

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.05.015

青藏粉质黏土单向冻结冷生构造发育 及冻胀发展过程试验研究

王永涛^{1,2}, 王大雁¹, 马 巍¹, 穆彦虎¹, 关 辉¹, 顾同欣¹

(1.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 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)

摘 要:通过对青藏饱和粉质黏土进行开放条件下的单向冻结试验,并结合土样冻结过程的图像数据,分析土样在单向冻结过程中冷生构造的发育和冻胀变形的发展规律,得到以下结论:试样冻结稳定所需时间为 26 h 左右,基本不受顶板温度变化的影响,但土样冻结后形成不同冷生构造带的位置及薄厚与土样顶板温度(顶底板温度梯度)密切相关,顶板温度越低,微薄层状和薄层状构造带的厚度越大,最暖端厚层冰透镜体以及未冻土部分整体状构造带的厚度越小。研究结果还表明,土样的冻胀变形经历了快速冻胀、稳定冻胀和线性冻胀 3 个阶段,其中线性冻胀阶段是冻胀发展最快的阶段,也是冰透镜体生长最快的阶段。研究成果揭示了土样单向冻结过程中冷生构造发育和冻胀发展的动态过程,为冻胀机制的认识以及冻胀模型的建立与验证提供了试验基础。

关 键 词:单向冻结;数字图像采集技术;冷生构造;冻胀变形;水分迁移

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 05 - 1333 - 10

Experimental study of development of cryostructure and frost heave of the Qinghai-Tibet silty clay under one-dimensional freezing

WANG Yong-tao^{1,2}, WANG Da-yan¹, MA Wei¹, MU Yan-hu¹, GUAN Hui¹, GU Tong-xin¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on one-dimensional freezing test at five different top cooling temperatures in an open system, the freezing behaviors of the saturated Qinghai-Tibet silty clay are studied experimentally. Combining with digital image acquisition technology and routine data measure system in laboratory, the temperature distribution and development, cryostructure profile development, frost heave development, water supplement process and water content profile are analyzed during one-dimensional freezing of soil sample. Some conclusions are drawn as follows. Firstly, the freezing front in sample reaches a stable state after 26 hours. After that, the longitudinal cryostructure of soil samples can be divided into four belts, including tiny thin layer structural belt, thin layer structural belt, thick layer structural belt and overall structure belt from the cold end to warm end. The frost heave development contains three stages, i. e. fast frost heave stage, stable frost heave stage and linear frost heave stage. The ice lens segregation at the bottom of thin layer structural belt and thick layer structural belt are the main source of frost heave. After tests, the water content profiles of the soil sample indicate that the water content increases in frozen part and decreases in unfrozen part. Meanwhile, the layers in which having the highest water content are located at the location of thick ice lenses. Because of the consolidation of the unfrozen part and water migration from unfrozen part to freezing front and frozen part, the water content of the unfrozen part has decreased and induced a drying phenomenon. The conclusions have provided the dynamic processes of the development of cryostructure and frost heave of the Qinghai-Tibet silty clay under one-dimensional freezing. It is expected that this study will provide a test basis for future study of more reasonable frost heave models.

Keywords: one-dimensional freezing test; digital image acquisition technology; cryostructure; frost heave; water migration

收稿日期: 2014-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41071048); 冻土工程国家重点实验室基金(No. SKLFSE-ZT-17); 国家自然科学基金创新群体(No. 41121061). This study was funded by the National Natural Science Foundation of China(41071048), the Foundation of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering(No. SKLFSE-ZT-17) and the Innovative Research Group of National Natural Science Foundation of China(41121061).

第一作者简介: 王永涛, 男, 1989 年生, 博士, 主要从事冻土物理力学方面的研究工作。E-mail: wangyongtao@lzb.ac.cn

通讯作者: 王大雁, 女, 1971 年生, 博士, 研究员, 主要从事冻土物理力学方面的研究工作。E-mail: dywang@lzb.ac.cn

1 引言

在寒区工程建设和运营期间,冻胀是引起工程病害的主要因素之一,可导致如房屋基础、公路铁路路基、桥梁、涵洞等的不均匀隆起,石油管道的翘曲、人工冻结井壁的开裂破坏以及边坡失稳等工程问题^[1-3]。随着国民经济的发展,我国在多年冻土区和季节冻土区相继开展了一系列的重大工程建设,不可避免地将遇到土体冻胀问题,以新建的哈大高速铁路为例,冻胀问题成为影响铁路路基稳定性的主要因素。因此,土体冻胀变形发展机制及过程一直是科研人员及寒区工程设计人员关心的科学问题。

对于土体冻胀的研究,最早开始于19世纪20年代^[4-5]。随着研究的深入,人们已经认识到水分迁移和冰分凝是冻胀的基本内在过程,冻胀敏感性的土体、充足的水源补给以及合适的温度梯度是冻胀发生的基本条件^[6]。

在理论研究方面,国外学者相继提出了包括毛细理论^[7]、冻结缘理论^[8],并建立了水热模型^[9]、分凝势模型^[10-12]、刚性冰模型^[13-14]、热力学模型^[15]、水-热-力耦合模型^[16]等冻胀预报模型,在上述已有模型基础上,国内学者Li等^[17]提出了考虑相变作用的水-热-力耦合模型。周扬等^[18]提出了饱和土的水-热耦合分离冰模型。Sheng等^[19-22]提出了通过输入少量参数便能较准确地预测冻胀量和冻深的冻胀模型PCHeave,并在哈大高速铁路路基冻胀模拟中得到了应用,解释了路基冻胀变形的可能原因。Zhou等^[23]提出了非饱和土冻结过程中水分迁移的移动泵(moving-pump)模型。Kurylyk等^[24]对1970年以来的主要的冻胀模型进行了详细的总结与探讨。这些模型的提出对于冻胀模型建立、冻胀原理的探索以及冻胀的工程灾害预报方面作出了重要的贡献。

在试验研究方面,由于外界水的补给对于冻胀变形的发展非常关键,因此室内试验多采用开放系统下的单向冻结试验。其中,张婷^[25]、唐益群^[26]、王天亮^[27]、胡坤^[28]、郗慧^[29]、蔡海兵^[30-31]等分别对不同类型的土体在单向冻结过程中的冻胀特性进行了试验研究,考虑了包括含水率、冷端温度、干密度、约束条件、含盐量、地应力等因素对土体冻胀特性的影响,但这些研究的重点主要集中在土体冻胀率、冻胀变形及冻胀力等最终状态的试验测试方面,并未涉及冻胀变形发展机制及冷生构造形成过程。对于土体冻结过程中的冷生构造,王家澄等^[32-33]对不同土质、温度梯度和压力条件下土冻胀过程中

的成冰过程,以及冻胀试验结束后冷生构造进行了研究。Peterson^[34]对土体冷生结构的形成过程及影响因素进行了研究。徐学祖等^[35]将黏土冻胀后的冷生构造划分为整体状构造带、纤维状构造带、微薄层状构造带、冻结缘层状构造带以及未冻土带。但由于当时试验测试条件的限制,上述冷生构造的研究主要以定性描述为主,无法开展定量分析。

针对以上研究的不足,具有实时性、直观性、定量性的数字图像方法^[36]逐渐被引入到对冻胀过程的研究中来。李萍等^[37]在前人探索的基础上^[38-40],在国内首次使用了复形膜技术,实现了冰分凝静态试验结果向冰分凝动态过程分析的反演转化,分析了饱水正冻土中冻结缘成因和特征。ARENSEN等^[41-42]采用了高分辨率摄像头,对Devon粉土的冻结过程中冰分凝的过程进行了拍摄,并使用粒子图像测速技术对冰晶生长和土体固结过程中位移变化进行了分析,提出了竖向冻结裂隙的出现为水分迁移提供了通道的假说。Zhou等^[43]利用高分辨率显微镜对黏土的冻结过程进行了拍摄,通过对采集图像的二值化处理,得到了最暖端冰透镜体随时间生长的过程。这些研究对土体冻胀机制及冷生构造发展过程进行了有益的探索,为这一领域的试验研究提供了新的思路。基于此,本文利用高像素CCD成像装置对不同温度梯度下青藏粉质黏土在开放条件下的冻结过程进行间隔时间拍摄,通过图像处理技术对土样冻结过程中的冷生构造发育和冻胀变形过程进行研究,通过分析冻胀变形机制和来源,以期对未来土体冻胀预报模型的建立及验证提供试验基础。

2 试验方法

2.1 试验土样

由于原状土样存取困难,且土质参数不易控制,在对土体冻胀规律的认识过程中,常常采用重塑土样进行试验^[24-29]。为此,本研究将采用取自青藏高原北麓河盆地的冻胀性较为敏感的粉质黏土作为试验用土。试验前将所取土风干碾碎过2 mm筛,对过筛后土进行粒径分析,得到土的颗粒分析曲线,如图1所示,并对土的液、塑限进行测试,测得液限为23.5%,塑限14.0%,塑性指数为9.5。

2.2 试验设备及方法

该试验装置是在冻土工程国家重点实验室的冻融循环试验机^[44]的基础上进行改进而成,试验装置示意图如图2所示。整套试验装置由土样承载装置、温度控制装置、温度和位移采集装置、补水装置、数字图像采集装置以及照明装置6部分组成。

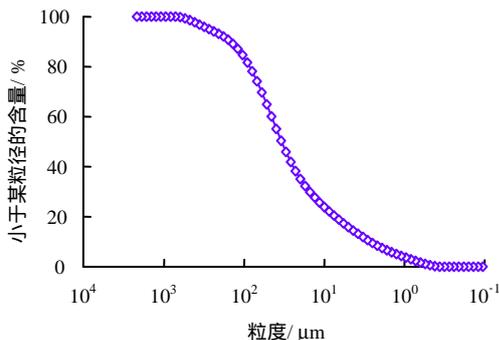


图 1 青藏粉质黏土颗分曲线

Fig.1 Gradation curve of the Qinghai-Tibet silty soil

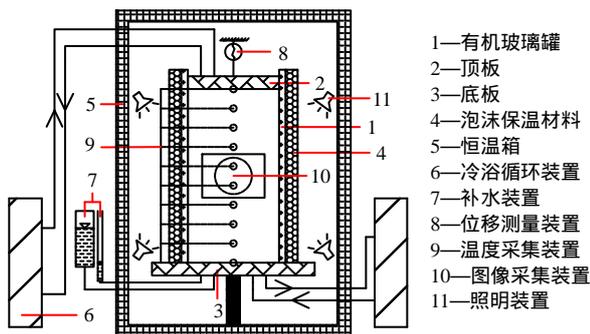


图 2 土样单向冻结试验系统示意图

Fig.2 The apparatus of one-dimensional freezing test

(1) 土样承载装置：为自行设计并加工的持土罐，由半圆形的有机玻璃罐和冷液均匀循环的顶底板组成，如图 3 所示。土样置于顶板和底板之间的有机玻璃罐中，有机玻璃罐内壁尺寸为内半径为 10 cm、高为 30 cm、壁厚为 2 cm。

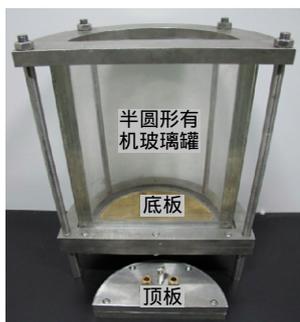


图 3 土样承载装置

Fig.3 Soil sample container

(2) 温度控制装置：如图 2 所示，土样上、下端的温度由连接顶底板的冷浴循环系统进行控制，冷浴内部温度控制精度为 ± 0.1 。为了减少土样散热，装土的有机玻璃罐外边半圆形部分用泡沫保温材料进行包裹。整个试验承载装置都置于控温精度达 ± 0.1 的恒温箱中。

(3) 温度和位移采集装置：土样中的温度变化是通过在土样中间隔 1 cm 布置一个热敏电阻进行测量，测量精度为 ± 0.05 。土样的变形通过在顶板设置位移计进行测量，测量精度为 ± 0.01 mm。

(4) 补水装置：由马廖特瓶进行开放系统下的无压补水。

(5) 数字图像采集装置：采用分辨率为 $4\,416 \times 3\,312$ 的 CCD 成像装置对半圆形有机玻璃罐平面部分土样进行垂直拍摄。拍摄前在罐体边缘设置刻度尺，用于后期的变形校正。试验中图像采集的时间间隔为 5 min，采集范围为持土罐宽度方向为 18 cm，高度方向为 15 cm，图像采集及分析的精度可达 0.02 mm。试验过程中 CCD 成像装置的位置以及成像的设置参数尽量保持不变，以保证图像在精度上的一致性。

(6) 照明装置：拍摄过程中恒温箱全部封闭，阻挡外界的光线进入，并采用 LED 冷光源提供长期稳定均匀的照明条件。

2.3 试验条件

试验前将土样拌水至设计含水率，在密闭容器中静置 24 h，使水分充分均匀。装样采用分层捣实法，严格控制每次装入土的质量和高度，试验中试样的高度均为 13.5 cm。装样完成后将试样筒放置在室温下恒温 24 h，保证土样内部温度分布均匀，然后在设置的试验条件下（见表 1）进行开放系统下的单向冻结试验，研究不同温度梯度下土样在有外界水源补给时的冻胀过程与特性。

表 1 青藏粉质黏土室内冻胀试验条件
Table 1 Experimental conditions of frost heave test

土质	温度设置/			补水 条件	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)
	顶板	底板	箱温			
青藏粉 质黏土	-5、-7、-9、-11、-13	+5	+5	开放 系统	19	1.83

试验过程中由于冷浴循环管路的热量损失，冻结稳定后实测的顶底板温度未达到设计值。冻结 120 h 实测顶板温度值分别为 -3.14、-3.89、-5.66、-8.97、-9.88。试验中所采用的温度探头的精度可达 ± 0.05 ，本文全部以实测值进行分析。

3 试验结果与分析

3.1 土样冻结过程及温度分布

图 4 为土样中的温度分布图，其中，图 4(a)~(e)分别为不同顶板温度下土样冻结过程中温度的

变化情况。图4(f)为冻结120 h后土样中纵剖面的温度分布情况。从图4(a)~(e)可以看出,在冻结初期,土样中的温度迅速下降,之后降温速率逐渐减小并在26 h之后趋于稳定。图中黑色曲线为土样中冻结锋面的前移规律,冻结锋面的位置以土样在试验所设计的干密度和含水率情况下测试的冻结温度(-0.31)为依据进行确定,冻结锋面以上为已

冻区,以下为未冻区。冻结锋面的稳定位置随着顶板温度的降低逐渐加深。从图4(f)中可以看出,土样冻结120 h后,纵剖面上的温度分布基本呈线性规律,但在局部位置,温度变化较剧烈,尤其是在已冻区中表现得更为明显,这主要是由于已冻区中的层状冰透镜体改变了土样局部位置的导热系数导致的结果。

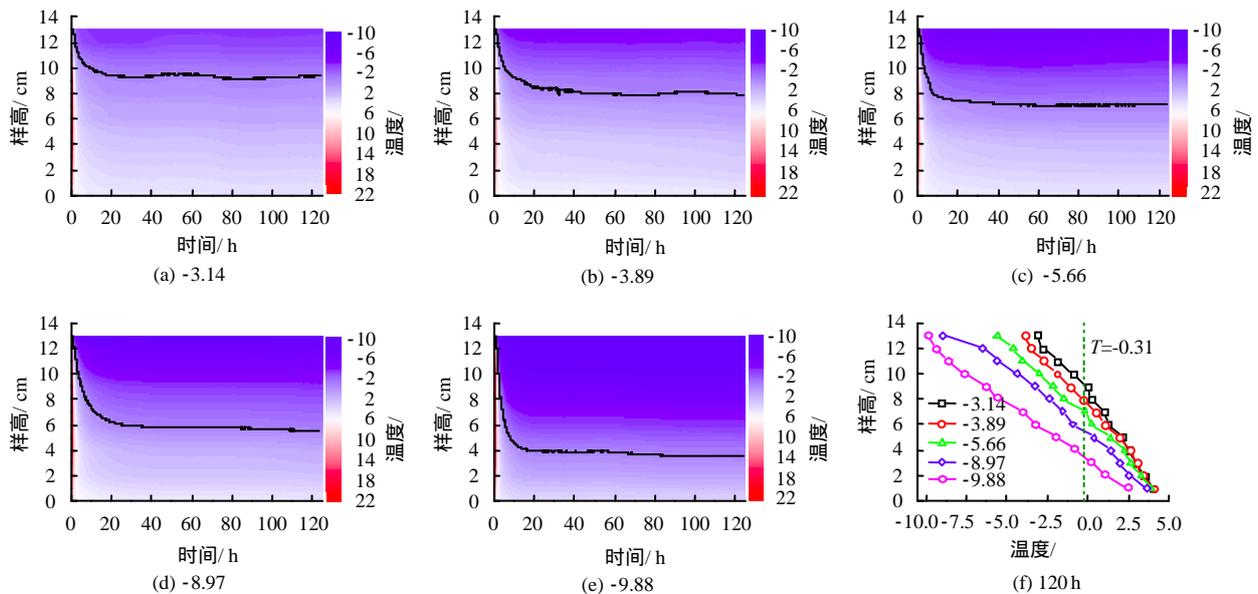


图4 土样冻结过程中温度分布情况

Fig.4 Temperature distribution curves during freezing of soil sample

3.2 土样冷生构造发育过程

土样的冷生构造是指冰晶或冰层与矿物颗粒在空间上的排列和组合形态^[35]。图5为顶板温度为 -3.14 的土样纵剖面高度方向8.0~13.5 cm,宽度方向9~11 cm纵向剖面冻结过程中冷生构造的发育过程。冻结过程中土样纵剖面发育有纵向和横向冰透镜体,其中以横向冰透镜体发育为主,为土样纵剖面冷生构造的主要组成部分。冻结初期,冻结锋面快速发展,微薄层状冰透镜体发育,如图5中a线以上部分,其特点是冰透镜体分布密集,基本呈水平状分布,冰透镜体厚度较薄,且基本不随冻结时间和土样高度发生变化。随后,薄层状冰透镜体发育,如图中ad线之间部分,其特点是层状冰透镜体分布稀疏,多成弯曲状,冰透镜体在冻结过程中逐渐变厚,且层状冰透镜越靠近暖端厚度越大。最后,最暖端厚层状冰透镜体开始发育,如图中dd'线之间部分,其特点是在冻结稳定后,冰透镜体生长迅速,层状发育明显,较规整。最暖端冰透镜体下沿之下(冻结锋面以下)的部分可认为是未冻土部分,在冻结过程中发生压密固结,整体性明显较已冻区要好。

结合图5中的冷生构造形态及前人研究成果^[32-35],可将青藏粉质黏土在试验条件下冻结稳定后纵剖面的冷生构造自冷端向暖端依次划分为微薄层状构造带、薄层状构造带、最暖端厚层冰透镜体构造带、未冻土部分整体状构造带。可以看出,在冻结48 h之后,由于土体冻胀变形的发展,已冻土部分与管壁之间相对运动产生间隙,导致冰晶分凝,对微薄层状构造的演化过程的认识有一定的影响。但从局部细节可以看出,微薄层状构造带的层厚和形态随着后期冻结的变化并不是很大。值得注意的是,薄层状构造带下端和最暖端厚层冰透镜体构造带的形态都发生了明显的变化,冰分凝的厚度随着冻结时间的增加而逐渐变厚,层状形态更加明显。同时,未冻土部分整体状构造带随着冻结时间的推移发生了明显的固结变形。

为了对不同温度梯度下土样冻结相同时间的冷生构造进行比较,图6中选取了所有顶板温度冻结48 h的土样纵剖面高度为0~13.5 cm、宽度为8~12 cm的冷生构造剖面进行对比分析。此时,冻结已经趋于稳定,所有冷生构造的形态也已形成,并

且相比冻结 120 h 的冷生构造剖面，被管壁冰体遮蔽的较少，细节更为明显。从图可以看出，随着顶板温度的降低，微薄层状构造带和薄层状构造带的整体厚度增大，但两个区域中相邻冰透镜体的间距

和冰透镜体本身的厚度都相应减小；最暖端厚层冰透镜体以及未冻土部分整体状构造带的厚度均减小，但是最暖端厚层冰透镜体的层状特性发育更加良好，成层性和平直性明显。

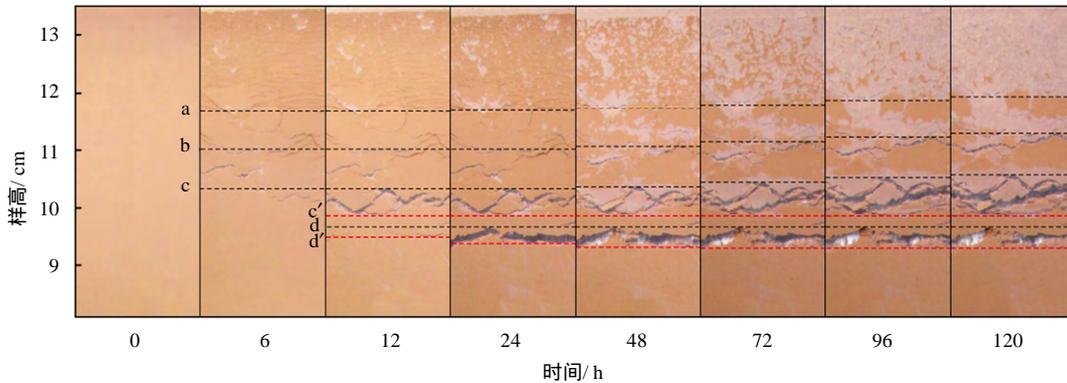


图 5 顶板-3.14 土样冻结过程中冷生构造发育过程

Fig.5 Cryostructure development during the freezing of soil sample with top temperature as -3.14

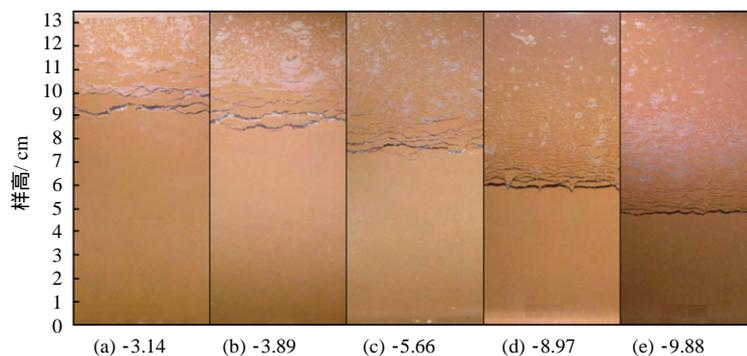


图 6 不同顶板温度下土样冻结 48 h 的冷生构造图

Fig.6 Cryostructure of soil samples after 48 h of freezing with different top temperatures

3.3 土样冻胀变形发展过程

土体冻胀的过程是已冻区内孔隙水原位冻结和水分迁移导致的层状分凝冰的膨胀作用^[35]与未冻土部分的压密固结过程的综合结果^[45-46]。然而，由于孔隙水原位冻结体积只增加 9%，对冻胀的贡献很小，所以冻胀主要是由后两者共同作用的结果。

图 7 给出了不同顶板温度下土样冻结过程中冻胀量随时间的发展规律。根据图中冻胀曲线的形态，不同顶板温度下的土样在试验给定冻结时间内的冻胀过程基本都表现为明显的 3 段特性。如图中虚竖线标识所示，可划分为第 1 阶段：快速冻胀阶段；第 2 阶段：稳定冻胀阶段；第 3 阶段：线性冻胀阶段。

从图 7 可以看出，冻胀第 1 阶段内冻胀迅速发育，但冻胀量较小。该阶段均发生于冻结开始的 1~2 h，冻结深度 0.5~1.5 cm 的范围之内（见图 4(a)~(e)），通过分析以及与试验后含水率的分布情况进行对比，可认为是土样顶端附近的水分在顶板自重

作用下受压后水分发生集聚，造成局部含水率变大，因此冻结初期出现冻胀量快速增大的现象。

当冻胀进入第 2 阶段，冻胀的速率明显降低，冻胀量的增量明显减小，土样的冻胀量相对稳定。从图 7 中顶板温度 -3.14 的冻胀曲线可以看出，此阶段的截止时间基本在 36~38 h 之间，此时冻结锋面（图 4(a)）已经基本稳定。结合图 5 中冷生剖面的发展过程可见，土样冻结 6~12 h 内，微薄层状和薄层状冷生构造形态已经基本形成，但未充分发展，造成土样的冻胀量很小；12~24 h 内，土样 ab 线之间的薄层状冰透镜体的厚度有微小增加，土样总体有微小的冻胀，土样 bc' 线之间土体形态基本未发生变化，而 dd' 线之间最暖端厚层冰透镜体开始发育，厚度明显增加，但透镜体上沿几乎没有向上移动，下沿却有明显的下移，说明这段时间内，土样 dd' 线之间的冰透镜体的分凝造成了下部未冻土部分的固结，并未作用于土样的冻胀；24~48 h 内，

土样有一定程度的冻胀,但冻胀量的主要来源是 cc' 线之间冰透镜体的分凝作用,虽然 dd' 之间的厚度也有一定的增加,但冻胀增加的量还是基本等于下部

未冻土部分的固结量。因此,冻胀第 阶段土样冻胀主要是薄层状构造带的下端冰透镜体的分凝作用所致。

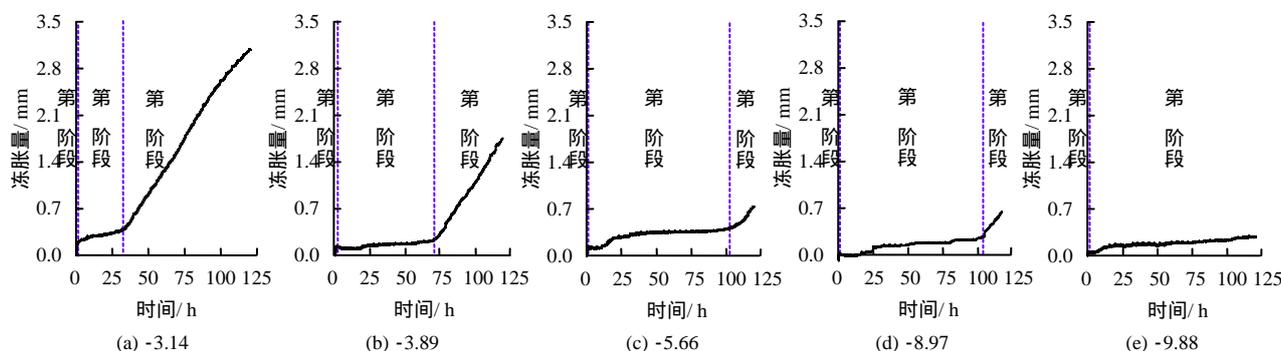


图 7 不同顶板温度下土样冻结过程中冻胀量的发展规律

Fig.7 Frost heave development curve with time under different top temperatures

冻胀进入第 阶段后,从图 5 中土样冻结 48 h 之后的图像分析可见,冻胀的发育主要是 cc' 线之间冰透镜体生长所致,而最暖端厚层冰透镜体厚度的增量很小。究其原因,可认为在最暖端厚层冰透镜体构造带中,由于孔隙冰和层状冰分凝的膨胀作用,导致土样中有未被冰充填的孔隙和裂隙出现,形成了水分迁移的通道,使得未冻土部分中的水分向上迁移并在有孔隙的和裂隙的位置分凝成冰,虽然同时刻内 dd' 线之间的土样也处于冰分凝的温度范围之内,但只要存在水分向上迁移的通道,cc' 线土样之间的冰透镜体就会继续发育,对其下部冰透镜体的生长起到抑制作用。同时,值得注意的是冻胀的主要贡献还是靠近冻结锋面的几层冰透镜体的分凝作用的结果,这是由于在已冻土部分,越靠近冻结锋面,土样中的温度越接近土样的冻结温度,土样中的水分发生冻结需要的时间就越长,这为水分能够顺利迁移到冰分凝位置,而不在迁移路径发生冻结提供了客观的可能性,这也是土样中微薄层状和薄层状构造带的上部为什么没有较为明显的冰透镜体形成的原因。而未冻土部分固结基本停止的原因是由于前期的固结压密作用,使得未冻土部分土体足以承担上部土体的自重作用以及冰分凝向下的作用力,不再需要以固结变形进行抵消,从而冰透镜体的膨胀作用便造成上部土体产生向上的冻胀位移。

冰透镜体的分凝作用的结果。当顶板温度越高,已冻土部分的厚度就越小,水分迁移充满已冻土部分微薄层状构造带和薄层状构造带上部的路径就越短,向薄层状构造带下部和最暖端厚层冰透镜体带迁移的时间就越长,从而冻胀第 阶段的发展过程就越短,第 阶段的发展过程就更加持久,因此冻胀量(冻胀率)也越大。而当顶板温度较低时,已冻土部分的厚度就越大,对应于图 7 中冻胀第 阶段的时间就越长,而冻胀变形的主要贡献部分第 阶段的发育时间就越短,因此冻胀量(冻胀率)相对较小。对不同顶板温度下的试样冻胀量(冻胀率)试验数据进行拟合,发现两者均与顶板温度有较好的指数关系。

图 8 给出了冻结 120 h 后试样最终冻胀量(冻胀率)与顶板温度的关系。可以看出,顶板温度(小于土样的初始结晶温度)越高,即试样内部温度梯度越小,对应的试样最终冻胀量(冻胀率)也越大。这是因为,冻胀的主要分量是靠近冻结锋面的几层

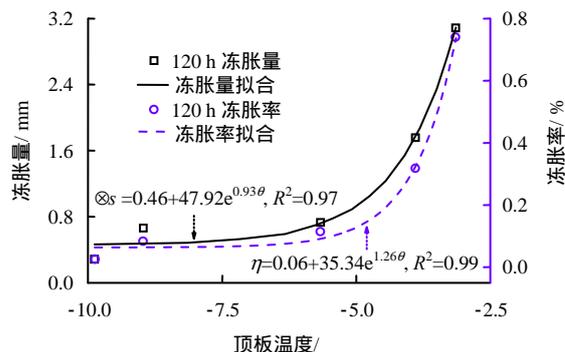


图 8 顶板温度与冻胀量(冻胀率)关系曲线

Fig.8 Frost heave (ratio) of soil sample under different top temperatures

3.4 土样冻结前后含水率分布

冻胀结束后试样内不同层位含水率的分布情况,可以反映试样在温度梯度作用下水分迁移及重分布的最终状况。图 9 是不同顶板温度下的试样冻

结前、后不同层位含水率的分布状况,是对每个试验冻结前、后的试样分14层进行切片测定含水率的结果。

可以看出,试样已冻区内的含水率较初始含水率均有相应的增大,结合图5、6可知,含水率明显增大的位置均为冻结锋面以上的最暖端厚层冰透镜体构造带和薄层状构造带的下部,即cd'线之间的部分,且顶板温度越高,即试样内部温度梯度越小,该区域内的最终含水率越大,而这个区域内分凝冰

的生长正是试样最终冻胀变形的主要贡献部分,这也解释了不同顶板温度下试样最终冻胀量(冻胀率)的差异。而在未冻区内,试样冻结结束后含水率较初始含水率均有所减小。而这部分土样含水率减小的原因,主要包括未冻区内土样的固结压密,以及水分在温度梯度作用下向冻结锋面和已冻区内迁移的综合结果。通过不同顶板温度下的对比发现,顶板温度越低,即土样内部温度梯度越大,未冻区内的含水率减小的程度越大。

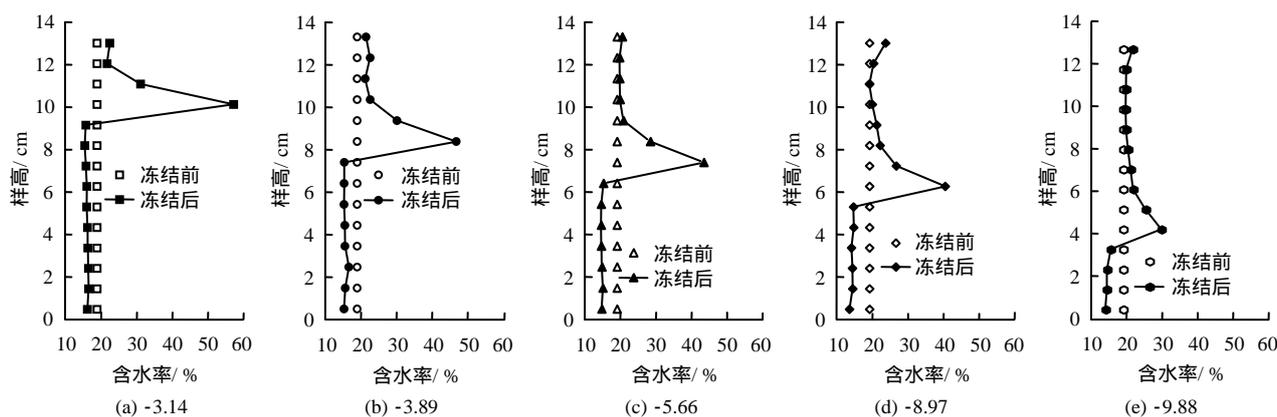


图9 不同顶板温度下的试样冻结试验前后含水率

Fig.9 Water content profile of soil sample under different top temperatures before and after tests

4 结论

(1) 冻结试验初期,冻结锋面快速向下推移,之后速度减缓,在不同顶板温度下26h左右试样均达到冻结稳定状态。冻结120h后,试样纵剖面的温度分布基本呈线性规律。

(2) 土样冻结稳定后纵剖面的冷生构造自冷端向暖端依次可划分为微薄层状构造带、薄层状构造带、最暖端厚层冰透镜体构造带、未冻土部分整体状构造带。随着顶板温度的降低,土样冻结稳定后,微薄层状和薄层状构造带厚度增大,最暖端厚层冰透镜体和未冻土部分整体状构造带厚度减小。

(3) 试样在单向冻结过程中,冻胀变形的发育过程可以分为3个阶段:快速冻胀阶段、稳定冻胀阶段以及线性冻胀阶段。快速冻胀阶段,土样顶端0~1.5cm范围内微薄层状构造发育,土样有一个明显的快速冻胀。进入稳定冻胀阶段后,土样中微薄层状构造带继续发育、薄层状构造带、最暖端厚层冰透镜体构造带以及未冻土部分整体状构造带形态基本形成,并随着冻结时间的推移继续发育。这个阶段由于最暖端厚层冰透镜体的生长基本造成了未冻区内土样的固结作用,因此,土样的冻胀过程趋于平缓,冻胀量增加缓慢。进入线性冻胀阶段后,

土样中的冷生构造继续发展,但除了薄层状构造带下部的冰透镜体生长迅速外,其他部分的构造形态变化缓慢,薄层状构造带下部冰透镜体的快速生长导致土样的冻胀速率迅速增大,冻胀量沿线性规律变化。随着顶板温度的降低,土样冻结120h后的冻胀量(冻胀率)均有所减小,对不同顶板温度下的土样冻胀量(冻胀率)试验数据进行拟合,发现两者均与顶板温度有较好的指数关系。

(4) 土样试验后的含水率分布规律为在已冻区内有所增加、未冻区内有所减小。已冻区内土样含水率显著增加的位置均为冻结锋面以上的最暖端厚层冰透镜体构造带和薄层状构造带的下部,且随顶板温度的升高(小于土样的初始结晶温度),对应最大含水率的增加更加显著。未冻区内土样含水率减小主要是由于土样冻胀过程中未冻区的固结压密作用以及水分向已冻区中冰透镜体的分凝位置发生迁移造成的。

参考文献

- [1] 王铁行. 多年冻土地区路基冻胀变形分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 1-5.
WANG Tie-hang. Analysis of frost heave on subgrade in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and

- Transport**, 2005, 18(2): 1 - 5.
- [2] 金会军, 喻文兵, 高晓飞, 等. 冻土区输油管道工程基础稳定性研究[J]. 油气储运, 2006, 25(2): 13 - 18.
JIN Hui-jun, YU Wen-bing, GAO Xiao-fei, et al. Stability of engineering foundations of oil pipelines in permafrost regions[J]. **Oil & Gas Storage and Transportation**, 2006, 25(2): 13 - 18.
- [3] 徐坤, 杨更社. 模糊综合评判在土体冻胀灾害预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报. 2004, 23(增刊1): 4339 - 4342.
XU Kun, YANG Geng-she. Application of comprehensive fuzzy evaluation model in frost heaving forecast[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.1): 4339 - 4342.
- [4] TABER S. Frost heaving[J]. **Journal of Geology**, 1929, 37 (5): 428 - 461.
- [5] TABER S. The mechanics of frost heaving[J]. **Journal of Geology**, 1930, 38 (4): 303 - 317.
- [6] BRONFENBRENER L, BRONFENBRENER R. Modeling frost heave in freezing soils[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2010, 61 (1): 43 - 64.
- [7] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. **Transactions of the Faraday Society**, 1961, 57: 1541 - 1551.
- [8] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[C]//51st Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington D. C.: Highway Research Record, 1972, (393): 1 - 11.
- [9] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. **Water Resources Research**, 1973, 9 (5): 1314 - 1323.
- [10] KONRAD J M. Frost heave mechanics[D]. Edmonton: The University of Alberta, 1980.
- [11] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. A mechanistic theory of ice formation in fine grained soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1980, 17 (4): 473 - 486.
- [12] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1980, 18(4): 482 - 491.
- [13] O'NEILL K. The physics of mathematical frost heave models: A review[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1983, 6(3): 275 - 291.
- [14] O'NEILL K, MILLER R D. Exploration of a rigid-ice model of frost heave[J]. **Water Resources Research**, 1985, 21(3): 281 - 296.
- [15] DUQUENNOI G, FREMOND M, LEVY M. Modelling of thermal soil behavior[C]//Frost in Geotechnical Engineering. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1989, 1: 895 - 915.
- [16] SHEN M, LADANYI B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1987, 14(3): 237 - 246.
- [17] LI N, CHEN B, CHEN F X, et al. The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2000, 31(3): 199 - 205.
- [18] 周扬, 周国庆, 王义江. 饱和土水热耦合分离冰冻胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1746 - 1751.
ZHOU Yang, ZHOU Guo-qing, WANG Yi-jiang. Separate ice frost heave model for coupled moisture and heat transfer in saturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(11): 1746 - 1751.
- [19] SHENG D. Thermodynamics of freezing soils, theory and application[D]. Luleå: Luleå University of Technology, 1994.
- [20] SHENG D, AXELSSON K, KNUTSSON S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils: 1. Theory and verification[J]. **Nordic Hydrology**, 1995, 26 (2): 125 - 146.
- [21] SHENG D, AXELSSON K, KNUTSSON S. Frost heave due to ice lens formation in freezing soils: 2. Field application[J]. **Nordic Hydrology**, 1995, 26 (2): 147 - 168.
- [22] 盛岱超, 张升, 李希. 高速铁路与路基冻胀相互作用机制[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2186 - 2191.
SHENG Dai-chao, ZHANG Sheng, LI Xi. Effects of train loads on frost heave of embankments[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(12): 2186 - 2191.
- [23] ZHOU J Z, WEI C F, LI D Q, et al. A moving-pump model for water migration in unsaturated freezing soil[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 104(8): 14 - 22.
- [24] KURYLYK B L, WATANABE K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils[J]. **Advances in Water Resources**, 2013, 60(10): 160 - 177.
- [25] 张婷, 杨平, 王效宾. 浅表土人工冻土冻胀特性的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 65 - 68.
ZHANG Ting, YANG Ping, WANG Xiao-bin. Experimental research on the frost heave behavior of shallow top soil[J]. **Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)**, 2010, 34(4): 65 - 68.
- [26] 唐益群, 洪军, 杨坪, 等. 人工冻结作用下淤泥质黏土冻胀特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 772 - 776.
TANG Yi-qun, HONG Jun, YANG Ping, et al. Frost-

- heaving behaviors of mucky clay by artificial horizontal freezing method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(5): 772 - 776.
- [27] 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.
WANG Tian-liang, YUE Zu-run. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(2): 359 - 364.
- [28] 胡坤, 周国庆, 李晓俊, 等. 不同约束条件下土体冻胀规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1653 - 1658.
HU Kun, ZHOU Guo-qing, LI Xiao-jun, et al. Experiments on frost heave of artificial frozen soils with different constraints[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(10): 1653 - 1658.
- [29] 邴慧, 何平, 杨成松, 等. 开放系统下硫酸钠盐对土体冻胀的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 126 - 130.
BING Hui, HE Ping, YANG Cheng-song, et al. Influence of sodium sulfate on soil frost heaving in an open system[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2006, 28(1): 126 - 130.
- [30] 蔡海兵, 彭立敏, 郑腾龙. 隧道水平冻结施工期地表融沉的历时预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 504 - 510.
CAI Hai-bing, PENG Li-min, ZHENG Teng-long. A duration prediction model of surface thawing settlement in construction period of tunnel with horizontal freezing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(2): 504 - 510.
- [31] 蔡海兵, 彭立敏, 郑腾龙. 隧道水平冻结壁强制解冻期地表沉降的预测方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3516 - 3522.
CAI Hai-bing, PENG Li-min, ZHENG Teng-long. A method for predicting ground surface settlement in the artificial thawing period of tunnel horizontal frozen wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3516 - 3522.
- [32] 王家澄, 徐学祖, 张立新, 等. 土类对正冻土成冰及冷生组构影响的实验研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 16 - 22.
WANG Jia-cheng, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin, et al. Experimental study of influence of soil type on ice formation and cryogenic structure of freezing soils[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1995, 17(1): 16 - 22.
- [33] 王家澄, 徐学祖, 张立新, 等. 温度和压力条件对正冻土中成冰过程和冷生组构的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 250 - 257.
WANG Jia-cheng, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin, et al. Influence of temperature and pressure on cryogenic structure of freezing soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1995, 17(3): 250 - 257.
- [34] PETERSON R A. Assessing the role of differential frost heave in the origin of non-sorted circles[J]. **Quaternary Research**, 2011, 75(2): 325 - 333.
- [35] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. The physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [36] 徐文杰, 岳中琦, 胡瑞林. 基于数字图像的土、岩和混凝土内部结构定量分析和力学数值计算的研究进展[J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 289 - 313.
XU Wen-jie, YU Zhong-qi, HU Rui-lin. Current status of digital image based quantitative analysis of internal structures of soils, rocks and concretes and associated numerical simulation[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(3): 289 - 313.
- [37] 李萍, 徐学祖, 蒲毅彬, 等. 利用图像数字化技术分析冻结缘特征[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 175 - 180.
LI Ping, XU Xue-zu, PU Yi-bin, et al. Analysis of characteristics of frozen fringe by using the digital technique of picture[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1999, 21(2): 175 - 180.
- [38] TAKEDA K, OKAMURA A. Microstructure of freezing front in freezing soils[C]//International Symposium of Ground Freezing. Lulea: Lulea University of Technology, 1997: 171 - 178.
- [39] WATANABE K, MIZOGUCHI M, ISHIZAKI T, et al. Experimental study on microstructure near freezing front during soil freezing[C]//International Symposium of Ground Freezing. Lulea: Lulea University of Technology, 1997: 53 - 58.
- [40] SUGITA A, ISHIZAKI T, FUKUDA M. Characteristics of the soil-structures of frozen soils[J]. **Korean Society of Civil Engineers**, 1996, 3(11): 425 - 428.
- [41] ARENSEN L U, AZMATCH T F, SEGO D C. A new hypothesis on ice lens formation in frost-susceptible soils[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks, 2008, 1: 59 - 64.
- [42] ARENSEN L U, SEGO D C, TAKE W A. Measurement of ice lens growth and soil consolidation during frost penetration using particle image velocimetry (PIV)[C]//60th Canadian Geotechnical Conference. Ottawa: Canadian Geotechnical Society, 2007: 2046 - 2053.
- [43] ZHOU J S, ZHOU G Q, ZHANG Q, et al. Experimental research on evolving rules of segregation ice in artificial frozen soil[J]. **Procedia Earth and Planetary Science**, 2009, 1(1): 544 - 549.
- [44] 李国玉, 喻文兵, 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 - 2286.

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 - 2286.

[45] MACKAY J R. Reticulate ice veins in permafrost,

northern Canada[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1974, 11(2): 230 - 237.

[46] 何平, 程国栋, 朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土, 2001, 23(1): 92 - 98.

HE Ping, CHENG Guo-dong, ZHU Yuan-lin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soils[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2001, 23(1): 92 - 98.

《岩土力学》2015 年增刊 1 被 EI 收录论文 (120 篇, 收录率 100 %)(1)

序号	论文题名	作者	页码
1	超固结土热黏弹塑性本构关系	孔令明, 姚仰平	1 - 8
2	粒间胶结接触力学特性的三维试验研究	蒋明镜, 金树楼, 刘 蔚, 等	9 - 13
3	考虑吸附水的非饱和土耗散本构关系研究	胡亚元	14 - 18
4	湛江强结构性黏土强度特性的应力路径效应	孔令伟, 臧 濛, 郭爱国, 等	19 - 24
5	花岗岩残积土冲击损伤与损伤演化特性试验研究	胡 华, 蔡 亮, 梁健业, 等	25 - 30
6	硬化土模型体积屈服机制及其本构积分算法研究	黄伯麒, 朱合华	31 - 37
7	楔形桩和等截面桩中性点位置可视化对比模型试验	孔纲强, 孙学谨, 曹兆虎, 等	38 - 42
8	抛石挤淤深度的计算方法和模型试验	闫澍旺, 陈 静, 孙立强, 等	43 - 48
9	非饱和粉质黏土坡面降雨非正交入渗试验研究	王成华, 万正义	49 - 54
10	基于颗粒介质的桩承式路堤土拱效应试验分析	房营光, 侯明勋, 谷任国, 等	55 - 60
11	轴向荷载作用下管与软土相互作用模型试验	王建华, 杨召焕	61 - 65
12	结构性黄土的剪切带及强度特性的真三轴试验研究	邵生俊, 陈 菲, 代亚锋, 等	66 - 70
13	极限平衡条件的拓展与土工结构稳定分析	邵龙潭, 刘士乙	71 - 75
14	刚性桩复合地基沉降计算的简化方法	杨 光, 范 泽, 姜 燕, 等	76 - 84
15	基于热力学的临界状态模型的返回映射算法及实现	孙 翔, 郭晓霞, 邵龙潭	85 - 93
16	岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究	张国凯, 李海波, 夏 祥, 等	94 - 100
17	天然沉积结构性黏土原位压缩规律及预测模型研究	刘维正, 瞿 帅, 张军辉	101 - 108
18	复合衬层中变系数有机污染物迁移规律分析	徐江伟, 余 闯, 蔡晓庆, 等	109 - 114
19	干湿循环下南阳膨胀土的土水和变形特性	孙德安, 黄丁俊	115 - 119
20	吹填场区软黏土地基的次固结特性研究	雷华阳, 李 宾, 仇王维, 等	120 - 124
21	考虑孔压积累-消散耦合的等效有限元方法	钱建固, 林志果, 马 霄	125 - 130
22	基于旁压试验土体弹塑性本构模型初探	苏 辉, 杨石飞, 顾国荣	131 - 136
23	大规模群桩基础相互作用近似解耦方法	杨 威, 梁发云, 陈海兵	137 - 141
24	一种基于修正西原模型的冻土蠕变本构关系	孙 凯, 陈正林, 陈 剑, 等	142 - 146
25	考虑气-液交界面的非饱和土有效应力公式	张 昭, 刘奉银, 张国平	147 - 153
26	高填方地基的蠕变沉降计算方法	姚仰平, 刘 林, 王 琳, 等	154 - 158
27	基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究	丁金华, 陈仁朋, 童 军, 等	159 - 168
28	考虑前期降雨的边坡稳定降雨阈值曲面	杨 攀, 杨 军	169 - 174
29	水土压力统一计算理论的提出和发展	王洪新	175 - 180
30	颗粒物质在等比例应变加载下的分散性失稳模式	马 刚, 常晓林, 刘嘉英, 等	181 - 186
31	垃圾填埋场污泥灰改性黏土衬垫的强度特性及微观结构	董祚掣, 陆海军, 李继祥, 等	187 - 192
32	考虑循环弱化的饱和黏土简化非线性模型	刘 莹, 黄茂松, 江 杰, 等	193 - 198
33	上海规范重力式围护墙稳定性若干问题探讨	梁发云, 杨开彪, 李镜培	199 - 203
34	土工格栅加筋膨胀土拉拔试验研究	蔡剑韬	204 - 208
35	土体力学特性颗粒尺度效应的理论与试验研究	冯德奎, 房营光, 侯明勋	209 - 214
36	冻融循环下含磷材料固化锌铅污染土的强度及溶出特性研究	魏明俐, 伍浩良, 杜延军, 等	215 - 219
37	干砂弹性参数测定的弯曲-伸展元试验	顾晓强, 杨 峻, 黄茂松, 等	220 - 224
38	考虑渗流条件下开挖面失稳离心试验研究	陈仁朋, 尹鑫晟, 汤旅军, 等	225 - 229
39	基于盾构隧道纵向沉降的纵向等效刚度反分析	殷建国, 黄宏伟	230 - 234
40	隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析	李 雪, 周顺华, 王培鑫, 等	235 - 240
41	砂土中隧道开挖对邻近桩基竖向影响的简化计算方法	靳军伟, 杨 敏, 邓友生, 等	241 - 246
42	软土中吸力式桶形基础倾覆承载性能离心模型试验	朱 斌, 应盼盼, 邢月龙	247 - 252
43	太湖软土地基沉降特性分析	张 涛, 刘松玉, 蔡国军	253 - 259
44	单一粒径组颗粒材料破碎规律及破碎极限研究	童晨曦, 张 升, 李 希, 等	260 - 264
45	列车荷载作用下高速铁路基速度传递规律模型试验研究	姜领发, 熊署丹, 陈善雄, 等	265 - 269

(未完, 见第 1450 页)