DOI：10.11779/CJGE201402017

温度梯度冻土蠕变变形规律和非均质特征

赵晓东，周国庆

（中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏 徐州 221008）

摘 要：采用 K_0DCGF（K_0 固结—保持荷载冻结—形成温度梯度—再试验）方法，开展不同温度梯度冻结饱和黏土三轴蠕变试验，研究冻土蠕变变形规律和温度梯度诱导的冻土非均质特征。结果表明：K_0DCGF 模式中温度梯度冻结饱和黏土蠕变曲线由瞬时蠕变、衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变 4 个阶段组成；温度梯度冻土径向蠕变速率小于轴向蠕变速率；温度梯度冻土最小轴向蠕变速率与蠕变应力之间满足指数函数关系，而长期强度极限与蠕变破坏时间之间则满足对数函数关系；梯度温度冻结过程中的水分场重分布和试验后冻土变形的非均匀分布是 K_0DCGF 蠕变试验中“温度梯度诱导的冻土非均质性”的重要体现；蠕变试验后温度梯度冻土冷端含水量最高，密实度最大；蠕变试验后温度梯度冻土宏观径向变形/试样高度沿试样高度方向分布随蠕变应力增加由先增加后降低规律逐步演化为持续增加规律，这一现象与冻土初始瞬时蠕变速率密切相关。

关键词：温度梯度；冻结饱和黏土；蠕变变形；非均质

中图分类号：TU445 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2014)02－0390－05

作者简介：赵晓东(1981－)，男，河北承德人，博士，副研究员，主要从事冻土力学与工程方面的研究。E-mail: zxdcumt@126.com。

Creep deformation and heterogeneous characteristics for frozen soils with thermal gradient

ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Triaxial creep tests on frozen clay are conducted by using the K_0DCGF (K_0 consolidation, freezing with non-uniform temperature under loading) method under various thermal gradients. The creep deformation and heterogeneous characteristics of the frozen clay with thermal gradient are investigated. The test results indicate that the frozen saturated clay with thermal gradient presents brittle characteristics in creep tests, and the creep curves are composed of transient creep stage, attenuation creep stage and accelerated creep stage. The radial creep rate is smaller than the axial one. The relationship between the minimum axial creep rate and the creep stress can be expressed by the exponential equation, while that between the long-term strength and the creep failure time can be described by the logarithmic equation. The redistribution of the water content before tests and the non-uniform deformation distribution after tests are the specific form of the heterogeneous characteristics caused by the thermal gradient. The water content and the density at the lower temperature end are the largest. The ratio between the radial deformation and the specimen height increases as the specimen height increases, and it decreases as the specimen height increases further under lower creep stress. However, the ratio between the radial deformation and the specimen height presents a continuous increase trend as the specimen height increases under higher creep stress. This phenomenon is related to the initial transient creep rate.

Key words: thermal gradient; frozen saturated clay; creep deformation; heterogeneous characteristic

0 引 言

中国自应用冻结法凿井以来，冻结穿过的冲积层厚度先后突破 400 m（程村主副井 430 m），500 m（丁集矿 530.45 m、赵固一矿 526.5 m），600 m（郭屯煤矿 587.5 m），而巨野煤田冲积层厚度 750 m 的万福矿井冻结凿井工程已开工。与冻结凿井技术水平不断提高相悖的是，其理论研究薄弱，且严重滞后于工程实践。

基金项目：973 计划项目（2012CB026103）；国家自然科学基金项目（51304209）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（2011QNA03）；中国博士后基金项目（20110491489）

收稿日期：2013－04－26

认识人工冻土的变形破坏性质是完善冻结设计理论的关键基础和重要前提。高围压固结－有压冻结条件下形成的深部人工冻土具有显著的流变力学特性（包括蠕变和松弛等）。现有人工冻土蠕变力学行为的影响因素研究多集中在含水率、土性、温度、压力等方面，而对于温度梯度的影响以及由此诱导的冻土非均质性一直没有得到足够认识和深入研究，致使井帮变形过大、片帮、局部坍塌等事故时有发生。大量试验表明：相同平均温度条件下均匀温度冻土试块与非均匀温度冻土试块的强度存在本质差异[1-3]，冻土变形破坏机理也不尽相同[4-5]。基于 K_0DCF 模式（先 K_0 固结后再冻结）的均匀温度冻土试块试验无法有效涵盖温度梯度诱导的冻土非均质信息[6-7]，物理模拟试验（K_0 固结—保持荷载冻结—形成温度梯度—再试验）虽能很好的模拟冻结壁的实际温度梯度分布，直观获得冻结壁的蠕变变形规律和蠕变承载性能，但难以实现冻土变形破坏过程的直接观测[8-9]。笔者基于试块尺度试验研究了 GFC（均匀温度冻结—形成温度梯度—再试验）模式中温度梯度对冻土宏观蠕变变形的影响规律，但未能揭示“温度梯度诱导的冻土非均质性”的演化和固结围压的影响[10]。

通过开展冻结饱和黏土在 K_0DCGF（K_0 固结—保持荷载冻结—形成温度梯度—再试验）模式中的三轴蠕变试验，研究温度梯度对冻结饱和黏土蠕变变形破坏的影响规律，探讨蠕变过程中“温度梯度诱导的冻土非均质性”的表现形式，为将“温度梯度诱导的冻土非均质机制”引入到现有组合温度梯度冻结壁厚度设计和稳定性控制分析中奠定基础。

1　试验方法

K_0DCGF 试验装置、土样制备、试验过程控制及温度调节在文献[1～4]中详细介绍，此处只对蠕变变形规律和非均质性量测方面做简单阐述。

（1）所有试样的平均温度设定为−20℃（上端温度与下端温度平均值），温度梯度（上端温度与下端温度差值与试样高度的比值）在 0～0.5 ℃/cm 之间。

（2）试验过程中温度梯度冻土的径向变形通过固定在试样中间位置的径向变形传感器获得。试验后不同高度处冻土的宏观径向变形分布通过高精度游标卡尺测量获得。

（3）试验后，在低温冷库内用自制钻头在冻土不同高度处取芯，然后分别通过电子称、烘箱和酒精量筒获得芯样的质量、体积等，从而计算获得温度梯度冻土典型高度处（上、中、下）的密度和含水率分布。

（4）需要说明的是：文中固结应力指的是 K_0 固结后冻土所受到的轴向应力；而蠕变应力则指 K_0 固结后蠕变试验前冻土所受到的轴向应力与径向应力之差。

2　温度梯度冻土蠕变变形规律

2.1　轴向和径向蠕变变形

图 1 和图 2 分别给出温度梯度冻结饱和黏土（温度梯度 0.50℃/cm，平均温度−20℃）和均匀温度冻土（温度梯度 0.00℃/cm，平均温度−20℃）在 K_0DCGF 试验中的典型轴向蠕变变形曲线，图中固结应力均为 3.2 MPa。图 3 为温度梯度冻土长期强度极限－破坏时间（蠕变速率达到最小对应的时间）曲线。

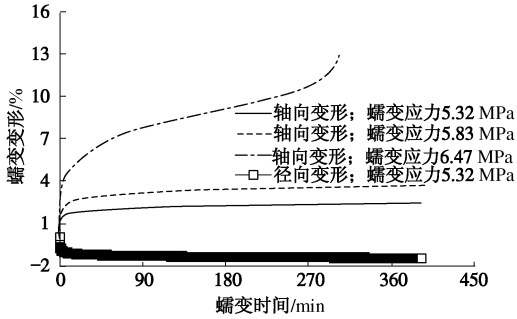

图 1 温度梯度冻土蠕变变形曲线

Fig. 1 Creep curves of frozen clay with thermal gradient

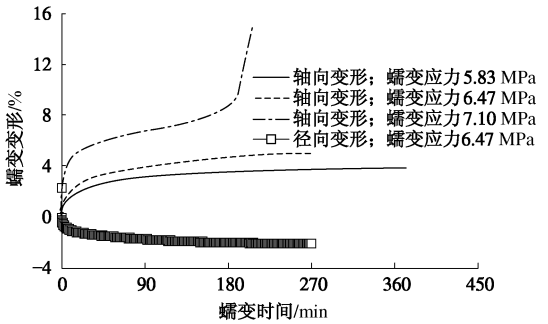

图 2 均匀温度冻土蠕变变形曲线

Fig. 2 Creep curves of frozen clay without thermal gradient

对比图 1 和图 2 可以看出：K_0DCGF 试验中温度梯度冻土和均匀温度冻土蠕变变形曲线形态具有相似性，即温度梯度的存在不改变冻土宏观蠕变变形过程。不同温度梯度冻土蠕变行为都具有以下基本特征：

（1）K_0DCGF 试验中，当蠕变应力不超过冻土的长期强度极限时，不同温度梯度冻土蠕变曲线具有初始瞬时蠕变、衰减蠕变和稳定蠕变 3 个阶段；而当蠕变应力超过冻土长期强度极限时，不同温度梯度冻土蠕变曲线出现初始瞬时蠕变、衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变 4 个阶段。

（2）K_0DCGF 试验中，蠕变应力不超过冻土的长期强度极限时，相同固结应力条件下随温度梯度的增加，冻土蠕变达到稳定蠕变阶段所对应的蠕变时间略降低（图 3）。蠕变应力超过冻土长期强度极限时，K_0DCGF 试验中冻土蠕变速率达到最小的时间则明显减少。

（3）K_0DCGF 试验中，径向蠕变规律与轴向蠕变

规律相同，当蠕变应力不超过冻土的长期强度极限时，都呈现出初始瞬时蠕变、衰减蠕变和稳定蠕变阶段。但是冻土径向蠕变速率要小于轴向蠕变速率。

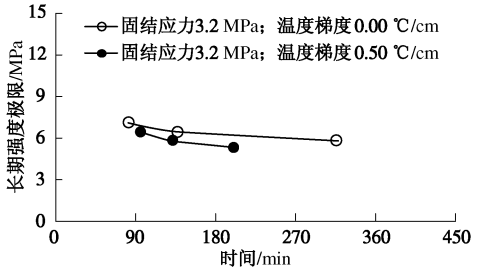

图 3 温度梯度冻土长期强度极限

Fig. 3 Long-term strength of frozen clay with thermal gradient

根据 Clausius-Clapeyron 方程，冰点降低 1℃，需 13.5 MPa 的压力。当冻土温度为−10℃时，融化压力约为 20 MPa[11]。K_0DCGF 蠕变试验中：①冻土受到的最大蠕变应力不超过 10 MPa，平均法向应力不超过 10/3=3.3 MPa，考虑到固结应力影响，施加在冻土上的平均法向应力不超过 8.0+3.3=11.3 MPa；②不同温度梯度冻土中最高温度为−15℃，其它试样高度处温度均低于−15℃；③冻土融化压力随温度降低非线性增加。

因此，K_0DCGF 蠕变试验中，即便考虑到土性等因素，冻土中孔隙冰也不会发生整体压融现象。结合图 1，2，4，K_0DCGF 试验中冻土的蠕变变形机制在不同阶段可理解为：①衰减蠕变阶段。主要为多晶冰的粘塑性流动和土骨架的蠕变。但其流动速率由于底部裂缝出现将急剧降低，且流动速率由于温度梯度因素，在冻土未断裂区内呈梯度分布。②稳定蠕变阶段。主要为冻土底部暖端微裂纹的产生、扩展以及联合过程。此时在未断裂区中冰晶的粘塑性流动和土骨架蠕变变形受裂纹扩展影响急剧降低。③加速蠕变阶段。冻土蠕变变形机制主要为裂纹的失稳扩展。

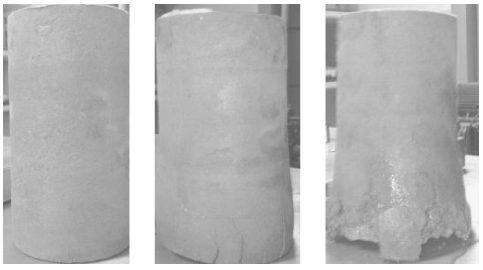

图 4 温度梯度冻土蠕变破坏特征(固结压力为 3.2 MPa，温度梯度为 0.5 ℃/cm，蠕变应力分别为 5.32，5.83 和 6.47 MPa)

Fig. 4 Failure characteristics of frozen clay with thermal gradient

2.2 最小蠕变速率

K_0DCGF 蠕变试验中，取冻土蠕变速率曲线上稳定蠕变阶段对应的速率平均值作为最小蠕变速率。通过对试验数据分析，发现温度梯度冻土最小蠕变速率与蠕变应力之间的关系符合指数方程，即

$$\dot{\varepsilon}_{\min} = A_{\mathrm{m}} \exp\left[k_{\mathrm{rate}} \cdot \sigma_{\mathrm{creep}}\right] \quad , \qquad (1)$$

式中，$\dot{\varepsilon}_{\min}$ 为最小蠕变速率，σ_{creep} 为蠕变应力水平。A_{m} 和 k_{rate} 为试验参数，是温度梯度的函数。

$$A_{\mathrm{m}}=8\times10^{-7}\,\mathrm{grad}T+4\times10^{-7} \quad , \qquad (2)$$

$$k_{\mathrm{rate}}=7\times10^{-4}\,\mathrm{grad}T+0.5 \quad , \qquad (3)$$

式中，$\mathrm{grad}T$ 代表温度梯度。

2.3 长期强度极限

K_0DCGF 蠕变试验中，温度梯度冻土长期强度极限与破坏时间之间关系可以用对数方程描述，即

$$\sigma_{\mathrm{f}}=\beta \ln t_{\mathrm{f}}+B \quad , \qquad (4)$$

式中，σ_{f} 为冻土长期强度极限，t_{f} 为蠕变速率达到最小时对应的时间，B 和 β 为参数，是温度梯度的函数。

$$\beta=-1.22\mathrm{grad}T-0.93 \quad , \qquad (5)$$

$$B=4.6\mathrm{grad}T+11.2 \quad 。 \qquad (6)$$

3 温度梯度诱导的冻土非均质性

K_0DCGF 试验中“温度梯度诱导的冻土非均质性”主要体现在：①冻结过程中温度梯度诱导的水分场重分布造成的“非均质”；②试验后冻土宏观变形非均匀分布。

3.1 冻结过程中的水分场重分布

为验证 K_0DCGF 试验冻结过程中温度梯度诱导的水分场重分布造成的冻土“非均质”。对温度梯度为 0.50 ℃/cm，固结压力为 3.2 MPa，蠕变应力为 5.83 MPa 冻土三轴蠕变试验后和固结压力为 8.0 MPa，温度梯度为 0.50 ℃/cm 冻土三轴剪切试验前后的内部含水量进行实测，结果列于表 1 中。

根据第 2 节的分析可知：K_0DCGF 试验中不发生孔隙冰压融并向低应力区转移的现象。因此，实测含水量能够代表冻结温度场形成后的冻土内部含水率分布规律。从表 1 中可以看出，温度梯度冻土内部含水量沿试样高度从上到下依次降低，这说明冻结过程中发生了水分重分布的客观事实。平均含水率与小尺度试样在高压固结仪中相同固结压力固结后实测含水量数值相差不到 1%[12]，间接验证了 K_0DCGF 试验方法中固结过程的可靠。

表 1 温度梯度冻土试验后含水率

Table 1 Water content of frozen clay with thermal gradient

试验方式	固结压力/MPa	上	中	下	平均
蠕变后	3.2	20.8	19.6	18.6	19.7
蠕变前	3.2	19.4	18.9	19.2	19.2
剪切后	8.0	17.6	17.1	16.5	17.0
剪切前	8.0	16.4	16.3	16.8	16.5

3.2 试验后冻土变形非均匀分布

K_0DCGF 试验后冻土宏观径向变形非均匀分布是温度梯度诱导的冻土非均质性的重要体现。以下将对蠕变试验后的冻土的实测径向变形进行分析。

图 5 给出 K_0DCGF 试验中固结应力为 3.2 MPa，温度梯度为0.50 ℃/cm条件下不同蠕变应力对应的冻土最终蠕变变形及其沿冻土高度增加而变化的实测曲线。可以看出，K_0DCGF 试验中，当蠕变应力不超过冻土的长期强度极限时，冻土蠕变后的径向膨胀变形沿冻土高度增加速率呈现为先增大后降低规律。且径向变形/冻土高度－高度曲线中最大值位置随蠕变应力增加而降低。当蠕变应力超过冻土的长期强度极限时，蠕变试验后，冻土径向膨胀变形沿冻土高度增加速率呈现为持续增大规律，但是径向变形与冻土高度比值增加趋势在距离冻土冷端距离 14 cm 处减缓。

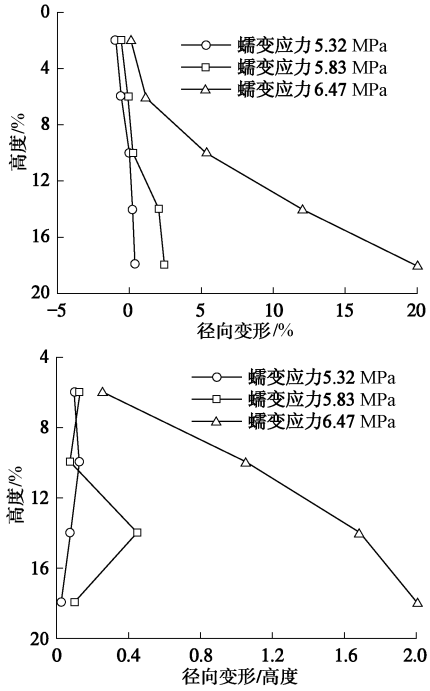

图 5 温度梯度冻土蠕变后径向变形(K_0DCGF)

Fig. 5 Radial creep deformation of frozen clay with thermal gradient (K_0DCGF)

图 6 给出 GFC（不经历 K_0 固结，直接冻结后进行试验；围压 12 MPa，温度梯度 0.50 ℃/cm）试验中冻土蠕变试验后试样径向变形分布的非线性规律。从图 6 可看出，温度梯度冻土在 GFC 试验中径向宏观变形以及径向变形/高度－冻土高度曲线沿冻土高度方向呈不断增加趋势，这与 K_0DCGF 试验结果迥然不同。

图 7 中给出温度梯度冻土初始瞬时蠕变曲线（不同蠕变应力条件下的平均值）。K_0DCGF 试验中冻土初始瞬时蠕变速率要明显大于 GFC 试验，且均大于三轴剪切试验中的 0.01/min[1]。相同固结应力或围压中，随温度梯度增加，冻土初始瞬时蠕变速率增加。

变形速率增加对冻土内部的微裂隙、微孔洞发育具有“延迟效应”，而蠕变试验中，蠕变应力的增加是初始瞬时蠕变速率增加的根源（图 8），也就是说蠕变应力的增加则会加剧冻土蠕变变形发展，也是冻土径向变形分布发生转变的根本原因（图 5）。

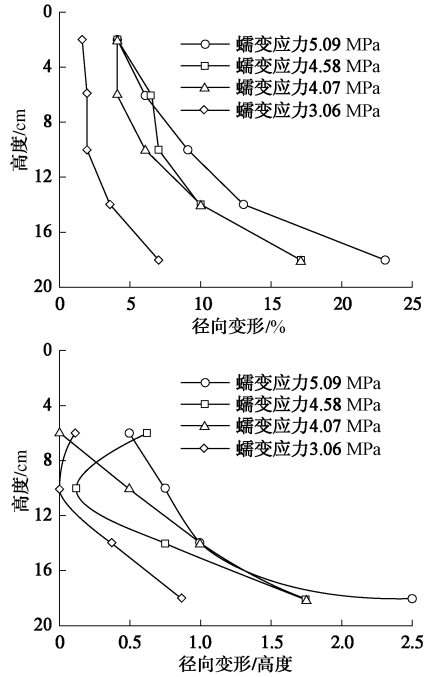

图 6 温度梯度冻土蠕变后径向变形(GFC)

Fig. 6 Radial creep deformation of frozen clay with thermal gradient (GFC)

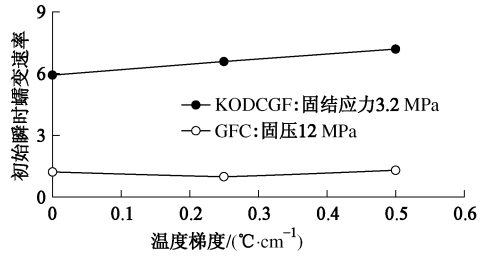

图 7 温度梯度冻土初始瞬时蠕变速率

Fig. 7 Initial creep rate of frozen clay with thermal gradient

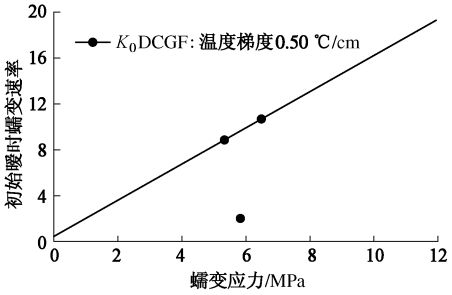

图 8 温度梯度冻土初始瞬时蠕变速率(固结应力：3.2 MPa)

Fig. 8 Initial creep rate of frozen clay with thermal gradient

冻土瞬时变形速率的增加，使得冻土径向膨胀变形分布规律初始便形成“非均匀”分布，即暖端强度得到优先发挥，相应的径向膨胀变形最大，随蠕变时间增加，这种分布规律逐渐加强并一直占主导地位，但其主导作用强弱与 K_0 固结过程密切相关，便造成图 5 和图 6 所示的分布规律。温度梯度冻土在径向发生不均匀膨胀同时，沿高度方向亦会发生不均匀压缩，而不同高度处冻土密度的演化是冻土径向和垂直方向变形的综合反映。表 2 为 K_0DCGF 三轴试验前后冻土

（固结压力为 8.0 MPa，温度梯度为 0.50 ℃/cm）内部密度分布。考虑测试误差和偶然因素影响，密度在冻土冷端（上端）最大，冻土暖端（下端）出现宏观裂缝导致相应的密度略有降低。

表 2 试验后密度分布

Table 2 Distribution laws of density after tests

密度/(g·cm^{-3})	上(0 cm)	中(10 cm)	下(20 cm)
试验后	>2.38	2.07~2.15	<2.34
试验前	2.12	2.12	2.12

4 结 论

（1）K_0DCGF 蠕变试验中冻土具有脆性特征，冻土蠕变过程由瞬时蠕变、衰减蠕变、稳定蠕变和加速蠕变 4 个阶段组成。冻土径向蠕变速率小于轴向蠕变速率。

（2）K_0DCGF 试验中冻土轴向最小蠕变速率与蠕变应力之间满足指数函数关系，而冻土长期强度极限与蠕变破坏时间之间则满足对数函数关系。

（3）K_0DCGF 试验中“温度梯度诱导的冻土非均质性”表现为梯度冻结过程中的水分场重分布和蠕变试验后冻土宏观变形的非均匀分布。

（4）K_0DCGF 试验后，当蠕变应力不超过冻土长期强度极限时冻土宏观径向变形/试样高度随高度增加呈先增加后降低规律，而当蠕变应力超过冻土长期强度极限时，则表现为持续增加规律，这与初始瞬时蠕变速率密切相关。

（5）本文基于 K_0DCGF 方法初步研究了冻土蠕变变形规律和非均质特征，后续还应开展不同固结应力的冻土蠕变试验，并进一步加强蠕变试验过程中冻土局部变形演化的实测，以期深刻掌握和理解“温度梯度诱导的冻土非均质性及其非线性行为”。

参考文献：

[1] ZHAO X D, ZHOU G Q, CHEN G Z, et al. Triaxial compression deformation for artificial frozen clay with thermal gradient[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, **67**(3): 171 - 177.

[2] ZHAO X D, ZHOU G Q, CHEN G Z. Triaxial compression strength for artificial frozen clay with thermal gradient[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, **20**(1): 218 - 225.

[3] 赵晓东, 周国庆, 陈国舟. 温度梯度冻结黏土破坏特征及抗压强度分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(12): 1856 - 1860. (ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, CHEN Guo-zhou. Failure mode and compression strength for frozen clay with thermal gradient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1856 - 1860. (in Chinese))

[4] 赵晓东, 周国庆, 商翔宇, 等. 温度梯度冻土压缩破坏特征及能量规律[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2350 - 2354. (ZHAO Xiao-dong, ZHOU Guo-qing, SHANG Xiang-yu, et al. Deformation failure and energy properties for frozen soil with thermal gradient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2350 - 2354. (in Chinese))

[5] 周国庆, 赵晓东, 李生生. 不同温度梯度两种路径冻结中砂应力 - 应变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 338 - 343. (ZHOU Guo-qing, ZHAO Xiao-dong, LI Sheng-sheng. Stress-strain properties for the frozen media sand at different temperature gradients during two stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 338 - 343. (in Chinese))

[6] 王大雁, 马 巍, 常小晓. K_0 固结后卸载状态下冻土应力 - 应变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(8): 1252 - 256. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Study on behavior of stress-strain of frozen soils subjected to K_0 consolidation by unloading triaxial shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(8): 1252 - 256. (in Chinese))

[7] 马 巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力-应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 198 - 200. (MA Wei, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of tjaeles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 198 - 200. (in Chinese))

[8] 王建州. 深厚表土层非均质厚冻结壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008. (WANG Jian-zhou. Research on the mechanical properties of inhomogeneous thick frozen wall in deep alluvium[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese))

[9] 陈军浩. 多圈管冻结壁的形成与融化规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010. (CHEN Jun-hao. Study on the law of forming and thawing of frozen wall with multi-freezing-tube[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))

[10] ZHAO X D, ZHOU G Q. Experimental study on the creep behavior of frozen clay with thermal gradient[J]. Cold Regions Science and Technolgoy, 2013, **86**(2): 127 - 132.

[11] 吴紫汪. 青藏冻土研究论文集[M]. 北京:: 科学出版社, 1983. (WU Zi-wang. Research theses on frozen soil in Qinghai Tibetan plateau[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))

[12] 商翔宇. 不同应力水平下深部粘土力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (SHANG Xiang-yu. Study on the mechanical properties of deep clay[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009. (in Chinese))