

冻融与静荷载双重作用下土体内部孔隙水压力、水分场变化规律研究^{*}

肖东辉^{1,2}, 马巍^{1†}, 赵淑萍³, 张泽¹, 冯文杰¹, 张莲海¹

(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. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210000)

摘 要:在季节冻土区, 土体内部孔隙水压力和水分含量受冻融循环和外部荷载的影响. 通过模型试验, 利用孔隙水压力传感器和水分传感器对冻融与静荷载双重作用下黄土内部的孔隙水压力和水分含量进行监测, 得到不同深度处孔隙水压力和水分含量的变化过程. 结合静荷载的应力场, 进一步分析孔隙水压力和水分含量的空间变化规律. 试验结果表明: 在冻融与静荷载双重作用的初期, 土体内部孔隙水压力快速增大; 之后, 孔隙水压力开始随温度呈周期性变化. 在一个冻融周期内, 土体内部孔隙水压力和水分含量都随温度的升高而增大, 随温度的降低而减小, 而且孔隙水压力和水分都随温度的变化而表现出滞后性. 随着冻融循环次数的增加, 孔隙水压力在荷载下方和两侧形成三个集中区; 水分则在荷载下方形成高含水量区, 在荷载两侧形成低含水量区. 通过对静荷载产生的应力场进行分析发现, 土体内部孔隙水压力和水分场的空间分布与静荷载产生的应力场有密切关系.

关键词:冻融循环; 静荷载; 模型试验; 孔隙水压力; 应力; 温度

中图分类号: TU411.93

文献标志码: A

Research on Changing Laws of Pore Water Pressure and Moisture Field in Soil Subjected to the Combination of Freeze-thaw and Static Load Actions

XIAO Donghui^{1,2}, MA Wei^{1†}, ZHAO Shuping³, ZHANG Ze¹, FENG Wenjie¹, ZHANG Lianhai¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210000)

Abstract: In the seasonal frozen regions, the pore water pressures and water contents in soil are influenced by freeze-thaw cycles and external loads. In the model test, the sensors of pore water pressure and water content were used to measure the variations of pore water pressures and water contents of the loess under the freeze-thaw cycles and static load, and the changing process of pore water pressures and water

^{*} 收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630636), Key Project of National Natural Science Foundation of China(41630636); 甘肃省交通运输厅科技项目(2014-03), Science and Technology Project of Transportation Hall of Gansu Province(2014-03); 国家自然科学基金资助项目(41301070, 41501072), National Natural Science Foundation of China (41301070, 41501072); 中科院西部之光博士项目(2013-03), Western Light Doctor Project of Chinese Academy of Sciences(2013-03)

作者简介: 肖东辉(1989—), 男, 山东临沂人, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: mawei@lzb.ac.cn

contents at different depths of soil was obtained. The relationship between static stress and pore water pressures in the space was then examined. It is found that the pore water pressures of soil increased rapidly at the beginning of freeze-thaw and static load actions; and the pore water pressure then changed periodically with the temperature. In a freeze-thaw cycle, soil pore water pressure and moisture content increased with the increase of temperature, and decreased with the decrease of temperature. In addition, the pore-water pressure and moisture had hysteretic quality with the changing of temperature. Moreover, three concentrated areas of pore water pressure from the longitudinal section with the increasing number of freeze-thaw cycles were observed: one was directly below the loading position, and the other two were located between the edge of loading area and test chamber. Meanwhile, a high water content area below the static load and low water content areas on both sides of the static load were also found. Under the static load, the distribution of pore water pressure resembled the stress field calculated by the corner-points method. It is also considered that the present of these concentrated areas was related to the stress field of soils produced by the static load.

Key words: freeze-thaw cycle; static load; model test; pore water pressure; stress; temperature

季节冻土区土体经历着反复的冻结和融化过程,这种以年为周期的冻融循环作用是导致季节冻土区工程病害问题的重要原因之一^[1-3].而这些病害的形成与土体内部水分的变化有着密切关系^[4-5].大量室内实验研究已经证明冻融过程中有水分迁移的存在,冻土中的水分迁移与冻结缘中土水势梯度有关,而该梯度主要取决于土质、冻结速度和冻胀速度等因素^[6].在冻结过程中水分向冻结锋面迁移,在融化过程中水在自重作用下向冻结前的位置迁移,但是由于土的阻滞力作用,水分不能返回原位置,导致土体内部水分的重分布^[7-10].

在冻融循环过程中,土体内部的水分迁移与孔隙水压力变化有着直接关系^[11-12].国内外学者对冻融过程中的孔隙水压力进行了实验研究,结果表明:冻融循环过程中土体内部的孔隙水压力变化受温度、冻结速率、冻融循环次数以及土质等因素的影响^[13];当温度下降到冻结点以下时,孔隙水压力下降为负值;当温度升高到冻结点以上时,孔隙水压力快速升高为正值^[14];通过 X 射线图片收集冰透镜体的形成过程,发现在冻结前缘稳定以后不久产生了较大的孔隙水压力,孔隙水压力的峰值与温度的峰值同步^[15].对冻结缘附近的孔隙水压力进行测量,发现孔隙水压力梯度是水分向冻结锋面迁移的驱动力,而有效应力的增加则导致冻结锋面处的固结^[16].当施加荷载时,普通未冻结土的孔隙水压力会立即达到峰值高度,而冻土需要一定时间才能达到峰值^[17].

目前,对于冻结和融化过程中水分迁移和孔隙

水压力变化的研究大都集中在无荷载的小土样试验上,基于大土样的模型试验、研究荷载作用对土体中水分迁移和孔隙水压力变化的影响研究还不多.本文基于模型试验研究在冻结和融化过程中静荷载作用下土体中水分和孔隙水压力的变化过程.针对其产生机理、影响因素及其发展规律进行研究,以期为寒区工程提供理论依据.

1 试验材料与方法

1.1 试验土样的物理参数

本次模型试验用土为兰州黄土(36°01′14″N, 103° 50′15″E,海拔 1 624 m),采样地点属于季节冻土区.按照土工试验方法标准对土样的液塑限、密度、最大干密度、含水量等物理性能进行测试,结果如表 1 所示,土样颗粒分析结果如图 1 所示.

表 1 土样的基本物理指标
Tab. 1 The basic parameters of the intact loess

参数	含水量 /%	干密度 /(g·cm ⁻³)	土粒密度 /(g·cm ⁻³)
测试值	0.93	1.36	2.61

参数	塑限/%	液限/%	塑性指数
测试值	18.7	27.3	8.6

1.2 模型试验设计

本次模型试验利用中国科学院冻土工程国家重点实验室小型模型试验系统来完成,如图 2(a)所示.模型试验系统包括环境箱、制冷系统、控制系统、

保温试验箱、各类传感器和数采仪(图 2(b)).

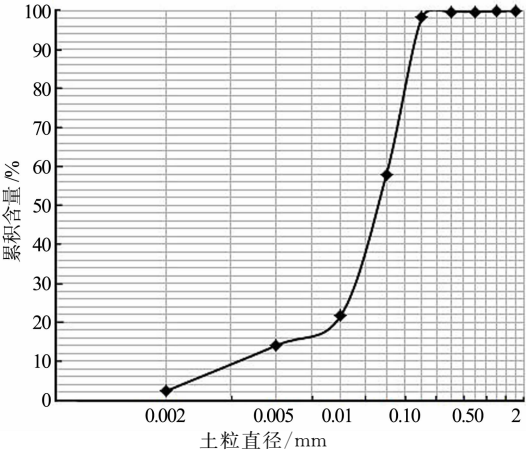
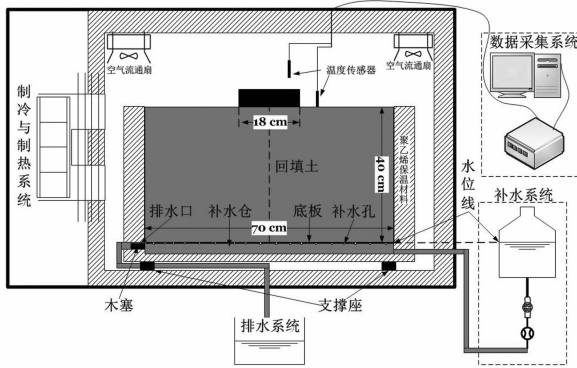


图 1 土样粒径分布

Fig. 1 The distribution of soil particles' diameters



(a) 小模型试验箱



(b) 模型试验系统

图 2 模型试验系统照片

Fig. 2 The photos of modeling test

制冷系统和控制系统用来控制环境箱的温度,环境箱的内部空间尺寸为 1 m×1 m×1 m. 保温试验箱用来装填土样,其内部尺寸为 0.7 m×0.7 m×0.4 m,保温试验箱置于环境箱内,箱壁采用保温材料制成,保证土样的温度自上而下变化. 模型试验的冻融周期为 24 h,温度数据参考兰州市黄土区的月

平均温度,在-8~17 ℃之间呈正弦函数曲线变化. 重塑土样过 2 mm 孔径的筛子,配制干密度为 1.6 g·cm⁻³,初始含水量为 12.6% 的土样,并将土样静置 24 h,使土样含水量更加均匀,然后称重装箱,测得静置后的土样含水量为 11.6%.

本次模型试验选用 EC-5 土壤水分传感器、HC-25 孔隙水压力传感器以及热敏电阻温度传感器如图 3 所示. EC-5 土壤水分传感器内部主要是由方波信号发生电路、RC 充放电电路、时间电压转换电路组成,量程为 0~100%,精度为±3%(EC<8 dS/m),使用温度范围为-20~40 ℃. HC-25 孔隙水压力传感器的量程为-100~200 kPa,使用温度范围为-20~80 ℃. 孔隙水压力传感器采用 4~20 mA 输出,输出的电流信号可以转化成实际孔隙水压力值,所以孔隙水压力传感器不需要进行标定试验. 当孔隙水压力传感器置于空气中时,其值在 0~0.5 kPa 之间,符合本次模型试验的精度要求. 热敏电阻温度传感器的工作温度-50~120 ℃,阻值误差 1%. 试验过程中,孔隙水压力传感器和水分传感器采用 DT80 数据采集仪进行数据采集,温度传感器则采用 DT500 数据采集仪进行数据采集,设置数据采集仪的数据采集时间间隔为 1 min.

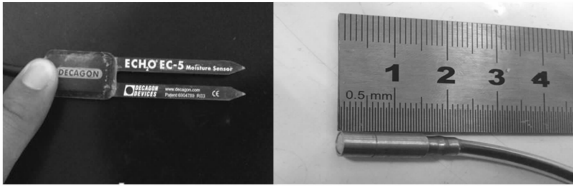


图 3 EC-5 传感器和孔隙水压力传感器

Fig. 3 Sensor of EC-5 and pore water pressure

保温试验箱内的静荷载位置、土壤水分传感器、温度传感器、孔隙水压力传感器的布设如图 4 所示. 探头埋设的最大深度为 30 cm,而这一深度的土体自重应力约为 5 kPa. 所以试验中,在土体表层的位置施加相同大小的静荷载,即荷载底面积为 18 cm×18 cm,高为 9 cm,总质量为 16.2 kg,荷载应力为 5 kPa. 传感器的布设采用左右对称的方式,即在保温试验箱的左侧布设温度探头,右侧布设水分探头和孔隙水压力探头.

2 试验结果分析

土体内部的温度传感器、水分传感器和孔隙水

压力传感器的位置和编号如图 4 所示,其中字母 a, b, c, d 分别代表距保温试验箱中心线 35 cm, 23.3 cm, 11.7 cm 和 0 cm;字母 e, f, g 分别代表距保温试验箱中心线 11.7 cm, 23.3 cm 和 35 cm;数字 1, 2, 3

分别代表距土体表层 10 cm, 20 cm 和 30 cm, 例如, a1 表示距土体中心线 35 cm, 距土体表层 10 cm; d2 表示距土体中心线 0 cm, 距土体表层 20 cm; f3 表示距土体中心线 23.3 cm, 距土体表层 30 cm.

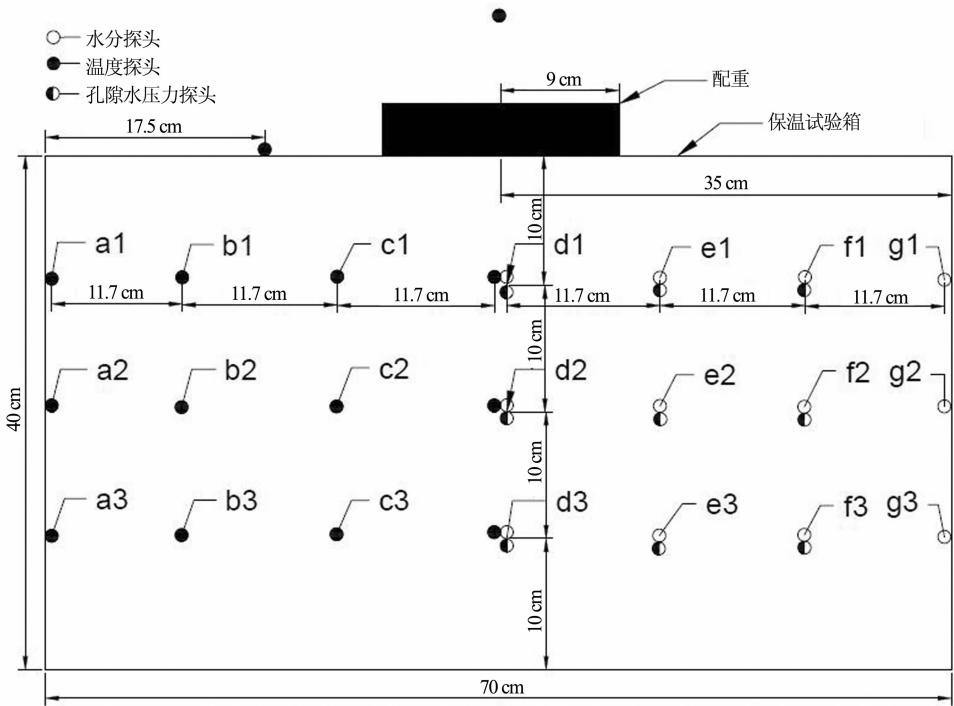


图 4 探头及荷载位置
Fig. 4 The location of sensors and load

2.1 温度变化

本次模型试验的环境温度为 $-8\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$, 土体表层温度在 $-4.5\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化, 如图 5 所示.

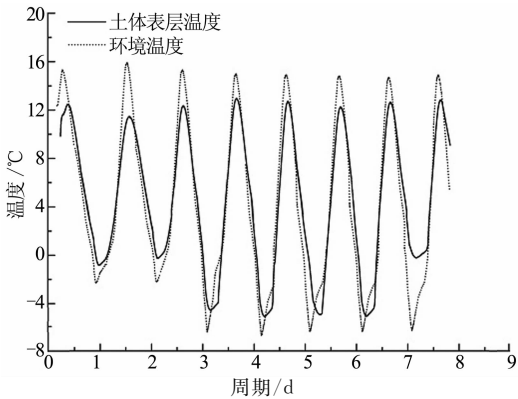


图 5 环境温度和土体表层温度
Fig. 5 Temperature of environment and on the soil surface

土体内部温度变化如图 6 所示, 从图中可以看出, 保温试验箱内的土体温度随环境温度的变化而呈现出周期性变化, 而且距土体表层越近, 温度变化波幅越大.

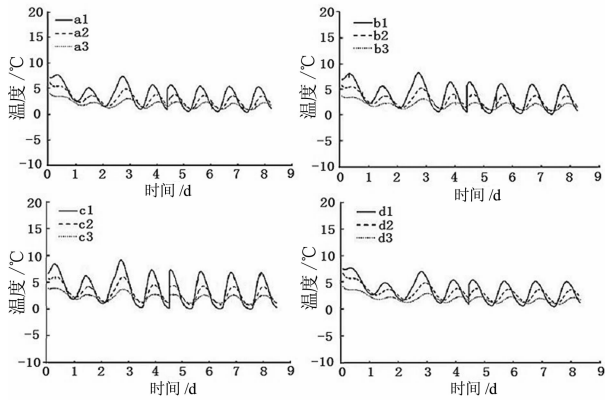


图 6 土体内部温度变化
Fig. 6 The changing of temperature in soil

2.2 孔隙水压力变化

当土体表层施加 $18\text{ cm}\times 18\text{ cm}$ 的静荷载时, 土体内部孔隙水压力变化如图 7 所示. 在冻融初期, 由于荷载对土体的挤压作用, 土体内部孔隙水压力基本上都是呈快速增大的趋势, 之后, 孔隙水压力开始呈周期性变化. d3 位置处的孔隙水压力变化与其他位置有所不同, 冻融初期, 孔隙水压力呈增大的趋势, 但增大速率小于其他位置, 之后, 其继续呈近似于线性地增大.

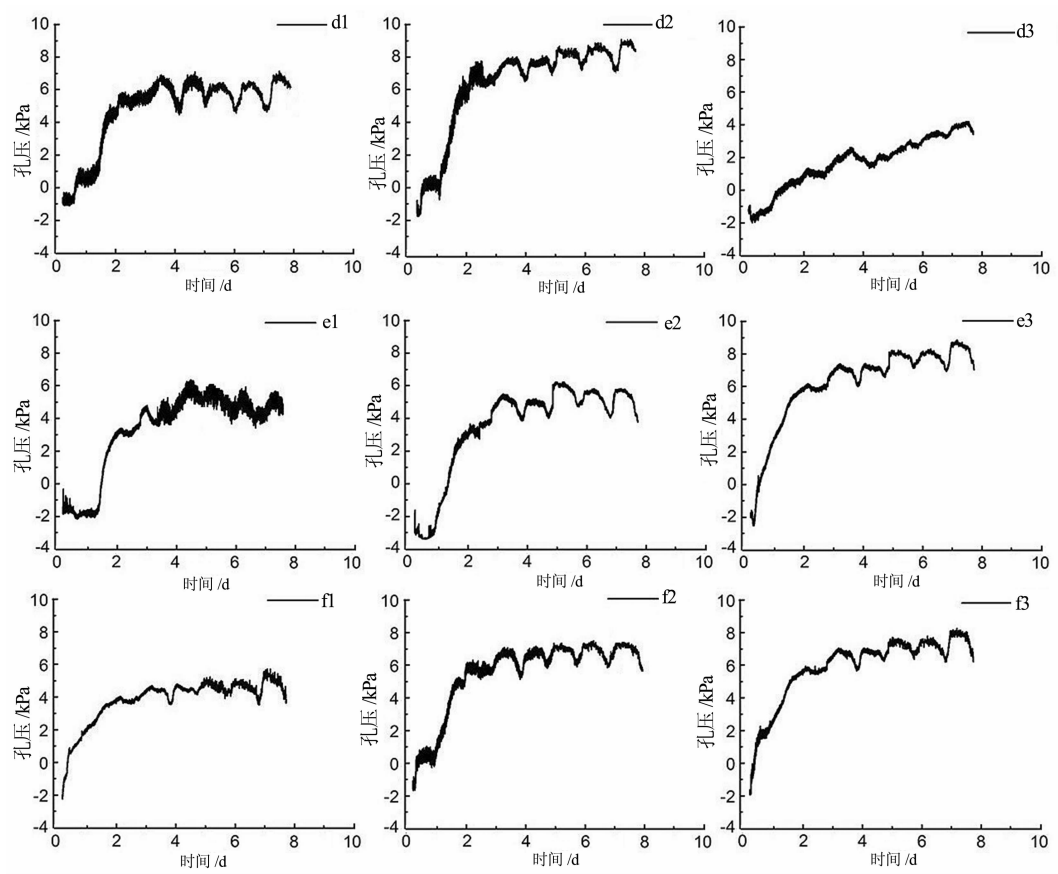


图 7 土体内部孔隙水压力变化
Fig. 7 The changing of pore water pressure in soil

孔隙水压力快速增大之后,随着冻融循环次数的继续增加,孔隙水压力开始呈周期性变化,但是不同位置处的孔隙水压力表现出不同的变化趋势.从图 7 中可以看出,由于 d1 和 d2 处于荷载正下方,同一深度土体的孔隙受挤压变形较大,孔隙面积越小,所以 d1 和 d2 位置处的孔隙水压力分别大于 e1,f1 和 e2,f2 位置处的孔隙水压力;而 d3 位置在荷载和土体自重作用下,土体孔隙受挤压变形严重,孔隙内水分受挤压而排出,导致 d3 位置处的孔隙水压力小于 e3 和 f3 位置处的孔隙水压力. d 位置上的孔隙水压力随深度的增加先增大,后减小;e 和 f 位置上的孔隙水压力则随深度的增加,始终呈增大的趋势. 同一深度横向比较发现 d1, e1,f1 位置处的孔隙水压力变化趋势相似,都是先快速增大,然后趋于稳定的周期性变化;d2,e2,f2 位置处的孔隙水压力在快速增大后,都呈周期性变化,但 d2 位置处的孔隙水压力整体上呈缓慢增大的趋势;d3 位置处的孔隙水压力始终呈近似于线性的增大趋势,e3 和 f3 位置处的孔隙水压力在快速增大后,整体上都呈缓慢增大的周期性变化.

综上所述,静荷载和冻融循环双重作用下土体内部孔隙水压力变化可分两个阶段:快速增大阶段

和周期性缓慢增大阶段. 在开始阶段,孔隙水压力主要受土体自重和静荷载的影响,此时土体内部孔隙水压力呈快速增大趋势;之后,静荷载对土体作用趋于稳定,随着冻融循环次数的增加,孔隙水压力开始随温度呈周期性稳定变化或者周期性缓慢增大.

2.3 水分变化

本次模型试验由于水分数据采集仪的问题导致前两个周期水分数据丢失,所以水分数据从第三周期开始,土体内部水分变化如图 8 所示. 从图 8 中可以发现,随着冻融循环次数的增加,土体内部水分呈周期性变化. 在冻融初期,由于冻融循环作用和补水系统的存在,导致水分向土体上部迁移,土体内部 1,2 位置处的含水量明显高于初始含水量;3 位置处的含水量与初始含水量接近. 沿深度方向,土体内部各位置处的含水量变化为:d 和 g 位置处的含水量随深度的增加而减小;e 和 f 位置处的含水量随深度的增加先增加,后减小. 沿同一深度方向, d1-g1 位置处的含水量呈先减小,后增大的趋势;d2-f2 位置处的含水量基本保持不变,但 g2 位置处的含水量明显小于 d2-f2 位置处的含水量;d3-g3 位置处的含水量则始终呈减小的趋势.

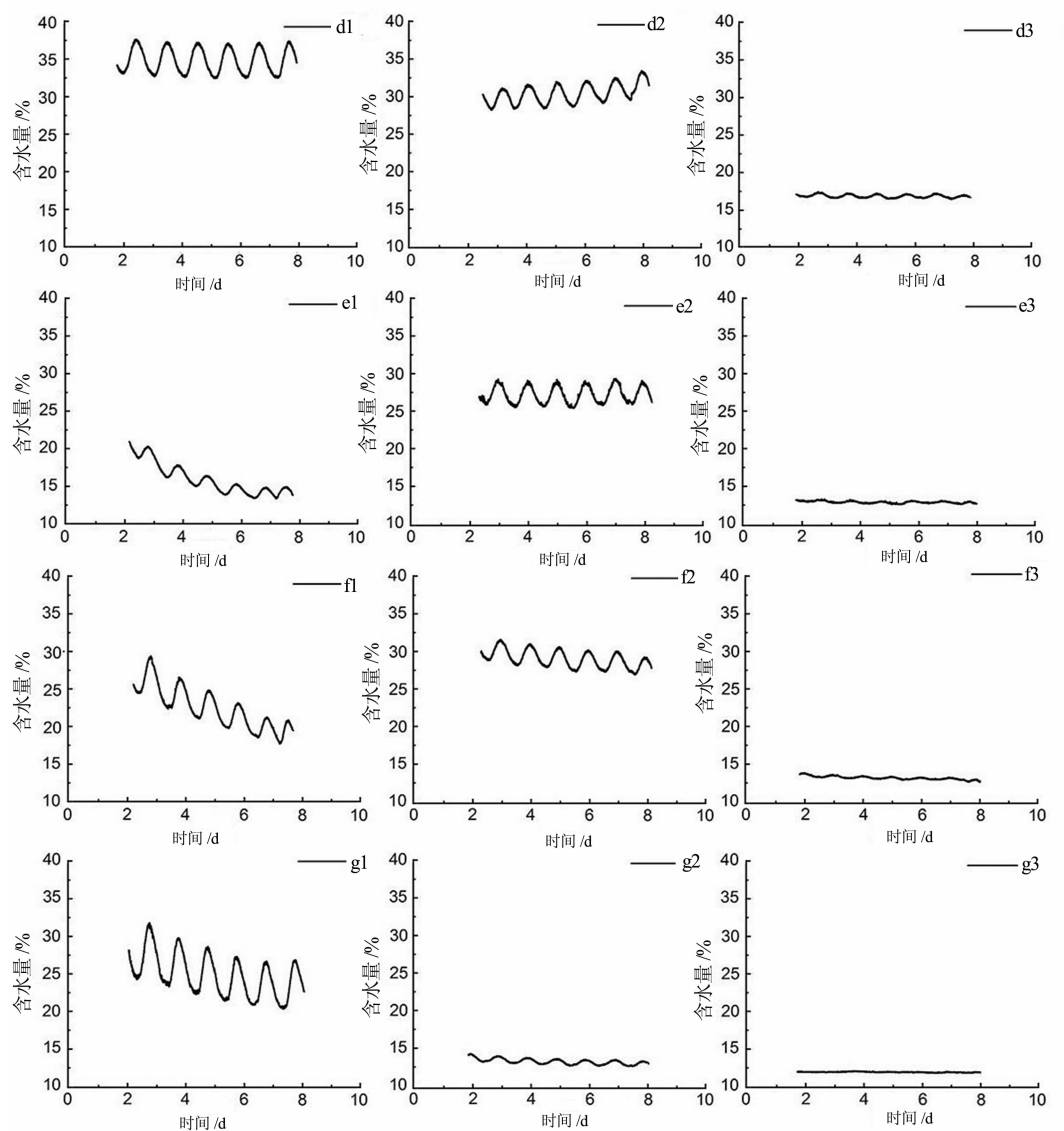


图 8 土体内部水分变化
Fig. 8 The changing of moisture in soil

由于 d 位于荷载正下方,在荷载应力和自重应力作用下,土体孔隙受挤压变形,孔隙面积减小,孔隙的毛细力增大,土体的持水性增强,在冻融作用下,水分向上迁移,并在 1 位置处聚集,导致 1 位置处的水分含量最高;而 g 位于土体边缘,荷载应力影响较弱,孔隙持水性较差,水分在自重作用下向下迁移,导致 g 位置处的水分含量沿深度方向呈减小趋势.同理,e 和 f 位于荷载边缘,荷载横向应力作用导致 e2 和 f2 位置处的孔隙面积减小,孔隙的毛细力增大,土体的持水性增强;而 e1 和 f1 位置处的荷载横向应力影响较弱,孔隙毛细力较小,土体的持水性较差,水分在自重作用下向下迁移,导致 e2 和 f2 位置处的水分含量增大,而 e1 和 f1 位置处的水分含量减小.土体底部 3 位置处的水分含量与土样的初始含水量比较接近,原因是土体自重应力导致土体

孔隙挤压变形严重,孔隙容积减小,水分充填于孔隙内部,导致底部水分含量变化不大.

2.4 荷载下方孔隙水压力 and 水分变化

保温试验箱内荷载下方土体的温度、孔隙水压力和水分随冻融循环次数的增加而变化.选取处于荷载正下方中线 d 位置处的温度、孔隙水压力和水分数据进行分析,结果如图 9 所示.其中 T 表示温度, P 表示孔隙水压力, W 表示含水量.选择周期性较好的第 7 周期进行单周期分析发现,荷载下方的孔隙水压力和水分含量随温度的变化相似.在 d1, d2 位置,当温度从最大值下降到最小值时,孔隙水压力和水分含量都是先增大,后减小;当温度从最低值升高到最大值时,孔隙水压力和水分含量则都是先减小,后增大,随着温度的变化,孔隙水压力和水分含量的变化具有一致性. d3 位置处由于温度变化

幅度较小,而且静荷载作用影响较弱,导致孔隙水压力和水分的变化规律不明显. 孔隙水压力随温度的变化与土中水的毛细势和吸附势变化有关:毛细势和冰水界面的曲率半径有关,曲率半径越大,毛细势越大,孔隙水压力越大;吸附势和未冻水膜的厚度有关,未冻水膜的厚度越大,吸附势越大,孔隙水压力越大. 温度升高,土体内的毛细势和吸附势均增大,孔隙水压力增大,反之,孔隙水压力减小.

从图 9 中可以发现,d1 和 d2 位置处的孔隙水压力 and 水分含量随温度的变化具有滞后性. 孔隙水压力表现出滞后性的原因是,降温过程中,土体内的毛细势和吸附势均变小,孔隙水压力减小,当温度降低到冰点以下时,土体内部发生冰水相变,水冻结成冰,土体孔隙中的自由水含量降低,孔隙水压力进一步减小,由于土体孔隙中自由水含量的最低值是在

最大冻结深度出现时,所以在最大冻结深度出现之前,孔隙水压力将持续减小,因为最大冻结深度在最低温度之后,所以孔隙水压力相对于温度变化具有滞后性;随着温度的升高,土体内部冻结锋面开始向上移动,冰开始相变成水,首先导致土体内部未冻水含量升高,孔隙水压力增大,然后随着温度的进一步升高,土体内部自由水含量开始快速升高,孔隙水压力将继续增大,但是由于冰完全融化成水需要一定时间,当温度达到最大值时,土体内的冰没能完全融化,土体内自由水含量未达到最大值,孔隙水压力也未达到最大值,所以孔隙水压力的最大值在最高温度之后. 同理,由于孔隙水压力的变化与水分含量有着直接关系,所以随着温度的变化,水分含量的变化也具有滞后性.

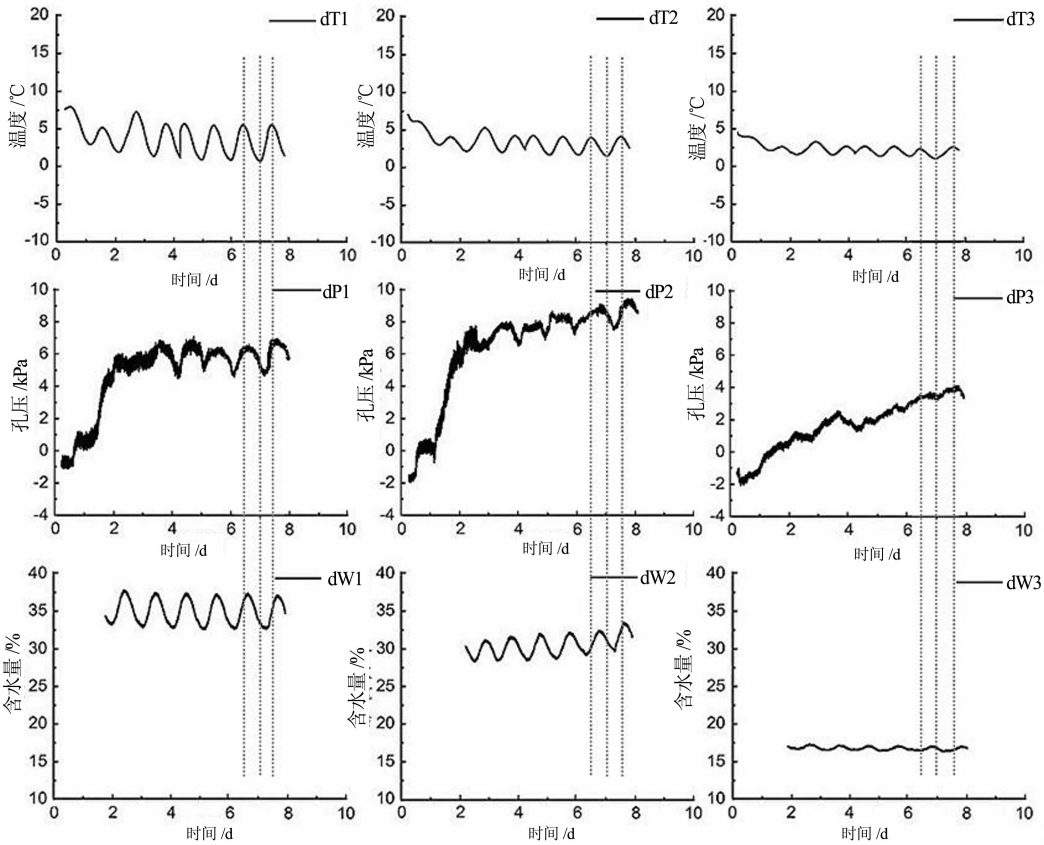


图 9 中线位置温度、孔隙水压力和水分的变化
Fig. 9 The changing of temperature, pore water pressure and moisture in middle line

3 讨 论

3.1 荷载下方应力场分布

当地基表面宽度为 B 的条形面积上作用竖向

均布荷载 p 时如图 10 所示,地基内任意点 M 的纵向应力和横向应力可以由公式(1)和(2)求得^[18].

$$\sigma_z = K_z^s p \tag{1}$$

$$\sigma_x = K_x^s p \tag{2}$$

式中: σ_z 为纵向应力; σ_x 为横向应力; K_z^s, K_x^s 分别

为条形面积受均布荷载作用时的竖向附加应力分布系数,水平向应力分布系数. 其值可按 $m(=\frac{x}{B})$ 和 $n(=\frac{z}{B})$ 的数值查表得到.

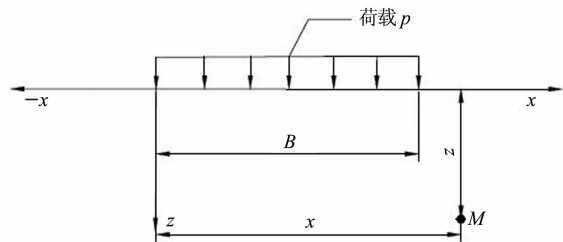


图 10 竖向均布荷载作用下任意点应力
Fig. 10 The vertical stress at any point under uniformly distributed load

本次模型试验施加的静荷载为 5 kPa, 根据条形荷载在土体中的应力计算公式, 计算出静荷载作用下, 土体内部应力场分布如图 11 所示.

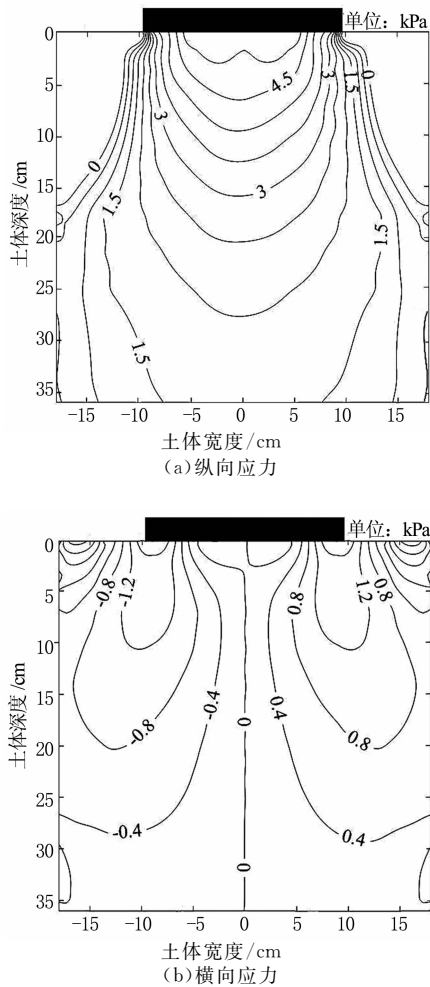


图 11 静荷载作用下土体内部应力分布
Fig. 11 The distribution of stress under the static load in soil

从图 11 中可以发现随着深度的增加, 纵向应力和横向应力都减小. 纵向应力主要集中在静荷载下方, 而横向应力则集中在静荷载两侧的土体.

3.2 孔隙水压力的变化云图

随着冻融循环次数的增加, 荷载和无荷载两种条件下, 土体纵向剖面上的孔隙水压力变化如图 12 所示. 从图中可以发现, 在一个冻融循环周期内, 温度越高, 孔隙水压力越大, 反之, 孔隙水压力越小, 这主要和土体内部孔隙内自由水的毛细势和未冻水膜的吸附势有关.

在无荷载条件下, 如图 12(a) 所示. 由于孔隙水压力传感器的布设范围为 $(-23.3 \sim 23.3 \text{ cm})$, 而土体宽度范围为 $(-35 \sim 35 \text{ cm})$, 导致土体两侧 $(-35 \sim 23.3 \text{ cm})$ 和 $(23.3 \sim 35 \text{ cm})$ 范围内的孔隙水压力由插值得到, 误差较大, 可以忽略, 不予分析, 即仅分析 $(-23.3 \sim 23.3 \text{ cm})$ 范围内的孔隙水压力变化. 从图 12(a) 中可以发现, 在土体底部, 由于土体自重应力的影响, 导致底部孔隙水压力较大, 而上部孔隙水压力较小. 随着冻融次数的增加, 孔隙水压力逐渐增大, 这与土体内部水分的迁移有关.

在荷载条件下, 随着深度的增加, 土体自重开始影响土体内的孔隙水压力, 而且土体内部的水分场也发生变化, 导致荷载下方孔隙水压力的最大值并不是在靠近荷载的位置, 而是在荷载下方 20 cm 处. 从图 12(b) 中还可以发现在荷载两侧 30 cm 深度处也有孔隙水压力集中区域, 这是因为荷载两侧土体在荷载横向应力和土体自重共同作用下, 挤压变形, 导致两侧土体孔隙面积减小, 形成孔隙水压力集中区, 但是由于荷载两侧横向应力相对于纵向应力较弱, 荷载两侧的孔隙水压力集中区域的位置比荷载下方孔隙水压力集中区域的位置更深. 通过图 11 和图 12 对比分析发现, 静荷载产生的横向应力在土体内部的分布与孔隙水压力的分布相似, 说明静荷载两侧的孔隙水压力与其在土体内产生的横向应力有关. 随着冻融循环次数的增加, 土体内水分向冻结锋面迁移, 并在土体内部发生重分布, 导致土体内部孔隙水压力集中区域的面积有逐步扩大的趋势.

综上所述, 在冻融循环条件下, 静荷载产生的应力场影响着孔隙水压力在土体内部的空间分布, 而且一定程度上影响着水分的空间分布; 冻融作用则通过影响土体内水分的迁移和重分布来影响孔隙水压力的大小. 所以, 在冻融作用下, 土体内部孔隙水

压力自下而上逐渐增大,而在冻融和静荷载双重作用下,土体内孔隙水压力集中在荷载下方 20 cm 处

和荷载两侧 30 cm 深度处,而且随着冻融循环次数的增加,孔隙水压力也呈增大的趋势。

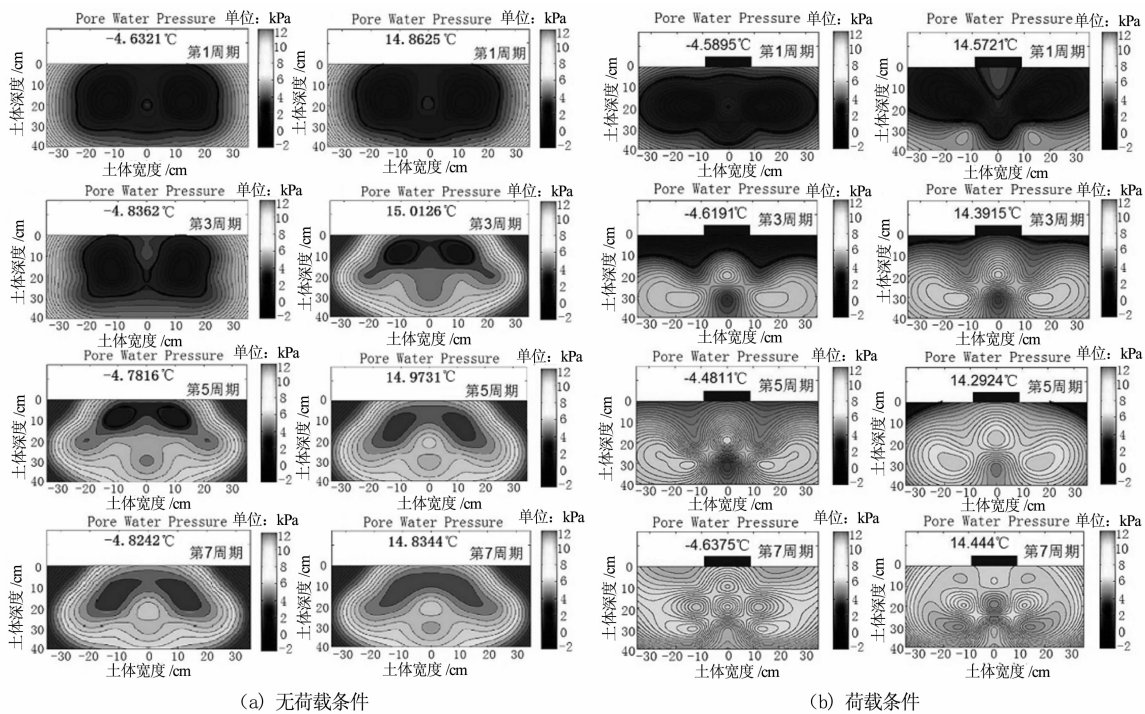


图 12 无荷载、荷载条件下土体表层温度极值时孔隙水压力场
Fig. 12 Pore water pressure field's change on the temperature extremes of soil surface under conditions of no load and load

3.3 水分场的变化云图

无荷载条件下,土体内部的水分场变化如图 13 (a)所示,从图中可以发现,冻融第一周期到第七周期,土体上部颜色逐渐变浅,说明随着冻融循环次数的增加,土体内部水分含量变大,而且在距表层 0~20 cm 范围内形成 2 个面积较大、含水量较高的区域. 土体内部含水量出现这种变化的原因是在冻结过程中,根据热胀冷缩原理,土体内部所有成分在温度下降时体积收缩,形成真空地带,在这种真空吸力作用下,土体下部水分向上迁移,随着冻融次数的增加,土体上部水分含量开始逐渐增大.

静荷载条件下,由于水分数据采集仪的问题导致前两个周期水分数据丢失,所以从第三周期开始讨论土体内部的水分场的变化. 从图 13(b)中可以发现,随着冻融循环次数的增加,土体内部距土表层 20 cm 内的水分含量增大,原因是在冻结过程中水分向冻结锋面迁移,在融化过程中水在自重作用下向冻结前的位置迁移,但是由于土的阻滞力作用,水分不能返回原位置,导致土体内部水分的重分布. 从

图 13(b)中可以发现,在荷载正下方有一个水分集中区;在荷载两侧,距表层 10 cm 处有两个低含水量区,距表层 20 cm 位置处则有两个水分含量较大区域. 荷载下方出现水分含量集中区域的原因是静荷载的挤压作用导致荷载下方土体内部孔隙面积减小,土体孔隙的毛细力增大,在冻结过程中,土体下部水分更快向上迁移,在荷载下方形成高含水量区. 荷载两侧距表层 10 cm 处出现低含水量区域的原因是荷载两侧的土体受荷载挤压变形,孔隙内水分向下迁移,导致荷载两侧含水量低,而且由于荷载两侧纵向应力较弱,孔隙毛细力较小,随着冻融循环作用的进行,孔隙毛细力的吸水作用较弱,导致水分向上迁移量减小,形成低含水量区域. 随着冻融循环次数的增加,水分向冻结锋面迁移,导致低含水量区域的面积逐渐减小;在距荷载较远的位置,由于荷载作用较弱,土体孔隙挤压变形较弱,水分向上迁移量大,导致保温试验箱壁与土体表层交汇处出现水分集中区域.

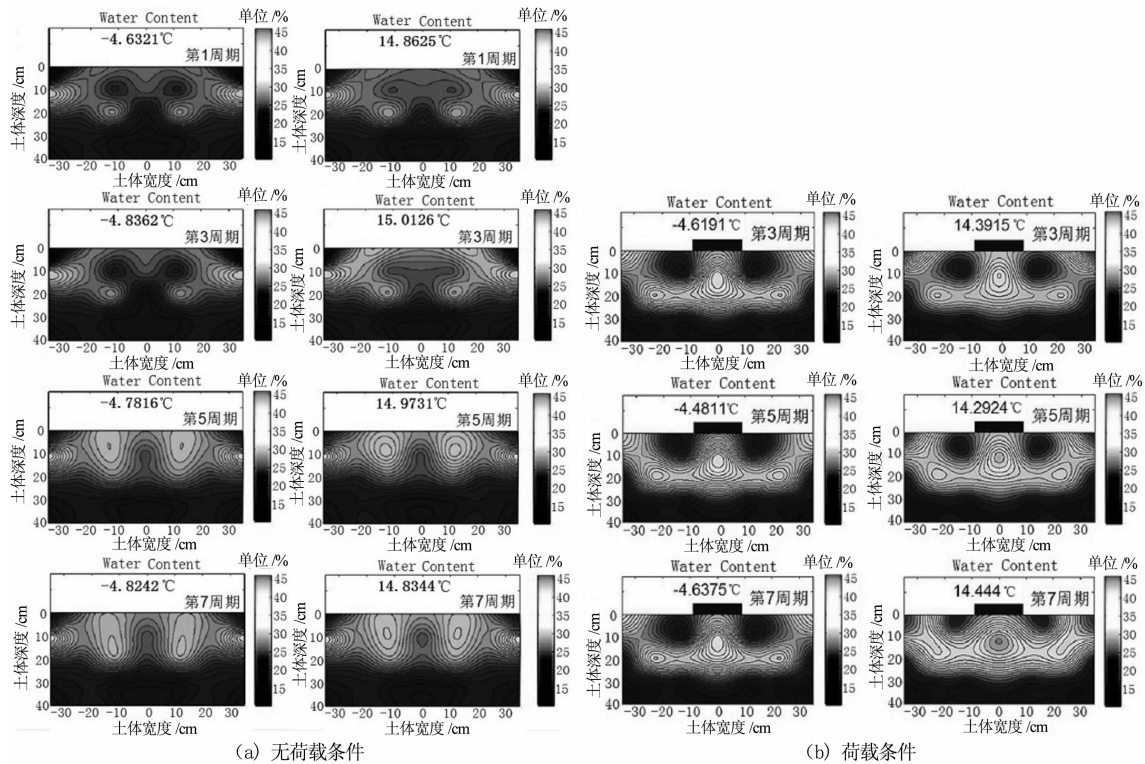


图 13 无荷载、荷载条件下土体表层温度极值时水分场变化

Fig. 13 Moisture field's changing on the temperature extremes of soil surface under conditions of no load and load

4 结 论

1)冻融和静荷载双重作用下土体内部孔隙水压力变化可分两个阶段:快速增大阶段和周期性缓慢增大阶段。

2)在一个冻融周期内,孔隙水压力 and 水分含量都随温度的升高而增大,随温度的降低而减小;孔隙水压力 and 水分含量随温度的变化表现出一致性,而且相对于温度变化,孔隙水压力 and 水分含量的变化都具有滞后性。

3)冻融作用导致土体内部孔隙水压力 and 水分含量随冻融次数的增加而增大;而静荷载作用则导致孔隙水压力在土体内部形成三个集中区域,而且集中区域的位置和荷载应力场有直接关系。

4)荷载的挤压作用导致荷载下方和两侧土体孔隙面积都减小,水分排出,含水量减小;但是随着冻融循环次数的增加,荷载下方土体孔隙具有更大的毛细力,水分向上迁移的驱动力更强,在荷载正下方形成高含水量区。

参考文献

[1] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils [J]. Engineering Geology, 1979, 13(1/4): 73—92.

[2] INGLES D R. Particle sorting and stone migration by freezing and thawing [J]. Science, 1965,148(3677):1616—1617.

[3] 王宁, 毛云程, 张得文, 等. 冻融循环对季节冻土区黄土路堑边坡的影响[J]. 公路交通科技, 2011(4): 79—84.

WANG Ning, MAO Yuncheng, ZHANG Dewen, *et al.* Influence of freezing—thawing cycles on loess slope in seasonal frozen soil regions [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2011(4): 79—84. (In Chinese)

[4] 雒姐丽, 毛雪松. 湿度对青藏公路多年冻土路基稳定性的影响[J]. 路基工程, 2011(6): 5—7.

LUO Niuli, MAO Xuesong. Influence of humidity on permafrost subgrade stability in Qinghai-Tibet highway [J]. Subgrade Engineering, 2011(6): 5—7. (In Chinese)

[5] 周健, 王连欣, 贾敏才, 等. 颗粒组对泥石流形成形态影响研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(1): 8—14.

ZHOU Jian, WANG Lianxin, JIA Mincai, *et al.* Influence of grain size distribution on the formation of debris flow [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2014, 41(1): 8—14. (In Chinese)

[6] 徐敦祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 13.
XU Xiaozu, DENG Yousheng. Experimental study on moisture migration in permafrost [M]. Beijing: Science Press, 2001: 13. (In Chinese)

[7] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 196—197.
XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of Frozen Soils [M]. Beijing: Science Press, 2001: 196—197. (In Chinese)

[8] CHENG Guodong. The mechanism of repeated segregation for formation of thick layered ground ice [J]. Cold Region and Technology, 1983, 8(1): 57—66.

[9] 徐敦祖. 土水势、未冻水含量和温度[J]. 冰川冻土, 1985, 7(1): 1—14.
XU Xiaozu. Soil-water potential and unfrozen water content and temperature [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, 7(1): 1—14. (In Chinese)

[10] IWATS S. Driving force for water migration in frozen clayed soil [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1980, 26(2): 215—227.

[11] 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 Jilin, MA Wei. Influence of freezing-thawing on strength of overconsolidated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2082—2086. (In Chinese)

[12] AKAGAWA S, HIASA S, KANIE S, *et al.* Pore water and effective pressure in the frozen fringe during soil freezing[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks, Alaska, USA: University of Alaska Fairbanks, 2008: 13—18.

[13] 张莲海, 马巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1856—1864.
ZHANG Lianhai, MA Wei, YANG Chengsong. Pore water pressure measurement for soil subjected to freeze—thaw cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1856—1864. (In Chinese)

[14] EIGENBROD K D, KNUTSSON S, SHENG D. Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(2): 77—92.

[15] HARRIS C, DAVIES M C R. Pressure recorded during laboratory freezing and thawing of a natural silt-rich soil [C]// 7th international conference on permafrost. Yellowknife, Canada: Don Hayley of EBA Engineering Consultants Ltd, 1998: 433—439.

[16] 石峰. 动荷载条件下冻土融化固结与变形研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2014: 46—47.
SHI Feng. Consolidation and deformation of thawing soil under dynamic loading [D]. Beijing: Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, 2014: 46—47. (In Chinese)

[17] 张虎. 高温-高含冰量冻土沉降变形机理分析及数值计算[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2013: 45.
ZHANG Hu. Mechanism analysis and numerical simulation on the settlement of warm and ice-rich permafrost[D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2013: 45. (In Chinese)

[18] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 81—84.
CHEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin. Soil Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 81—84. (In Chinese)