

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0012

GAO Jianqiang, BAI Ruiqiang, MA Qinguo. Experimental study on freezing of unsaturated coarse-grained soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 94-101. [高建强, 白瑞强, 马勤国. 非饱和粗颗粒土体的冻结试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 94-101.]

非饱和粗颗粒土体的冻结试验研究

高建强^{1,2}, 白瑞强^{1,2}, 马勤国³

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘 要: 按照实际工程中路基填料的级配要求配制试样, 在考虑覆盖层和补水条件下进行室内单向冻结试验, 开展了土质、温度梯度和温度边界条件对非饱和粗颗粒填料冻胀特性的影响研究。试验结果表明: 土质、温度梯度和温度边界对粗颗粒填料的冻胀特性影响显著。其中混合细粒的冻胀量最大、黏质黄土次之、粉质黏土最小, 且其对应的试样顶部、冻结锋面处的含水量及外界补水量均具有相同的大小关系。温度梯度越大, 冻胀量越大, 试样顶部含水量越高, 但冻结锋面处的含水量变化比较小, 同时外界补水量越小。试样冷端温度边界越低, 冻胀量越小, 试样冷端含水量越小, 但外界补水量越大。

关键词: 非饱和土; 粗颗粒土; 冻胀特性; 土质; 温度

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)01-0094-08

0 引言

冻土是一种温度低于 0℃且含有冰的土或岩石^[1], 其中季节冻土约占我国国土面积的 53.5%^[2]。位于严寒地区的铁路路基, 会随着季节性的气候变化产生不同程度的冻胀病害, 严重影响轨道系统的平顺性和列车的运行安全^[3-4]。近年来, 为了解决季节冻土区高速铁路路基的冻胀问题, 粗颗粒填料因具有冻胀敏感性低等特点而被广泛应用, 但现场实际监测数据表明, 高铁路基仍存在不同程度的冻胀, 部分地段甚至超过了规范限值^[5-7]。因此, 研究季节冻土区的路基填料冻胀问题具有重要意义。

目前, 随着对粗颗粒土体冻胀问题研究的不断深入, 相关研究学者一致认为细粒土含量、初始含水量和外界补水量是影响粗颗粒土体冻胀特性的主要因素^[8-16]。即粗颗粒土的冻胀敏感性随着黏粒含量、初始含水量和外界补水量的增加而增大。上述情况主要是针对地下水位较浅, 存在水分补给的地区。对于远离地下水的地表土层长期处于非饱和

状态, 且存在地表覆盖层的地区, 地下温度较高区的水分在温度梯度的作用下将主要以蒸汽形式迁移至覆盖层下方, 不断冷凝汇聚, 甚至达到饱和状态, 并在低于冻结温度条件下, 将会产生冻胀, 有学者称之为“锅盖效应”^[17]。因此, 蒸汽迁移在一定条件下也是造成土体冻胀的重要因素。其中, 在含水量梯度或者温度梯度下, 非饱和土存在非常明显的气态水迁移现象^[18-19]。Eigenbrod 等^[20]通过试验发现, 含有细粒的粗颗粒土样蒸汽迁移水量要明显高于纯净的粗颗粒土。王铁行等^[21]和张升等^[22]通过试验证明冻结条件下的水汽迁移可以使试样顶部的含水量显著增大。Gao 等^[23]通过试验发现, 蒸汽迁移对粗颗粒土体冻胀特性的影响较为显著。

上述研究成果表明, 细粒含量、含水量是影响粗颗粒土冻胀敏感性的主要因素, 同时气态水在一定程度上也对粗颗粒土体的冻胀发挥着不可忽视的作用。但影响土体冻胀的因素较多, 本文将在考虑覆盖层条件下, 对级配良好的纯净粗颗粒土中分别添加相同含量的黏质黄土、粉质黏土和混合细粒

收稿日期: 2017-11-17; 修订日期: 2018-01-26

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC015); 国家自然科学基金项目(41230630)资助

作者简介: 高建强(1990-), 男, 甘肃靖远人, 2015年在兰州交通大学获硕士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事冻土工程数值计算分析研究。E-mail: gaojq@lzb.ac.cn

通信作者: 白瑞强, E-mail: 1269977095@qq.com.

土，制备成具有相同初始含水量的试样，进行补水条件下的单向冻结试验。开展土质条件、温度梯度和温度边界对非饱和粗颗粒土体冻胀特性的影响研究，从而为季节冻土区高速铁路路基填料的选择提供一定的参考。

1 试验方案

1.1 土样的物理特性

本试验所用黏质黄土取自东北哈大线沈阳段，土样呈黄褐色；粉质黏土取自青藏高原北麓河野外试验观测站附近取土场，土样呈红褐色。所取土样均为冻胀敏感性土体，具有一定的代表性，其颗粒分布曲线如图 1 所示。将晒干的土样经碾碎后过 2 mm 筛，称取一定量的过筛土与级配碎石进行混合，配置成含水量和细粒土的质量含量均为 5% 的

试验土样。两种细粒土的物性参数列于表 1。

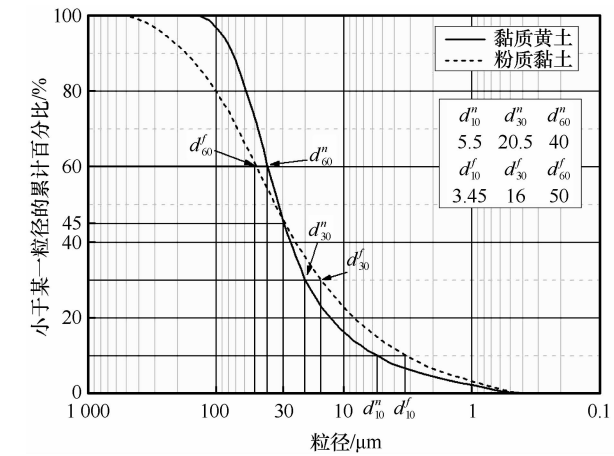


图 1 试验中两种细粒土的颗分曲线
Fig. 1 Accumulative curves of particle size grading of the tested Viscousness loess and silty clay

表 1 细粒土的物性参数 Table 1 Physical parameters of the Viscousness loess and silty clay					
土质	天然干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	分类
黏质黄土	1.67	45.0	25.0	20.0	黏土
粉质黏土	1.90	36.8	23.9	12.9	

1.2 试验过程及方法

本试验基于冻土工程国家重点实验室冻融循环试验机展开。该试验装置主要由保温试验箱体、顶底板制冷及控温系统、温度位移监测系统、补水系统等组成。顶底板制冷及控温系统通过酒精冷浴控制。温度位移监测系统由分布在试样筒侧壁上的热敏电阻传感器和布设在试样顶部的位移计组成。补水系统是由橡胶软管连接马氏瓶与底板补水孔来完成，由马利奥特瓶水位下降的多少确定补水量。

大量的试验证明，影响冻土中水分迁移量的因素就是直接制约土体冻胀的因素。包括土体本身的特性（土质、导热性能和渗透性能等）及外界条件

（温度、地下水位和压力等）。对于非饱和粗颗粒土体的冻胀性能，已有试验表明黏粒含量和初始含水量对非饱和粗颗粒土体的冻胀特性影响比较显著^[23]。因此，本文将重点针对土质、温度梯度及温度边界这三个影响因素进行试验研究。其中，冻结试验的温度选取依据参考文献确定^[24]。具体的冻胀试验方案见表 2。

本文以试样 S3 的颗粒分布为例说明。试样 S3 的粒径分布不均匀系数为 16.51，曲率系数为 2.57，属于级配良好的粗颗粒土，土体的颗粒粒径组成见表 3。试验土样需经过 24 h 焖料使水分分布均匀。试验土样制备采用压样法，试样尺寸为高

表 2 单向冻结试验方案 Table 2 The experiment conditions of one-side freezing test							
试样编号	试验时间/h	细粒土质	试样尺寸 ($h \text{ mm} \times \varphi \text{ mm}$)	温度梯度 /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$)	控制温度/ $^{\circ}\text{C}$		初始温度 / $^{\circ}\text{C}$
					顶板	底板	
S1	120	黏质黄土	200 × 198	0.7	-4	+10	+10
S2	120	粉质黏土	200 × 198	0.7	-4	+10	+10
S3	120	黏质黄土	200 × 198	0.5	-4	+6	+6
S4	120	混合黏粒	200 × 198	0.7	-4	+10	+10
S5	120	黏质黄土	200 × 198	0.7	-6	+8	+8

注：试样 S4 所添加的混合黏粒由粉质黏土与黏质黄土按照质量比 1:6 进行均匀混合。

表3 试样 S3 颗粒粒径组成
Table 3 Composition of particle diameters of Specimen S3

粒径/mm	<0.075	0.075~0.5	0.5~1.18	1.18~2.36	2.36~4.75	4.75~9.5	9.5~16.0
质量分数/%	5	5	5	11	16	30	28

200 mm，直径 198 mm。将土样分为 4 等份压入试样筒内，控制干密度为 $2.087\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。在试样顶面覆盖塑料膜并进行密封处理。通过在试样侧面布设温度探头监测土样不同深度处的温度变化情况，同时，在土样顶端安装位移计来测量土体的冻胀量。试样恒温阶段，将试样顶、底板温度按照试验方案中的初始值进行设定，待土样监测断面温度达到要求的初始值后，将土样顶板温度按要求进行设定并开始冻结试验。试验过程中，对试样进行同步无压补水。试验结束后，采用烘干法测得土样的含水量分布情况。

2 结果与分析

2.1 土质对土样冻胀特性的影响

由不同土质试样在冻结过程中的冻胀量随时间变化曲线(图 2)可以看出，3 种土质配置的试验土样冻胀量之间存在明显差异。冻结试验结束时，试样 S1、S2 和 S4 的冻胀量分别为 3.26 mm、2.73 mm 和 3.40 mm。对于掺和相同百分含量细粒土的粗颗粒土试样而言，其冻胀特性取决于所添加细粒土的颗粒级配情况(见图 1)。与级配曲线平缓的粉质黏土相比，黏质黄土的级配曲线稍陡一些，说明黏质黄土中的细颗粒含量所占比重更大，对应其冻胀性更强，对粗颗粒土体的冻胀敏感性影响更大。混合细粒主要以黏质黄土为主，外加部分粉质黏

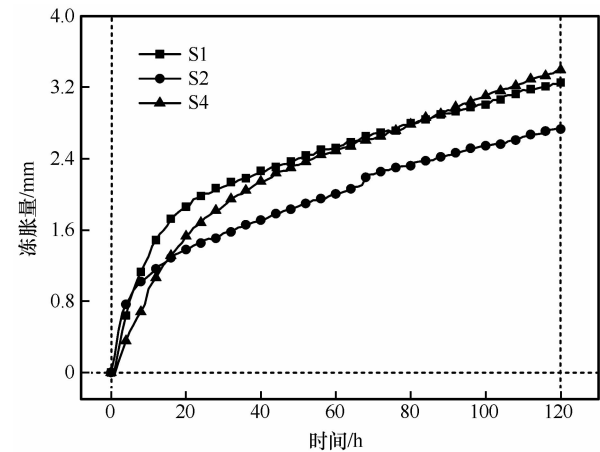


图 2 不同土质情况下的土样冻胀量变化曲线
Fig. 2 Variations of frost heave with time of Specimens S1, S2 and S4

土，其冻胀性相比单一土质更强。因此，对于本试验三种土质的试样冻胀量而言，混合细粒最大，黏质黄土的次之，粉质黏土的最小。

由图 3 可以看出，试验初期土样存在剧烈降温阶段，随后土体温度下降速度逐渐减慢，而后土体温度处于缓慢降温阶段，经一段时间后温度场达到稳定。因此，可以将试样温度变化曲线分为 4 个区段，即快速降温阶段(0~5 h)，距离试样顶部越近，温度降低越快；缓慢降温阶段(10~15 h)；试样温度逐渐趋于稳定；介于两者之间的过渡段(5~10 h)，该阶段的温度降低速率明显减小；温度稳定阶段(15~120 h)，该阶段的试样温度均已处于稳定状态。其余试样沿不同高度处的温度变化曲线均呈现类似变化规律，本文不再赘述。

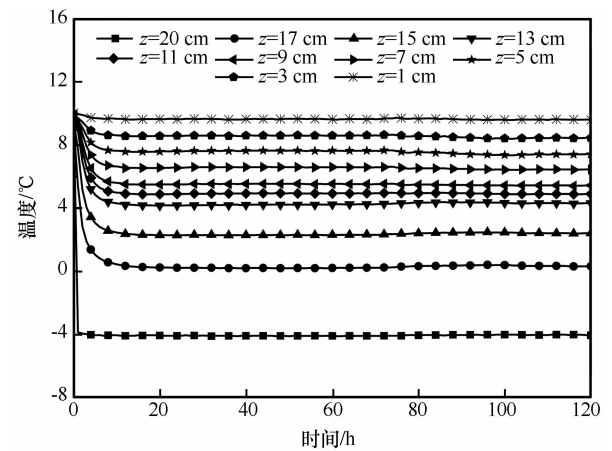


图 3 试样 S2 沿不同样高处的温度随时间变化曲线
Fig. 3 Variations of temperatures at different depths with time of Specimen S2

图 4 为冻结试验结束后总含水量沿试样高度方向的分布情况。冻结 5 d 后，从土样含水量剖面可以看出，试样 S1、S2 和 S4 含水量的分布均出现了两个峰值。试样顶部的含水量分别为 15.31%、12.17% 和 16.96%，试样冻结锋面处的含水量分别为 11.17%、10.14% 和 15.41%，均明显高于试样初始含水量。这是因为试样顶部温度在冻结过程中恒定在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，随着冻结锋面的下移，在温度梯度的作用下，气态水和液态水持续不断地向冻结锋面迁移，冷凝、冻结后积聚在冷端边界处致使含水量增大。当冻结锋面进入稳定阶段后，液态水和气态

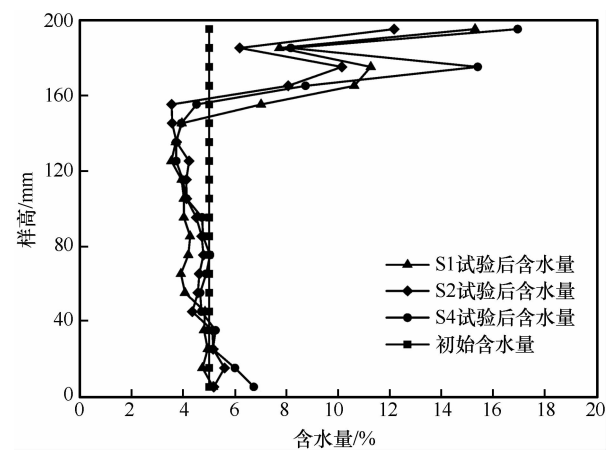


图 4 不同土质的试样试验前后含水量分布曲线
Fig. 4 Water content profiles of different soil specimens before and after test

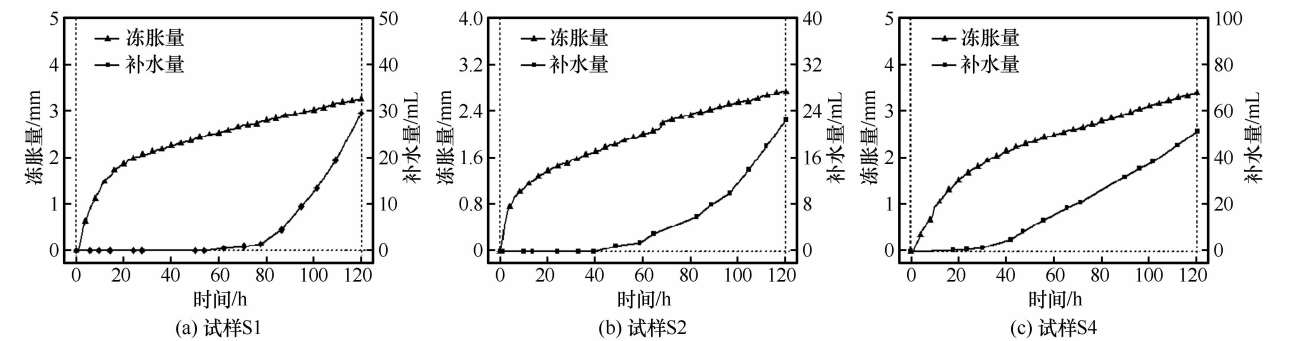


图 5 不同土质的试样冻胀量与补水量关系曲线
Fig. 5 Curves of frost heaving and water intake of Specimens S1 , S2 and 4

补水时刻分别为 62.2 h、48.3 h 和 17.8 h。这与冻结过程中土体内部孔隙水压力和孔隙气压力的变化有关。

2.2 温度梯度对土样冻胀特性的影响

由不同温度梯度下的试样冻结过程中的冻胀量随时间变化曲线(图 6)可以看出，温度梯度对土样的冻胀量影响比较明显。冻结试验结束时，试样 S1 和 S3 的冻胀量分别为 3.26 mm 和 2.81 mm。对于含水量和黏粒含量较小的粗颗粒土体，气态水是土体内部主要的水分迁移形式，且温度梯度越大，蒸汽迁移量越大。因此，最终导致试样的冻胀量越大。

图 7 为冻结试验结束时，试样 S3 的总含水量沿试样高度方向的分布情况。从土样含水量剖面可以看出，试样 S3 的含水量分布亦存在两个峰值。试样顶部的含水量为 9.44%，低于试样 S1 的顶部含水量 15.31%，这是由于试样 S1 的温度梯度较大，试样未冻区的液态水和气态水在迁移至冻结锋面的同时，仍有大量的气态水越过冻结锋面向试

水仍不断迁移至冻结锋面处并冻结成冰，但由于土体孔隙较大，仍有部分气态水会越过冻结锋面继续向试样上部迁移。同时可以看出，试样高度在 40 ~ 160 mm 范围内的土体含水量均低于初始含水量，这是由于土体孔隙中的气态水和液态水不断向冻结锋面处迁移，导致冻结锋面以下未冻区土体的含水量不断减小。

图 5 为不同土质试样冻结试验过程中的冻胀量与补水量的对应关系曲线。可以看出，不同土质的试样冻结试验结束时的总补水量不同，试样 S1、S2 和 S4 的补水量依次为 29.5 mL、22.5 mL 和 51.5 mL。同时可以看出，外界水分并不是在冻结试验一开始就进行补给，而是经过一段时间后才开始缓慢被吸入土样中，试样 S1、S2 和 S4 的起始

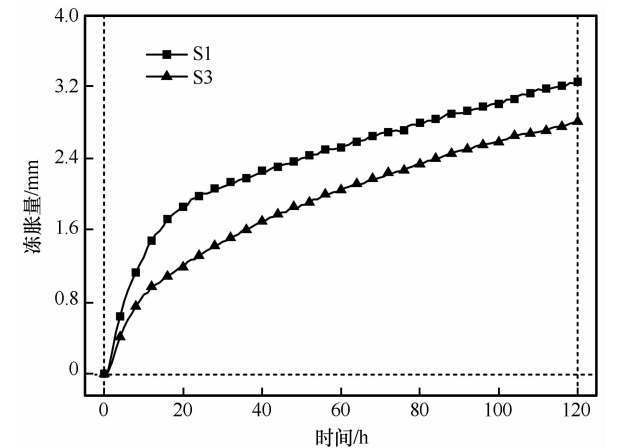


图 6 不同温度梯度下的土样冻胀量变化曲线
Fig. 6 Variation of frost heave of Specimen S1 and S3 with time under different temperature gradients

样上部迁移，致使最终试样 S1 顶部的含水量明显高于试样 S2。试样 S3 的冻结锋面处含水量为 11.57%，与试样 S1 冻结锋面处的含水量(约为 11.27%)相差不大。因此，可以认为温度梯度对非饱和粗颗粒土体的顶部含水量影响明显，且温度梯

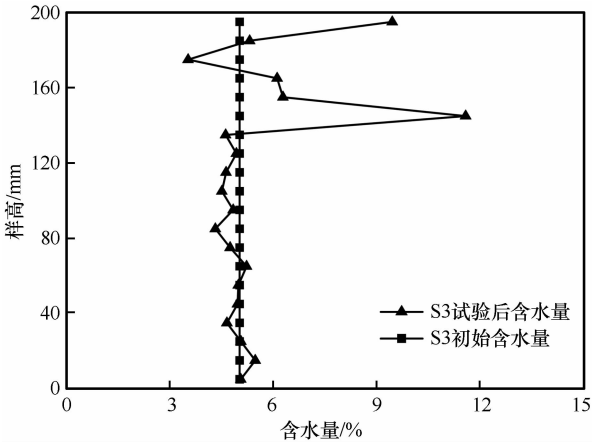


图7 试样 S3 的试验前后含水量分布曲线
Fig.7 Water content profile of Specimen S3 before and after test

度越大，试样顶部的含水量越大，但对冻结锋面处的含水量影响较小。

图8为试样S3在冻结试验过程中的冻胀量与补水量的关系曲线。可以看出，试样S3的起始补水时刻(约 $t=23$ h)明显早于试样S1的起始补水时刻(约 $t=62.2$ h)，且最终的补水量(约45 mL)也要高于试样S1的总补水量(约29.5 mL)。这是因为在试样S1和S3冻结过程中，随着冻结锋面的下移，气态水和液态水向冷端边界迁移，待试样进入冻结稳定阶段，在温度梯度作用下，冻结锋面以下未冻区一定范围内的水分持续向冻结锋面处迁移，在冻结锋面及以下融土区形成一定的负孔隙水压力，致使外界水分被吸入土体。与试样S1冻结封面以下且沿试样高度40~160 mm范围内的含水量明显小于初始含水量情况相比，试样S3的外界水分补给量较大，其未冻区含水量大致在初始值附近变化。由此可以得出，温度梯度越小，外界环

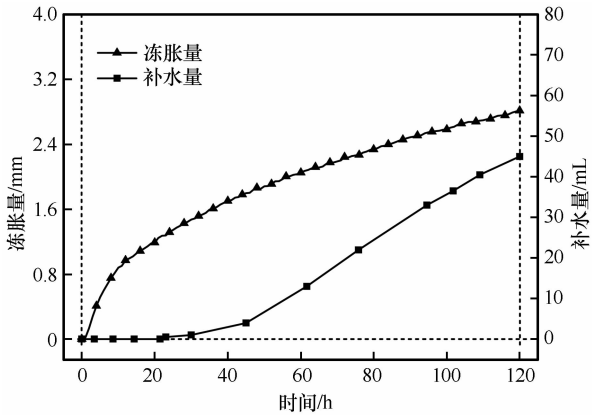


图8 试样 S3 的冻胀量与补水量关系曲线
Fig.8 Frost heaving and water intake changing with time of Specimen S3

境的补水量越大。

2.3 温度边界对土样冻胀特性的影响

图9为不同温度边界下的试样冻结过程中的冻胀量随时间变化曲线。可以看出，温度边界对土样的冻胀量影响也比较明显。冻结试验结束时，试样S1和S5的冻胀量分别为3.26 mm和1.46 mm。这是由于试样冷端边界的温度不同，其冻胀机理不同。当冷端温度边界较低(试样S5为 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$)时，试样冻结过程中，土体中的温度梯度比较大，冻结速率较快，水分快速冻结，致使气态水和液态水来不及向冷端边界处迁移，且其冻结持续时间较短，孔隙水主要以原位冻结为主。对于冷端温度较高的试样S1而言，冻结过程中的水分迁移相对充分，迁移到冷端边界处的水分较多，因此其冻胀量较大。

图10为冻结试验结束时试样S5的总含水量沿

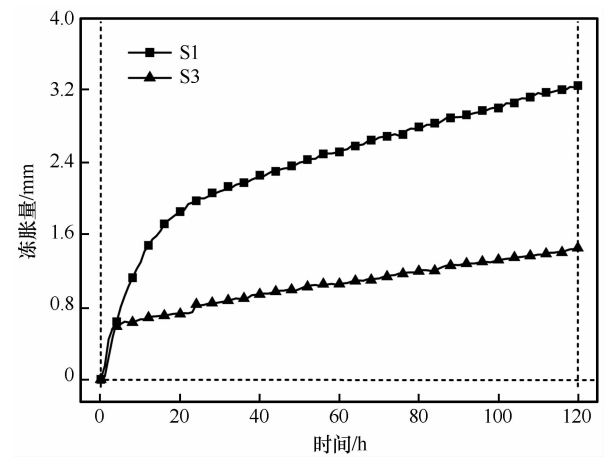


图9 不同温度边界下的土样冻胀量变化曲线
Fig.9 Variations of frost heave of Specimen S1 and S5 changing with time under different temperature boundaries

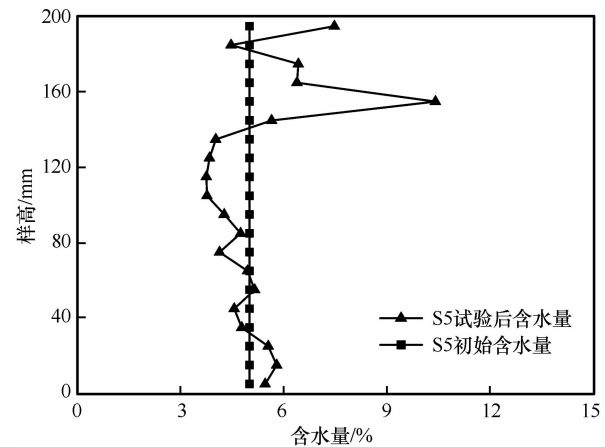


图10 试样 S5 的试验前后含水量分布曲线
Fig.10 Water content profiles of Specimen S5 before and after the test

试样高度方向的分布情况。从土样含水量剖面可以看出，试样 S5 的顶部含水量仅为 7.47%，明显低于试样 S1 的顶部含水量。冻结锋面处含水量为 10.42%，与试样 S1 相差不大。

图 11 为试样 S5 在冻结试验过程中的冻胀量与补水量的关系曲线。可以看出，试样 S5 的起始补水时刻(约 $t = 51.3$ h)仍早于试样 S1 的起始补水时刻(约 $t = 60$ h)，且最终的补水量(约 48.5 ml)也要高于试样 S1 的总补水量(约 29.5 mL)。对于土质和初始含水量一定的情况，试样冷端的温度越低，冻结深度越大，未冻土段的长度相对较短，造成外界环境的补水量越大。

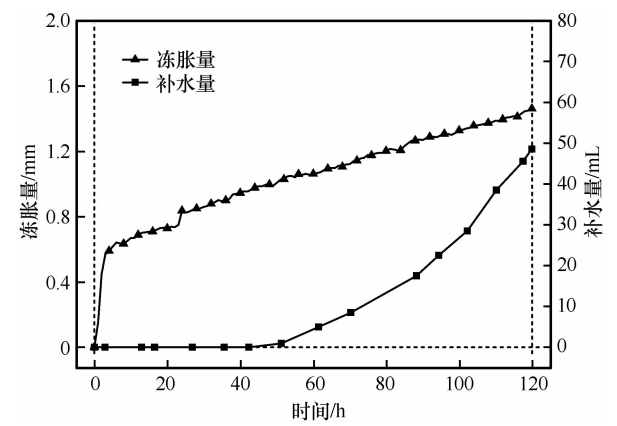


图 11 试样 S5 的冻胀量与补水量关系曲线
Fig. 11 Curves of frost heaving and water intake of Specimen S5

3 结论

为了研究土质、温度梯度和温度边界条件对非饱和粗颗粒土体冻胀特性的影响，本文在考虑覆盖层条件下，通过对级配良好的纯净粗颗粒土添加一定量的细粒土，开展了补水条件下的单向冻结试验。通过对试验结果的分析，初步得出以下几点结论：

- (1) 土质对粗颗粒填料的冻胀特性影响显著。其中混合细粒的冻胀量最大、黏质黄土次之、粉质黏土最小，且其对应的试样顶部、冻结锋面处的含水量及外界补水量之间均具有相同的大小关系。
- (2) 对于黏粒含量和含水量较低的非饱和粗颗粒土体，温度梯度越大，蒸汽迁移量越大，试样顶部含水量也越高，相应试样的冻胀量越大，但冻结锋面处的含水量变化比较小。外界补水量随着温度梯度的增大而减小。
- (3) 对于非饱和粗颗粒土体，试样的冻胀量随

着冷端温度边界的降低而减小，相应的试样顶部含水量也越小，但外界补水量越大。

参考文献 (References) :

[1] Lu Jianguo, Zhang Mingyi, Zhang Xiyin, et al. Review of the coupled hydro-thermo-mechanical interaction of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 102 – 111. [路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻土水热力耦合研究现状 & 进展[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 102 – 111.]

[2] Xu Xiaozu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]

[3] Zhang Xiyin, Zhang Mingyi, Lu Jianguo, et al. Study of the freezing and thawing features of soil: current situation and outlook[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1644 – 1657. [张熙胤, 张明义, 路建国, 等. 土体冻融特征研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1644 – 1657.]

[4] Wang Jinchang, Wu Qingbai. Settlement analysis of embankment-bridge transition section in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 79 – 85. [王进昌, 吴青柏. 青藏铁路冻土区路桥过渡段沉降原因分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 79 – 85.]

[5] Shi Gangqiang, Zhao Shiyun, Li Xianming, et al. The frost heaving deformation of high-speed railway subgrades in cold regions: monitoring and analyzing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 360 – 368. [石刚强, 赵世运, 李先明, 等. 严寒地区高速铁路路基冻胀变形监测分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 360 – 368.]

[6] Wang Chunlei, Zhang Rongken, Zhao Xiaomeng, et al. Frost heaving monitoring system and frost heaving rules for the high-speed railway embankment in the seasonally frozen soil regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 962 – 968. [王春雷, 张戎垦, 赵晓萌, 等. 季节冻土区高速铁路路基冻胀监测系统 & 冻胀规律研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 962 – 968.]

[7] Liu Hua, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Effect of structures and sunny-shady slopes on thermal characteristics of subgrade along the Harbin-Dalian Passenger Dedicated Line in Northeast China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123: 14 – 21.

[8] Konrad J M, Lemieux N. Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 515 – 527.

[9] Konrad J M. Freezing-induced water migration in compacted base-course materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(7): 895 – 909.

[10] Vinson T S, Ahmad F, Rieke R. Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils[M]//Transportation Research Board N1089. Washington, DC: Transportation Research Record, 1986: 124 – 131.

[11] Zhang Yichen, Li Xin, Zhang Xifa, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1522 – 1526. [张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性 & 分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1522 – 1526.]

- [12] Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Analysis on the effect of replacing-soil method on inhibiting frost heave of railway roadbed in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 1–7. [许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 换填法抑制季节冻土区铁路路基冻胀效果分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 1–7.]
- [13] Wang Tianliang, Yue Zurun. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 359–364. [王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗粒土冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 359–364.]
- [14] Li Anyuan, Niu Yonghong, Niu Fujun, et al. Research status of frost heaving properties and controlling measures of coarse grained soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 202–210. [李安原, 牛永红, 牛富俊, 等. 粗颗粒土冻胀特性和防治措施研究现状[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 202–210.]
- [15] Leng Jingyan, Fu Xinping, Yang Junjie. Experimental research of the subgrade padding frost heaving of high-speed railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 440–445. [冷景岩, 付新平, 杨军杰. 高速铁路路基填料冻胀试验研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 440–445.]
- [16] Wu Libo, Qi Wei, Niu Fujun, et al. A review of studies on roadbed frozen damages and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1283–1293. [武立波, 祁伟, 牛富俊, 等. 我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1283–1293.]
- [17] Li Qiang, Yao Yangping, Han Liming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. Industrial Construction, 2014, 44(2): 69–71. [李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69–71.]
- [18] Nakano Y, Tice A, Oliphant J. Transport of water in frozen soil IV; analysis of experimental results on the effects of ice content[J]. Advances in Water Resources, 1984, 7(2): 58–66.
- [19] Guthrie W S, Hermansson Å, Woffinden K H. Saturation of granular base material due to water vapor flow during freezing: laboratory experimentation and numerical modeling[J]. Cold Regions Engineering, 2006, 29(11): 1–12.
- [20] Eigenbrod K, Kennepohl G. Moisture accumulation and pore water pressures at base of pavements[J]. Transportation Research Record, 1996, 1546: 151–161.
- [21] Wang Tiehang, Wang Juanjuan, Zhang Longdang. Experimental research on moisture migration in freezing unsaturated loess[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition), 2012, 44(1): 7–12. [王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(1): 7–12.]
- [22] Zhang Sheng, He Zuoyue, Teng Jidong, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: experimental study for two types of “canopy effect”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 961–968. [张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 961–968.]
- [23] Gao Jianqiang, Lai Yuanming, Zhang Mingyi, et al. Experimental study on the water-heat-vapor behavior in a freezing coarse-grained soil[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 956–965.
- [24] Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Experimental analysis of frost susceptibility for remolded clayey loess[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(1): 24–30. [许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 重塑黏质黄土冻胀敏感性试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 24–30.]

Experimental study on freezing of unsaturated coarse-grained soils

GAO Jianqiang^{1,2}, BAI Ruiqiang^{1,2}, MA Qinguo³

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: According to the grading standards of subgrade fillings in practical engineering, some test specimens were made for one-side freezing experiments, under the consideration of impervious cover and no-pressure water supply, and for studying the influence of properties of soils, temperature gradients and boundaries on the frost susceptibility of unsaturated coarse-grained soil. The tests results showed that the properties of soils, temperature gradients and boundaries have significant influence on the frost susceptibility of coarse-grained soils. The amount of frost heaving of specimen with mixed fines is largest, following by the specimens with clay loess, and the specimens with silty clay is the minimum. The water contents in the upper position and freezing front of specimen, as well as the external water supply, have the same effect. The larger the temperature gradient, the bigger the frost heaving of specimen, resulting in more water accumulated at the top of the specimen. But the water content is less changing at the freezing front, and the external water supply is smaller. The lower the temperature boundary at the cold end, the smaller the frost heaving. In addition, the water content in the upper position decreases and the external water supply increases. As the water content in the upper position less, the external water supply will increase.

Key words: unsaturated soil; coarse-grained soil; frost susceptibility; properties of soil; temperature

(本文编辑：庞瑜)