

不同小主应力和负温条件下冻结粉质黏土 平面应变试验研究

马芹永^{1, 2, 3}, 张鸿朋^{1, 2, 3}, 黄坤⁴, 马冬冬^{1, 2, 3}, 姚兆明^{1, 2, 3}, 吴飞^{1, 2, 3}

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 4. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对冻结法施工中的平面应变问题, 利用改进的安徽理工大学冻土真三轴仪进行平面应变试验, 分析冻结粉质黏土在不同小主应力和负温条件下的强度和变形特性, 建立基于 Weibull 分布和 Drucker-Prager 强度准则的冻结粉质黏土损伤本构模型。理论和试验结果表明: 同一温度下, 不同小主应力下的应力-应变曲线呈现不同程度的硬化特征。破坏强度随小主应力的增加表现出先增后减的规律, 随温度的降低呈线性增长的趋势。建立的非线性莫尔-库仑强度准则可以近似描述冻结粉质黏土的强度随小主应力增大而呈现出的非线性变化特征。不同试验条件下小主应力方向的应变均为膨胀变形, 体应变均呈现剪缩的特性。随着小主应力的增大, 试样的变形模量呈现先增后减的趋势; 当小主应力相同时, 其值随温度的降低而增大。当温度相同时, 破坏时的中主应力随小主应力的增大同样表现出先增后减的趋势。建立的损伤本构模型可以较好地反映复杂应力路径下小主应力和温度对冻结粉质黏土强度和变形特性的影响。

关键词: 土力学; 冻结粉质黏土; 力学性能; 平面应变; 强度准则; 损伤本构模型

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2024)03-0768-13

Experimental study on plane strain of frozen silty clay under different minor principal stresses and negative temperatures

MA Qinyong^{1, 2, 3}, ZHANG Hongpeng^{1, 2, 3}, HUANG Kun⁴, MA Dongdong^{1, 2, 3},
YAO Zhaoming^{1, 2, 3}, WU Fei^{1, 2, 3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;
4. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Aiming at the plane strain problem in freezing method construction, the plane strain tests were carried out by using the improved true triaxial apparatus of frozen soil in Anhui University of Science and Technology. Subsequently, the strength and deformation of frozen silty clay were analyzed under different principal stresses and temperatures. Based on Weibull distribution and Drucker-Prager strength criterion, a damage constitutive model was established for frozen silty clay. The theoretical and experimental results demonstrate that the stress-strain curves under different minor principal stress exhibit different degrees of hardening characteristics at

收稿日期: 2023-06-08; **修回日期:** 2023-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874003, 42301152)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 50874003 and 42301152)

作者简介: 马芹永(1964-), 男, 2005年于北京科技大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事冻土力学和岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: qymaah@126.com。通讯作者: 张鸿朋(1997-), 男, 现为博士研究生。E-mail: hpzhangal@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0475

the same negative temperature. The failure strength increases first and then decreases with the increase of the minor principal stress, while it increases linearly with decreasing temperature. The established nonlinear Mohr-Coulomb strength criterion can describe the nonlinear correlation between the strength of frozen silty clay and the minor principal stress. Under different test conditions, the strain along the minor principal stress is expansion deformation, and the volume strain exhibits shear contraction. As the minor principal stress increases, the deformation modulus of the sample increases first and then decreases. For the same minor principal stress, the deformation modulus exhibits a negative correlation with temperature. Under the same temperature, the intermediate principal stress at failure also increases first and then decreases with increasing minor principal stress. The performed analysis revealed that the established damage constitutive model effectively considers the influence of minor principal stress and temperature on the strength and deformation of frozen silty clay under complex stresses.

Key words: soil mechanics; frozen silty clay; mechanical properties; plane strain; strength criterion; damage constitutive model

1 引言

人工冻结法是利用人工制冷技术,使地层中的水结冰,把天然岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,隔绝地下水与地下工程的联系,以便在冻结壁的保护下进行井筒或地下工程掘砌施工的特殊施工技术^[1-2],具有适应性强、支护结构灵活、隔水性好、对环境影响小等优点^[3-4]。冻结壁的强度和变形特性是人工冻结法的重点关注指标^[5-6]。在冻结法凿井时,冻结壁在竖直方向上的变形量几乎为 0,近似处于平面应变状态。因此研究冻土在平面应力状态下的力学特性,掌握其强度和变形规律对冻结壁的施工、设计、维护以及安全性评价具有重要的工程意义^[7-9]。

为了解小主应力对岩土材料力学特性的影响,国内一些学者对常规土进行了理论和试验研究。潘家军等^[10]对粗粒土的研究表明,应力-应变曲线的破坏强度和斜率均随着小主应力的增加而增大,但曲线均呈现应变软化的现象,大主应变-体应变关系曲线随小主应力的增大由先剪缩后剪胀逐渐过渡为均呈现剪缩的特性;张玉和邵生俊^[11]对原状结构性黄土进行平面应变试验的研究发现,随着小主应力的增大,黄土的应力-应变曲线由应变软化型逐渐过渡为应变硬化型;姜景山等^[12]对粗粒土的力学性能进行了研究,表明同一小主应力条件下,平面应变试验的应力-应变关系曲线比常规三轴试验的斜率更大,体应变曲线的压缩变形也更大,同一加载路径下,随着小主应力的增加,体缩变形逐渐增大,小主应力方向的膨胀变形越来越小。上述研究表明,小主应力对常规土强度和变形特性的影响比较显著。

徐湘田等^[13]发现,含盐冻结粉质砂土的小主应力较小时,应力-应变曲线呈应变软化现象,当小

主应力超过 3 MPa 时,应力-应变曲线逐渐过渡为应变硬化现象,在小主应力为 12 MPa 时,强度达到最大值;牛亚强等^[14]也发现类似的规律。张德等^[15]基于损伤力学理论和概率统计方法,假设冻土微元强度服从 Weibull 分布,通过修正经典 Mohr-Coulomb 屈服准则,建立了冻结砂土在常规三轴应力状态下的双参数本构模型,研究发现该模型能够较好地预测冻结砂土的应力-应变曲线特征,且能很好地反映冻结砂土在不同小主应力下的应变软化和硬化现象;姚兆明等^[16]发现,不考虑温度影响的损伤本构模型可反映冻土在单轴应力状态下的全过程,当考虑温度影响时,通过分析 Weibull 随机分布参数 F_0 与弹性模量 E 随温度变化的趋势,发现随着分布参数 F_0 和弹性模量 E 随温度的降低而增大,近似呈线性关系,此模型与试验结果具有较好的一致性。目前针对冻土力学性能的研究大多集中于单轴和常规三轴应力状态,冻土在平面应变应力状态下的研究较少,因此研究冻土在平面应变应力状态下的力学特性具有重要的工程意义。

基于此,本文以冻结粉质黏土为研究对象,利用改进的冻土真三轴仪,进行不同小主应力和负温下的平面应变试验,分析了小主应力和温度对冻土力学性能的影响,建立了基于 Weibull 分布和 Drucker-Prager 强度准则的修正损伤本构模型,以预测冻结粉质黏土在平面应变状态下的应力-应变关系。

2 试样制备与试验方案

2.1 试验设备

冻土真三轴试验仪的结构形式如图 1 所示。该试验机通过五向刚性加荷方式加载,主要由压力室、温度控制系统、液压伺服油源系统以及数据采集系统组成,可以模拟土体在三维复杂应力路径

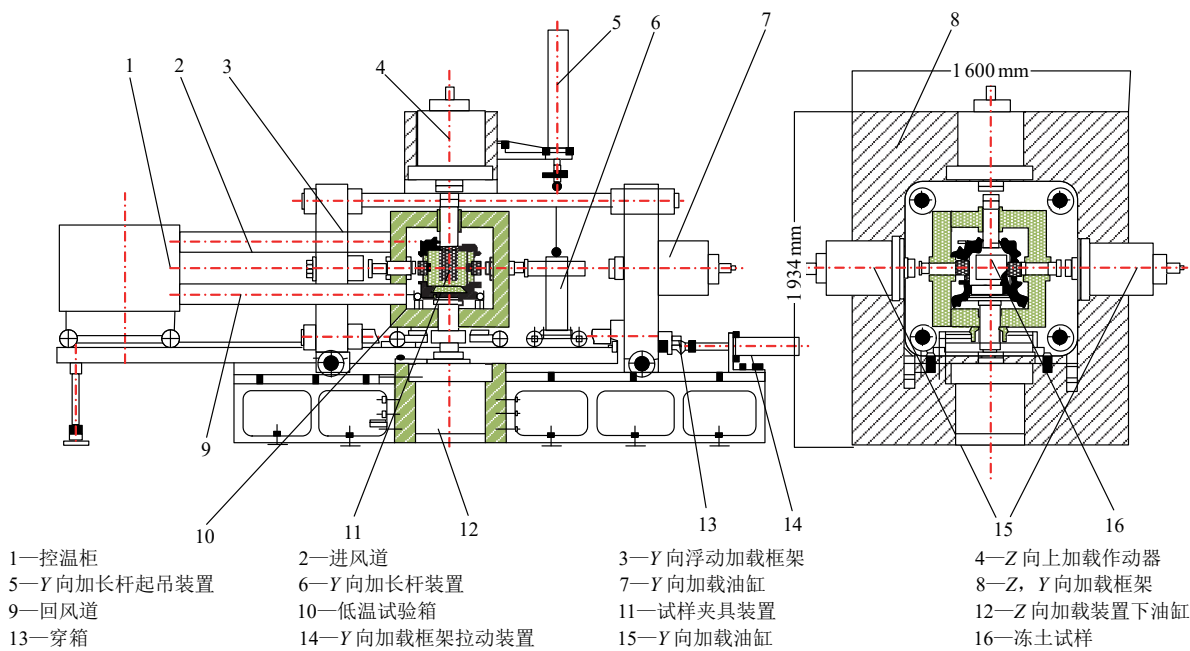


图 1 冻土真三轴试验机结构原理图

Fig.1 Structural schematic diagram of frozen soil true triaxial testing machine

下的力学特性。 X 、 Y 、 Z 三个主应力方向的最大试验力分别为 1 000，1 000 和 2 000 kN，位移测控范围分别为 0~150，0~200 和 0~150 mm，压力传感器和位移传感器的测量精度分别为 1 N 和 0.01 mm；加载箱的温度控制范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，控温精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；在试样加载过程中，数据采集系统能够实时采集各方向上的荷载以及位移传感器反馈的数据并记录^[17-18]。

2.2 试样制备

试验用土为粉质黏土，原状含水率为 15.6%，液限为 35.1%，塑限为 20.8%，土样微观形貌如图 2 所示。根据标准^[19]的规定，试样制备前对土样进行如下处理：破碎→过 2 mm 筛→在 105 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内干燥 12 h 后得到制样用土，所得土样的粒径分布见表 1。 X 射线衍射试验(XRD)图谱见图 3，土样的主要矿物成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 。制样前，首先将配好原状含水率的粉质黏土放入保湿皿中静置 24 h，然后采用分层击实法制样，将保湿均匀的土样从保湿皿中取出，在 100 mm×100 mm×100 mm 的模具内壁均匀涂抹一层凡士林，以防试样与模具黏合不易脱模，接着将称量好的土样均匀分成 5 等份，放入模具中分层夯实，制备好的试样脱模后应包裹一层保鲜膜，以防止试样在冻结过程中水分的流失，最后将试样放置在目标温度的低温箱内冻结 48 h^[20]。

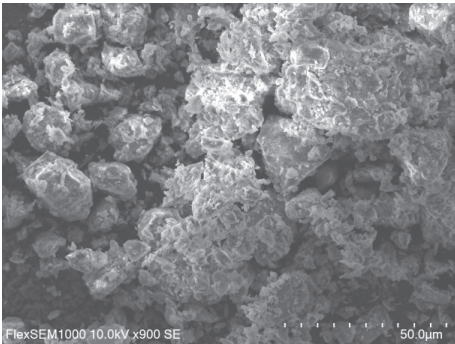


图 2 粉质黏土微观形貌

Fig.2 Microstructure of silty clay

表 1 粉质黏土粒径分布

Table 1 Particle-size distribution of silty clay

粒径 d/mm	质量分数/%
<0.075	8.9
0.075~0.1	13.4
0.1~0.3	10.2
0.3~0.6	27.8
0.6~1.0	16.4
1.0~2.0	23.3

2.3 试验方案及加载方法

具体试验方案如表 2 所示。在小主应力加载阶段和固结阶段，以 20 N/s 的加载速率加载至初始小主应力设定值，并固结 0.5 h；在大主应力加载阶段，维持小主应力恒定，中主应变保持不变，大主应力以 1 mm/min 的速度加载，直至试样破坏，实测应力路径如图 4 所示。

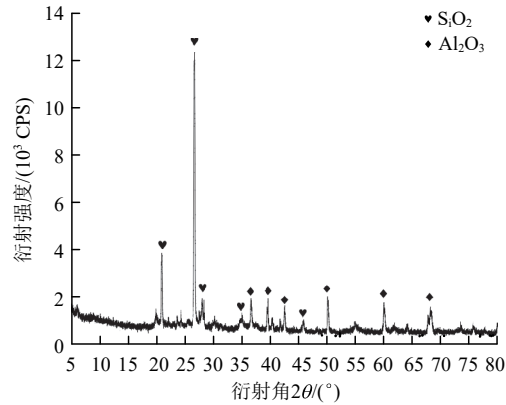


图 3 粉质黏土 XRD 分析
Fig.3 XRD analysis of silty clay

表 2 冻结粉质黏土试验方案
Table 2 Test scheme of frozen silty clay

试验类型	土质	温度/℃	含水率/%	小主应力/MPa
平面应变试验	粉质黏土	-5	15.6	1, 2, 3, 4, 5, 6
		-10		1, 2, 3, 4, 5, 6
		-15		1, 2, 3, 4, 5, 6

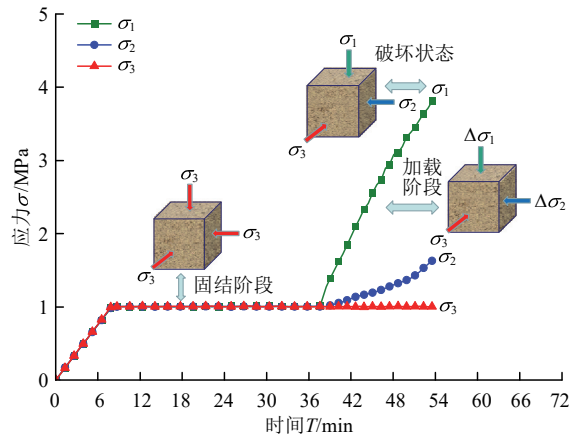
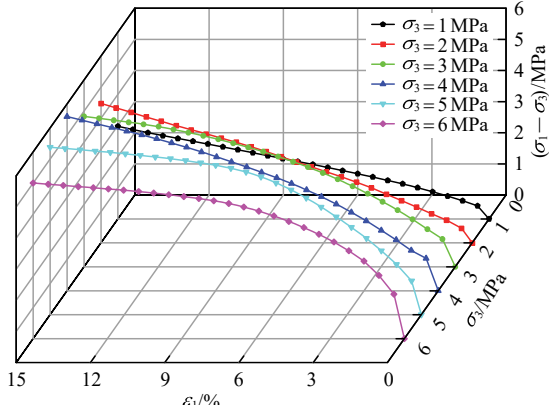


图 4 平面应变加载应力路径
Fig.4 Loading stress path of plane strain test

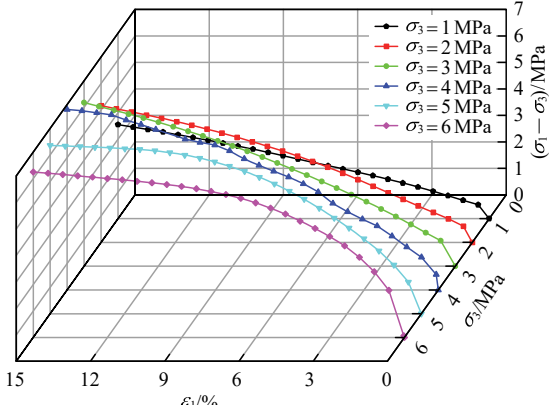
3 试验结果及分析

3.1 应力 - 应变分析

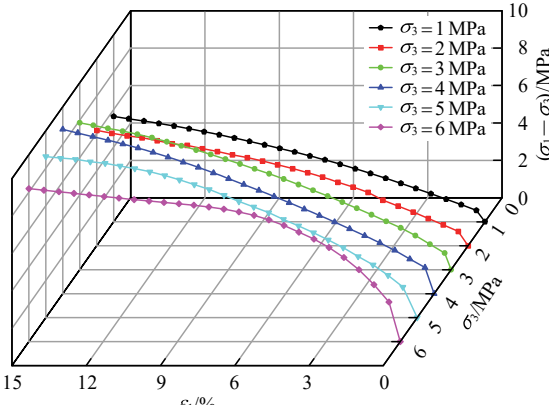
不同试验条件下冻结粉质黏土的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$) - 大主应变(ϵ_1)曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 冻结粉质黏土的应力 - 应变曲线均呈现应变硬化的特性, 其硬化程度受小主应力和温度的共同影响。相同负温条件下, 小主应力较小时, 应力随应变的增加近似线性增长, 应力 - 应变曲线呈强硬化型; 随着小主应力的增大, 应力 - 应变曲线逐渐从应变强硬化型过渡为弱硬化型^[21]。相同小主应力条件下, 应力 - 应变曲线斜率及应力峰值均随温度的降低而增大, 且曲线硬化程度基本一致。



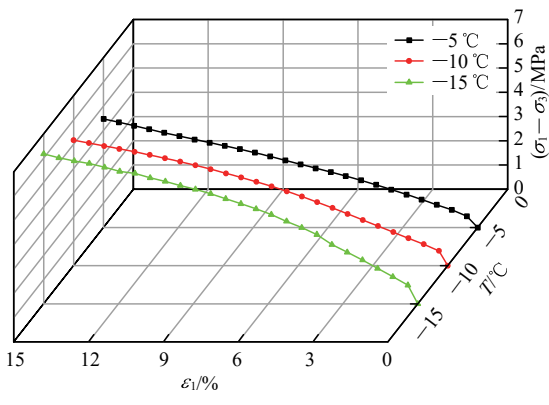
(a) -5 °C



(b) -10 °C



(c) -15 °C

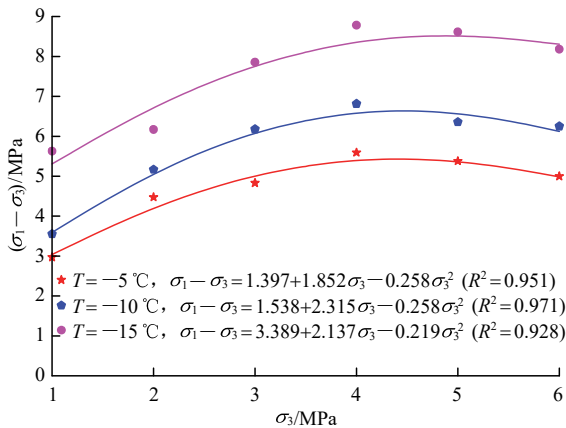


(d) $\sigma_3 = 2 \text{ MPa}$

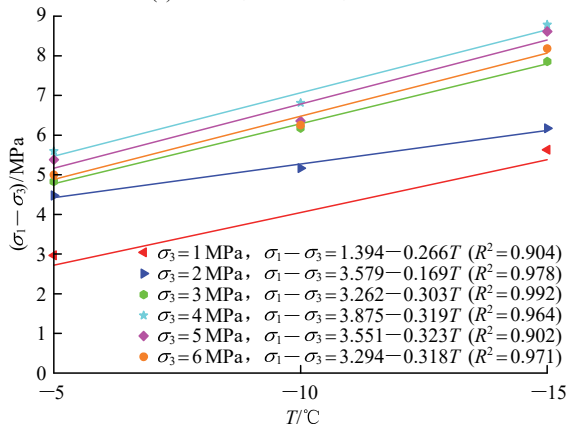
图 5 冻结粉质黏土偏应力 - 大主应变曲线
Fig.5 Deueviatoric stress and major principal strain curves of frozen silty clay

3.2 强度特性分析

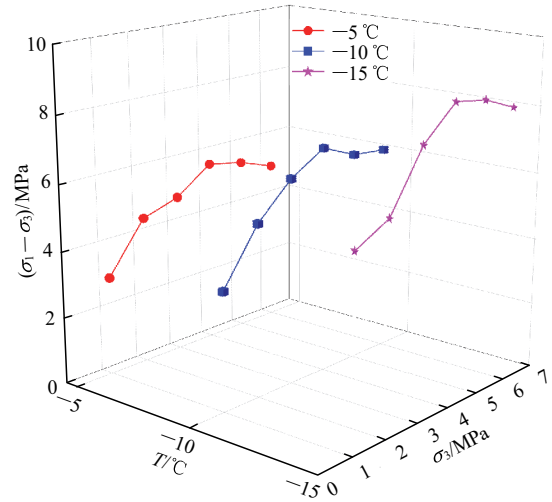
考虑到本试验条件下所得的应力-应变曲线均呈硬化型,因此取大主应变为 15% 的应力作为破坏应力^[19]进行分析。图 6 为小主应力和负温对冻结粉质黏土破坏强度的变化规律及拟合曲线,由图 6(a)可知,在不同负温条件下,强度随着小主应力的增加均呈现先增大后减小的趋势,可以近似描述为二次抛物线。当小主应力为 4 MPa 时,破坏应力最大,表现出明显的区间性。当小主应力较小时,试样内部并未产生压碎压融现象,小主应力对冻土的强度只起到增强作用,其增强作用主要表现为该阶段小主应力对冻结粉质黏土起到压密作用,增大了颗粒间的有效接触面积,提高了摩擦阻力;当小主应力较大时,试样内的冰被压融压碎,冰的压碎降低了试样内部冰的冻结力,而冰的压融产生了孔隙水,孔隙水起到的润滑作用降低了冻结粉质黏土的内摩擦角,当压融程度较大时会产生超静水压力,从而减小了破坏面上的有效正应力,此时小主应力对冻土的强度起到弱化作用。从图 6(b)可以看出,在相同小主应力条件下,随着温度的降低,冻结粉质黏土的强度近似呈线性关系,这主要因为温度的降低使得试样内部的冰晶体增多,胶结能力增强。



(a) 小主应力对破坏应力的影响



(b) 温度对破坏应力的影响



(c) 破坏应力三维图

图 6 破坏应力随小主应力和负温的变化规律

Fig.6 Variation of failure stress with minor principal stress and negative temperature

3.3 非线性莫尔-库仑强度参数分析

由图 6(a)可知,线性的莫尔-库仑准则不能反映冻结粉质黏土在小主应力较大时,强度随小主应力的非线性变化趋势。因此,当冻土试样发生剪切破坏时,根据非线性莫尔-库仑准则^[22],大主应力(σ_1)和小主应力(σ_3)可用下式表示:

$$\frac{\sigma_1}{p_a} = O \cdot \frac{\sigma_3}{p_a}^S \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q \quad (1)$$

式中: P_a 为标准大气压(0.101 33 MPa); O , S 和 Q 均为材料拟合参数。

通过式(1)对冻结粉质黏土的平面应变试验结果进行拟合,拟合参数及拟合结果分别如表 3 和图 7 所示。

表 3 拟合参数计算值

Table 3 The results of fitting parameter

温度/ $^{\circ}\text{C}$	O	S	Q	R^2
-5	0.991	5.497	0.863	0.994
-10	0.989	5.851	0.897	0.996
-15	0.995	14.239	0.632	0.966

根据莫尔-库仑强度准则可知,莫尔应力圆的表达式为

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

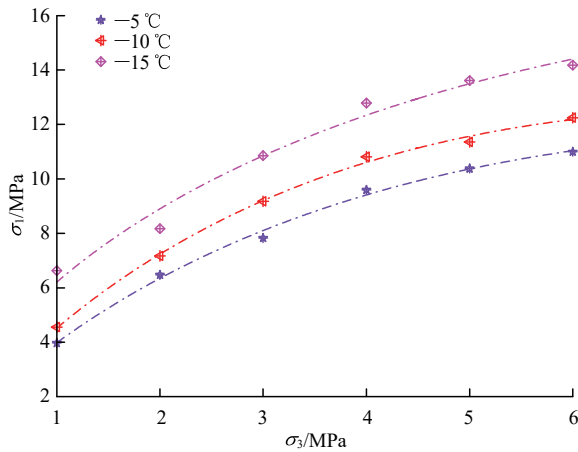


图 7 不同负温下大、小主应力之间的关系曲线

Fig.7 Major principal stress and minor principal stress curves of frozen silty clay under different negative temperatures

将式(1)改写为

$$n(\sigma_1, \sigma_3) = \frac{\sigma_1}{p_a} - O^{\frac{\sigma_3}{p_a}} S \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q = 0 \quad (3)$$

由强度包络线理论可知:

$$\frac{\partial f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} \frac{\partial n(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_3} - \frac{\partial f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_3} \frac{\partial n(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} = 0 \quad (4)$$

对式(2)和(3)进行微分可得

$$\frac{\partial f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} = \sigma_3 - \sigma \quad (5)$$

$$\frac{\partial f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_3} = \sigma_1 - \sigma \quad (6)$$

$$\frac{\partial n(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} = \frac{1}{p_a} \quad (7)$$

$$\frac{\partial n(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_3} = -\frac{S}{p_a} O^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q \ln O + Q \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{Q-1} \right] \quad (8)$$

将式(5)~(8)代入式(4), 可以得到冻结粉质黏土剪切面上的正应力(σ)和剪应力(τ)的表达式:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + S O^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q \ln O + Q \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{Q-1} \right]}{1 + S O^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q \ln O + Q \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{Q-1} \right]} \quad (9)$$

$$\tau = \left\{ \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 - \left[\frac{\sigma_1 + S O^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q \ln O + Q \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{Q-1} \right]}{1 + S O^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^Q \ln O + Q \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{Q-1} \right]} - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (10)$$

联立式(1), (9)和(10), 可以绘制出如图 8 所示的莫尔应力圆以及强度包络线。

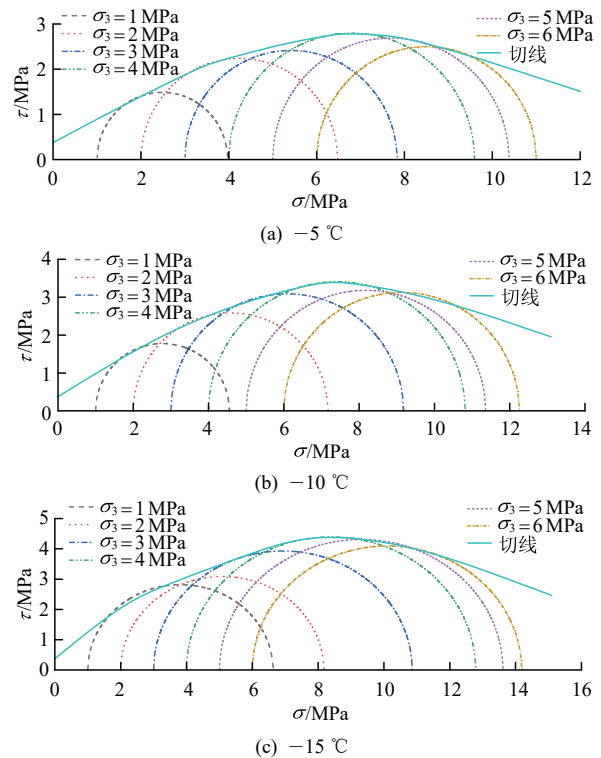


图 8 冻结粉质黏土莫尔应力圆及强度包络线

Fig.8 Molar stress circle and strength envelope of frozen silty clay

从图 8 可以看出, 通过式(1), (9)和(10)计算得出的强度包线及莫尔应力圆之间的吻合程度很高, 可见所建立的非线性莫尔-库仑强度准则能够较为准确地描述冻结粉质黏土的抗剪强度随小主应力的非线性变化规律。

3.4 变形特性分析

图 9 为不同试验条件下冻结粉质黏土小主应变(ε_3)和体应变(ε_v)与大主应变(ε_1)之间的关系曲线, 其中 ε_3 和 ε_v 以压缩为正, 膨胀为负, $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ 。由试验结果可知, 小主应变均为负数, 为膨胀变形。同一负温条件下, 当大主应变小于 3%时, 小主应

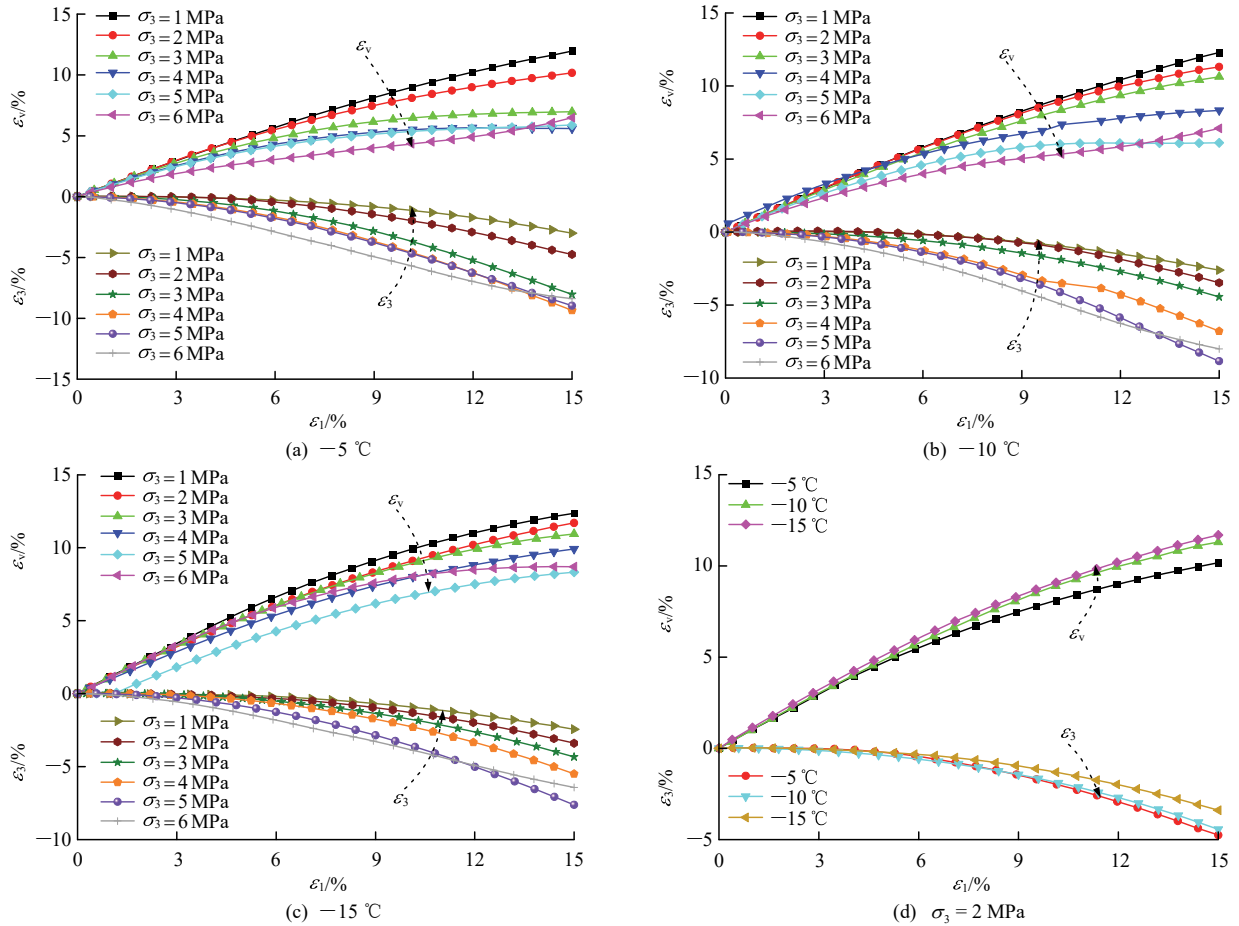


图9 冻结粉质黏土小主应变和体应变与大主应变之间的关系曲线

Fig.9 Minor principal strain-major principal strain and volume strain-major principal strain curves of frozen silty clay

变几乎为 0，侧胀变形很小；随着大主应变的不断增大， ε_3 - ε_1 曲线的斜率在不断增大，此时大主应变 - 小主应变的关系曲线大致呈线性分布。当小主应力较小时，随着小主应力的增加，曲线的斜率也越来越大，即膨胀量逐渐增大，表明小主应力对小主应变的影响较大；当小主应力较大时，试样的小主应变逐渐减弱，这是因为此时的小主应力足够大，使得试样在轴向加载阶段前已被压密，因此轴向加载后小主应力方向的膨胀变形减小。相同小主应力条件下，小主应力方向的膨胀变形随温度的降低而减小，这是由于温度的降低提高了冻土的整体性，因此轴向加载后小主应力方向的膨胀变形减小。

体应变能够较为全面地反映冻土的变形特性。从图 9 中可以看出，除温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、小主应力为 4 MPa 的体应变曲线先剪缩后剪胀外，其余体应变曲线均随着大主应变的增大，体缩变形不断增加。相同负温下，当小主应力较小时，试样内部的微裂缝在外荷载的作用下闭合，颗粒间的接触愈发紧密，因此产生较大的压缩变形；而当小主应力较大时，剪缩幅度要远远小于小主应力较小时的状态，这是

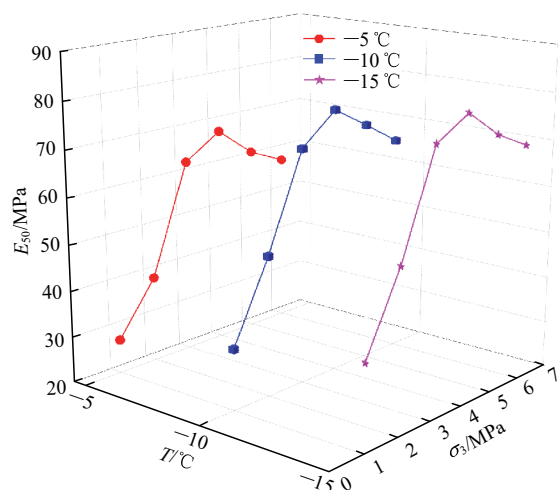
由于小主应力的进一步增大使得冻土内部的孔隙冰和较大的黏土颗粒在加载阶段前大部分已被压缩，抑制了裂缝的开展，因此轴向加载后的体应变变化幅度较小。同一小主应力下，体应变随温度的降低而增大，由于小主应变随温度的降低而减小，平面应变试验条件下中主应力方向的位移保持不变，从而使得体应变逐渐增大。

3.5 变形模量分析

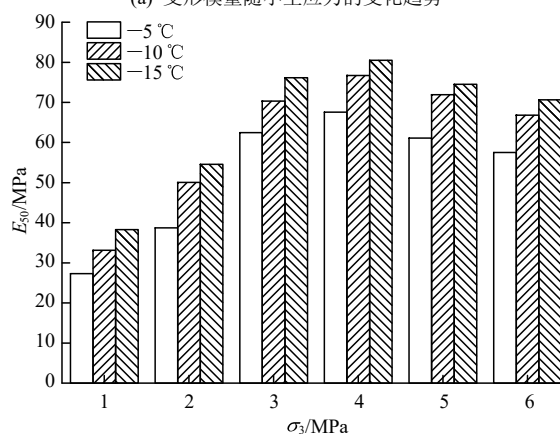
根据试验方法^[23]，选取应力 - 应变曲线上 50% 处的峰值应力点($\sigma_{0.5}$)与其所对应的应变($\varepsilon_{0.5}$)的比值作为变形模量，即 0.5 倍强度处的割线模量(E_{50})^[24]：

$$E_{50} = \frac{\sigma_{0.5}}{\varepsilon_{0.5}} \quad (11)$$

不同小主应力和负温条件下冻结粉质黏土变形模量的变化规律如图 10 所示。从图 10(a)可以看出，当温度一定时，随着小主应力的增大，试样的变形模量呈先增后减的变化趋势，这与强度变化规律一致，小主应力较小时，由于土体的压硬性，土体受到的约束随着小主应力的升高而增强，土颗粒间产



(a) 变形模量随小主应力的变化趋势



(b) 变形模量随温度的变化趋势

图 10 变形模量随小主应力和负温的变化趋势

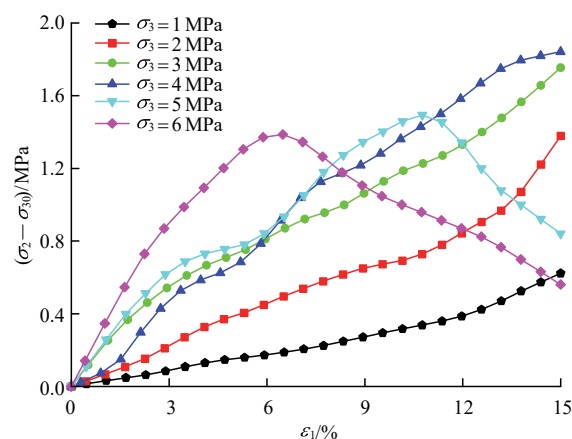
Fig.10 Variation of deformation modulus with minor principal stress and negative temperature

生相对滑移的难度增大, 土体抵抗变形的能力增强; 小主应力较大时, 试样内部的冰颗粒已被压融压碎, 使得土体抵抗变形的能力逐渐减弱。从图 10(b)可知, 小主应力一定时, 试样的变形模量随温度的降低而增大, 但增长趋势逐渐减缓, 这是因为温度的降低使得冻土内部的未冻水含量减小, 孔隙冰增多^[25], 增强了土颗粒间的黏结力和摩擦力, 减小了试样的压缩变形, 表现为变形模量随温度的降低而增大。

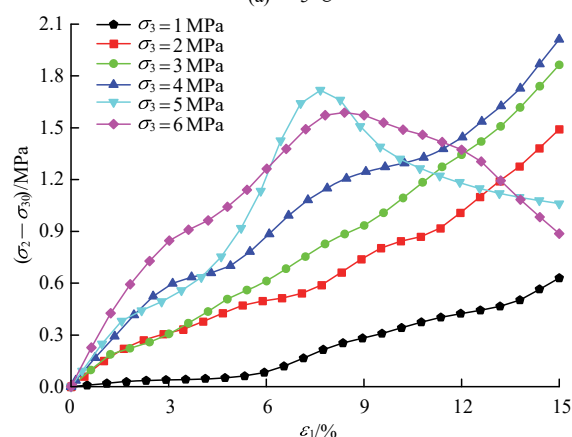
3.6 中主应力变化规律分析

根据课题组前期研究表明, 平面应变应力状态下冻土的强度大于常规三轴应力状态^[26], 其根本原因在于中主应力对冻土的强度具有一定的增强作用。因此, 深入研究在加载过程中, 中主应力的演化规律尤为重要。

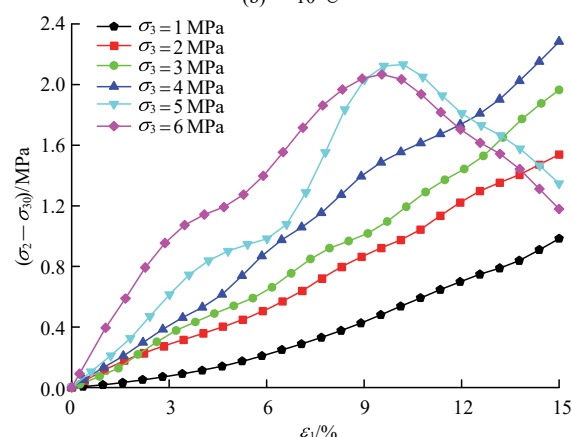
根据冻结粉质黏土在不同小主应力和负温下的中主应力(σ_2)和大主应变(ε_1)的试验结果, 得出如图 11 所示的关系曲线。为消除静水压力的影响,



(a) -5 °C



(b) -10 °C



(c) -15 °C

图 11 冻结粉质黏土中主应力 - 大主应变曲线

Fig.11 Intermediate principal stress and major principal strain curves of frozen silty clay

图中的纵坐标均取 $(\sigma_2 - \sigma_{30})$, 其中 σ_{30} 为初始小主应力。由图 11 可知, 当 $\sigma_3 = 5$ 和 6 MPa 时, 中主应力随大主应变的发展先增后减; 其余条件下, 中主应力均随大主应变的增加不断增大。这是因为小主应力较小时, 随着剪切变形的不断发展, 冻土的强度不断增大, 中主应力也在不断增大; 当小主应力较大时, 加载初期, 曲线的初始切线斜率较大, 但土体很快产生塑性变形, 在此过程中中主应力的增

长速度较快,当偏应力-大主应变曲线逐渐趋于水平状态时,中主应力相应的减小;破坏时的中主应力随小主应力的增大呈先增后减的趋势,这与偏应力-大主应变曲线的试验结果相吻合,规律较为明显;同一小主应力条件下,温度越低,破坏时的中主应力越大。

3.7 损伤本构模型

(1) 模型推导

根据 J. Lemaitre 等^[27-28]提出的等效应变的假设,损伤材料上产生的应变与无损材料上产生的应变相同。表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{\sigma^*}{E} = \frac{\sigma}{E^*} = \frac{\sigma}{E(1-D)} \quad (12)$$

式中: σ , σ^* 分别为名义应力和有效应力; E , E^* 分别为无损材料的弹性模量和受损材料的弹性模量; D 为冻土的损伤变量。

从宏观角度来看, D 的表达式如下:

$$D = \frac{N_f}{N} \quad (13)$$

式中: N_f 和 N 分别为已破坏的微元数和总微元数。

当试样加载到某一应力水平 L 时,已破坏的微元数为

$$N_f = \int_0^L NP(z)dz \quad (14)$$

式中: $P(z)$ 为冻结粉质黏土微元破坏的概率。

整理可得

$$D = \frac{N_f}{N} = \frac{\int_0^L NP(z)dz}{N} = \int_0^L P(z)dz \quad (15)$$

(2) 模型参数的确定

破坏准则可采用以下通式表示:

$$F = K_0 \quad (16)$$

式中: F 为水平应力, K_0 为常数。

Drucker-Prager 强度准则^[29-30]能够反映中主应力对冻土强度的影响,基于该强度准则,并结合等效应变假设,得出冻结粉质黏土微元强度的表达式如下:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3(\sin \varphi)^2}} \quad (18)$$

$$I_1 = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^* \quad (19)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_1^* - \sigma_3^*)^2] \quad (20)$$

式中: α 为材料参数; I_1 , J_2 分别为应力第一不变量和偏应力第二不变量。

根据 Hooke 定律和式(12)可得

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1^* - \mu(\sigma_2^* + \sigma_3^*)}{E} \quad (21)$$

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1-D}, \quad i=1, 2, 3 \quad (22)$$

整理式(21)和(22)可得

$$\frac{1}{1-D} = \frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)} \quad (23)$$

将式(18)~(20)计算所得的 α , I_1 和 J_2 代入式(17),即可求出参数 F 。

假设 F 服从 Weibull 随机分布,则概率分布函数^[31]如下:

$$P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m} \quad (24)$$

式中: m 和 F_0 为分布参数。

将式(24)代入式(15)可得

$$D = 1 - e^{-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m} \quad (25)$$

将式(25)代入式(23)和(24)即可得出下式所示基于 Drucker-Prager 准则的冻结粉质黏土本构方程:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 e^{-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m} + \mu(\sigma_3 + \sigma_2) \quad (26)$$

将式(26)进行变换并对等式两边取对数可得

$$\ln \left[-\ln \frac{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)}{E\varepsilon_1} \right] = \ln \beta + m \ln F_0 \quad (27)$$

$$\text{令 } \beta = \left(\frac{1}{F_0} \right)^m, \quad Y = \ln \left[-\ln \frac{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)}{E\varepsilon_1} \right],$$

$X = \ln F_0$, $C = \ln \beta$, 可得

$$Y = C + mX \quad (28)$$

利用线性回归可知 C 和 m , 从而求出 F_0 。将试验所得的结果代入式(28)可知,小主应力和负温下的模型参数 m 和 F_0 , 如表 4 所示。

图 12 反映了 m 和 F_0 分别为定值时的应力-应变曲线。从图 12(a)可以看出,冻结粉质黏土的峰值应力随着 F_0 的增大而增长,即 F_0 越大,冻土抵抗变形破坏的能力越强。由图 12(b)可知,随着 m 的增大,冻结粉质黏土的峰值应力从应变硬化逐渐过渡为应变软化,这表明 m 对冻土材料的脆性和延性特征的影响较大,即 m 越大,冻土抵抗变形破坏的能力越弱。

表 4 不同小主应力和负温下的损伤本构模型参数
Table 4 Damage constitutive model parameters under different minor principal stress and negative temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	σ_3/MPa	m	F_0/MPa
-5	1	0.398	5.63
	2	0.255	15.39
	3	0.123	19.88
	4	0.104	23.87
	5	0.211	17.05
	6	0.295	10.66
-10	1	0.358	7.84
	2	0.231	18.93
	3	0.112	23.35
	4	0.084	26.74
	5	0.176	19.46
	6	0.249	11.29
-15	1	0.336	9.06
	2	0.214	20.65
	3	0.108	26.73
	4	0.069	28.45
	5	0.143	21.12
	6	0.206	13.46

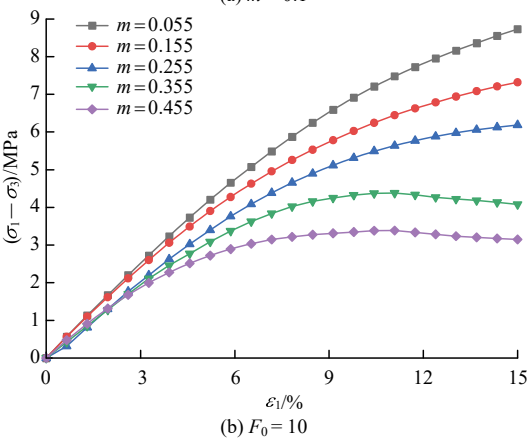
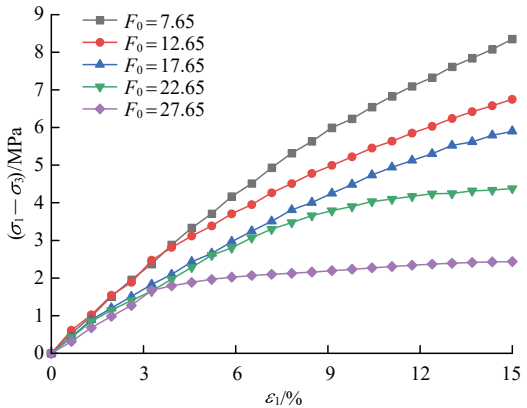


图 12 损伤本构模型随 m 和 F_0 的变化规律

Fig.12 Variation of damage constitutive model with m 和 F_0

由表 4 可知, 参数 m 和 F_0 随着小主应力的增大分别呈现先增后减和先减后增的趋势, 这与偏应力 - 大主应变的结果一致。从图 13 和 14 可以看出, 采用二次抛物线进行拟合能够较为准确地反映出 m 和 F_0 随小主应力增大的变化趋势, 相关系数(R^2)均在 0.9 以上, 可见拟合效果较好。根据拟合公式, 获得不同小主应力和负温条件下的 m 和 F_0 值, 从而代入如式(16)所示的本构方程以预测冻结粉质黏土的应力 - 应变关系。

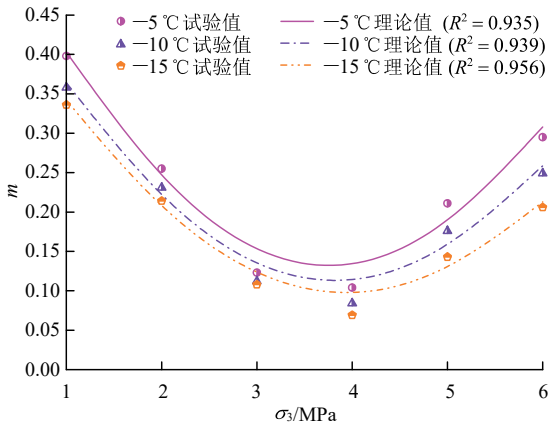


图 13 不同负温下参数 m 随小主应力的变化规律

Fig.13 Variation of parameter m with minor principal stress under different negative temperatures

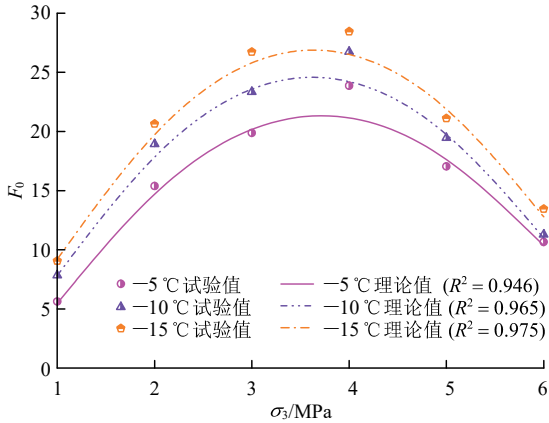


图 14 不同负温下参数 F_0 随小主应力的变化规律

Fig.14 Variation of parameter F_0 with minor principal stress under different negative temperatures

(3) 模型验证

为了验证损伤本构模型的合理性与准确性, 将理论计算得到的曲线与试验数据测得的数据进行对比分析, 如图 15 所示。由图可知, 不同小主应力条件下, 通过理论计算得到的数值可以反映冻结粉质黏土破坏特征以及强度随小主应力的增大而变化的趋势, 相关系数(R^2)均在 0.98 以上, 可见修正的损伤本构模型可以较好地反映冻结粉质黏土的力学破坏特性。

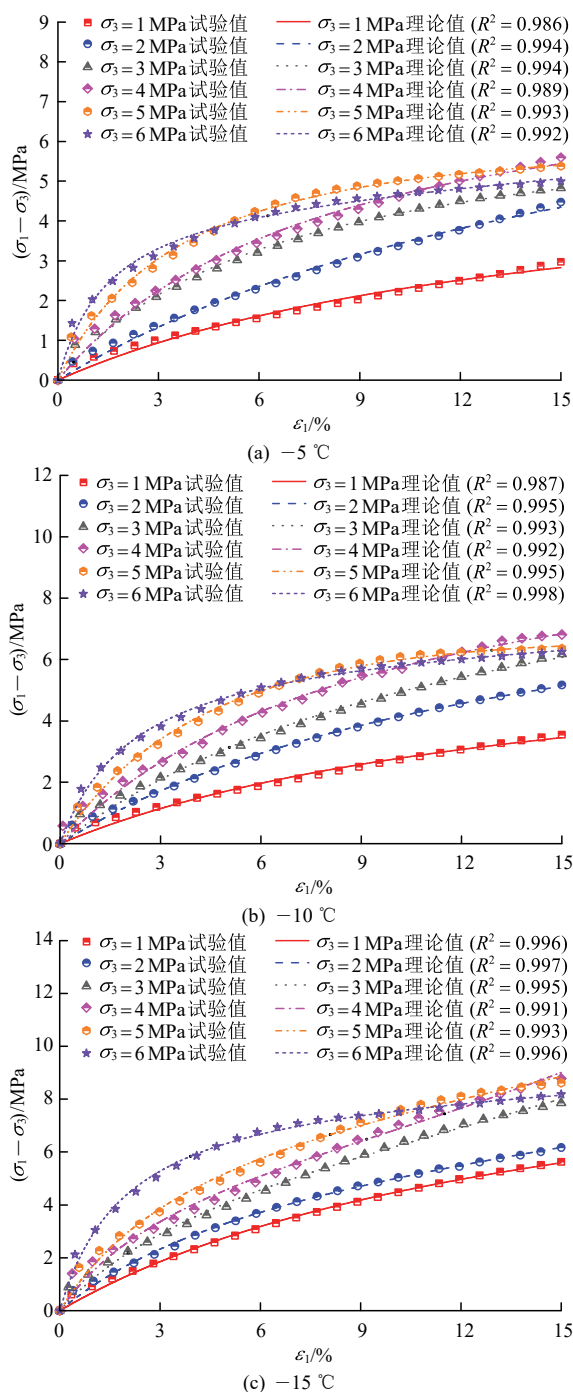


图 15 试验曲线和改进的理论曲线对比结果

Fig.15 Comparison results of the test curves and the improved theoretical curves

4 结 论

(1) 同一负温下, 应力 - 应变曲线随小主应力的增大由应变硬化型逐渐过渡为应变软化型。随着温度的降低冻结粉质黏土的强度近似线性增长; 随着小主应力的增大, 近似呈二次多项式关系, 当 $\sigma_3 = 4$ MPa 时强度达到最大值。非线性莫尔 - 库仑准则可较好地反映冻结粉质黏土在小主应力大于一定值后强度降低的变化特征。

(2) 在平面应变条件下, 冻结粉质黏土在小主应力方向呈膨胀变形, 体应变呈剪缩的特性; 温度相同时, 随着小主应力的增大, 变形速率和剪缩程度分别表现出先增后减和先减后增的趋势; 相同负温条件下, 当 $1 \text{ MPa} \leq \sigma_3 \leq 4 \text{ MPa}$ 时, 变形模量随小主应力的增大而增加, 当 $\sigma_3 = 5$ 和 6 MPa 时, 变形模量减小。随着小主应力的增大, 破坏时的中主应力呈现先增后减的趋势。

(3) 修正的参数 F_0 越大, 冻结粉质黏土抵抗变形破坏的能力越强; 参数 m 越大, 冻结粉质黏土抵抗变形破坏的能力越差。改进后所得的损伤本构模型能较好地分析冻结粉质黏土的力学破坏特征。

参考文献(References):

- [1] 马芹永. 多年冻土和人工冻土的爆破试验与方法研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 75 - 78.(MA Qinyong. A study on blasting tests and methods for permafrost and artificially frozen soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 75 - 78.(in Chinese))
- [2] 鲁先龙, 陈湘生, 陈曦. 人工地层冻结法风险预控[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2308 - 2314.(LU Xianlong, CHEN Xiangsheng, CHEN Xi. Risk prevention and control of artificial ground freezing(AGF)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2308 - 2314.(in Chinese))
- [3] 杨更社, 屈永龙, 奚家米. 白垩系地层煤矿立井冻结壁的力学特性及温度场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1873 - 1879.(YANG Gengshe, QU Yonglong, XI Jiami. Study of mechanical properties and temperature field of frozen wall in cretaceous strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1873 - 1879.(in Chinese))
- [4] 范长新, 温智, 王旭, 等. 人工冻结法调控多年冻土区桩基础地温场的效果分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(8): 106 - 113.(FAN Changxin, WEN Zhi, WANG Xu, et al. Effect analysis of artificial freezing method to regulate ground temperature field of pile foundation in permafrost regions[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(8): 106 - 113.(in Chinese))
- [5] 张博, 杨维好, 蒋成. 考虑井帮收敛的深冻结壁弹塑性设计方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 112 - 119.(ZHANG Bo, YANG Weihao, JIANG Cheng. An elastoplastic design method for deep frozen wall considering shaft-flank displacement convergence[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(1): 112 - 119.(in Chinese))
- [6] 郇新军, 李铭远, 张景伟, 等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结

- 法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1 267 - 1 276.
(GAO Xinjun, LI Mingyuan, ZHANG Jingwei, et al. Field research on artificial freezing of subway cross passages in water-rich silty clay layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1 267 - 1 276.(in Chinese))
- [7] NI P P, MEI G X, ZHAO Y L, et al. Plane strain evaluation of stress paths for supported excavations under lateral loading and unloading[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1): 146 - 159.
- [8] WANG B X, XU X T, WANG X S, et al. Mechanical behavior and strength criterion of frozen silty clay under complex stress paths[J]. Geoderma, 2023, 435: 116506.
- [9] 陈 敦, 马 巍, 王大雁, 等. 定向剪切应力路径下冻结黏土变形特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2 483 - 2 490.(CHEN Dun, MA Wei, WANG Dayan, et al. Experimental study of deformation characteristics of frozen clay under directional shear stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2 483 - 2 490.(in Chinese))
- [10] 潘家军, 程展林, 余 挺, 等. 不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2 078 - 2 084.
(PAN Jiajun, CHENG Zhanlin, YU Ting, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of coarse-grained soil under different intermediate principal stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2 078 - 2 084.(in Chinese))
- [11] 张 玉, 邵生俊. 平面应变条件下黄土的竖向加载变形与强度特性分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 112 - 121.(ZHANG Yu, SHAO Shengjun. An analysis of vertical loading deformation and strength characteristics of loess under plain strain condition[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 112 - 121.(in Chinese))
- [12] 姜景山, 左永振, 程展林, 等. 应力状态对粗粒料力学特性影响的大型真三轴试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3 563 - 3 572.(JIANG Jingshan, ZUO Yongzhen, CHENG Zhanlin, et al. Effects of stress state on mechanical properties of coarse granular material using large-scale true triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3 563 - 3 572.(in Chinese))
- [13] 徐湘田, 白瑞强, 赖远明, 等. 含盐冻结粉质砂土力学性质的试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 836 - 842.(XU Xiangtian, BAI Ruiqiang, LAI Yuanming, et al. Experimental study on mechanical properties of saline frozen silty sand[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 836 - 842.(in Chinese))
- [14] 牛亚强, 赖远明, 王 旭, 等. 冻结粉质黏土三轴抗压强度和变形特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 424 - 430.(NIU Yaqiang, LAI Yuanming, WANG Xu, et al. Experimental study on triaxial compressive strength and deformation behaviors of frozen silty clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 424 - 430.(in Chinese))
- [15] 张 德, 刘恩龙, 刘星炎, 等. 基于修正 Mohr-Coulomb 屈服准则的冻结砂土损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 978 - 986.(ZHANG De, LIU Enlong, LIU Xingyan, et al. A damage constitutive model for frozen sandy soils based on modified Mohr-Coulomb yield criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 978 - 986.(in Chinese))
- [16] 姚兆明, 余 文, 麻世堃, 等. 冻结黏土单轴抗压试验及损伤本构模型分析[J]. 力学与实践, 2020, 42(2): 196 - 201.(YAO Zhaoming, YU Wen, MA Shilong, et al. Uniaxial compression test and damage constitutive model for analysis of frozen clay[J]. Mechanics in Engineering, 2020, 42(2): 196 - 201.(in Chinese))
- [17] 马芹永, 黄 坤, 马冬冬, 等. 不同中主应力系数和负温条件下冻结砂土真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 870 - 878.
(MA Qinyong, HUANG Kun, MA Dongdong, et al. True triaxial tests on frozen sandy soil under different intermediate principal stress coefficients and negative temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 870 - 878.(in Chinese))
- [18] 姚兆明, 付祥宾, 李 南. 冻结饱和砂土真三轴试验及本构模型研究[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2022, 42(3): 1 - 9.(YAO Zhaoming, FU Xiangbin, LI Nan. True triaxial test and constitutive model of frozen saturated sand[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2022, 42(3): 1 - 9.(in Chinese))
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.(in Chinese))
- [20] HUANG K, MA Q Y, MA D D, et al. Strength and deformation properties of frozen sand under a true triaxial stress condition[J]. Soils and Foundations, 2022, 62(1): 101089.
- [21] 吴旭阳, 梁庆国, 牛富俊, 等. 黄土剪切应变硬化-软化分类试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1 457 - 1 466.(WU Xuyang, LIANG Qingguo, NIU Fujun, et al. Study on hardened and softened classification in shear test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1 457 - 1 466.(in Chinese))
- [22] 牛亚强, 赖远明, 王 旭, 等. 初始含水率对冻结粉质黏土变形和强度的影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 499 - 506.(NIU Yaqiang, LAI Yuanming, WANG Xu, et al. Research on influences of initial water content on deformation and strength behaviors of frozen

- silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 499 - 506.(in Chinese))
- [23] 中华人民共和国行业标准编写组. MT/T 593.5—2011 人工冻土物理力学性能试验 第 5 部分: 人工冻土三轴剪切强度试验方法[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. MT/T 593.5—2011 Physical and mechanical properties test of artificial frozen soil Part 5: Triaxial shear strength test method of artificial frozen soil[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.(in Chinese))
- [24] 陈昌富, 韦思琦, 蔡 焕. 温度变化对水泥土力学性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 190 - 199.(CHEN Changfu, WEI Siqi, CAI Huan. Effect of temperature change on mechanical properties of cement soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 190 - 199.(in Chinese))
- [25] 孙义强, 孟上九, 王 淼, 等. 负温和初始含水率对冻结粉质黏土力学性质的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 193 - 205.(SUN Yiqiang, MENG Shangjiu, WANG Miao, et al. Effects of negative temperature and initial moisture content on mechanical properties of frozen silty clay[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(1): 193 - 205.(in Chinese))
- [26] 张鸿朋, 马芹永, 黄 坤, 等. 冻结砂不同应力路径三轴试验强度和变形分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1 477 - 1 486.(ZHANG Hongpeng, MA Qinyong, HUANG Kun, et al. Strength and deformation analysis of frozen sand under different stress paths using the triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1 477 - 1 486.(in Chinese))
- [27] LEMAITRE J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233 - 245.
- [28] 梁明纯, 苗胜军, 蔡美峰, 等. 考虑剪胀特性和峰后形态的岩石损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2 392 - 2 401.(LIANG Mingchun, MIAO Shengjun, CAI Meifeng, et al. A damage constitutive model of rock with consideration of dilatation and post peak shape of the stress-strain curve[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2 392 - 2 401.(in Chinese))
- [29] 杜宇翔, 盛 谦, 付晓东, 等. 半成岩变形强度特征与损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 239 - 250.(DU Yuxiang, SHENG Qian, FU Xiaodong, et al. Study on deformation and strength characteristics and damage constitutive model of semi-diagenetic rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 239 - 250.(in Chinese))
- [30] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 184 - 187.(CAO Wengui, ZHAO Minghua, TANG Xuejun. Study on simulation of statistical damage in the full process of rock failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 184 - 187.(in Chinese))
- [31] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 226 - 3 231.(CAO Wengui, ZHAO Minghua, LIU Chengxue. Study on the model and its modifying method for rock softening and damage based on Weibull random distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 226 - 3 231.(in Chinese))