

DOI: 10.11779/CJGE201901011

考虑加载速率影响的冻结含盐砂土强度准则研究

高娟^{1, 2, 3}, 赖远明^{1, 3}, 常丹⁴, 牛亚强⁵

(1. 中国科学院西北生态资源环境研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100000; 4. 北京交通大学, 北京 100044; 5. 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 围压、加载速率等外部条件对冻结盐渍土强度影响显著。对-15℃德令哈含盐砂土进行了一系列不同加载速率、不同围压下的常规三轴剪切试验, 依据广义非线性强度理论建立了考虑加载速率影响的冻结含盐砂土强度准则。依据试验结果采用二次函数拟合得到了子午面上的破坏函数, 分析了加载速率对冻结含盐砂土强度及内摩擦角的影响。通过修正的 Lade-Duncan 强度准则给出了 π 平面上的破坏函数, 探讨了加载速率对子午面破坏函数及偏平面形状函数的影响。提出的模型能够反映在加载速率、压融以及冰晶破碎等因素共同影响下的冻结含盐砂土强度的非线性特点。

关键词: 加载速率; 强度准则; 主应力空间; 冻结含盐砂土

中图分类号: TU752

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)01-0104-07

作者简介: 高娟(1988-), 女, 博士研究生, 主要从事岩土力学方面的研究工作。E-mail: gaojuan2611261@lzb.ac.cn。

Strength criterion for frozen saline sand considering effects of loading rates

GAO Juan^{1, 2, 3}, LAI Yuan-ming^{1, 3}, CHANG dan⁴, NIU Ya-qiang⁵

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Province Transportation Planning,

Survey & Design Institute CO., LTD., Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;

4. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 5. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The external conditions such as confining pressures and loading rates have significant influences on the strength of frozen saline soil. A series of conventional triaxial compression tests under different loading rates are carried out for Delingha frozen saline sand at a temperature of -15℃ with the confining pressures varying from 0.5 to 8 MPa. A strength criterion for the frozen saline sand, including the influences of loading rates, is established by use of the generalized nonlinear strength theory. Based on the conventional triaxial compression test results, the strength function in p - q plane is well fitted by the parabolic equation, and the relationship between loading rates and friction angles is analyzed. The strength function in π plane derived from the modified Lade-Duncan model considering the influences of loading rates and hydrostatic pressures is used. The proposed strength criterion can reflect the nonlinear strength characteristics of frozen saline sand, including the influences of change in the loading rates, pressure melting and ice crushing.

Key words: loading rate; strength criterion; principal stress space; frozen saline sand

0 引言

冻结盐渍土在中国分布极为广泛^[1-2]。冻结盐渍土作为一种含冰、土粒骨架、未冻水、气体以及含盐晶体组成的多组分、分散相体系, 其中盐分的存在及未冻水与冰的动态平衡使得冻土强度等力学性质对围压和加载速率等外部条件更为敏感^[3-5]。而冻土的强度是基础设计及其施工过程中的一个重要的力学指标和评价参数^[6]。在冻结盐渍土区域开展的冻土工程中, 为了准确评价冻土的极限承载力及其基础的稳定性, 建立考虑加载速率和围压等外部因素影响的冻结含盐砂土强度准则显得尤为重要。

早期一些学者通过对低围压下的冻土强度研究,

发现冻土强度随围压的增大近似线性增大, 从而提出了采用线性莫尔库仑、Drucker-Prager 等准则来描述冻土的强度特征。随着后期研究的深入, 学者们^[7-12]先后发现在低温条件下随着围压的增大, 冻土的强度会先增加到某一峰值之后呈现下降趋势, 并分别将冻土的屈服准则表达为不同的二次函数的形式。栗晓林等^[13]、黄道良等^[14]、吕晶晶等^[15]通过单轴压缩试验, 研究了不同加载速率条件下冻土的强度特性, 蔡聪等^[16]基于

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDY-SSW-DQC015); 国家自然科学基金项目 (41230630, 41701068)

收稿日期: 2017-12-27

变速率常规单轴压缩试验结果, 引入了一个与加载速率相关的率敏感性系数, 构建了一个新的考虑率效应的冻土强度关系式。

本文取德令哈含盐砂土作为研究对象, 利用常规三轴剪切试验对温度为 -15°C 的冻结含盐砂土进行了不同加载速率、不同围压下的一系列试验研究, 根据材料在 π 平面与子午面上的破坏规律, 得到子午面及 π 平面上的破坏函数, 建立了复杂应力状态下考虑加载速率的冻结含盐砂土的强度准则。

1 常规三轴剪切试验及结果分析

1.1 试验条件及试样制备

本次试验采用常规三轴剪切试验, 所用土样为德令哈含盐砂土, 其粒径分布如图 1 所示。通过土样溶液的离子分析得到土样盐分及其含量如表 1 所示。在试样的制备过程中, 为了保证均匀性, 首先将采集来的土样过 2 mm 筛后加蒸馏水配制成含水率为 11% 左右的散体土, 在限制蒸发的条件下保持约 6 h, 使水分在土体中充分均匀。然后装入圆柱形模具中在制样机上按试验要求压制成直径为 61.8 mm, 高度为 125 mm 的圆柱形试样, 本文控制试样干密度为 1.90 g/cm^3 , 然后进行抽气饱和, 测得试样的含水率约为 15.99%。试样制好后连模具一起放入制冷箱, 在 -30°C 的环境中迅速冻结 48 h 后将冻结土样脱模。脱模后在试样两端垫上环氧树脂垫片并套上乳胶套, 随后放入恒温箱内在试验温度下恒温 24 h, 使试样内部温度均匀。通过试验测得土样冻结温度为 -9°C , 依据国标 GB50324 冻土试验标准, 本次试验温度定为 -15°C 。

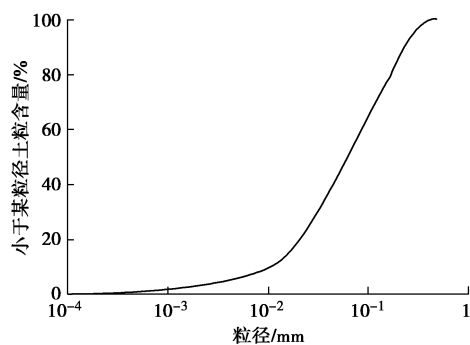


图 1 土样粒径分布曲线
Fig. 1 Grain-size distribution curve of soil

表 1 土样盐分及其含量表

Table 1 Types of soil salt and corresponding contents

盐 分	NaCl	CaSO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	合计
含量/%	1.77	2.16	0.07	0.07	4.07

本文采用的试验设备是由 MTS-810 材料试验机改造而成的低温三轴仪。该低温三轴仪能在常围压下的三轴试验中测算冻土试样的最大主应力以及体积应变等, 图 2 为低温三轴仪的照片。试验中控制围压分别为

0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 MPa, 轴向加载速率分别控制为 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 min^{-1} 。



图 2 MTS-810 低温三轴试验系统

Fig. 2 MTS-810 triaxial test system of frozen soil

1.2 试验结果分析

本文得到不同加载速率下冻结含盐砂土的应力应变关系, 对出现应力软化现象的情况, 取应力峰值作为相应条件下的强度值, 对于应变硬化情况, 选取轴向应变为 15% 所对应的应力值作为其强度值。得到不同加载速率下强度值随围压的变化规律如图 3 所示, 可以看出: 同一加载速率下, 当围压小于 4.0 MPa 时, 强度随着围压的增加而增加, 并且在较低围压下, 强度的变化可以近似看作线性变化; 当围压超过 4.0 MPa 后, 随着围压的增加强度反而呈现降低趋势, 本文认为这种现象主要是由于在较低围压下, 围压对冻结含盐砂土的强度起到强化效果, 使得土颗粒之间的摩擦力增强, 从而导致强度提高, 而随着围压的增大, 冻结砂土中的孔隙冰发生“压融”, 冰晶胶结体发生破裂、滑移等现象, 减少了土颗粒之间的摩擦使得其强度在高围压下反而降低, 因此冻结含盐砂土的强度与围压的关系呈现非线性的特征。

图 4 为围压为 1 MPa, 加载速率分别为 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 min 情况下冻结含盐砂土的应力 - 应变曲线, 图 5 为围压分别为 0.5, 2.0, 5.0, 8.0 MPa 情况下冻结含盐砂土强度随加载速率的变化规律。结合图 4, 5 可以看出: 随着加载速率的增加, 应力 - 应变曲线的初始阶段切线模量和峰值强度也在增加, 而峰值应变却在减小, 土样到达峰值强度前的非弹性变形量随着加载速率的增加而减小, 这一趋势说明随着加载速率的增加, 冻结含盐砂土越显脆性, 因此此类冻结砂土是应变速率敏感性材料, 同一围压下, 冻结含盐砂土的强度随着加载速率的增加而增加, 随着加载速率的增加冻结砂土会表现出不同的力学特性和破坏形态。

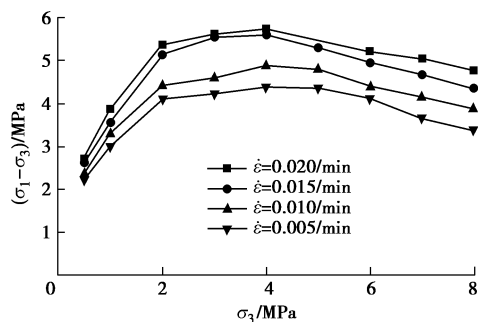


图3 各加载速率下剪切强度随静水压力的变化规律

Fig. 3 Relationship between strength and pressure under different loading rates

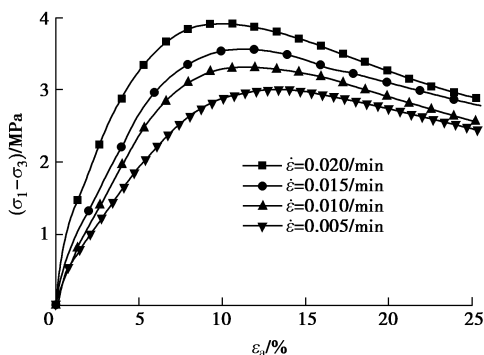


图4 不同加载速率下应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of frozen saline sand under different loading rates

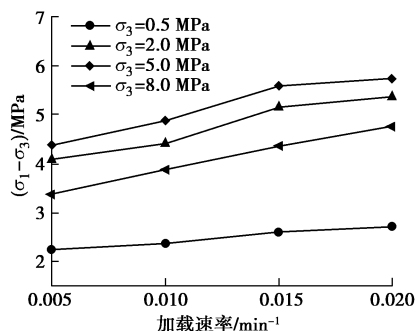


图5 加载速率对强度的影响

Fig. 5 Relationship between loading rate and strength under different pressures

2 考虑加载速率的子午面临界强度曲线及其参数分析

2.1 不同加载速率下的临界强度曲线

本文采用静水压力 p ，剪应力 q 及 Lade 角 θ_σ 表示冻结含盐砂土的屈服条件，则有

$$F(p, q, \theta_\sigma) = 0 \quad (1)$$

采用屈服条件的通用表示形式^[17]，式(1)可以写为

$$F(p, q, \theta_\sigma) = F_1(p) + F_2\left(\frac{q}{g(\theta_\sigma)}\right) \quad (2)$$

对于式(2)进行分离变形，可以得到

$$q = f_{p-q}(p)g(\theta_\sigma) \quad (3)$$

式中， $f_{p-q}(p)$ 为子午面 $(p-q)$ 上的临界强度曲线， $g(\theta_\sigma)$ 为 π 平面上的形状函数。

如图6所示，本文采用二次函数(4)描述各个加载速率下的临界强度随静水压力的变化规律：

$$q = f(p) = \left[a \left(\frac{p}{p_a} \right)^2 + b \frac{p}{p_a} + c \right] p_a \quad (4)$$

式中， p_a 为标准大气压值，本文取为 0.1013 MPa， a ， b ， c 分别为冻结含盐砂土的临界强度曲线参数，不同加载速率下的参数可以通过对试验结果回归拟合得到。同样可以求得 $q=0$ 时，对应的抗拉强度 f_t 如表2所示。

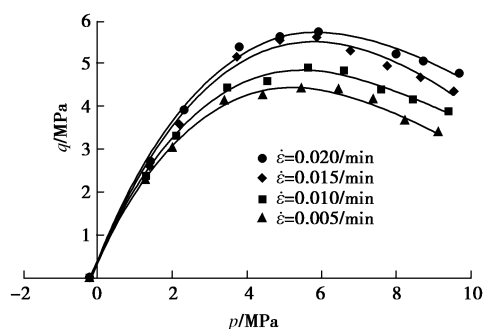


图6 不同加载速率下剪切强度与围压的关系曲线

Fig. 6 Change of shear strength with pressure under different loading rates

表2 临界强度曲线参数与加载速率的关系

Table 2 Relationship between parameters of critical strength curve and loading rates

加载速率/(min ⁻¹)	a	b	c	f_t /MPa
0.005	-1.20553	1.39332	0.059336	-0.406
0.010	-1.20671	1.46274	0.06202	-0.404
0.015	-1.34508	1.66703	0.05495	-0.352
0.020	-1.31962	1.69430	0.05736	-0.326

2.2 强度包络线

依据莫尔库仑强度理论，在 $\sigma-\tau$ 应力空间，强度准则可以表示成剪应力和法向应力的形式：

$$f_1(\sigma_1, \sigma_3) = \left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 = 0 \quad (5)$$

对于常规三轴试验，平均主应力 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ ，剪应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ，代入式(5)可以得到

$$f_1(p, q) = (\sigma - p - q/6)^2 + \tau^2 - q^2/4 = 0 \quad (6)$$

由式(4)可以给出冻结含盐砂土常规三轴试验强度包络线，可以表示为

$$f_2(p, q) = \left[a \left(\frac{p}{p_a} \right)^2 + b \frac{p}{p_a} + c \right] p_a - q = 0 \quad (7)$$

依据包络线定理：

$$\frac{\partial f_1}{\partial p} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial q} - \frac{\partial f_1}{\partial q} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial p} = 0, \quad (8)$$

将式 (6)、(7) 代入式 (8), 求出由平均主应力 p 和广义剪应力 q 表示的法向正应力 σ :

$$\sigma = \frac{6ap^2 - 8apq + 3bp_a p - 4bp_a q + 18p_a p + 3p_a q}{6ap + 3p_a b + 18p_a}. \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (6), 得到剪应力 τ 的表达式为

$$\tau = \sqrt{\frac{q^2}{4} - \left(\frac{6ap^2 - 8apq + 3bp_a p - 4bp_a q + 18p_a p + 3p_a q}{6ap + 3p_a b + 18p_a} - p - \frac{1}{6}q \right)^2}. \quad (10)$$

按照试验结果可以给出不同加载速率下的应力莫尔圆如图 7 所示, 根据式 (9)、(10) 可以给出不同加载速率下冻结含盐砂土在 $\sigma - \tau$ 应力空间的强度曲线。对比可以看出用本文提出的强度包络曲线与试验得到的莫尔应力圆吻合良好, 且按照式 (4) 给出的非线性强度准则能够较好的描述冻结含盐砂土三轴剪切试验过程中的压融以及冰晶破碎现象。

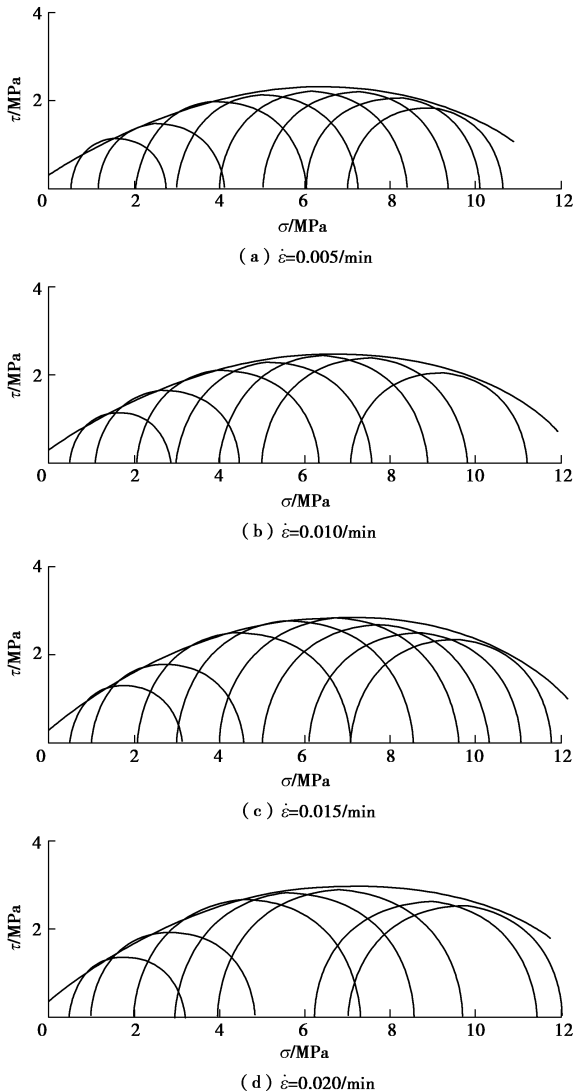


图 7 不同加载速率下应力莫尔圆与包络线图

Fig. 7 Mohr circles of stress and enveloping lines under different loading rates

2.3 加载速率对冻结含盐砂土内摩擦角的影响分析

在 $\sigma - \tau$ 应力空间, 根据莫尔库仑理论可以得到材料内摩擦角 φ 满足

$$\tan \varphi = \frac{d\tau}{d\sigma} = -\frac{\partial f}{\partial \sigma} / \frac{\partial f}{\partial \tau} = -\frac{\sigma - p - \frac{1}{6}q}{\tau}. \quad (11)$$

将式 (9)、(10) 代入式 (11) 解得内摩擦角 φ 的表达式为

$$\varphi = \arctan \left[-\frac{\frac{6ap^2 - 8apq + 3bp_a p - 4bp_a q + 18p_a p + 3p_a q}{6ap + 3p_a b + 18p_a} - p - \frac{1}{6}q}{\sqrt{\frac{q^2}{4} - \left(\frac{6ap^2 - 8apq + 3bp_a p - 4bp_a q + 18p_a p + 3p_a q}{6ap + 3p_a b + 18p_a} - p - \frac{1}{6}q \right)^2}} \right]. \quad (12)$$

依据试验结果即可得到相应加载速率下冻结含盐砂土的内摩擦角随平均主应力的变化规律如图 8 所示。可以看出, 在常规三轴试验中同一加载速率下冻结含盐砂土的内摩擦角并非定值, 内摩擦角随着静水压力的增加而急剧降低, 本文认为这主要是由于随着围压增加, 试样内部发生压融及冰晶滑移、破碎等现象, 从而导致土颗粒之间的摩擦力降低。不同加载速率下, 冻结含盐砂土的内摩擦角也存在差异, 加载速率越大, 初始内摩擦角越大, 且随着静水压力的增加, 加载速率对内摩擦角的影响逐渐减小。

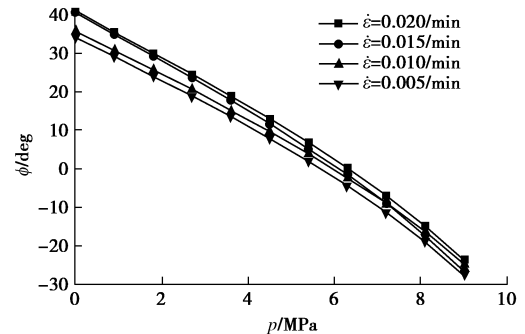


图 8 不同加载速率下冻结含盐砂土内摩擦角与静水压力关系
Fig. 8 Relationship between friction angle and hydrostatic pressure of frozen salt sand soil

3 冻结含盐砂土 π 平面破坏函数

3.1 π 平面上形状函数确定

为了构建冻结含盐砂土在主应力空间的破坏函数, 本文引入一个形状函数 $g(\theta_o)$, 以此描述 π 平面上的破坏函数曲线形状, 并且要求 π 平面上破坏函数的形状必须为连续的凸曲线, 且应当能够尽可能准确地反映冻结砂土材料的强度特征。为了描述砂土的破坏条件, Lade-Duncan^[18]依据砂土真三轴试验结果提出了考虑了中间主应力影响以及偏平面非圆轨迹的单参数强度准则为

$$F(I_1, I_2) = \frac{I_1^3}{I_3} - k = 0 \quad (13)$$

由试验可知, 由于冰胶结体及盐晶体存在, 冻结含盐砂土具有一定的黏聚力和抗拉能力, 因此空间强度面不通过主应力坐标系原点。此外, 由于压融及冰晶破碎现象的存在, 静水压力对 π 平面上强度曲线的影响不可忽略。大多数土类材料在 π 平面上的破坏函数与 Lade-Duncan 模型在形状上比较吻合。综合考虑, 本文假设冻结含盐砂土在 π 平面上的破坏函数其形状基本符合 Lade-Duncan 模型, 认为参数 k 为与静水压力有关的参数。对 Lade-Duncan 模型进行修正, 同时将主应力空间坐标进行平移提出修正的 Lade-Duncan 强度准则^[19]。新的主应力空间可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1 - f_u \\ \sigma'_2 &= \sigma_2 - f_u \\ \sigma'_3 &= \sigma_3 - f_u \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

得到新的坐标系下的强度准则为

$$F(I'_1, I'_3) = I_1'^3 - k(I'_1)I'_3 = 0 \quad (15)$$

式中 $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 为新坐标系下的主应力; I'_1, I'_3 为新坐标系下的主应力第一不变量和主应力第三不变量。

通过试验数据拟合, 可以得到冻结含盐砂土不同加载速率下的 Lade-Duncan 模型参数 $k(I'_1)$ 随 I'_1 的变化规律如图9所示。本文采用

$$k(I'_1) = \alpha \cdot (I'_1)^\eta = 3\alpha \cdot (p - f_u)^\eta \quad (16)$$

形式对试验数据进行拟合, 从而得到不同加载速率下的材料参数 α, η , 如表3所示。

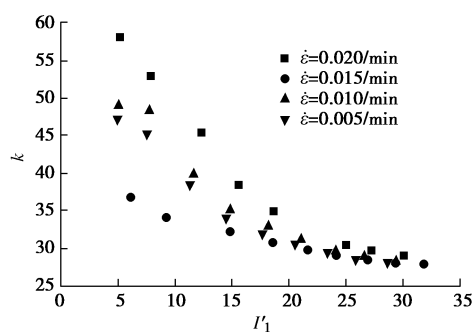


图9 参数 k 随 I'_1 的变化规律

Fig. 9 Relationship between k and I'_1

表3 π 平面破坏函数参数

Table 3 Parameters of failure function in π plane

加载速率 (min^{-1})	0.005	0.01	0.015	0.02
α	-1.20553	-1.20671	-1.34508	-1.31962
η	1.39332	1.46274	1.66703	1.6943

根据应力不变量之间的关系, 新坐标系下的偏应力不变量 J'_2, J'_3 以及 Lode 角满足以下关系:

$$\sin 3\theta_\sigma = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J'_3}{J_2'^{3/2}} \quad (17)$$

$$J'_2 = \frac{1}{3}(I'_1)^2 + I'_2 \quad (18)$$

$$J'_3 = I'_3 + \frac{1}{3}I'_1I'_2 + \frac{2}{27}(I'_1)^3 \quad (19)$$

在当前应力路径下, 静水压力 p' 及偏应力 q' 分别可以表示为 $p' = \frac{I'_1}{3}, q' = \sqrt{3J'_2}$, 结合式(17)~(19), 式(15)可以写为

$$F(p, q, \theta_\sigma) = 2(q')^3 \sin 3\theta_\sigma + 9p'(q')^2 + 27\left(\frac{27-k}{k}\right)(p')^3 = 0 \quad (20)$$

式中, $p' = p - f_u, q' = \sigma_1 - \sigma_3 = q$ 。

求解式(20), 则偏应力 q 可以表示为

$$q = f_{p-q}(p)f_\pi(\theta_\sigma) = \frac{\frac{3}{2}\sqrt{\frac{k-27}{k}}(p-f_u)}{\sin\left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arcsin\left(\sqrt{\frac{k-27}{k}}\sin 3\theta_\sigma\right)\right]} \quad (21)$$

π 平面上常规三轴剪切试验应力路径对应的形状函数 $g(\theta_\sigma)$ 应满足: 当 $\theta_\sigma = -\frac{\pi}{6}$ 时, $g(\theta_\sigma) = 1$ 恒成立, 于是 π 平面上强度曲线的形状函数为

$$g(\theta_\sigma) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\arcsin B\right)}{\sin\left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3}\arcsin(B \sin 3\theta_\sigma)\right]} \quad (22)$$

式中, $B = \sqrt{\frac{k(I'_1) - 27}{k(I'_1)}}$ 。

为了便于观察冻结含盐砂土应力空间破坏面的特征, 利用式(22)得到不同静水压力下冻结含盐砂土 π 平面上的强度曲线, 如图10所示, 可以看出本文提出的模型在不同静水压力作用下 π 平面强度曲线是不相同的, 随着静水压力的增加强度曲线逐渐趋于圆形化, 因此该模型能够反映 π 平面破坏曲线的形状受静水压力的影响。

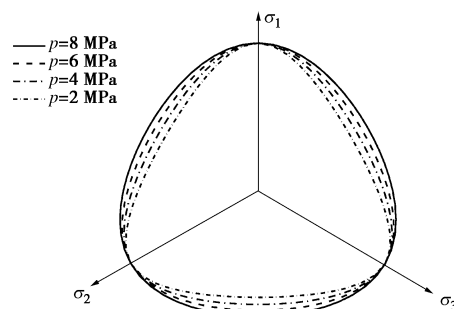


图10 不同静水压力下的 π 平面强度曲线 ($\dot{\epsilon} = 0.02/\text{min}$)

Fig. 10 Strength curves in π plane under different pressures at loading rate of 0.02/min

图 11 为加载速率变化情况下, 静水压力分别为 2, 8 MPa 时偏平面上形状函数曲线, 可以看出不同加载速率下偏平面上的强度曲线存在差异, 具体表现为随着加载速率的增大, 偏平面上的强度曲线逐渐向内收缩, 即随着加载速率的增加, 强度曲线逐渐趋近于三角形。

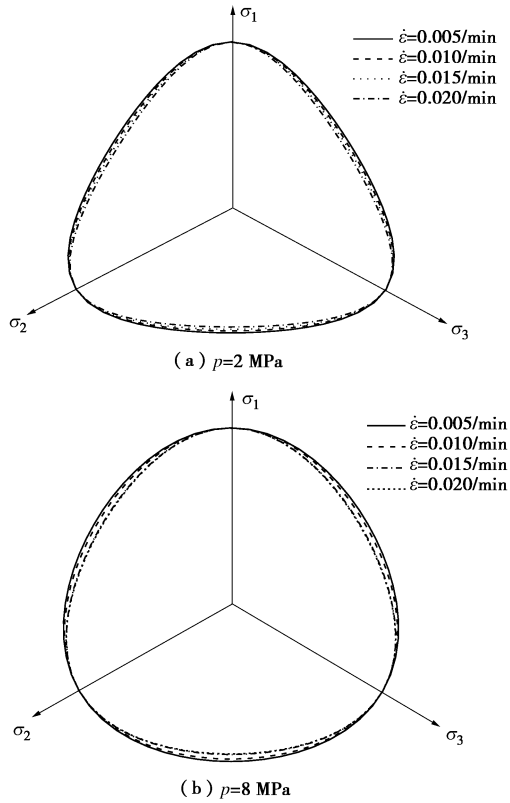


图 11 不同加载速率下 π 平面强度曲线

Fig. 11 Strength curves of frozen saline sand in π plane under different loading rates

3.2 主应力空间的破坏曲面

分别得到子午平面及 π 平面上的破坏函数, 整个主应力空间的强度准则可以表达为

$$f(p, q, \theta_\sigma) = \left[a \left(\frac{p}{p_a} \right)^2 + b \frac{p}{p_a} + c \right] \cdot \frac{\sin \left\{ \frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arcsin \left[\sqrt{\frac{3\alpha \cdot (p - f_u)^\eta - 27}{3\alpha \cdot (p - f_u)^\eta}} \right] \right\}}{\sin \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arcsin \left[\sqrt{\frac{3\alpha \cdot (p - f_u)^\eta - 27}{3\alpha \cdot (p - f_u)^\eta}} \right] \sin 3\theta_\sigma \right\}} \cdot p_a \quad (23)$$

依据式 (23) 即可给出不同加载速率下冻结含盐砂土主应力空间的强度曲面如图 12 所示。可以看出, 在主应力空间, 随着加载速率的增加, 冻结含盐砂土的破坏曲面逐渐向外扩张。

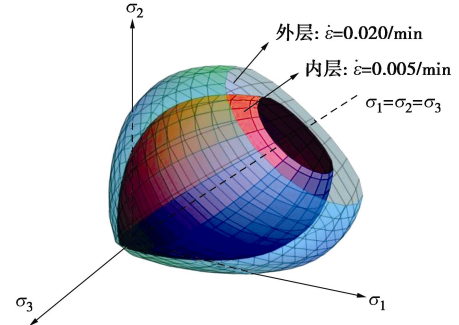


图 12 主应力空间的破坏曲面

Fig. 12 Failure surface of frozen saline sand in principal stress space

4 结 论

为了研究冻结含盐砂土在不同加载速率下的主应力空间强度曲线, 在 -15°C 条件下, 进行了不同加载速率、不同围压下的一系列常规三轴剪切试验, 基于试验结果提出了考虑加载速率的冻结含盐砂土复杂应力状态下的强度准则, 给出了不同加载速率下冻结含盐砂土的应力空间破坏曲面图。本文得到以下 4 点结论。

(1) 同一加载速率下, 冻结含盐砂土的强度与围压的关系呈现非线性的特征, 当围压较小时, 强度随着围压的增加而增加, 当围压超过一定值之后, 随着围压的增加强度反而呈现降低趋势。且加载速率对临界强度存在较大影响, 同一围压下, 冻结含盐砂土的强度随着加载速率的增加而增加。

(2) 冻结含盐砂土破坏函数包括 π 平面上的破坏函数 $f_\pi(q, \theta_\sigma)$ 及子午面上的破坏函数 $f_{p-q}(p)$ 。考虑了压融和静水压力的影响, 子午面上的破坏函数 $f_{p-q}(p)$ 可采用二次多项式形式给出。此函数给出能够很好地描述加载速率变化下冻结含盐砂土在子午面上的非线性强度特点。

(3) 同一加载速率下冻结含盐砂土的内摩擦角并非定值, 内摩擦角随着静水压力的增加而急剧减小。不同加载速率下, 加载速率越大, 冻结含盐砂土的初始内摩擦角越大。且随着静水压力的增加, 加载速率对内摩擦角的影响逐渐减小。

(4) 采用修正的 Lade-Duncan 强度准则描述 π 平面上的破坏形状特征, 给出考虑加载速率及静水压力 p 影响的 π 平面破坏形状函数 $g(\theta_\sigma)$, 得到不同加载速率下偏平面上的强度曲线图, 相同静水压力条件下, 随着加载速率的增加, 偏平面上的强度曲线形状逐渐趋向三角形。在主应力空间, 随着加载速率的增加, 冻结含盐砂土的破坏曲面逐渐向外扩张。

参考文献:

[1] 徐敦祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体的冻胀和盐胀机理[M].

- 北京: 科学出版社, 1995. (XU Xiao-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanisms of frost heaving and salt expansion of soils[J]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [2] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WANG Zun-qin, ZHU Shou-quan, YU Ren-pei. Salty soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [3] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 人民出版社, 2006. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: People's Publishing House, 2006. (in Chinese))
- [4] LAI Y M, LIAO M K, HU K. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory[J]. International Journal of Plasticity, 2016, **78**: 84 - 113.
- [5] MA W, WU Z W, ZHANG L X, 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 - 7.
- [6] 李栋伟, 汪仁和. 冻土抗剪强度特性及试验研究[J]. 安徽理工大学学报, 2004, **24**(增刊): 52 - 55. (LI Dong-wei, WANG Ren-he. Frozen soil ant-shear strength characterand testing study[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2004, **24**(S0): 52 - 55. (in Chinese))
- [7] BAKER T H, JONES S J, PARAMESWARAN V R. Confined and unconfined compression tests of frozen sand[C]// Proc 4th Canada Permafrost Conf. National Research Council of Canada, 1982: 387 - 392.
- [8] JONES S J. The confined compressive strength of polycrystalline ice[J]. Journal of Glaciology, 1982, **28**: 171 - 177.
- [9] FISH A M. Strength of frozen soil under a combined stress state[C]// Proceedings of 6th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam, 1991: 135 - 145.
- [10] 马巍, 吴紫汪, 盛煜. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(5): 7 - 11. (MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Yu. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 7 - 11. (in Chinese))
- [11] 陈湘生, 汪崇鲜, 吴成义. 典型人工冻结黏土三轴剪切强度准则的试验研究[J]. 建井技术, 1998, **19**(4): 1 - 7. (CHEN Xiang-sheng, WANG Chong-xian, WU Cheng-yi. Experimental study on triaxial shear strength criterion of typical artificial frozen clay[J]. Mine Construction Technology, 1998, **19**(4): 1 - 7. (in Chinese))
- [12] 沈忠言, 吴紫汪. 冻土三轴强度破坏准则的基本形式及其与未冻水含量的相关性[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(1): 22 - 26. (SHEN Zhong-yan, WU Zi-wang. Basic form of failure criteria of triaxial strength of frozen soils and its relativity to unfrozen water[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, **21**(1): 22 - 26. (in Chinese))
- [13] 栗晓林, 王红坚, 牛永红. 不同加载速率下冻结黏土的强度及破坏特性[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(12): 2335 - 2340. (LI Xiao-lin, WANG Hong-jian, NIU Yong-hong. The strength and failure properties of frozen clay under varying loading rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(12): 2335 - 2340. (in Chinese))
- [14] 黄道良, 林斌. 人工冻土力学性能影响因素敏感性分析[J]. 力学与实践, 2012, **34**(4): 63 - 65. (HUANG Dao-liang, LIN Bin. Sensitivity analysis on the influence factors of the mechanical properties of the artificial frozen soil[J]. Mechanics in Engineering, 2012, **34**(4): 63 - 65. (in Chinese))
- [15] 吕晶晶. 冻结盐渍土力学性能试验及其本构模型的研究[D]. 合肥: 安徽理工大学. (LÜ Jing-jing. The study on mechanical property test and its constitutive model of freeze saline soil[D]. Hefei: AnHui University of Science and Technology. (in Chinese))
- [16] 蔡聪, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻结黄土的单轴试验及其本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 879 - 887. (CAI Cong, MA Wei, ZHAO Shu-ping. Uniaxial tests on frozen loess and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 879 - 887. (in Chinese))
- [17] LIAO M K, LAI Y M, WANG C. A strength criterion for frozen sodium sulfate saline soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, **53**(7): 1176 - 1185.
- [18] LADE P V, DUNCAN J M. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, **101**(10): 1037 - 1053.
- [19] YANG Y G, LAI Y M, LI J B. Laboratory investigation on the strength characteristic of frozen sand considering effect of confining pressures[J]. Cold Regions Science and Technology 2009, **60**: 245 - 250.