5.1 节)随荷载的增加而降低的趋势并不矛盾。这是由于在反复冻融试验的融化过程中,较大顶端荷载的压密作用产生较大的融沉变形,然而随着冻融次数的增加,这种压密作用使得土体越来越密实,土体骨架作用使土体不易被压密。

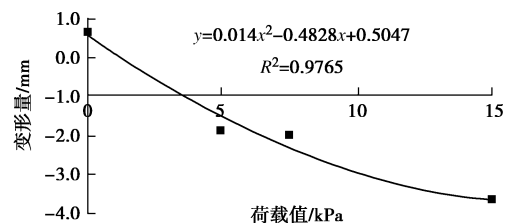


图 14 总体变形量与荷载的关系(正值为冻胀、负值为压密)

Fig. 14 Relationship between total deformation and load

图 15 给出了 7 次冻融后总体变形量与压实度的关系曲线。总变形量随压实度的增加从负值逐渐增加达到正值,最后趋于平稳呈现二次曲线关系;也就是说,随着初始压实度的增加,经历 7 次冻融后土体从压密变形(融沉)逐渐表现为隆起变形(冻胀),即经历多次冻融后不同初始压实度试样的压实度逐渐趋于某一定值;从图中还可以看出,当初始压实度为 92.5% 时,土体的变形量为零,当试样的初始压实度大于该压实度(92.5%) 时,试样发生隆起变形(冻胀),反之则

发生压密变形(融沉),这说明存在一个临界压实度,当试样的初始压实度等于该临界压实度时,经历多次冻融后,试样的高度不发生变化。

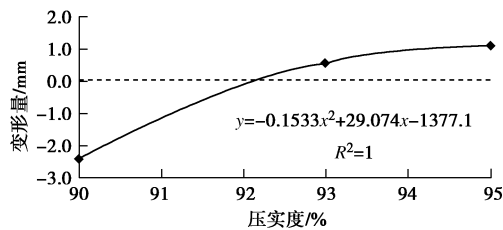


图15 总体变形量与压实度的关系(正值为冻胀、负值为压密)

Fig. 15 Relationship between total deformation and dry density

6 结 论

(1) 在外界水源补给的前提下,5次冻融后试样的融沉系数达到稳定,因此可将5次冻融后的融沉系数作为评价土体融沉性质的指标,也说明7次冻融足以反应土体的反复冻胀、融沉特性。

(2) 由于外界水源的补给作用,多次冻融后试样含水率均大于初始含水率,且荷载作用下含水率增幅小于自重作用;补水量随冻融次数的增加而减少,并在经历3次冻融后趋于稳定,且冻胀过程的最大补水量是融沉过程的3倍左右。

(3) 荷载的压密作用使得冻胀变形的产生滞后于自重作用,且随荷载的增大总体变形量先增大而后趋于稳定;同时,荷载在抑制冻胀的同时也加剧了融沉变形。

(4) 多次冻融后不同初始压实度试样的压实度逐渐趋于某一定值;总体变形量随压实度的增加先降低而后稳定,且存在一临界压实度值,该值下经历多次冻融后试样高度不发生变化。

参考文献:

- [1] 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. (in Chinese))
- [2] 中国铁路考察团. 俄罗斯多年冻土区铁路建设考察报告[R]. 北京: 铁道部科技司, 2002. (The Delegation of China Railway. Investigation report about railway construction in Russian permafrost[R]. Beijing: Science & Technology Office of Railway Ministry, 2002. (in Chinese))
- [3] MORGENSTERN N R, NIXON J F. One dimension consolidation of thawing soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971, 8(4): 558 - 565.
- [4] 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.
- [5] KLINOVA G, AKSENOV V, DZHAKHANGIROVA N. Thaw-induced deformation properties of frozen soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010, 47(3): 102 - 107.
- [6] TANAKA T, HAUNG S, FUKUDA M, et al. A study on cold region pipeline design based on full-scaled field experiment[C]//7th International Pipeline Conference, IPC, ASME, US, 2009, 4: 211 - 219.
- [7] 陈湘生, 濮家骝, 罗小刚, 等. 土壤冻胀离心模拟试验[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 615 - 619. (CHEN Xiang-sheng, PU Jia-liu, LUO Xiao-gang, et al. Centrifuge modeling tests of soil freezing heave[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 615 - 619. (in Chinese))
- [8] CHENG G D, TONG B L, LUO X B. The influence of embankment materials on the permafrost table[C]//Permafrost Papers on Permafrost Studies of Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1983: 195 - 203.
- [9] 田亚护, 刘建坤, 彭丽云. 动、静荷载作用下细粒土的冻胀特性实验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1882 - 1888. (TIAN Ya-hu, LIU Jian-kun, PENG Li-yun. Experimental study on frost action of fine-grained soils under dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1882 - 1888. (in Chinese))
- [10] 彭丽云, 刘建坤. 正融粉质黏土在循环荷载作用下的变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 567 - 572. (PENG Li-yun, LIU Jian-kun. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 567 - 572. (in Chinese))
- [11] CHEN X F, WANG L L, MA W, et al. Experimental study on soil water movement and frost heave during freezing process[C]//Recent Development of Research on Permafrost Engineering and Cold Region Environment. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2009: 619 - 629.
- [12] 包卫星, 谢永利, 杨晓华. 天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 380 - 385. (BAO Wei-xing, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. A laboratory test study on water and salt migration in natural saline soils and associated shear strength changes under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Engineering

- Geology, 2006, **14**(3): 380 - 385. (in Chinese))
- [13] 郑琦宏, 张殿发, 宣 亮. 冻融条件下封闭体系中土壤水分运移规律模拟研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2006, **19**(1): 81 - 84. (ZHENG Qi-hong, ZHANG Dian-fa, XUAN Liang. Research on mechanism of soil moisture migration under freezing and thawing condition[J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2006, **19**(1): 81 - 84. (in Chinese))
- [14] 李国玉, 俞文兵, 马 巍, 等. 甘肃省公路沿线典型地段含盐量对冻胀盐胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2276 - 2280. (LI Guo-yu, YU Wen-bing, MA Wei, et al. Experimental study of characteristics of frost and salt heaves of saline highway foundation soils in seasonally frozen regions in Gansu province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2276 - 2280. (in Chinese))
- [15] 付 伟, 汪 稔. 饱和粉质黏土反复冻融电阻率及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 769 - 774. (FU Wei, WANG Ren. Experimental study of electrical resistivity and deformation characteristics of saturated silty clay during repeated freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 769 - 774. (in Chinese))
- [16] 李国玉, 马 巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对压实黄土湿陷变形影响的过程和机制[J]. 中国公路学报, 2011, **24**(5): 1 - 5. (LI Guo-yu, MA Wei, MU Yan-hu, et al. Process and mechanism of impact of freezing and thawing cycle on collapse deformation of compacted loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, **24**(5): 1 - 5. (in Chinese))
- [17] 梁 波, 张贵生, 刘德仁. 冻融循环条件下土的融沉性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1213 - 1217. (LIANG Bo, ZHANG Gui-sheng, LIU De-ren. Experimental study on thawing subsidence characters of permafrost under frost heaving and thawing circulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1213 - 1217. (in Chinese))
- [18] 杨成松, 何 平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干重度和含水率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增刊 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))

2014 年度黄文熙讲座学术报告会通知

2014 年度黄文熙讲座学术报告会定于 2014 年 4 月 19 日(星期六)在北京中国职工之家饭店多功能厅(北京市西城区复兴门外大街真武庙路 1 号)举行。本次学术报告会由中国水利水电科学研究院、流域水循环模拟与调控国家重点实验室承办。讲座主讲人为浙江大学陈云敏教授和中国人民解放军后勤工程学院陈正汉教授, 讲座题目分别为“环境土工基本理论及工程应用”和“非饱和土与特殊土力学的基本理论研究”。讲座文稿已分别刊登在《岩土工程学报》2014 年第 1 期、第 2 期的黄文熙讲座栏目。4 月 18 日晚 8 时在北京中国职工之家饭店召开《岩土工程学报》编委会全体会议, 请《岩土工程学报》第十一届编委会全体编委准时出席会议。黄文熙讲座学术报告

会期间, 还将邀请知名学者专家做学术报告。热烈欢迎全国岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。有意参会者请填写会议回执, 于 2014 年 3 月 31 日前通过电子邮件(E-mail: hwxjz@iwhr.com; yinqi@iwhr.com)或传真(010-68786970)发送至会议秘书处, 以便会议安排。《岩土工程学报》编委会成员于 2014 年 4 月 18 日全天在中国职工之家饭店报到。学术报告会参会代表于 2014 年 4 月 19 日上午 8:00~9:00 在中国职工之家饭店多功能厅报到。联系人: 殷旗, 010-68786970, yinqi@iwhr.com; 邓刚, 13701213398, dgang@iwhr.com。学术报告会安排的详细信息可在本刊网站查询。

(本刊编辑部)