

不同温度梯度两种应力路径冻结中砂应力-应变特性试验研究

周国庆^{1,2}, 赵晓东^{1,2}, 李生生³

(1. 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; 2. 中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 天地科技股份有限公司北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013)

摘要: 采用 K_0 固结、负荷冻结、三轴压缩的试验方法, 首次进行了 4 种不同温度梯度冻结中砂在加轴压 (CTC) 及减围压 (RTC) 两种路径下的三轴试验, 获得了温度梯度和应力路径对冻结中砂应力-应变特性的影响。不同温度梯度及减围压试验的偏应力比-轴向应变关系曲线形态与传统均匀温度下冻结中砂加轴压试验结果类似, 可用温度梯度的线性函数对双曲线模型进行修正后予以描述。但是不同温度梯度和两种应力路径条件下的应力应变特性存在很大差异, 温度梯度状态和减围压应力路径对冻结中砂的应力-应变特性具有明显的“弱化效应”; 温度梯度诱导了冻结中砂的非均质性, 减小了模型的起始斜率, 大大减低了抗变形能力; 与加轴压应力路径相比, 减围压应力路径试验的偏应力比大为降低, 减围压应力路径 (开挖过程) 弱化了冻结中砂的强度。

关键词: 温度梯度; 冻结中砂; 应力路径; 应力-应变; 弱化效应

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)03-0338-06

作者简介: 周国庆(1961-), 男, 江苏扬州人, 博士, 教授, 主要从事冻土力学、深土力学与工程方面研究。E-mail: gqz@cumt.edu.cn。

Stress-strain properties for the frozen media sand at different temperature gradients during two stress paths

ZHOU Guo-qing^{1,2}, ZHAO Xiao-dong^{1,2}, LI Sheng-sheng³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, CUMT, Xuzhou 221116, China; 3. Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: The conventional triaxial compression (CTC) and reduced triaxial compression (RTC) tests are performed on the frozen medium sand subject to K_0 consolidation and loaded freezing at different temperature gradients. The effects of temperature gradients and the stress paths on the stress-strain properties are investigated. The results indicate that the relationship types between the axial deformation and the deviator stress for the frozen medium sand during the RTC process and at different temperature gradients present the similar laws as the traditional test results, moreover, the relationships between which can be described by the modified hyperbolic model by using the linear function of the temperature gradients. However, there are evident differences in the stress-strain properties at different temperature gradients and stress paths for the weakening effects. In other words, the temperature gradients result in the non-homogeneous properties and lead to the decrease of the initial slopes together with the ability of resisting the deformation. In addition, the deviator stress ratios in the process of RTC decrease greatly compared with CTC process for the weakening effects of RTC process.

Key words: temperature gradient; frozen medium sand; stress path; stress-strain; weakening effects

0 引言

冻土应力应变关系、强度及随时间变化的性质与土性、温度、加荷速率等因素关系的研究一直是冻土力学的重点并取得了大量成果 (Chamberlain et al, 1972; Sayles, 1973; Auld, 1985; 马巍等, 1995,

2000; Andersen, Glen R. et al, 1995; Takashi, 2002;

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50534040); 国家科技支撑计划重点项目 (2006BAB16B01)

收稿日期: 2008-12-06

等)^[1-7]。

随着人工地层冻结法在深厚表土层凿井工程以及城市复杂地下工程中应用的发展, 必然越来越多地涉及深部冻土的力学特性问题(崔广心, 1998)^[8]。马巍等(2001; 2003)的研究认为^[9-10], 不同固结方式对冻土应力-应变曲线形态影响不大, 但变形过程明显不同, 而初始围压成为影响冻土破坏强度与破坏应变的主要因素之一, 且随围压增高, 破坏强度受温度的影响越加明显; 同时分析了加、卸荷试验对冻土应力应变特性的影响。王大雁等^[11-13]通过模拟 K_0 固结、有载冻结然后受力的冻结凿井过程, 研究了冻结黄土在径向卸载状态下的应力-应变行为, 获得冻结黄土卸荷应力-应变关系具有理想刚塑性特征的结论, 并指出更高的初始围压和更低的温度均都可使深部冻土抵抗变形的能力增强。Parameswaran R 和 Jones S J^[14]对 -10°C 的 Ottawa 冻结砂土在围压为 $0.1\sim 75\text{ MPa}$ 条件下进行了三轴试验, 研究了屈服应力和围压之间的关系。Re^[15]等对高压下冻结砂土力学特性的试验结果表明, 研究冻土破坏前的力学行为非常重要, 并获得了砂土初始相对密度、围压、温度、应变速率对试验结果的影响。

上述对于高围压下冻土所表现出的宏观力学特性的研究结果不尽类似, 但都呈现出高围压下的冻土具有与浅部冻土相异的力学特性。

但是上述试验研究均未涉及到非均匀温度场中的冻土问题。随着冻结法凿井深度以及冻结地下工程规模的加大, 由厚冻结壁(冻土墙)引发的尺度效应、非均质效应、开挖卸荷效应日益显现。采用传统平均温度计算冻结壁强度和厚度的方法不再适用, 必须研究非均匀温度场(温度梯度)对冻土强度和变形特性的影响及其机理。除了盛煜等(1996)^[16]对正弦变温过程中冻土蠕变变形进行过初步分析外, 目前尚没有研究涉及到具有一定温度梯度冻土的力学性质, 而这对于深厚表土非均质、厚冻结壁的稳定分析具有十分重要的意义。

本文选择4种具有不同温度梯度的冻结中砂, 对其进行加轴压路径(Conventional Triaxial Compression, CTC)和减围压路径(Reduced Triaxial Compression, RTC)的三轴压缩试验研究, 并分析了温度梯度和两种应力路径对冻结中砂应力-应变特性的影响。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验采用 TATW-500 冻土三轴试验装置。其加载

系统的轴压、围压均可通过负荷、位移、变形3种方式控制, 且可实现3者之间的相互转换, 以适应不同的荷载边界条件。制冷系统可以实施试样上端、下端、周围的三端制冷, 以实现冻土试样内部非均匀温度场的调控^[17]。

试验中通过轴向和径向变形传感器测取试样轴向、径向变形, 传感器量程分别为 $\pm 75\text{ mm}$, 12 mm 精度均为 0.001 mm 。不同测点的温度则通过埋设于试样中精度为 0.01°C 的热敏电阻进行监测与控制, 参见图1。

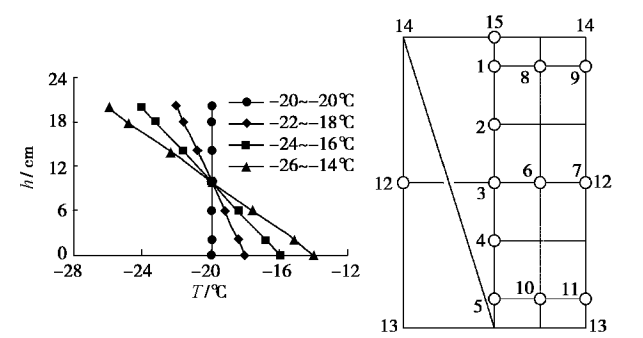


图1 温度梯度与测点布设

Fig. 1 Temperature gradients and test sites

试验采用福建标准中砂, 其参数见表1。

表1 试样材料参数

Table 1 Parameters of experimental materials

特征	颗粒 密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比		干密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)		平均粒 径/mm	不均匀 系数	曲率 系数
		最大	最小	最大	最小			
参数	2.643	0.85	0.52	1.74	1.43	0.39	1.542	1.104

1.2 试样及制备

制样器注入无气水, 固定温度传感器, 边加砂, 边振动, 使砂颗粒自动密实, 保证试样中无残留气泡, 达到设计高度后, 将试样顶部修平并密封制样器, 制成直径 100 mm , 高度 200 mm 的饱和砂样。为保证松散介质试样成型、便于安装, 将其置于 -2°C 低温箱内冻结、脱模; 安装试验排水装置并连接测试导线, 将试样取出并放置在压力室底座上。关闭排水阀, 使试样在不超过 100 kPa 压力条件下解冻, 当试样内部温度接近室温时, 即可进行高压 K_0 固结。

1.3 试样温度梯度

试验设计4种温度梯度, 如图1所示。

4种温度梯度分别为 $0.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $0.4^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $0.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $0.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$, 即对应图1中13~13'面温度分别为 -14°C 、 -16°C 、 -18°C 和 -20°C , 14~14'面温度分别为 -26°C 、 -24°C 、 -22°C 和 -20°C , 试样不同高度处温度沿径向则保持均匀。

1.4 试验过程

为模拟深部冻土体的实际受力过程, 首先对试样进行高压 K_0 固结, 接着在荷载条件下冻结, 以形成预设的非均匀温度场, 然后再进行 CTC 或 RTC 试验。

具体试验过程为(见图 2): ①固结 打开排水阀, 对解冻完成的砂土试样分别按轴压 $0.05 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$, 围压 $0.02255 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$ (K_0 系数 $0.451^{[17]}$) 速率加到设定的固结压力, 轴压 10 MPa 、围压 4.51 MPa , 使试样在侧限条件下固结; ②稳定 保持恒定轴压和围压不变, 稳定 6 h 以上, 直至试样轴向变形不超过 $0.001 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; ③冻结 保持轴压、围压恒定, 关闭排水阀, 三端冻结试样 24 h 以上, 监测试样温度, 直至温度场达到设定要求; ④试验 维持上述温度场恒定不变, 分别进行恒围压, 逐级施加轴压 (CTC) 和恒轴压, 逐级减小围压 (RTC) 试验, 直至试样破坏, 加、卸荷速率与固结加荷速率相同。

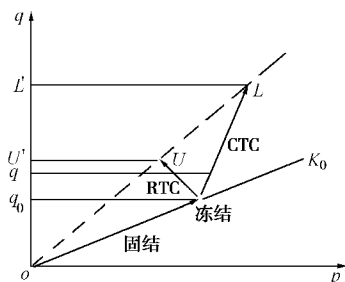


图 2 试验过程示意

Fig. 2 Sketch of test paths

2 试验结果及分析讨论

试验获得了四种不同温度梯度冻结中砂在 CTC 和 RTC 试验过程中的应力 - 应变关系数据。

2.1 总体性状

图 3 (a) 是冻结中砂在均匀温度场 (-20°C)、CTC (曲线 I) 以及 RTC (曲线 II) 试验的轴向应力与轴向应变的关系曲线, 图 3 (b) 是 Andersen 等 (1995)^[4] -20°C 冻结砂的 CTC 试验应力 - 应变曲线。与图 3 (a) 采用 K_0 固结后冻结、应力控制进行 CTC、RTC 试验不同, 后者采用的是传统冻结以及应变控制, 并采取 CTC 方式实施试验。

对比图 3 (a)、3 (b) 及图 3 (a) 中的曲线 I 和 II, 可以看出: 三条曲线的基本形态类似、变化趋势相同, 均可用双曲线模型模拟, 即

$$\frac{e_1}{s_1 - s_3} = a + be_1, \quad (1)$$

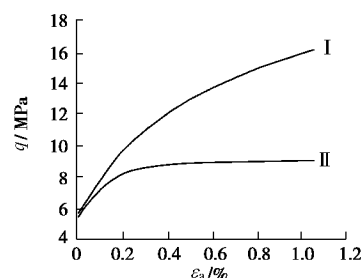
或

$$q = s_1 - s_3 = \frac{e_a}{a + be_a}, \quad (2)$$

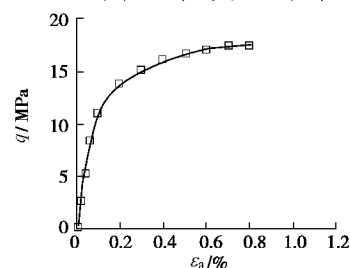
式中, a , b 为与试验曲线形态相关的系数, a 为小应变时曲线的起始斜率 h_i (对于 CTC 试验视为弹性模量 E_i) 的倒数, $h_i(E_i) = \left(\frac{q}{e_a}\right)_{e_a \rightarrow 0} = \frac{1}{a}$, b 为大应变时

最大偏应力的倒数, $q_{ult} = (s_1 - s_3)_{ult} = \left(\frac{q}{e_a}\right)_{e_a \rightarrow \infty} = \frac{1}{b}$ 。

从图 3 (a) 可以明显看出, 冻结中砂传统加轴压试验获得的强度小于减围压试验, 这一基本结论与马巍及王大雁^[9-13]等试验结果类似, 而与 Guryanov 等^[15]的 -5°C 冻结粉土试验结果有异。



(a) CTC (I) 和 RTC (II)



(b) CTC^[4]

图 3 均匀温度场冻结砂土应力 - 应变关系试验曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of frozen sand in homogeneous temperature field

试验前试样经历了 K_0 固结过程, 因而两种不同应力路径的试验均是在固结偏应力 $q_0 = 10 - 4.51 = 5.49 \text{ MPa}$ 的基础上实施的, 因此用试验过程中的偏应力与固结应力的比值 q' (偏应力比) 描述与分析其应力 - 应变关系更为合理, 即

$$q' = \frac{q}{q_0}. \quad (3)$$

式中 q 为试验过程中的偏应力; q_0 是试样在 K_0 固结完成后的偏应力 (参见图 3), 分析时需考虑双曲线模型的起点问题。

图 3 (a) 和 (b) 分别是 4 种不同温度梯度冻结中砂在 CTC 和 RTC 过程的偏应力比 q' 与轴向应变 e_a 关系的试验曲线。

从图 3 可以看出, 无论是 CTC 试验还是 RTC 试验, 不同温度梯度下冻结中砂的偏应力比与轴向应变之间的关系曲线均属于应变硬化型, 也就是说, 均可用式 (1) 或式 (2) 形式的模型加以修正后予以描述。

若以-20℃均匀温度场 CTC 过程（常规试验）冻结中砂应力 - 应变模型为基准，则不同温度梯度，CTC 和 RTC 试验应力应变模型可以描述为

$$q' = 1 + \frac{e_a}{a_0 f_a(\text{grad}T) + b_0 f_b(\text{grad}T) e_a} \quad (4)$$

式中 q' 为 CTC（或 RTC）试验中偏应力比； a_0 、 b_0 分别为-20℃均匀温度场冻结中砂 CTC（或 RTC）试验过程中的模型参数，拟合试验结果如表 2 所示， $f_a(\text{grad}T)$ 、 $f_b(\text{grad}T)$ 分别是两种情形下模型参数 a_0 、 b_0 考虑温度梯度的修正函数， $\text{grad}T$ 为温度梯度。

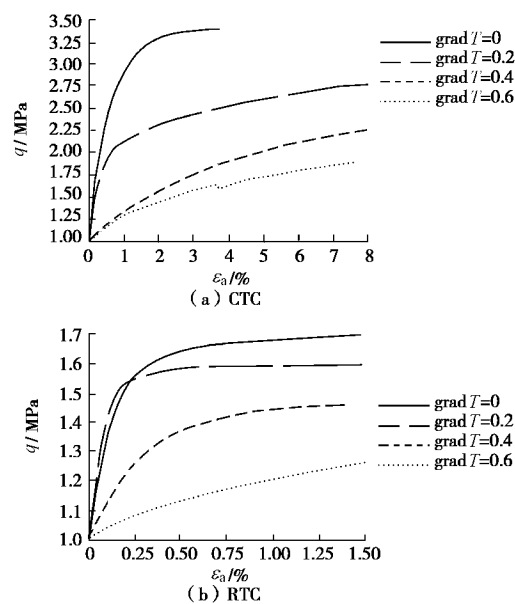


图 3 不同温度梯度冻结中砂 $q' - e_a$ 关系试验曲线

Fig. 3 Curves of $q' - e_a$ for frozen medium sand at different temperature gradients

表 2 均匀温度场冻结中砂应力 - 应变模型拟合参数

Table 2 Parameters of stress-strain model in homogeneous temperature field

模型参数	CTC			RTC		
	a_0	b_0	R^2	a_0	b_0	R^2
数值	0.1881	0.3428	0.9987	0.1748	1.1611	0.9906

2.2 $f(\text{grad}T)$ 函数

按 Kondner 双曲线模型拟合不同温度梯度的 CTC 和 RCT 试验的模型参数，结果示于表 3 和图 4 中。

表 3 不同温度梯度冻结中砂应力 - 应变模型拟合参数

Table 3 Parameters of stress-strain model at different temperature gradients

gradT/(℃ · cm ⁻¹)	CTC			RCT		
	a	b	R^2	a	b	R^2
0.2	0.2692	0.5719	0.986	0.1358	1.2800	0.975
0.4	2.4328	0.4714	0.999	0.5441	1.6937	0.995
0.6	2.6841	0.8100	0.995	2.8686	1.7643	0.995

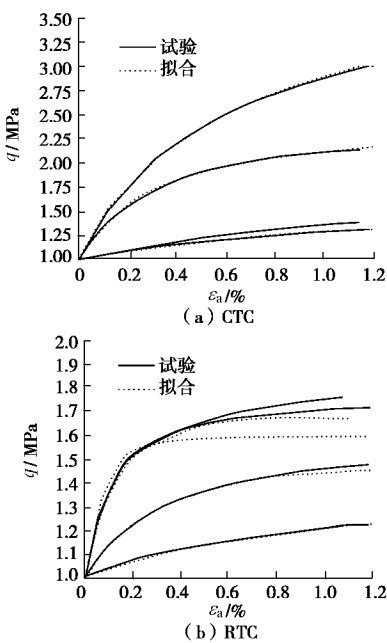


图 4 不同温度梯度冻结中砂 $q' - e_a$ 关系拟合与试验曲线

Fig. 4 Experimental and regression curves of $q' - e_a$ at different temperature gradients

分析可知，CTC 和 RCT 试验模型参数 a 、 b 的温度梯度修正函数 $f(\text{grad}T)$ 均可近似表述为温度梯度的线性关系，即

$$f(\text{grad}T) = 1 + K \text{grad}T \quad (5)$$

式中， K 为温度梯度的常数，分 CTC 和 RTC 两种应力路径情况，对应 a 、 b 的常数 K_a 、 K_b 值示于表 4。

表 4 K_a 、 K_b 值

Table 4 Values of K_a and K_b

K_a		K_b	
加荷	卸荷	加荷	卸荷
22.90	17.94	1.97	0.92

则得考虑温度梯度的冻结中砂应力 - 应变模型：对于 CTC 试验

$$q' = 1 + \frac{e_a}{0.1881(1 + 22.9\text{grad}T) + 0.3428(1 + 1.97\text{grad}T)e_a} \quad (6)$$

对于 RTC 试验

$$q' = 1 + \frac{e_a}{0.1748(1 + 17.94\text{grad}T) + 1.1611(1 + 0.92\text{grad}T)e_a} \quad (7)$$

通过此，可进一步分析温度梯度及 CTC（或 RTC）试验过程对冻结中砂应力 - 应变特性及演变的影响。

2.3 温度梯度的影响

若温度梯度对双曲线模型参数 a 、 b 的影响近似可用 $(1 + K \text{grad}T)$ 描述，则不同温度梯度对模型起始切线斜率 h_i 以及大应变时的极限偏应力比 q'_{ult} 的影响示于图 5。

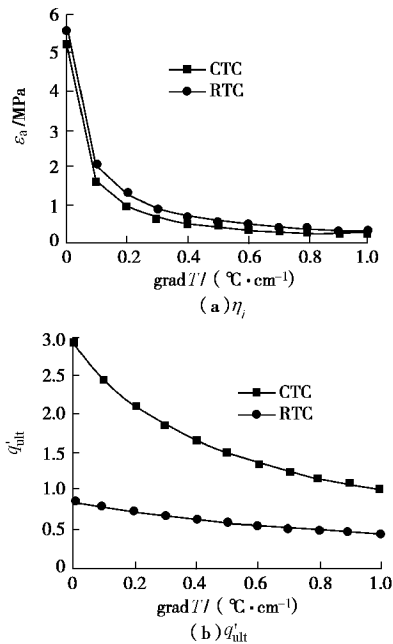


图5 模型起始切线斜率及极限偏应力比与温度梯度的关系
Fig. 5 Variation of h_t and q'_{ult} with the temperature gradients

如前所述, 温度梯度基本没有改变冻结中砂应力-应变关系的形态。但随着温度梯度的微小增加, 模型起始切线斜率大大减低(图5(a)), 偏应力比-轴向应变关系曲线明显变缓(图4), 抵抗变形的能力大大减低; 类似地, 大应变时的极限偏应力比也随温度梯度的增加而减低(图5(b)), 冻土的强度减低。

即使温度梯度很小时, 与均匀温度场条件相比, 冻结中砂的强度和刚度也均发生了明显变化, 特别是冻土的刚度减低更为显著。即, 冻土刚度对温度均匀变化的依赖程度远没有其非均质性的影响更大。这一结论对于冻结工程实际十分重要, 实际工程中冻结壁的变形往往大于按传统平均温度计算所得结果的一个重要原因就是没有考虑温度梯度诱导的材料非均质性的影响。

冻土力学性质强烈依赖于温度, 由温度梯度诱导的非均质冻土试样的轴向应变是非均匀的, 温度相对较高部分的变形较大, 对在相对较小偏应力条件下的变形贡献也就更大, 从而导致了起始曲线斜率(弹性模量)的很大差异。

温度梯度对冻结中砂应力应变特性演变的作用既影响模型曲线的起始斜率(弹性模量), 也影响冻土的强度, 但其作用主要体现在对冻土起始刚度的弱化。

2.4 应力路径的影响

尽管 RTC 试验中冻结中砂刚度和强度随温度梯度的变化稍缓于 CTC 试验(表4、图5), 但温度梯度对两种应力路径试验获得的应力-应变曲线起始斜率影响差别不大, 均表现出强烈依赖于温度梯度的特征(图5(a)); 而对应于实际开挖工程路径的 RTC 试

验, 在相同轴向应变时的偏应力比仅为传统加轴压试验(CTC)的 $1/3 \sim 1/2$ (图5(b)), 与模型曲线起始斜率的变化相比, 相同温度梯度时冻结中砂强度的变化相对更大, 其强度更低(参见图3、表3)。因此, 减围压路径试验对冻结中砂应力-应变特性演化的作用主要体现在对强度的弱化, 依据传统试验方法获得的冻土强度进行冻结壁的设计计算将可能高估冻结壁的安全性。

3 结论与思考

(1) 不同温度梯度冻结中砂在加轴压和减围压两种应力路径下三轴试验获得的应力-应变关系曲线形状和演化与均匀温度冻结中砂基本相同, 均可用 Kondner 双曲线模型进行描述, 但是不同温度梯度以及 CTC 和 RTC 两种应力路径试验中的冻结中砂应力应变特性差异很大。

(2) 根据对本文试验结果的分析, 可以采用温度梯度的线性函数 $f(\text{grad } T)$ 修正双曲线模型, 以描述温度梯度对应力-应变关系特性的影响。

(3) 温度梯度诱导了冻结中砂的非均质性, 这一非均质性质对冻结中砂应力-应变关系曲线的起始弹性模量影响很大, 温度梯度对其具有明显的弱化效应。

(4) 与 CTC 路径试验结果相比, RTC 试验在相同轴向应变时的偏应力比大为减低。RTC 试验对冻结中砂应力-应变特性演化的效应主要体现在对强度的弱化。

本文初步研究了不同温度梯度冻结中砂 CTC 和 RTC 两种应力路径试验的应力-应变关系演变特征, 所得温度梯度“弱化效应”的结论突破了传统冻结壁分析计算的均质化假设, 对于深厚表土非均质厚冻结壁的合理评价具有重要意义, 但更大范围的温度梯度、不同土性以及弱化效应机理等研究工作正在进行之中。

参考文献:

- [1] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM R. The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure tri-axial conditions[J]. Géotechnique, 1972, 22(3): 469 - 483.
- [2] SAYLES F H. Triaxial constant strain rate tests and triaxial creep tests on frozen Ottawa sand[C]// Proceedings of 2nd International Permafrost Conference, Yakutsk, USSR, 1973: 384 - 391.
- [3] AULD F A. Freeze-wall strength and stability design problems in deep shaft sinking. Is current theory realistic?[C]// 4th

- International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, 1985: 343 - 350
- [4] ANDERSEN G R, SWAN C W, LADD C C, et al. Small-strain behavior of frozen and in triaxial compression[J]. Can Geotech J, 1995, **32**(3): 428 - 451.
- [5] 马 巍, 吴紫汪, 盛 煜. 岩土工程学报[J]. 围压对冻土强度特性的影响, 1995, **17**(5): 8 - 10. (MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Yu. Effect of confining pressure on strength behavior of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 8 - 10. (in Chinese))
- [6] 马 巍, 朱元林, 马文婷, 等. 冻结粘性土的变形分析[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(1): 44 - 46. (MA Wei, ZHU Yuan-lin, MA Wen-ting, et al. Analyses of deformation in frozen clayey soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(1): 44 - 46. (in Chinese))
- [7] ONO Takashi. Lateral deformation of freezing clay under triaxial stress condition using laser-measuring device[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002(35): 45 - 54.
- [8] 崔广心. 深土冻土力学—冻土力学发展的新领域[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(2): 97 - 100. (CUI Guang-xin. Mechanics of frozen soil for deep a new field of frozen soil mechanics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(2): 97 - 100. (in Chinese))
- [9] 马 巍, 常小晓. 加载卸载对人工冻结土强度与变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(5): 564 - 566. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Influence of loading and unloading on strength and deformation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(5): 564 - 566. (in Chinese))
- [10] 马 巍, 常小晓, 王大雁. 人工冻结竖井中冻土壁强度与变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增 2): 2871 - 2874. (MA Wei, CHANG Xiao-xiao, WANG Da-yan. Behaviour of strength and deformation of frozen soil wall in artificially frozen shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2871 - 2874. (in Chinese))
- [11] 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 consolidation by unloading triaxial shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(8): 1252 - 256. (in Chinese))
- [12] 王大雁, 马 巍, 常小晓. 深部人工冻土抗变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 419 - 421. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Study on resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 419 - 421. (in Chinese))
- [13] 王大雁, 马 巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土在小应变条件下的刚度特性[J]. 岩土力学, 2006, **27**(4): 1448 - 1510. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Small strain stiffness properties of frozen soils in deep alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(4): 1448 - 1510. (in Chinese))
- [14] PARAMESWARAN V R, JONES S J. Triaxial testing of frozen sand[J]. Journal of Glaciology, 1981, **27**(95): 147 - 156.
- [15] RE G D, GERMAINE J T, LADD C C. Triaxial testing of frozen sand: equipment and example results[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2003, **17**(3): 90 - 118.
- [16] 盛 煜, 吴紫汪, 常小晓. 正弦变温过程中冻土蠕变变形初步研究[C]// 第五届全国冰川冻土大会论文集. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 729 - 732. (SHENG Yu, WU Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Preliminary investigations into creep deformation of frozen soil in the process of sinusoidal temperature[C]// Proc of Fifth National Assembly on Frozen Glacier. Lanzhou: Gansu Cultrual Press, 1996: 729 - 732. (in Chinese))
- [17] 李生生. 非均匀温度场冻结中砂卸荷力学特性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007. (LI Sheng-sheng. Unloding mechanics characteristic of frozen medium sand in inhomogeneous temperature field[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007. (in Chinese))