

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201710089

定向剪切应力路径下冻结黏土强度特性试验

雷乐乐^{1,2},王大雁¹,王永涛^{1,3},陈敦¹,马巍¹

(1. 冻土工程国家重点实验室(中国科学院西北生态环境资源研究院),兰州 730000;
2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 内蒙古大学 交通学院,呼和浩特 010070)

摘要:为探索考虑主应力轴方向变化等复杂应力路径下的冻结黏土强度特性,采用冻土空心圆柱仪,在温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,对重塑冻结黏土开展一系列主应力轴方向固定不变的定向剪切试验,探讨大主应力轴方向角 a 、中主应力系数 b 和平均主应力 p 值变化对冻结黏土强度特性的影响.通过对广义剪应力-广义剪应变曲线的分析,发现 a 角和 p 值变化对冻土的强度及破坏应变都有较大影响,随着 a 角的增加,破坏时的广义剪应力 q_j 值先增加后减小,最小值出现在 $a=75^{\circ}$ 处,随着 p 值增加, q_j 值先增加后减小; b 值变化对强度的影响较小,而对破坏应变有较大影响;广义剪应力-广义剪应变曲线均为弹性塑性应变硬化曲线,且初始线性段的极限应变值在 0.5% 左右,不受应力路径变化的影响.分析应力与应变之间的关系,建立了定向剪切应力路径下冻结黏土的强度模型方程,进而求得广义剪切模量随应变发展的关系表达式,并发现初始广义剪切模量对冻结黏土应变的发展及破坏应变值有较大影响,且存在一临界值,对于冻结黏土,该临界值为 $6\times 10^5\text{ kPa}$. a 角、 b 值和 p 值的变化都会对冻结黏土的强度及变形产生较大影响.

关键词:冻结黏土;冻土空心圆柱;定向剪切试验;强度特性;强度模型

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)06-103-07

The strength characteristics of frozen clay under the different principal stress directions

LEI Lele^{1,2}, WANG Dayan¹, WANG Yongtao^{1,3}, CHEN Dun¹, MA Wei¹

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

Abstract: To fully study the strength characteristics of frozen clay under complex stress paths such as the variation of principal stress axis direction, a series of different principle stress direction shear experiments were carried out using the frozen soil hollow cylinder apparatus at a temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to investigate the influence of the major principal stress orientation angle a (defined in the vertical plane), the intermediate principal stress ratio b and the mean principal stress p on the strength characteristics of frozen clay. Analyzing the generalized shear stress-generalized shear strain curves, the results showed that the strength of frozen clay was great influenced by the changes in a angle and p -value, and it was not affected by the changes in b -value. The failure strain was affected by the changes in these three parameters. The styles of stress-strain curves were all elastic-plastic strain harden curves and the range of elastic strain of the curves was about 0.5% , which was not affected by different stress paths. The strength model of frozen clay under different principle stress direction shear experiments was built through analyzing the relationship between stress and strain. Moreover, the relationship about generalized shear modulus E_{j1} and strain was obtained, and the influence of initial shear modulus E_{j10} on E_{j1} -strain curves was also discussed. The threshold value of E_{j10} was found and was about $6\times 10^5\text{ kPa}$ for frozen clay. The changes in a angle, b -value and p -value had great influence on the strength characteristics of frozen clay.

Keywords: frozen clay; frozen soil hollow cylinder apparatus; fixed principal stress direction test; strength characteristic; strength model

在多年冻土区和季节性冻土区进行工业与民用建筑、交通运输工程的建设,以及在人工冻土工程中

冻结壁的设计和应用等,都会涉及冻土的强度问题.冻土作为一种特殊的岩土材料,其土颗粒的矿物成分、形状与级配等是影响强度的主要因素,含水量、加载速率及温度等外部条件的变化也会对冻土的强度产生影响^[1-2].针对这些因素,国内外已开展了大量的试验研究来分析冻土的拉压强度特性,并给出相应的强度特征方程^[3-7].在模型方程研究中,Zhu等^[8]将冻土的应力-应变类型分为9种,分别给出

收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671069);
国家自然科学基金重点项目(41630636);
冻土工程国家重点实验室重点基金(SKLFSE-ZY-31)

作者简介: 雷乐乐(1991—),男,博士研究生;
王大雁(1971—),女,研究员,博士生导师

通信作者: 王大雁, dywang@lab.ac.cn

相应的应力-应变方程;陈湘生^[9]基于温度对冻土强度的影响提出冻土的瞬时强度模型,但此模型不能涵盖围压的影响,为此 Fish^[10]和马巍等^[6]建议采用广义 Drucker-Prager 准则;王大雁等^[11]利用 Duncan-Chang 双曲线模型分析了深部人工冻土的应力-应变行为;赖远明等^[12]提出改进 Duncan-Chang 模型来分析冻土的应变软化现象和应变硬化现象。

以上研究大多数是在单轴压缩或三轴压缩等简单应力路径下冻土强度的试验研究成果,而开展主应力轴方向变化等复杂应力路径的试验主要在非冻土的强度特性研究中,发现土体的强度随 α 角的增大呈匀形变化,其最小值在 α 为 60° 左右^[13-14];随着 b 值的增加不排水剪切强度均逐渐降低^[15],应力-应变刚度呈现各向异性弱化效应, b 值越大刚度弱化越显著^[16]; p 值的改变会在试样中产生明显的剪切变形^[17]. 由于试验仪器方面的限制,现有冻土力学的研究成果均未考虑主应力轴方向变化等对冻土强度的影响.随着冻土区工程的不断发展,对于工程中普遍存在的主应力轴方向变化等复杂应力状态,急需在室内试验中开展相关研究工作,为冻土区工程建设提供理论指导.为此,本文借助冻土空心圆柱仪,对重塑冻结黏土开展一系列主应力轴方向固定的定向剪切试验,探讨 α 角、 b 及 p 值的变化对冻结黏土强度特性的影响。

1 试样制备及试验设计

1.1 试样制备

试验用土采自青藏公路沿线,为青藏粉质黏土,其基本的物理性质如表 1 所示,颗粒级配见图 1. 制样前,将土体在自然条件下风干碾碎过 2 mm 筛后密封保存。

为确定试样的饱和含水率,首先对试验用土进行标准实心试样(直径 61.8 mm,样高 125 mm)的抽气饱水试验,测定该饱和试样的干密度为 1.77 g/cm^3 ,含水率为 19.8%. 然后以此为标准推算所需的干土质量和制备饱和试样所需的水量.将一定量蒸馏水加入试验土并拌和均匀后过 5 mm 筛,在密封容器中静置 24 h,使土中水均匀分布.通过自主研发的空心圆柱试样制样设备,将其制成干密度 1.77 g/cm^3 、含水率 19.8% 的空心圆柱试样,试样的尺寸:高度 $h_0 = 200 \text{ mm}$ 、外径 $d_0 = 100 \text{ mm}$ 、内径 $d_i = 60 \text{ mm}$ 、壁厚 $d = 20 \text{ mm}$,见图 2. 制备好的试样快速装入冻土空心圆柱试验机中,在 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下冻结 48 h,再将温度调至试验温度,稳定 24 h,使压力罐内温度均匀。

表 1 试验土的物理性质指标

Tab.1 Basic physical properties of experiment soil

相对体积质量	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_p
2.7	27.7	17.6	10.1

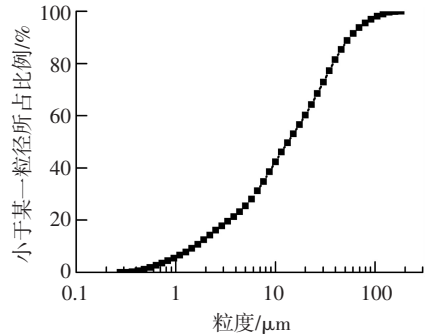


图 1 土体的颗粒级配曲线

Fig.1 Grain-size distribution curve



图 2 空心圆柱试样

Fig.2 Hollow cylinder specimen

1.2 试验方案

试验采用冻土工程国家重点实验室与美国 GCTS 公司联合开发的冻土空心圆柱仪(FHCA - 300),见图 3.该仪器能够独立控制和施加 4 个加载参数:轴力 W 、扭矩 M_T 、内围压 p_i 和外围压 p_o ,从而控制 3 个主应力的方向和大小,能够更为真实的模拟冻土在主应力轴方向旋转等复杂应力路径下的应力-应变行为,其详细的仪器性能介绍见文献[18].



图 3 冻土空心圆柱试验机

Fig.3 Frozen soil hollow cylinder apparatus

本次试验应力路径为定向剪切,设定应力路径时采用 α, b, p 及 q (大小主应力值差的半值)4 个参数,借鉴 High 等^[13]提出的空心圆柱试样的计算公式,建立试验机加载参数与应力路径设定参数之间的映射关系:

$$W = \frac{q}{2} \pi (1 - 2b + 3 \cos 2\alpha) \cdot (r_o^2 - r_i^2) + p_o s,$$

$$p_0 = \frac{r_0 \left[2p - \frac{q}{3}(1-2b) - q \cos 2\alpha \right] + qr_i(2b-1+\cos 2\alpha)}{2r_0},$$

$$p_i = \frac{r_i \left[2p - \frac{q}{3}(1-2b) - q \cos 2\alpha \right] + qr_0(2b-1+\cos 2\alpha)}{2r_i},$$

$$M_T = \frac{\pi}{r_0 + r_i} q \sin 2\alpha (r_0^4 - r_i^4).$$

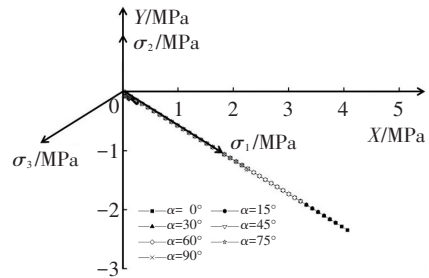
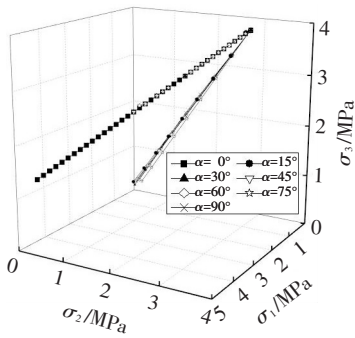
在-10℃条件下,开展3组试验: α 角变化的试验(TA)、 b 值变化的试验(TB)和 p 值变化的试验(TP).试验过程分为两个阶段:第一阶段,将所有参数加载到应力路径设定的初始值;第二阶段,从初始值开始,保持 α 角、 b 及 p 值不变,控制 q 值以30 kPa/min的速率加载,直至试样发生破坏,具体参数设置见表2.试验加载应力路径在主应力空间中的变化形式见图4(图中二维坐标图为加载路径在 π

平面上的投影).

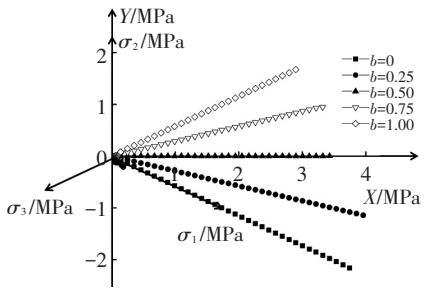
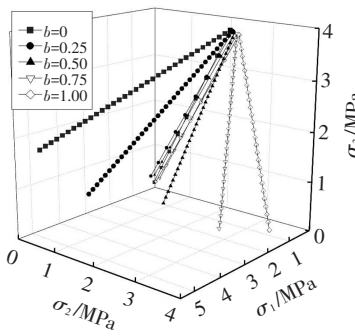
表 2 试验应力路径表

Tab. 2 The stress path in tests

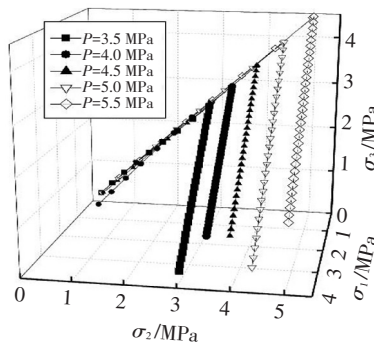
编号	p /kPa	b	α /(°)	q /kPa
TA-1	4 500	0	0	
TA-2	4 500	0	15	
TA-3	4 500	0	30	
TA-4	4 500	0	45	
TA-5	4 500	0	60	
TA-6	4 500	0	75	
TA-7	4 500	0	90	
TB-1	4 500	0	30	从 0 开始直至
TB-2	4 500	0.25	30	试样发生破坏
TB-3	4 500	0.50	30	
TB-4	4 500	0.75	30	
TB-5	4 500	1.00	30	
TP-1	3 500	0.50	30	
TP-2	4 000	0.50	30	
TP-3	4 500	0.50	30	
TP-4	5 000	0.50	30	
TP-5	5 500	0.50	30	



(a) α 角变化试验应力路径(左:三维;右: π 平面)



(b) b 值变化试验应力路径(左:三维;右: π 平面)



(c) p 值变化试验应力路径

图 4 主应力空间中试验应力路径

Fig.4 The stress path in principal stress space

2 结果及分析

试验应力路径中当有扭矩时($\alpha \neq 0^\circ$ 或 90°),设置剪应变达到 30% 停止试验,当无扭矩时($\alpha = 0^\circ$ 或 90°),设置轴向应变达到 25% 时停止试验.考虑到在定向剪切试验过程中,存在轴向力和扭矩的耦合加载,试样中各应变值的发展相互影响,因此采用广义剪应力 q_j 和广义剪应变 γ_j 来分析冻结黏土的应力-应变行为.

广义剪应力

$$q_j = \frac{1}{\sqrt{2}} ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2)^{\frac{1}{2}},$$

广义剪应变^[19]:

$$\gamma_j = \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\frac{9}{2} \varepsilon_a^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_s^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\varepsilon_a = \frac{u_a}{h_0}, \varepsilon_s = \frac{2\theta(r_0^3 - r_i^3)}{3H_0(r_0^2 - r_i^2)}.$$

式中: ε_a 为轴向应变, ε_s 为剪应变, u_a 为轴向位移, θ 为试样扭转角, ε_a 和 ε_s 均为基于试样整体测量的试验结果.通过 $q_j-\gamma_j$ 曲线更能综合反映不同影响因素下冻结黏土中力学特性的变化规律.

2.1 大主应力方向角 α 的影响

大主应力方向角 α 表征大主应力 σ_1 偏离竖直

方向的程度.图 5 为不同 α 角时试验结果曲线,其中图 5(b) 为试样在应变值为 0%~5% 范围内的应力-应变特征曲线.从图 5(a) 可得出不同 α 角下 $q_j-\gamma_j$ 曲线均呈双曲线型,且类似于弹性塑性应变硬化曲线, γ_j 随着 q_j 的增加而增加.初始加载阶段,应力-应变曲线近似呈线性变化,线性变化段的极限应变值在 0.5% 左右;随着变形的继续发展,应变增加的速率逐渐增大,破坏时的 q_j 值随着 α 角的增加先减小而后又出现增加的变化趋势,最小值出现在 $\alpha = 75^\circ$ (图 5(c)). $\alpha = 90^\circ$ 时的 $q_j-\gamma_j$ 曲线表现出随着广义剪应力的增加,应变先减小到 0 附近然后又开始逐渐增加,这主要是因为当 $\alpha = 90^\circ$ 时,大主应力 σ_1 在水平方向,而与之垂直的小主应力 σ_3 在竖直方向,试样处于拉伸应力状态,当第一阶段加载完成后,试样轴向变形为压缩变形,在第二阶段加载过程中轴向变形先减小到 0 然后再向拉应变方向发展,此应力路径中无扭矩,故广义剪应变在数值上等于轴向应变的绝对值,因此会出现该种现象.同时从图 5(b) 也可以看出, $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 曲线在一定变形后趋于重合,但由于土体的抗拉强度远低于抗压强度,故在 $\alpha = 90^\circ$ 时, γ_j 发展到 1% 时试样发生破坏.

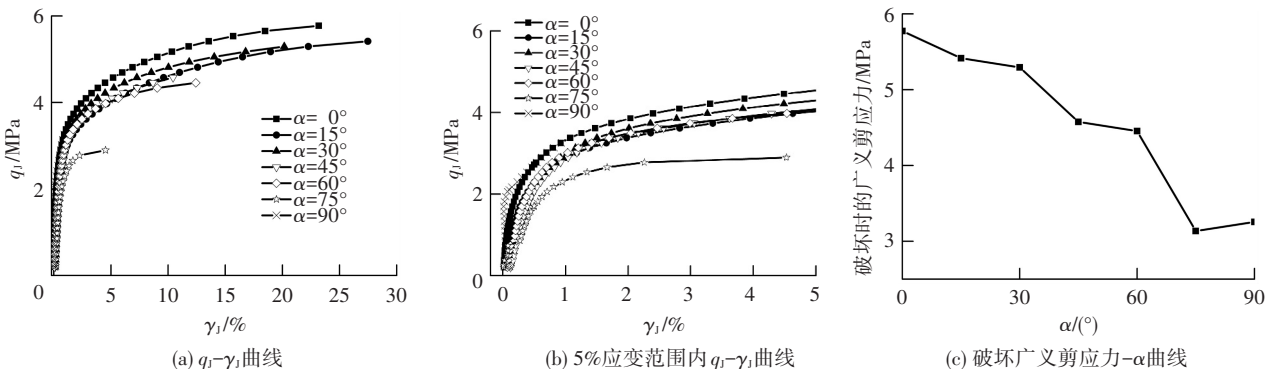


图 5 不同 α 角时试验结果曲线

Fig.5 Test result curves in different α angle stress paths

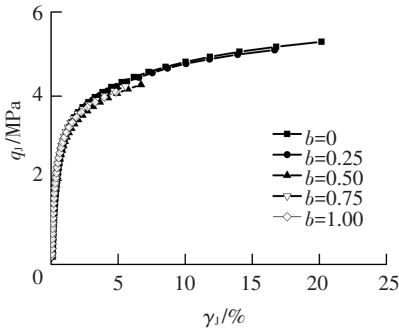
2.2 中主应力系数 b 值的影响

图 6 为 $\alpha = 30^\circ$ 时不同 b 值下的 $q_j-\gamma_j$ 曲线.从图中可以看出,不同 b 值下的 $q_j-\gamma_j$ 曲线之间的差异很小,几乎是重合发展,破坏时的广义剪应力值随 b 值增加逐渐减小,破坏时的广义剪应变值也随 b 值的增加有较大幅度的减小.在初始加载阶段,不同 b 值之间的差值不是很明显,应力-应变曲线也近似为线性变化,极限应变值同样在 0.5% 左右.

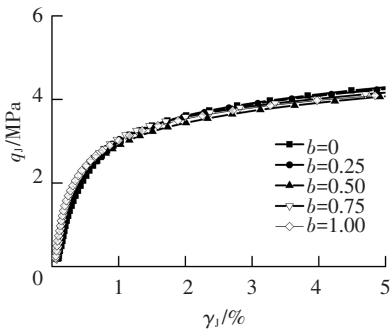
2.3 平均主应力 p 值的影响

平均主应力 p 值变化代表不同 π 平面上的应力路径,图 7 为 $\alpha = 30^\circ$ 时不同 p 值应力路径下的 $q_j-\gamma_j$ 曲线.从图中可以看出,在初始加载阶段,应

力-应变曲线近似为线性变化,极限应变值在 0.5% 左右, p 值的变化对线性阶段的发展影响不大.当应变值超过 0.5% 后,相同 γ_j 值对应的 q_j 先随 p 值的增加而增加,随后随着 p 值的继续增加, q_j 值又开始逐渐减小.故在试验应力范围内,当大主应力方向角 $\alpha = 30^\circ$ 时,平均主应力 $p = 5.0$ MPa 时, q_j 值最大.产生这种现象是因为随着 p 值的增加,土体颗粒和冰逐渐被压实,增大了颗粒间的摩擦力,使土体的强度增加;随着 p 值的继续增大,部分冰被压融,使冻土中未冻水含量增加,减小了颗粒间的摩擦力,同时部分土颗粒也可能出现压碎的现象,使冻土土体结构发生破坏,致使冻土强度降低.



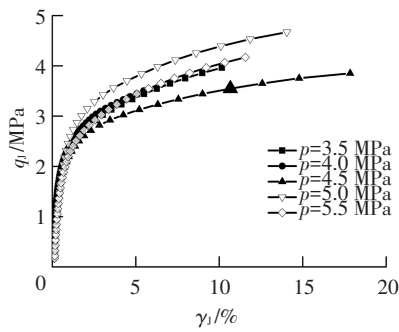
(a) q_1 - γ_1 曲线



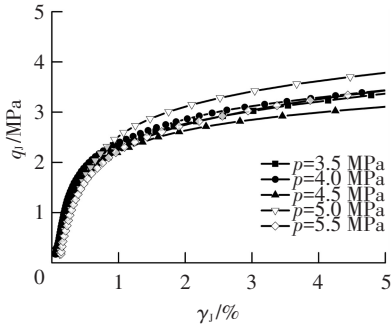
(b) 5%应变范围内 q_1 - γ_1 曲线

图 6 不同 b 值时 q_1 - γ_1 曲线

Fig.6 q_1 - γ_1 curves in different b stress paths



(a) q_1 - γ_1 曲线



(b) 5%应变范围内 q_1 - γ_1 曲线

图 7 不同 p 值时 q_1 - γ_1 曲线

Fig.7 q_1 - γ_1 curves in different p stress paths

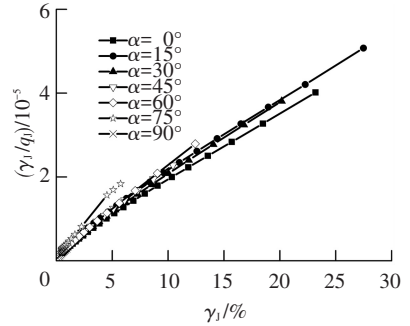
3 冻结黏土的强度模型

在定向剪切试验中, q_1 - γ_1 曲线呈双曲线形发展. 为探索冻结黏土的强度模型, 分别绘制出不同应力路径下 γ_1/q_1 - γ_1 曲线, 如图 8 所示, 以 γ_1 为横坐标, 以 γ_1/q_1 为纵坐标. 从图中可以看出, γ_1 与 γ_1/q_1 之间近似呈线性关系, 因此二者之间的关系可用线性方程来

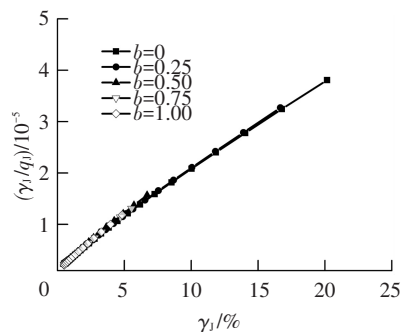
表示:

$$\frac{\gamma_1}{q_1} = m + n\gamma_1, \quad (1)$$

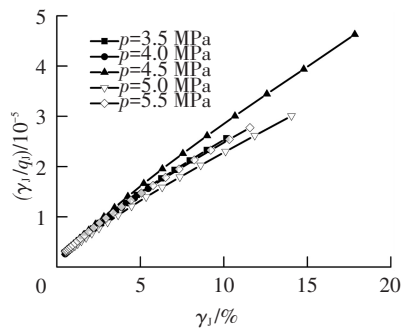
式中 m 和 n 为与土质及应力路径有关的试验常数. 试验数据经拟合后, 可得出不同应力路径下的 m 和 n 值, 且拟合度都达到 0.99 以上 (见表 3).



(a) 不同 α 角时 γ_1/q_1 - γ_1 曲线



(b) 不同 b 值时 γ_1/q_1 - γ_1 曲线



(c) 不同 p 值时 γ_1/q_1 - γ_1 曲线

图 8 γ_1/q_1 - γ_1 曲线

Fig.8 γ_1/q_1 - γ_1 curves

将式(1)整理, 可得 q_1 - γ_1 的关系表达式为

$$q_1 = \frac{\gamma_1}{m + n\gamma_1}, \quad (2)$$

根据式(2)可求得广义剪切模量 E_{jt} 的表达式为

$$E_{jt} = \frac{\partial q_1}{\partial \gamma_1} = \frac{m}{(m + n\gamma_1)^2}, \quad (3)$$

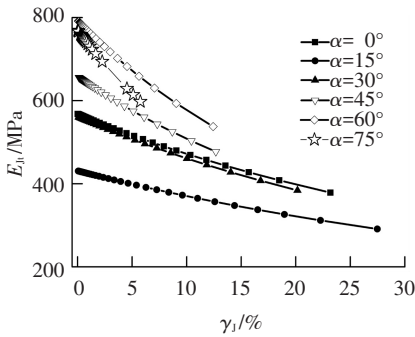
由式(3)可得, 当 $\gamma_1=0$ 时, 初始剪切模量 $E_{jt} = 1/m$; 当 $\gamma_1 \rightarrow +\infty$ 时, 由式(2)得极限广义剪应力值 $q_{1|ult} = 1/n$. 因此 m 和 n 的物理意义为 m 为初始剪切模量的倒数, n 为 q_1 - γ_1 曲线的渐近线所对应的广义剪应力值的倒数, 这与 Duncan-Chang^[20] 的双曲线模型中

参数的物理意义相同。

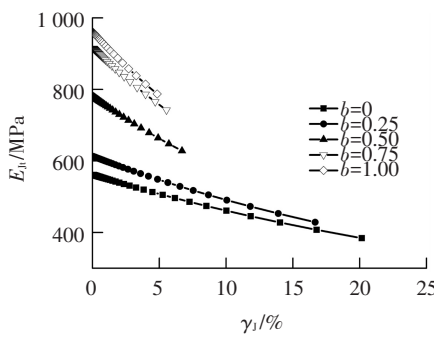
表 3 不同应力路径下系数 m 和 n 的计算值

Tab.3 Calculated values of m and n in different stress paths

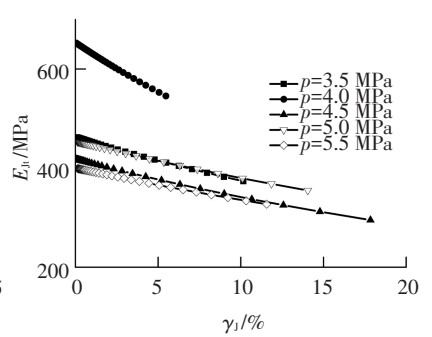
编号	$m/10^{-6}$	$n/10^{-4}$
TA-1	1.76	1.71
TA-2	2.32	1.83
TA-3	1.78	1.85
TA-4	1.52	2.09
TA-5	1.26	2.18
TA-6	1.30	3.04
TA-7	0.39	2.75
TB-1	1.78	1.85
TB-2	1.63	1.92
TB-3	1.28	2.20
TB-4	1.09	2.20
TB-5	1.04	2.26
TP-1	2.16	2.41
TP-2	1.53	2.64
TP-3	1.28	2.20
TP-4	2.20	2.06
TP-5	2.50	2.28



(a) 不同 α 角时 E_{ji} 变化曲线



(b) 不同 b 值时 E_{ji} 变化曲线



(c) 不同 p 值时 E_{ji} 变化曲线

图 9 剪切模量 E_{ji} 变化曲线

Fig.9 E_{ji} curves in different stress paths

4 结 论

1) 大主应力方向角 α 、中主应力系数 b 及平均主应力 p 值的变化都会对冻土的强度产生较大影响。随着 α 角的增加,破坏时的广义剪应力 q_j 值先增加后减小,最小值出现在 $\alpha = 75^\circ$ 处; b 值变化对 q_j 值的影响较小,破坏时的广义剪应变 γ_j 随 b 值的增加有较大幅度的减小;随着 p 值增加,相同 γ_j 值对应的 q_j 值先增加后减小。

2) 冻结黏土的 $q_j - \gamma_j$ 曲线为弹性塑性应变硬化曲线。在初始加载阶段,应力-应变曲线呈线性变化,线性段极限应变值在 0.5% 左右,可以将该点作为冻土的初始屈服点。

3) γ_j 与 γ_j/q_j 之间呈线性关系,采用 Duncan-Chang 双曲线模型方程作为冻结黏土定向剪切条件下的强度模型方程,试验常数 m 和 n 受 α 角、 b 值和 p 值变化影响较大。

4) α 角、 b 值和 p 值变化对冻土的初始广义剪切模量 E_{j10} 有较大影响。 E_{j10} 存在一个临界值 E'_{j10} ,当 $E_{j10} < E'_{j10}$, $E_{ji} - \gamma_j$ 曲线发展比较缓和, E_{j10} 值越小,曲线越平缓,破坏时的 γ_j 也较大;当 $E_{j10} > E'_{j10}$, $E_{ji} - \gamma_j$ 曲

由式(3)可以绘制出广义剪切模量随 γ_j 的变化趋势图,如图 9 所示。从图 9 可得出,随着变形发展,广义剪切模量都呈递减趋势,应力路径变化对初始广义剪切模量 E_{j10} 的影响较大。随着 α 角的增大, E_{j10} 先减小而后逐渐增大,增大到最大点后随着 α 角的继续增大然后降低,两个极值点分别为 $\alpha = 15^\circ$ (最小点)和 $\alpha = 60^\circ$ (最大点)。 E_{j10} 随着 b 值增加而增大,随着 p 值增加, E_{j10} 先增加而后减小。同时从图 9 还可以得出, E_{j10} 存在一个临界值 E'_{j10} ,当 $E_{j10} < E'_{j10}$, $E_{ji} - \gamma_j$ 曲线发展比较缓和, E_{j10} 值越小,曲线越平缓,破坏时的 γ_j 也较大;当 $E_{j10} > E'_{j10}$, $E_{ji} - \gamma_j$ 曲线逐渐变陡, E_{j10} 值越大曲线斜率越大,破坏时的 γ_j 越小,对于冻结黏土 $E'_{j10} = 6 \times 10^5$ kPa。

线逐渐变陡, E_{j10} 值越大曲线斜率越大,破坏时的 γ_j 越小,对于冻结黏土 $E'_{j10} = 6 \times 10^5$ kPa。

参 考 文 献

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

[2] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土抗变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 418-421. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2005.04.011.
WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao, et al. Study on resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 418-421. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2005.04.011.

[3] ALKIRE B D, ANDERSLAND O B. The effect of confining pressure on the mechanical properties of sand-ice materials [J]. Journal of Glaciology, 1973, 12(66): 469-481. DOI: 10.1017/S0022143000031889.

[4] 张锋, 林波, 冯德成, 等. 季节冻土区长期交通荷载下公路路基永久变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 120-126. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.019.
ZHANG Feng, LIN Bo, FENG Decheng, et al. Permanent deformation of subgrade induced by long-term truck traffic loading in seasonally frozen regions [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 120-126. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.019.

- [5] MA Wei, WU Ziwan, ZHANG Lixin, et al. Analyses of process on the strength decrease in frozen soils under high confining pressures [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29(1): 1-7. DOI:10.1016/S0165-232X(98)00020-2.
- [6] 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): 319-322.
MA Wei, WU Ziwan, ZHANG Changqing. Strength and yield criterion of frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(1): 319-322.
- [7] 吴紫汪, 马巍. 冻结砂土的强度特性[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(1): 15-20.
WU Ziwan, MA Wei. Strength characteristics of frozen sandy soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(1): 15-20.
- [8] ZHU Yuanlin, ZHANG Jiayi. Constitutive relations of frozen soil in uniaxial compression [C]//Proceeding of 6th Internet Conference on Permafrost. Beijing: [s.n.], 1991: 1092-1095.
- [9] 陈湘生. 人工冻土瞬时三轴剪切强度特征的试验研究[J]. *建井技术*, 1992(6): 38-40. DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1992.06.017.
CHEN Xiangsheng. Experimental study on strength of artificially frozen soil under transient triaxial compression [J]. *Mine Construction Technology*, 1992(6): 38-40. DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1992.06.017.
- [10] FISH A M. Strength of frozen soil under a combined stress state [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing. Beijing: [s.n.], 1991: 135-145.
- [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): 1252-1256. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2004.08.004.
WANG Dayan, MA Wei, CHANG Xiaoxiao. Study on behavior of stress-stain for frozen soils subjected to K_0 consolidation by unloading triaxial shear tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1252-1256. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2004.08.004.
- [12] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1612-1617. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2007.08.011.
LAI Yuanming, CHENG Hongbin, GAO Zhihua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1612-1617. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2007.08.011.
- [13] 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. DOI:10.1680/geot.1983.33.4.355.
- [14] 姚兆明, 姜自华, 王春萌, 等. 恒定主应力偏转角下黏土不排水剪切特性分析[J]. *力学与实践*, 2016, 38(1): 56-62. DOI:10.6052/1000-0879-15-104.
YAO Zhaoming, JIANG Zihua, WANG Chunmeng, et al. Characteristics of clay subjected to undrained shear with consideration of influence of deflection angle of principal stress axis [J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(1): 56-62. DOI:10.6052/1000-0879-15-104.
- [15] 柳艳华, 谢永利. 主应力轴旋转下中主应力系数对软黏土性状的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15(3): 27-33, 61. DOI:10.3969/j.issn.1671-1637.2015.03.005.
LIU Yanhua, XIE Yongli. Influence of intermediate principal stress coefficient on character of soft clay under rotation of principal stress axes [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(3): 27-33, 61. DOI:10.3969/j.issn.1671-1637.2015.03.005.
- [16] 钱建固, 杜子博. 纯主应力轴旋转下饱和软黏土的循环弱化及非共轴性[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1381-1390. DOI:10.11779/CJGE201608004.
QIAN Jiangu, DU Zibo. Cyclic degradation and non-coaxiality of saturated soft clay subjected to pure rotation of principal stress axis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1381-1390. DOI:10.11779/CJGE201608004.
- [17] PRADEL D, ISHIHARA K, GUTIERREZ M. Yielding and flow of sand under principal stress axes rotation [J]. *Soils & Foundations*, 1990, 30(1): 87-99. DOI:10.3208/sandf1972.30.87.
- [18] 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. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.016.
GUO Yan, WANG Dayan, MA Wei, et al. Development and application of frozen hollow cylinder apparatus [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(12): 114-120. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.016.
- [19] 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. DOI:10.13243/j.cnki.slx.1996.01.005.
SHEN Ruifu, WANG Hongjin, ZHOU Jingxing. Dynamic of sand under cyclic rotation of principal stress directions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996(1): 27-33. DOI:10.13243/j.cnki.slx.1996.01.005.
- [20] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
LI Guangxin. *Advanced soil mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.