DOI：10.16285/j.rsm.2017.1607

定向剪切应力路径下冻结黏土变形特性试验

陈 敦[1,2]，马 巍[1]，王大雁[1]，穆彦虎[1]，雷乐乐[1,2]，王永涛[1,3]，周志伟[1]，蔡 聪[1,2]

（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. 内蒙古大学 交通学院，内蒙古 呼和浩特 010070）

摘 要：为研究复杂应力路径下冻土的强度与变形特征，采用冻土空心圆柱仪（FHCA-300）对不同负温状态下的饱和冻结黏土开展定向剪切试验，基于不同剪切方向下冻结黏土的轴向和扭剪分量的应力-应变关系，探讨土样的剪切变形特征、各向异性属性以及剪切带的演变规律，并考察温度、大主应力方向角、平均主应力以及中主应力系数等因素对冻结黏土强度的影响。结果表明：平均主应力 p 值对冻结黏土的应力-应变关系影响显著，尤其是 p=4.5 MPa 时具有较高的剪切强度，且该值可能为压融临界 p 值；大主应力方向变化会诱发冻结黏土的各向异性，随着大主应力方向角的增加，冻结黏土剪切强度逐渐降低，并有明显的剪切带产生；中主应力系数的增加使得轴向强度有逐渐降低的趋势，但对剪切强度影响不明显；随着温度的降低，冻结黏土强度逐渐增大，试样发生脆性破坏并出现剪切破裂面，其剪切强度主要取决于冰颗粒和土颗粒的胶结力。

关 键 词：冻结黏土；空心圆柱仪；复杂应力路径；各向异性；剪切带

中图分类号：TU 445 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2018) 07－2483－08

Experimental study of deformation characteristics of frozen clay under directional shear stress path

CHEN Dun[1, 2], MA Wei[1], WANG Da-yan[1], MU Yan-hu[1], LEI Le-le[1, 2],
WANG Yong-tao[1, 3], ZHOU Zhi-wei[1], CAI Cong[1, 2]

（1. State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China）

Abstract: To study the strength and deformation characteristics of frozen clay under complex stress path, a series of directional shear tests on saturated frozen clay is conducted under different negative temperature conditions by using dynamic hollow cylinder testing apparatus of frozen soils (FHCA-300). Stress-strain curves of the axial and torsional shear components for frozen clay are analyzed under different shear directions. The shear deformation, anisotropy and shear band characteristics are discussed. And the effects of temperature, angle of major principal stress direction, mean principal stress and coefficient of intermediate principal stress in the strength and deformation behaviors of frozen clay are explored. The test results indicate that the value of the mean principal stress p has a significant effect on the stress-strain curves of frozen clay. When p=4.5 MPa, the frozen clay has a major shear strength and this stress value (the mean principal stress) may be the critical value of pressure melting. The anisotropy of frozen clay may be induced by the change of major principal stress direction. Shear strength decreases versus the increase of angle of major principal stress direction. The axial strength decreases with the increase of the coefficient of intermediate principal stress, but the effect of the coefficient on the shear strength is neglect. With the decrease of temperature, the strength of frozen clay increases gradually. Meanwhile, the samples produce brittle failure, and a shear failure surface appears and develops. The shear strength of frozen clay depends mainly on the cementation force between soils and ice particles.

Keywords: frozen clay; dynamic hollow cylinder testing system; complex stress path; anisotropy; shear band

收稿日期：2017-07-31
基金项目：国家自然科学基金(No. 41671069，No. 41401077)；冻土工程国家重点实验室基金项目(No. SKLFSE-ZT-31)；国家自然科学基金重点项目(No. 41630636)。
This work was supported by the Natural Science Foundation of China (41671069, 41401077), the Foundation of the State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE-ZT-31) and the Key Project of Natural Science Foundation of China (41630636).
第一作者简介：陈敦，男，1989 年生，博士研究生，主要从事冻土力学方面的研究工作。E-mail: chendun@lzb.ac.cn
通讯作者：马巍，男，1963 年生，博士，研究员，主要从事冻土力学与寒区工程方面的科研工作。E-mail: mawei@lzb.ac.cn

1 引 言

随着我国“一带一路”倡议的逐步推进及区域社会经济的发展，寒区工程项目显著增加。在寒区工程的设计、建设以及运营中，不可避免地会遇到冻土的强度与变形问题。准确预测冻土的变形，确保寒区工程的长期稳定，迫切需要在已有冻土强度理论的基础上，对冻土在复杂应力条件下的应力–应变–强度特性进行研究。

冻土作为一种特殊土，是由固体土颗粒、冰、液态水和气体 4 种基本成分所组成的非均质、各向异性的多相复合体，其物理力学性质与常规融土差异显著[1]。就冻土强度而言，影响因素主要包括温度、围压、含冰（水）率、土质类型和加载速率等[1]。对于温度的影响，已有研究表明，冻土强度随温度的降低呈幂函数形式增大，不同的试验土质和条件下，幂函数的参数值大小则略有差异[2]。对于含水率和围压而言，都存在一个临界值[2]，马巍等[3]依据围压的影响规律建立了冻土的抛物线型屈服准则。

对于常规融土，自 20 世纪 80 年代 Hight 等[4]提出空心圆柱仪（不但可以实现主应力大小成比例的任意变化，还可以同时实现主应力方向轴的旋转）以来，国内外的研究人员就利用该设备对土体在复杂应力条件下的力学性质开展了系统的研究。在国外，Nakata[5]、Yoshimine[6]、Lade[7−8]、Nishimura[9]、Kumruzzaman[10]、Kandasami[11]等利用空心圆柱仪分别对砂土、黏土等不同类型土样进行了多路径试验研究，发现大主应力方向角 α 和中主应力系数 b 的变化对土体应力–应变关系、剪切特性以及土体的各向异性均有显著影响。在国内，沈扬[12]发现在不同主应力方向的定向剪切试验中，随主应力方向的变化，试样各应变发挥程度显著不同，大主应力方向角 α 和中主应力系数 b 对软黏土的各向异性有明显的影响。管林波等[13]通过分析杭州典型原状黏土不同方向应变的发展规律，认为在剪切过程中，中主应力系数 b 对原状黏土的各向异性有显著影响，而大主应力方向角 α 引起的变化则可以忽略。其他学者则认为，中主应力系数与强度参数和非共轴特性具有依赖性[14−16]。

由于仪器设备技术的限制，以往冻土力学的研究主要基于冻土单轴和三轴试验，仅能反映土体在轴对称应力状态下的强度与变形特性，无法考察对大主应力方向角、平均主应力以及中主应力系数的影响。本文利用冻土空心圆柱仪（FHCA−300），通过开展不同负温状态下冻结黏土的定向剪切试验，获得不同剪切方向冻结黏土轴向和扭剪分量的应力–应变关系，以此分析其在不同影响因素下的变形特性，揭示土样的剪切变形特征、各向异性属性以及剪切带的发展演化规律。

2 试验设计

2.1 试验仪器

采用中国科学院冻土工程国家重点实验室和美国 GCTS 公司共同研发的冻土空心圆柱仪（如图 1 所示），开展冻土在复杂应力条件下的力学特性研究。仪器结构如图 2 所示，由压力室及伺服主机系统、液压伺服加载系统、数字控制系统以及温度控制系统 4 部分组成，可以独立施加和控制轴力 W、扭矩 M_{T}、内围压 p_{i}、外围压 p_{o} 以及温度 T[17]。仪器配置及传感器的性能指标如表 1 所示。



图 1 冻土空心圆柱仪（FHCA−300）

Fig.1 Dynamic hollow cylinder testing apparatus of frozen soils (FHCA−300)

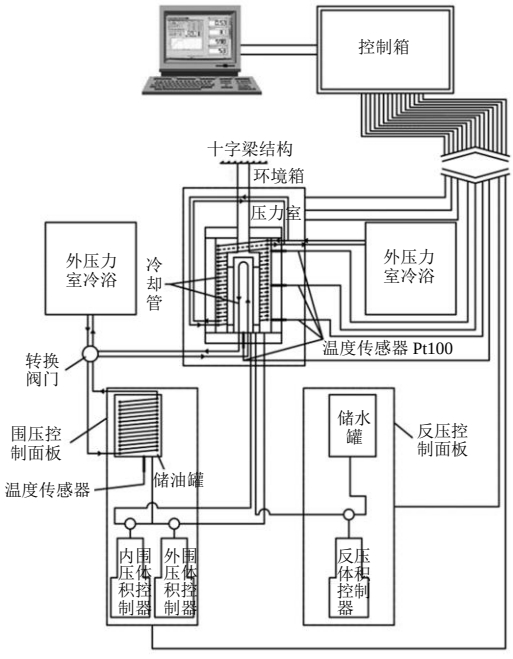


图 2 冻土空心圆柱仪结构示意图[17]

Fig.2 Structure diagram of dynamic hollow cylinder testing apparatus of frozen soils [17]

表 1　FHCA−300 传感器性能指标
Table 1　Summary of key features of the FHCA−300 sensors

传感器技术指标	量程	精度
轴向荷载传感器	−100 kN～100 kN	全量程 0.1%
轴向位移传感器	−50.8 mm～50.8 mm	0.001 mm
扭矩传感器	−1 000 N·m～+1 000 N·m	全量程 0.1%
扭矩位移传感器	−114.3 mm~114.3 mm	0.001 mm
扭转角度传感器	−45°～45°	全量程 0.1%
温度传感器	−40 °C～80 °C	±0.1 °C
内外围压传感器	2 MPa～22 MPa	全量程 0.25%

2.2　试样制备

试验所用土质为青藏铁路沿线粉质黏土，其相关物理性质如表 2 所示。

表 2　试验土质的物理性质
Table 2　Basic properties of tested clay

参数	土的相对密度	液限 w_L/%	塑限 w_P/%	干密度 ρ_d/(g/cm^3)	饱和含水率 w_{sat}/%
测试值	2.7	27.7	17.6	1.9	19.8

为保证试样的均匀性，对野外采集的土质进行自然风干后，碾碎并过 2 mm 的筛。称取筛后土烘干，加入蒸馏水配置成目标含水率为 19.8%的土样，装入密封袋中静制 24 h。然后，称取一定质量的土样分层装入自制钢筒中，用压样机变速率两头压实法进行制备，如图 3(a)所示。最终制成尺寸为 200 mm×100 mm×60 mm（高×外直径×内直径）的空心圆柱试样，如图 3(b)和图 3(c)所示。将制备完成的试样快速装入 FHCA−300 压力室，启动制冷循环系统。为防止试样中的水分迁移，将其在−30 °C 下快速冻结 48 h。随后调节至目标温度，直到试样内外温度稳定且达到设定值，恒温 12 h 以上然后开始进行试验加载。



(a) 制样设备　(b) 空心圆柱试样　(c) 空心圆柱试样

图 3　空心圆柱试样的制备
Fig.3　Preparation of a hollow cylinder sample

2.3　试样受力状态以及应力体系

空心圆柱试样的应力状态如图 4 所示，W、M_T、p_i 以及 p_o 在试样薄壁单元体上会产生 4 个独立的应力分量（轴向应力 σ_z、扭剪应力 $\tau_{z\theta}$、径向应力 σ_r 以及环向应力 σ_θ），其计算公式为

$$\sigma_z=\frac{W}{\pi(r_o^2-r_i^2)}+\frac{p_o(r_o^2-r_p^2)-p_ir_i^2}{(r_o^2-r_i^2)} \tag{1}$$

$$\tau_{z\theta}=\frac{M_T\left(r_o+r_i\right)}{\pi\left(r_o^4-r_i^4\right)} \tag{2}$$

$$\sigma_r=\frac{p_or_o+p_ir_i}{(r_o+r_i)} \tag{3}$$

$$\sigma_\theta=\frac{p_or_o-p_ir_i}{(r_o-r_i)} \tag{4}$$

式中：r_i、r_o 分别为试样的内径和外径；r_p 为轴向加载杆的半径。

这 4 个应力分量通过数学上的映射关系可把加载的应力参数换算到应力体系 p、q、b、α 中，其计算公式为

$$p=\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)=\frac{1}{3}(\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta) \tag{5}$$

$$q=\left(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\right)=\sqrt{\left(\frac{\sigma_z-\sigma_\theta}{2}\right)^2+\left(\tau_{z\theta}\right)^2} \tag{6}$$

$$\alpha=\frac{1}{2}\arctan\left(\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z-\sigma_\theta}\right) \tag{7}$$

$$b=\frac{\sigma_2-\sigma_3}{\sigma_1-\sigma_3}=\frac{\sigma_r-(\sigma_z+\sigma_\theta)/2+\sqrt{(\sigma_z-\sigma_\theta)^2/4+\left(\tau_{z\theta}\right)^2}}{2\sqrt{(\sigma_z-\sigma_\theta)^2/4+\left(\tau_{z\theta}\right)^2}} \tag{8}$$

式中：σ_1、σ_2、σ_3 分别为大、中、小主应力；p 为平均主应力；q 为剪应力。

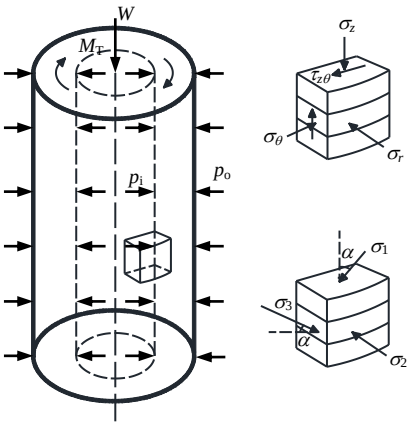


图 4　空心圆柱试样的应力状态
Fig.4　Stress states in a hollow cylinder sample

2.4 试验方案

本文开展了 4 组定向剪切试验，具体的试验方案如表 3 所示。整个试验过程分为两个阶段，如图 5 所示，第 1 阶段为初始阶段（见图 5 中 0 到 A），即将所有的应力参数加载到初始设定值；第 2 阶段为加载阶段（见图 5 中 A 到 B），即保持大主应力方向角 α、中主应力系数 b、平均主应力 p 和温度 T 不变，单纯增加剪应力 q 直至试样破坏，整个剪切过程中 q 的加载速率为 30 kPa/min。

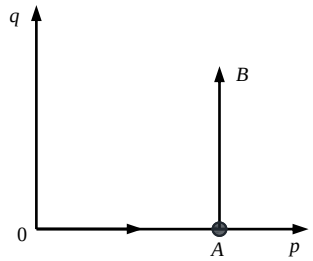


图 5 定向剪切试验加载路径

Fig.5 Loading path of directional shear test

表 3 试验方案

Table 3 Test scheme

试验编号	控制参数				试验编号	控制参数			
	T/℃	p/MPa	b	α/(°)		T/℃	p/MPa	b	α/(°)
T101	−10	3.5	0.50	30	T205	−10	4.5	0.00	60
T102	−10	4.0	0.50	30	T206	−10	4.5	0.00	75
T103	−10	4.5	0.50	30	T301	−10	4.5	0.00	30
T104	−10	5.0	0.50	30	T302	−10	4.5	0.25	30
T105	−10	5.5	0.50	30	T303	−10	4.5	0.75	30
T201	−10	4.5	0.00	0	T304	−10	4.5	1.00	30
T202	−10	4.5	0.00	15	T401	−5	4.5	0.00	30
T203	−10	4.5	0.00	30	T402	−15	4.5	0.00	30
T204	−10	4.5	0.00	45	T403	−20	4.5	0.00	30

3 试验结果分析及讨论

空心圆柱试样的单元体在试验应力路径下不仅有轴向应变 ε_z 的产生，也会产生扭剪应变 $\gamma_{z\theta}$、径向应变 ε_r 以及切向应变 ε_θ，因此在变形分析过程中引入广义剪应变[18]来进行描述。

广义剪应力 q_J 为

$$q_J=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} \tag{9}$$

广义剪应变 γ_g 为

$$\gamma_g=\frac{\sqrt{2}}{3}\left(\frac{9}{2}\varepsilon_z^2+\frac{3}{2}\gamma_{z\theta}^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

其中：

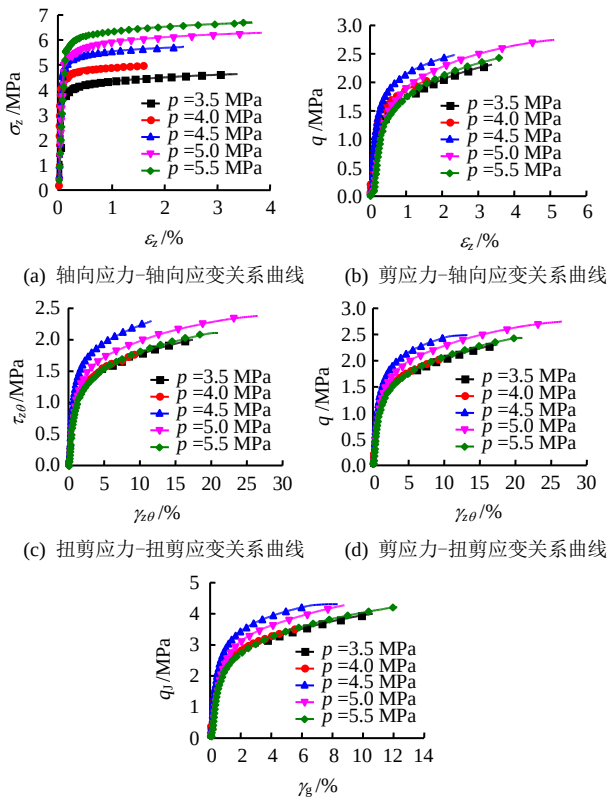
$$\gamma_{z\theta}=\frac{2\Delta\theta\left(r_o^3-r_i^3\right)}{3H_o\left(r_o^2-r_i^2\right)};\ \varepsilon_z=\frac{\Delta h}{H_o} \tag{11}$$

式中：Δh 为试样的轴向变形；H_o 为试样的起始高度；$\Delta\theta$ 为试样的扭转角度。

3.1 平均主应力的影响

由图 6(a)可知，随着平均主应力 p 值的增加，轴向强度逐渐增加。在加载初期，试样的弹性行为较为明显，不同 p 值下初始弹性模量大致相等。当轴向应力达到某一应力水平后，轴向应力逐渐趋于稳定。如图 6(b)所示，试样在 α =30°、b=0.5、T=−10 ℃ 的情况下，整个剪切过程中试样一直处于压缩状态。p=4.5 MPa 时，同等轴向应变对应的剪应力最大。

图 6(c)给出了不同平均主应力 p 下，扭剪方向上应力−应变关系曲线，可得 p 分别为 3.5、4.0、5.5 MPa 时的曲线变化模式基本相同，p 值的影响不明显。但 p 分别为 4.5 MPa 和 5.0 MPa 时，较之其他 p 值下的扭剪强度有所提高，且 p=4.5 MPa 时扭剪强度最大。图 6(d)与图 6(c)曲线的整体变化趋势基本一致，p 值为 3.5、4.0、5.5 MPa 时对扭剪方向应力−应变关系的影响可忽略。当 p=4.5 MPa 和 p=5.0 MPa 时在加载初期扭剪应变变化较小，但当扭剪应变达到 4.5%以后，p=4.5 MPa 的剪应力则持续高于 p=5.0 MPa 的剪应力。



(a) 轴向应力−轴向应变关系曲线 (b) 剪应力−轴向应变关系曲线

(c) 扭剪应力−扭剪应变关系曲线 (d) 剪应力−扭剪应变关系曲线

(e) 广义剪应力−广义剪应变曲线

图 6 不同平均主应力下冻结黏土应力−应变关系曲线

Fig.6 Stress-strain curves of frozen clay under different mean principal stresses

由图 6(e)可见，不同平均主应力 p 值下的广义剪应力−广义剪应变关系曲线可以分为两个阶段，第 1 个阶段为低剪应力阶段，不同 p 值的广义剪应变值非常接近，初始剪切模量基本一致，试样呈现出较大的刚度，没有受到重塑冻结黏土各向异性的影响。这是由于在冻结黏土空心圆柱试样制备过程中采用分层装入静压的方法，表现为横观各向同性。第 2 阶段随着广义剪应力的进一步增加，其应力−应变关系曲线发生明显的变化，各向异性特征显著。广义剪应力−广义剪应变曲线出现了拐点，该拐点本文称之为冻结黏土特征广义剪应力值 q_c，即 q_J 值增加到 q_c 值后，广义剪应变随之迅速发展。其中 p 分别为 3.5、4.0、5.5 MPa 的曲线差异不是十分明显，而 p=4.5 MPa 和 p=5.0 MPa 时则存在较大的变化，且在 p=4.5 MPa 时冻结黏土的强度最大。

由图 6 可得，平均主应力 p 值对冻结黏土的应力−应变−强度有一定的影响，尤其是 p=4.5 MPa 和 p=5.0 MPa 的情况较之其他 p 值影响更为显著。随着 p 值的增加，试样内部会出现压融现象，且对于平均主应力 p 可能存在一个压融临界 p 值（即 p=4.5 MPa 左右）。当 p 值小于压融临界 p 值时（即 p<4.5 MPa），冻结黏土的强度随着 p 值的增大而增大；当 p 值超过压融临界 p 值时（即 p>4.5 MPa），强度随压融临界 p 值的增大而减小，因此，后续试验中拟选用平均主应力 p=4.5 MPa 开展研究。

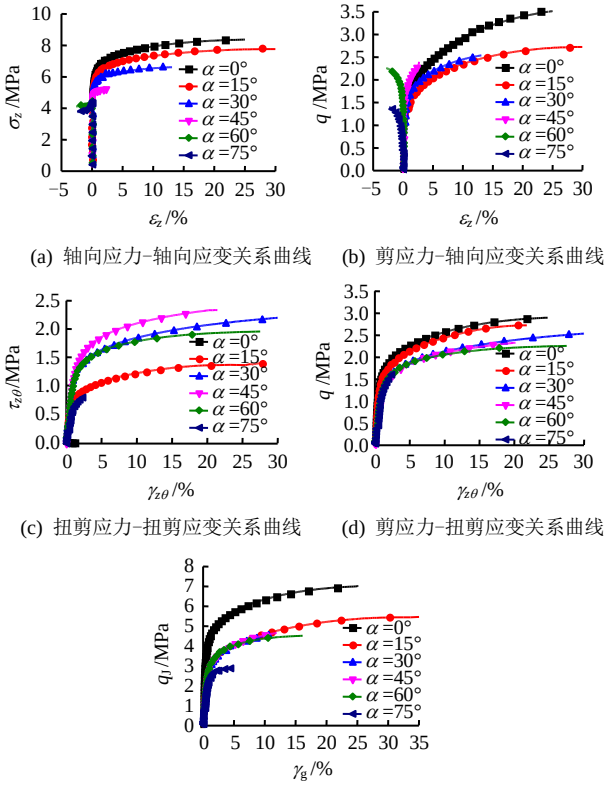
3.2　大主应力方向角的影响

图 7(a)和图 7(b)分别给出了不同大主应力方向角 α 下，轴向应力和剪应力与轴向应变的变化曲线。可以看出，大主应力方向角 α 分别为 0°、15°、30°及 45°时（即$\alpha \leqslant$45°），轴向分量的应力−应变关系呈现应变硬化特征，轴向应变随着轴向应力和剪应力的增加而逐渐增加，试样被压缩；而当大主应力方向角为 60°和 75°时（即$\alpha \geqslant$60°），随着轴向应力的降低或是剪应力的增加，轴向应变出现负值，试样被拉伸。

图 7(c)中不同的大主应力方向角 α 下，扭剪方向应力−应变关系曲线可知：大主应力方向角α =0°时（即模拟大主应力作用方向垂直于土体沉积面），没有施加扭矩，因此，扭剪应变始终为 0；当大主应力方向角α =45°时，扭剪强度最大；而当大主应力方向角α =75°时，扭剪强度最小。图 7(d)给出了不同大主应力方向角 α 下扭剪变形随剪应力的变化曲线。可以看出，随着大主应力方向角度的增加，剪切强度逐渐降低。α 分别为 30°、45°和 60°时，曲线发展基本一致。

由图 7(e)可以看出，在初始阶段弹性变形区，广义剪应力较低，因此，难以克服原生作用形成的土颗粒、冰晶体以及未冻水之间的胶结力，各个组构之间排列位置调整较小，宏观上即表现为广义剪应变变化不大，在不同的α 下具有大致相同的初始剪切模量，对强度几乎没有影响。随着 q_J 增加直到大于 q_c 后，试样完全进入塑性变形区域。土颗粒、冰晶体和未冻水之间原有的结构遭到破坏，各个组构之间排列位置重新调整，颗粒之间发生平移或转动错位，新的内部结构体系逐渐形成并达到平衡状态，冻结黏土强度的变化受α 的影响逐渐凸显[19]。当α =0°时，强度最高；当α 分别为 15°、30°、45°及 60°时，在加载初期和中期广义剪应力−广义剪应变曲线几乎重合，因此，α 在 15°～60°之间时对于冻结黏土强度的影响较小；当α =75°时，强度最低。

综上所述，无论大主应力方向角度偏转多少，试样均没有出现应变软化现象。大主应力方向变化诱发的冻结黏土各向异性对其强度具有较大的影响，且随着大主应力方向角的增大，剪切强度逐渐降低。



(a) 轴向应力−轴向应变关系曲线　(b) 剪应力−轴向应变关系曲线

(c) 扭剪应力−扭剪应变关系曲线　(d) 剪应力−扭剪应变关系曲线

(e) 广义剪应力−广义剪应变曲线

图 7　不同大主应力方向下冻结黏土应力−应变关系曲线

Fig.7　Stress-strain curves of frozen clay under different major principal stress directions

冻结黏土试样在受到轴力和扭矩耦合作用下，

应力−应变关系曲线均呈现应变硬化特征，当应力发展到某一时刻时，试样局部狭长区域会突然破坏（此处所指破坏为扭剪分量应变达到极值），表现为一种塑性破坏。从图 8 不同大主应力方向角 α 下冻结黏土试样的破坏特征可以看出，当 α=0°且 b=0 时（即 $\sigma_2=\sigma_3$），试样在加载过程中整体呈现轴对称压缩状态，试样没有发生扭剪变形，呈现出中间细端部粗的鼓型；当 α=15°时，试样下部发生破坏，并伴随着明显的扭剪痕迹；当 α 分别为 30°、45°、60°时，试样发生扭剪变形并且剪切痕迹明显，试样整体呈麻花型；当 α=75°时，试样发生扭剪变形，但基本保持原有形状。总结以上试样呈现的破坏特征可知，除大主应力方向角 α=0°的情况，其余角度下均出现明显的剪切带，剪切带是局部化变形发展成为一个集中剪切的带状区域，即试样在破坏时大多在局部狭窄区域中呈现急剧非连续式的变形，会直接导致试样的强度降低、承载力下降[20]。由图 8 可知，所有的剪切带都是整体变形，能够反映冻结黏土的整体力学变形特性，也说明轴力和扭矩耦合作用克服了端部效应的影响，这与文献[12]的研究结果相同。



(a) α=0° (b) α=15° (c) α=30° (d) α=45° (e) α=60° (f) α=75°

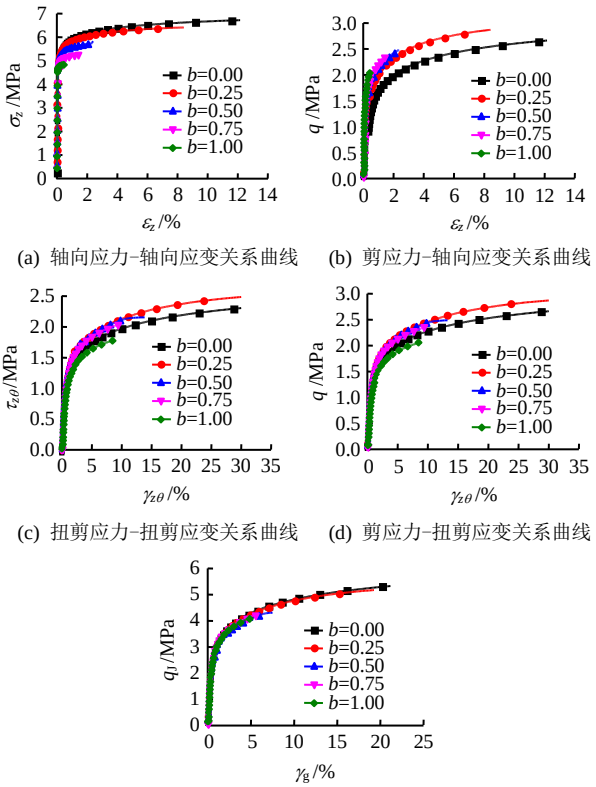
图 8 不同大主应力方向角下冻结黏土试样破坏特征

Fig.8 Failure characteristics of frozen clay samples under different angles of major principal stress direction

3.3 中主应力系数的影响

随着中主应力系数的增加，轴向强度逐渐降低，而剪切强度则会逐渐增加，如图 9(a)和图 9(b)所示。从图 9(c)和图 9(d)可知，对于扭剪应变 $\gamma_{z\theta}$ 无论是扭剪应力 $\tau_{z\theta}$ 还是剪应力 q，中主应力系数 b 值为 0.25、0.50 和 0.75 时，变化规律基本相同，因此 b 值在 0.25～0.75 之间时，中主应力系数对扭剪应变影响不大。然而，当 b 为 0 和 1 时，中主应力系数对扭剪应变则有一定的影响，此时剪切强度较之其他 b 值下的剪切强度较低。由图 9(e)可得，不同中主应力系数下冻结黏土的广义剪应力−广义剪应变关系曲线发展规律基本一致。

因此，在轴向分量上，随着中主应力系数 b 值的增加轴向强度逐渐降低；在扭剪分量上，中主应力系数 b 值在 0.25～0.75 之间时扭剪应力−应变曲线差别不大，而在 b 值为 0 和 1 的情况下则差异明显；中主应力系数对冻结黏土的广义剪应力−广义剪应变关系曲线的影响较小。



(a) 轴向应力−轴向应变关系曲线 (b) 剪应力−轴向应变关系曲线

(c) 扭剪应力−扭剪应变关系曲线 (d) 剪应力−扭剪应变关系曲线

(e) 广义剪应力−广义剪应变曲线

图 9 不同中主应力系数下冻结黏土应力−应变关系曲线

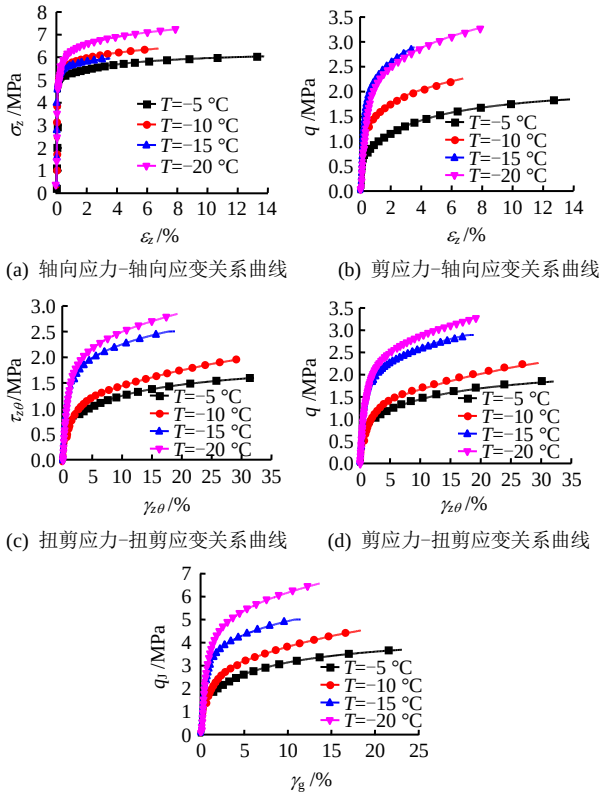
Fig.9 Stress-strain curves of frozen clay under different coefficients of intermediate principal stress

3.4 温度的影响

由图 10 可知，温度对于冻结黏土的应力−应变关系影响显著，随着温度的降低，冻土中未冻水的含量减小，土颗粒和冰颗粒之间的胶结力增强，强度逐渐增大。从图 10(c)和图 10(d)中不同温度扭剪分量的应力−应变关系曲线可得，−5 ℃ 与−10 ℃、−15 ℃ 与−20 ℃ 可近似看作为两组剪切应变簇，各组内部两条曲线应力值较为接近，各组之间应力值差距较大。

冻土的抗剪能力实际是由不同介质接触面的胶结力和冰自身的抗剪能力共同支撑主导，其中胶结力是冻土体中不同介质颗粒联结固化的基本受荷形式，颗粒间的胶结力要明显弱于冰颗粒自身的抗剪能力，在土样破坏前的变形过程中两种形式的承载机制共同支撑土体的宏观抗剪能力，当胶结力达到破坏强度时对应土体发生剪切破坏，土体的剪切强度值受最大胶结力的制约和影响[2]。图 10 表明，复杂应力状态下冻结黏土的破坏模式为剪切失效，因

此，其剪切破坏强度对应的细观机制是不同相物质接触面间的黏结强度。



(a) 轴向应力−轴向应变关系曲线　(b) 剪应力−轴向应变关系曲线

(c) 扭剪应力−扭剪应变关系曲线　(d) 剪应力−扭剪应变关系曲线

(e) 广义剪应力−广义剪应变曲线

图 10　不同温度 *T* 下冻结黏土应力−应变关系曲线

Fig.10　Stress-strain curves of frozen clay under different temperatures

图 11 给出了不同温度下冻结黏土试样的破坏特征。可见随着温度的降低，试样扭痕愈发明显，并逐渐出现明显的剪切带，试样发生剪切破坏。当温度高于−10 ℃时，试样出现扭痕但未出现破裂面，其中在 T =−5 ℃时，试样还基本保持加载前的形状，而 T=−10 ℃时则呈麻花型。但当温度低于 T =−10 ℃时，试样则出现了角度大约为 45°的破裂面，说明温度的降低使得土颗粒与冰颗粒的胶结能力增强，试样发生脆性破坏。



(a) T =−5 ℃　(b) T =−10 ℃　(c) T =−15 ℃　(d) T =−20 ℃

图 11　不同温度 *T* 下冻结黏土试样破坏特征

Fig.11　Failure characteristics of frozen clay samples under different temperatures

4　结　论

（1）平均主应力 p 值对冻结黏土的应力−应变−强度有一定的影响，尤其是 p=4.5 MPa 和 p=5 MPa 的情况影响显著；对于平均主应力 p 值可能存在一个压融临界 p 值（即 p=4.5 MPa 左右），当 p 值小于压融临界 p 值时，冻结黏土的强度随着 p 值的增大而增大；当 p 值超过压融临界 p 值时，冻结黏土的强度随压融临界 p 值的增大而减小。

（2）大主应力方向变化诱发的各向异性对冻结黏土强度具有较大的影响，主要表现为随大主应力方向角的增加，剪切强度降低，试样出现明显的剪切带。

（3）中主应力系数是影响冻结黏土轴向应力−应变关系以及强度的主要因素之一，随着中主应力系数的增加，轴向强度有逐渐降低的趋势，而中主应力系数对剪切强度的影响不显著，特别是中主应力系数 b 值在 0.25～0.75 之间时对广义剪应力−应变曲线影响不大。

（4）随着温度的降低，冻结黏土试样胶结能力增强，强度逐渐增加，试样发生脆性破坏，并且伴随产生剪切破裂面。在复杂应力状态下冻结黏土的破坏模式为剪切失效，其剪切强度主要取决于土颗粒和冰颗粒的胶结力。

参 考 文 献

[1] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xiao-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soil[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010.

[2] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
MA Wei, WANG Da-yan. Mechanics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[3] 马巍, 吴紫汪, 张长庆. 冻土的强度与屈服准则[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 129－133.
MA Wei, WU Zi-wang, ZHANG Chang-qing. Strength and yield criteria of frozen soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1993, 15(1): 129－133.

[4] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. **Geotechnique**, 1983, 33(4): 355－383.

[5] NAKATA Y, HYODO M, MURATA H H, et al. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(2): 115－

128.

[6] YOSHIMINE M, ISHIHARA K, VARGAS W. Effects of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(3): 179－188.

[7] LADE P V, KIRKGARD M M. Effects of stress rotation and changes of *b*-values on cross-anisotropic behavior of natural, K_0-consolidated soft clay[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(6): 93－105.

[8] LADE P V, NAM J, HONG W P. Shear banding and cross-anisotropic behavior observed in laboratory sand tests with stress rotation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(1): 74－84.

[9] NISHIMURA S, MINH N A, JARDINE R J. Shear strength anisotropy of natural London clay[J]. **Geotechnique**, 2007, 57(1): 49－62.

[10] KUMRUZZAMAN M D, YIN J H. Influences of principal stress direction and intermediate principal stress on the stress-strain-strength behaviour of completely decomposed granite[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(2): 164－179.

[11] KANDASAMI R K, MURTHY T G. Experimental studies on the influence of intermediate principal stress and inclination on the mechanical behavior of angular sands[J]. **Granular Matter**, 2015, 17(2): 217－230.

[12] 沈扬. 考虑主应力方向变化的原状软黏土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
SHEN Yang. Experimental study on effect of variation of principal stress orientation on undisturbed soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[13] 管林波, 周建, 张勋, 等. 中主应力系数和主应力方向对原状黏土各向异性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3871－3877.
GUAN Lin-bo, ZHOU Jian, ZHANG Xun, et al. Study of influence of parameters of intermediate principal stress and principal stress direction on anisotropy of intact clay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp. 2): 3871－3877.

[14] 周建, 严佳佳, 刘正义. 原生和次生各向异性对软黏土强度和变形特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 666－670.
ZHOU Jian, YAN Jia-jia, LIU Zheng-yi. Effects of inherent and induced anisotropies on strength and deformation characteristics of soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Supp.2): 666－670.

[15] CAI Y. An experimental study of non-coaxial soil behaviour using hollow cylinder testing[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2010.

[16] 杨彦豪, 周建, 温晓贵, 等. 杭州软黏土非共轴特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2861－2867.
YANG Yan-hao, ZHOU Jian, WEN Xiao-gui, et al. Experimental study of non-coaxiality of Hangzhou soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(10): 2861－2867.

[17] 郭妍, 王大雁, 马巍, 等. 冻土空心圆柱仪的研发与应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 114－120.
GUO Yan, WANG Da-yan, MA Wei, et al. Development and application of frozen hollow cylinder apparatus[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2016, 48(12): 114－120.

[18] 沈瑞福, 王洪瑾, 周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996, (1): 27－33.
SHEN Rui-fu, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing. Dynamic strength of sand under cyclic rotation of principal stress directions[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (1): 27－33.

[19] 郭林, 王钰轲, 王军, 等. 中主应力与大主应力方向角对软黏土排水变形特性影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1380－1387.
GUO Lin, WANG Yu-ke, WANG Jun, et al. Influence of intermediate principal stress and major principal stress direction on the drainage-induced deformation of soft clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1380－1387.

[20] 沈扬, 周建, 张金良, 等. 考虑主应力方向变化的原状黏土强度及超静孔压特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 843－847.
SHEN Yang, ZHOU Jian, ZHANG Jin-liang, et al. Research on strength and pore pressure of intact clay considering variation of principal stress direction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(6): 843－847.