

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0049

SHEN Mingde, ZHOU Zhiwei, MA Wei. Long-term strength attenuation characteristics and yield criterion of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):437-447. [申明德, 周志伟, 马巍. 冻土长期强度的衰减特征及屈服准则[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):437-447.]

冻土长期强度的衰减特征及屈服准则

申明德^{1,2}, 周志伟^{1,2}, 马 巍^{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)

摘 要: 冻土作为一种强流变土工材料, 其强度衰减特性是路基工程、桩基工程和人工冻结法施工中病害或失稳的重要诱因, 但一直以来缺乏对复杂应力状态下冻土强度包络面衰减特性的实验和理论研究。基于不同围压下冻结路基土强度点处的应力松弛试验, 研究了复杂应力状态对冻土强度衰减过程的影响规律, 试验确定了 p - q 应力空间内冻结路基土强度包络面的率相关变化特征, 揭示了复杂应力状态下黏聚力和内摩擦角在应力松弛过程中的衰减、退化规律及其机理, 最后建立了考虑应力松弛效应的冻土率相关强度理论。

关键词: 冻土; 流变; 强度衰减; 强度准则

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0437-11

0 引言

岩土材料的强度一直以来都是工程建设的重要指标。冻土中冰的胶结作用以及冰-水相态平衡是冻土强度的核心机制, 它决定了冻土具有强流变特性, 表现为蠕变、应力松弛以及强度衰减等现象。冻土的强度衰减是寒区路基、桩基和人工冻结井壁在服役过程中出现病害或失稳的重要诱因^[1-6]。因此, 掌握和理解冻土在复杂热力条件下的强度衰减特性及其机理是保证寒区工程基础设施稳定运营、安全维护的必要前提。

应力松弛试验是研究冻土强度衰减和确定冻土长期强度的重要方法。维亚洛夫^[7-8]通过蠕变-松弛耦合试验来确定冻土的长期强度, 并在工程实践应用中取得了较好效果。Ladanyi等^[9]评估了三类由室内三轴松弛试验确定冻土蠕变参数和强度特性方法的可靠性。Karpenko等^[4]认为多级应力松弛试验可用于确定冻土流变参数。应力松弛指冻土在恒定应变下, 应力随时间的发展而降低的过程。冻土的强度衰减过程是与应力松弛相关的流变特性的工程体现^[1]。维亚洛夫^[7-8]认为因矿物颗粒和

冰包裹体的重新定向及部分弹性变形转变成塑性变形而造成的应力松弛, 是决定冻土强度性质最重要的因素; 应力松弛会弱化孔隙冰与土粒间的联结作用, 改变冻土的物理力学性质。国内外对复杂应力状态下冻土强度衰减的研究较少, 多集中在分析冻土的松弛特性及相关的影响因素。吴紫汪等^[10]将兰州黄土的单轴应力松弛过程分为强烈松弛阶段和缓慢松弛阶段, 发现预应变越大或温度越高, 冻土的应力松弛越强烈, 并基于大量冻土应力松弛试验结果给出了冻土的长期强度方程^[11]。Cong等^[12]基于扰动状态概念研究了冻融循环对膨胀土应力松弛特性的影响, 剪切应力随冻融循环次数增大而线性降低, 当冻融循环次数超过7次时, 该影响就不明显了。Ladanyi等^[9]的试验结果表明100~300 kPa的围压变化对-5℃下冻结Ottawa砂土的松弛特性影响并不显著。王松鹤等^[13-15]在-1℃、0.5~3 MPa下开展了一系列应力松弛试验, 研究了预应变过程和排水条件对冻结青藏黏土松弛特性的影响, 发现随着围压增长, 松弛过程初期的瞬时松弛量增加, 松弛稳定历时延长。

常温土(融土)的相关研究认为, 岩土介质的松

收稿日期: 2021-11-21; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630636)资助

作者简介: 申明德, 博士研究生, 主要从事冻土力学研究. E-mail: shenmingde@lzb.ac.cn

通信作者: 马巍, 研究员, 主要从事冻土力学及冻土物理学研究. E-mail: mawei@lzb.ac.cn

弛过程中应力与时间对数为线性关系,且几乎不受围压影响^[16-18]。但值得注意的是,冻土的力学行为与融土相比,对围压的响应特征相差甚远。经过多年来对冻土力学行为的深入研究,许多学者认为冻土的瞬时强度随围压的增长会出现明显的三阶段特征,即快速增大、快速降低和平缓降低。这是由围压对冻土的两种影响机制(压密增强效应和冰晶压碎融弱化效应)耦合的结果,将直接影响冻土内的结构联结作用^[1,19-24]。因而从强度机制上看,冻土的流变特性必然受围压影响。另一方面,多年来随着人工冻结技术在深部地下工程建设中的广泛运用,人工冻结深凿井开挖工程深度已达到千米级^[25-28]。然而,现有研究仅考察了低围压、简单应力状态下冻土的应力松弛规律,缺乏对复杂应力状态下冻土强度衰减特性的研究,已有研究的相关结论在深部地下工程中的适用性值得怀疑^[29]。因此,本文基于冻结路基土在强度点处的应力松弛试验,在充分研究围压对冻土松弛特性影响的基础上,确定

考虑围压影响的长期强度方程,详细分析冻土黏聚力、内摩擦角及复杂应力状态下的冻土强度在流变过程中的演化规律,建立考虑应力松弛效应的冻土率相关强度准则。

1 材料与方法

1.1 土样制备

试验所用土样为G30(连云港—霍尔果斯)高速公路兰州市榆中段路基填土,其基本物理指标及粒径分布分别见表1~2,击实试验结果见图1。土料经自然风干并去除杂质,过2 mm土工筛后置于密封干燥处保存。采用标准刚性模具、液压制样机和自动脱模机将土料压制成直径和高度分别为61.8 mm和125 mm的圆柱体试样。制样干密度为1.769 g·cm⁻³,含水率为16%。将试样进行抽真空饱和12 h后,放入冰箱内在-30 ℃下快速等向冻结24 h以上。最后,将冻结后的试样置于温度为目标测试温度(-6 ℃)的恒温箱内恒温24 h。

表1 路基土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indices of the subgrade soil

含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
16.0	1.769	20.6	1.800	13.7	27.17	14.15	13.02

表2 路基土的粒径分布

Table 2 Grain size distribution of the subgrade soil

粒径	<0.075 mm	≥0.075~0.25 mm	≥0.25~0.5 mm	≥0.5 mm
质量百分比/%	18.26	59.45	16.75	5.54

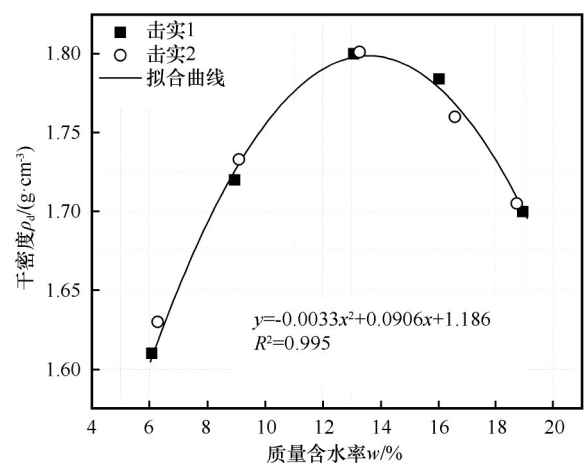


图1 路基土的击实试验结果
Fig. 1 Proctor compaction test results of the subgrade soil

1.2 试验方法

冻结重塑路基土的应力松弛试验均使用MTS-

810低温三轴仪完成,该设备被广泛应用于冻土力学特性研究,其性能参数在相关研究中已被详细介绍^[21-22,30],不再赘述。试验机轴力加载系统及围压系统均可由编制的加载程序独立控制。

为研究冻结路基土复杂应力状态下的冻土强度衰减特性,在0.5~16 MPa围压,-6 ℃下进行了一系列应力松弛试验,试验方案见表3。试验前,使用循环冷浴系统将围压室内的温度恒温至-6 ℃,并利用空调系统控制整个试验过程的环境温度恒定为18 ℃,以保证试验温度稳定。随后将制备完成的试样快速放入试验机内后,排净空气使液压油充满压力室。装样完成后,恒温2 h使液压油与试样的温度均达到稳定后开始加载程序。加载程序示意图见图2。对试样施加预定围压后开始轴向加载,以4×10⁻⁵ s⁻¹的应变率加载至轴向应变达到

表3 应力松弛试验方案

Table 3 Programs of stress relaxation test

试样编号	围压/MPa	温度/℃	预应变量/%	预应变速率/s ⁻¹
CR-1	0.5	-6	15	4×10 ⁻⁵
CR-2	1.5			
CR-3	2			
CR-4	3			
CR-5	4			
CR-6	8			
CR-7	12			
CR-8	16			

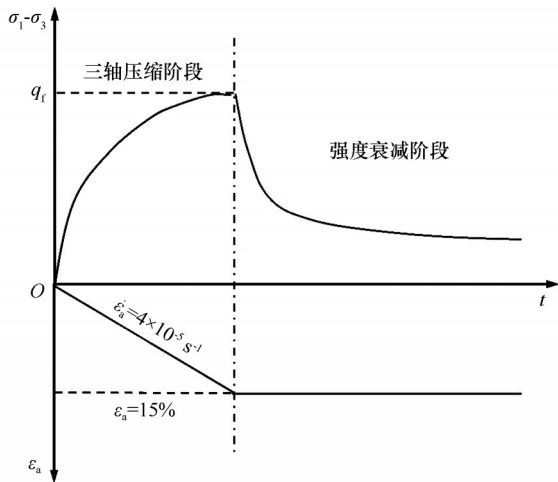


图2 加载过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading procedure

15%后保持轴向位移恒定,进入强度衰减阶段。试验全程自动采集轴向力、轴向位移、围压和围压位移数据。

2 结果与分析

2.1 围压对冻土松弛特性的影响

图3(a)为-6℃、0.5~16 MPa围压下冻结路基土的偏应力-松弛历时曲线。试验结果表明,冻结路基土在各围压下的松弛过程均表现为典型的松弛曲线,松弛过程可分为强烈松弛阶段和缓慢松弛阶段。强烈松弛阶段出现在应力松弛初期,持续约1~2 h,随后过渡到缓慢松弛阶段。应力松弛过程可以认为是冻土内部分弹性变形转变为黏塑性变形,这一过程伴随着土体内部能量变化^[1,10]。这一变化过程和材料的抗松弛性能可以通过应力松弛率变化来反映。图3(b)为松弛应力率随松弛历时发展的变化曲线。由图3(b)可以明显地观察到,在松弛历史0~1 h期间,应力松弛率的量级由超过1×10² MPa·h⁻¹极快地衰减至1×10⁻¹ MPa·h⁻¹,而在后续松弛历时内,应力率的衰减量小于1×10⁻¹ MPa·h⁻¹。在进入缓慢松弛阶段后,围压为1.5~12 MPa时,围压对应力松弛率的影响并不明显,这与王松鹤等^[14]获得的高温冻土在0.5~3 MPa的试验结果类似。围压为0.5 MPa和16 MPa的偏应力松弛率分别在松弛历时为21 h和13 h时衰减至0,而其他围压条件下则均在9 h左右稳定于0.01~0.02 MPa·h⁻¹。可以猜想,在复杂应力状态下发生的应力松弛,可能存在一低一高两个围压阈值,当围压低于小阈值或高于大阈值时,松弛过程将较其他情况明显地更快达到稳定状态。因此在特定条件下,围压对于冻土应力松弛过程存在明显影响。

冻土作为一种具有强流变特性的岩土材料,可

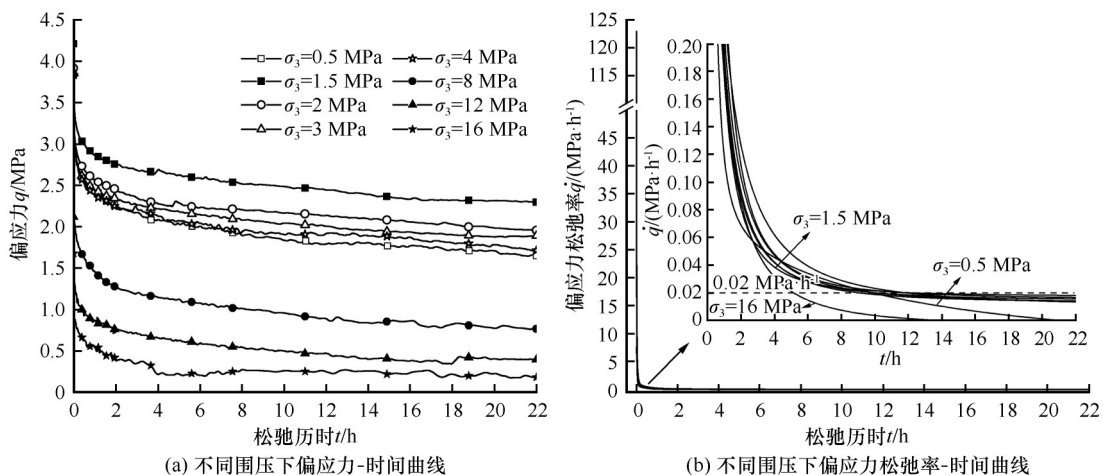


图3 松弛过程曲线

Fig. 3 Curves of relaxation procedure under various confining pressures: deviator stress-time (a) and deviator stress relaxation rate-time (b)

通过松弛时间 T_r 和松弛度 S 来评价其松弛特性。松弛时间 T_r 体现了材料的流变特性,为材料的固有参数。 T_r 越小,材料越接近液体状态; T_r 越大,材料越接近固体状态。松弛度则表征了应力松弛的强烈程度。这两个关键参数可通过图4来进行定义和求取。松弛时间 T_r 可由式(1)计算求取。

$$T_r = -\frac{\sigma_0 - \sigma_\infty}{\dot{\sigma}(t)_{t=0}} \quad (1)$$

式中: σ_0 为松弛过程的初始应力; σ_∞ 为稳定应力; $\dot{\sigma}(t)_{t=0}$ 为松弛曲线上 $t=0$ 处的切线斜率。松弛度由式(2)求取。

$$S = \frac{\sigma_0 - \sigma_r}{\sigma_r} \quad (2)$$

式中: σ_r 为破坏强度。本试验预加载阶段所有曲线均为硬化型曲线,定义应变为 15% 处的应力为试样的破坏强度。因此,本试验中初始应力等于破坏强度。

需要指出的是, σ_∞ 为理论上时间无限长所得到的稳定应力,松弛曲线稳定极限的判断与松弛历时 t

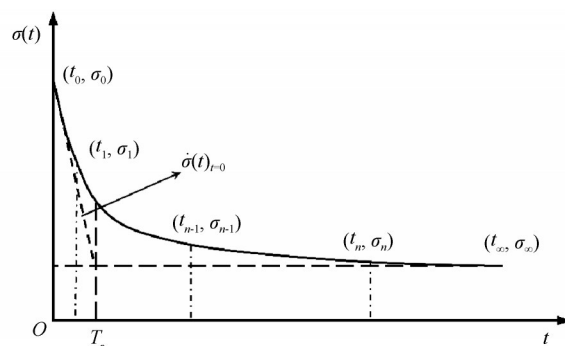


图4 松弛特性参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relaxation characteristic parameters

的尺度相关,在实际试验中极难获取。当进入相对稳定的缓慢松弛阶段时,松弛曲线可近似看作等斜率直线,取该段数据进行因素影响分析同样可以得到可靠的结果。因此在分析试验数据后,基于图3(b)定义当应力松弛率小于 $0.02 \text{ MPa} \cdot \text{h}^{-1}$ 时松弛曲线上对应时刻的应力作为 σ_∞ ,并据此计算各围压下冻结路基土的松弛时间和松弛度,结果如图5所示。

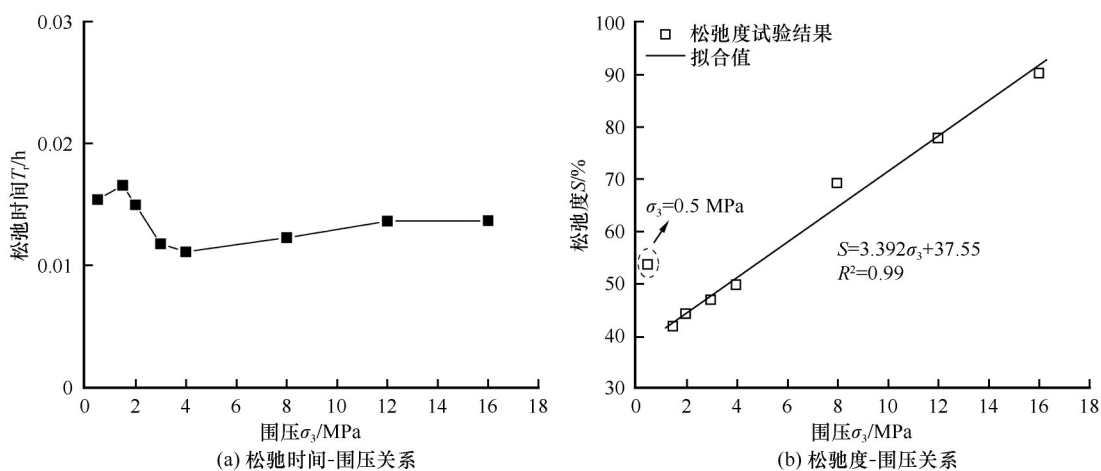


图5 松弛特性参数与围压的关系

Fig. 5 Relationships between relaxation characteristic parameters and confining pressure: relaxation duration-confining pressure (a) and relaxation ratio-confining pressure (b)

图5(a)表明,松弛时间对围压的变化并不敏感。而由图5(b)可以发现,除 0.5 MPa 围压外,其余试样的松弛度均随围压增大而线性增大, 16 MPa 围压下的松弛度达到了 90.32% ,而 1.5 MPa 下仅为 41.94% 。 0.5 MPa 围压下松弛度明显大于 1.5 MPa 的结果。初始松弛点的强度结果表明,围压为 1.5 MPa 的强度明显高于 0.5 MPa ,这表明在这一较小围压范围内 ($\sigma_3 < 1.5 \text{ MPa}$),围压的增大会压密土体而提高其抗松弛能力。在等预应变率、预应变

量和等温条件下,冻土的抗松弛能力受围压影响明显,围压超过某一阈值时,围压的升高将大幅提高冻土应力松弛的强烈程度;而当围压较小时,围压的增大会提升冻土的抗松弛能力。

2.2 围压对冻土长期强度的影响

冻土应力松弛的试验结果可作为确定其长期强度的依据。研究人员基于大量试验结果提出了许多很好的经验模型用以描述冻土的应力松弛过程^[7,10-13]并可据此确定冻土的长期强度。因此,本文

仅选取其中能较好描述试验结果且简洁的长期强度方程进行分析。吴紫汪等^[11]根据青藏公路风火山地区红色亚黏土的大量应力松弛试验结果发现,冻土破坏时间与应力的关系可用下式描述。

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_k}{\left(\frac{t}{t_k}\right)^k} \quad (3)$$

式中: σ_k 为松弛初期对应于短时间 t_k 的冻土强度; k 为试验系数。由于松弛历时 $t=0$ 为该松弛模型的奇点,因此取松弛历时 $t=0.01\text{ h}$ 为 t_k ,对应的偏应力为 σ_k 。使用该模型拟合的结果如图6所示,对应的模型参数见表4,该模型能较好地描述冻结路基土在不同围压下的应力松弛过程。将表中的参数 k 与围压变化绘制于图7,发现在 $1.5\sim 16\text{ MPa}$ 范围内,参数 k 随围压升高而线性增大,即应力与时间对数为线性关系且该直线斜率随围压升高而线性增大。而围压 0.5 MPa 时的参数 k 则明显大于 1.5 MPa 的结果。这在已有研究的基础上更新了对于冻土松弛特性影响因素的认识,即围压对冻土的松弛过程存在显著影响。参数 k 越大表明冻土抗松弛性能越差。基于冻土的两类关键强度机制(摩擦和冰的胶结作用)可以认为围压较小时($\sigma_3<1.5\text{ MPa}$),围压

的增大会压密土体而增强摩擦作用。但随着围压继续增大($\sigma_3>1.5\text{ MPa}$),土体已被充分压密,而高围压使得土体内应力集中区的冰晶或冰包裹体出现破裂或融化,使得强度开始降低并表现出更强的流变特性^[1,11]。为了准确考察复杂应力下冻土的强度衰减特性,基于数据仅对围压超过 1.5 MPa 的试验结果进行分析。

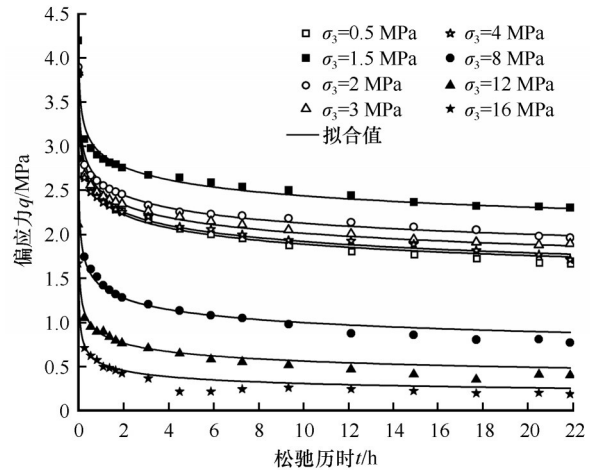


图6 不同围压下应力松弛方程验证

Fig. 6 Validation of stress relaxation equation under various confining pressures

表4 应力松弛方程拟合参数

Table 4 Fitting parameters of stress relaxation equation

试样编号	围压/MPa	σ_k /MPa	k	试样编号	围压/MPa	σ_k /MPa	k
CR-1	0.5	3.239	0.102	CR-5	4	3.174	0.100
CR-2	1.5	3.652	0.079	CR-6	8	2.193	0.153
CR-3	2	3.350	0.088	CR-7	12	1.507	0.192
CR-4	3	3.205	0.094	CR-8	16	1.126	0.246

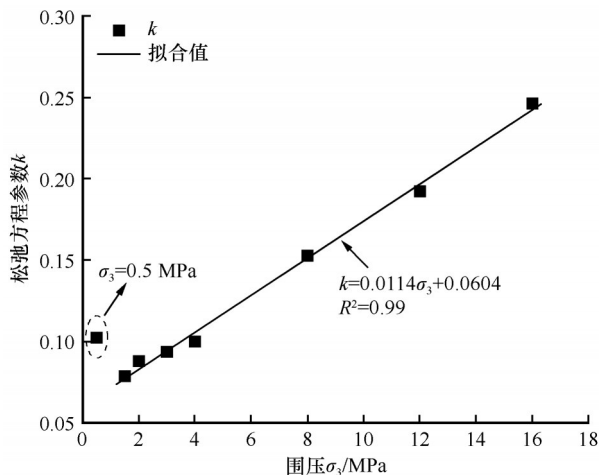


图7 松弛模型参数 k 与围压的关系

Fig. 7 Relationship between parameter k in relaxation model and confining pressure

以上结果表明,在使用应力松弛试验确定冻土的长期强度时,围压的影响不可忽略,可将式(3)改写为

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_k}{\left(\frac{t}{t_k}\right)^{k(\sigma_3)}} = \frac{\sigma_k}{\left(\frac{t}{t_k}\right)^{c_1\sigma_3 + c_2}} \quad (4)$$

式中: c_1 和 c_2 为拟合参数,本文中取 0.0114 和 0.0604 。通过式(4)可求得任何时刻的强度,即为高围压下考虑围压影响的冻土长期强度方程。

2.3 复杂应力状态下冻土的强度衰减特征

大量研究表明,土的强度主要取决于两种机制——黏聚力和摩擦抗力。冻土中冰的胶结作用以及冰晶的存在加强了这两种作用,从而使得土体冻结状态下的强度远高于融化状态^[1,31]。因此,流变

过程中这两种作用的演化规律可在一定程度上反映冻土强度衰减过程的内在变化,并为分析复杂应力状态下的冻土强度衰减特征提供参考。这两种作用在 Mohr-Coulomb 理论中对应两个强度参数,即黏聚力(c)和内摩擦角(φ)。基于本文的试验结果,可通过松弛过程中不同围压下试样任一时刻的

应力状态绘制摩尔圆及其包络线,以此求得任一时刻冻土的黏聚力和内摩擦角。通常选取较小围压下的线性段来获取冻土的等效黏聚力(c')和等效内摩擦角(φ')^[32-33]。如图4所示,从松弛初始点 t_0 开始,本文提取了12个时刻下试样的应力状态,并绘制摩尔圆及其包络线(图8)。

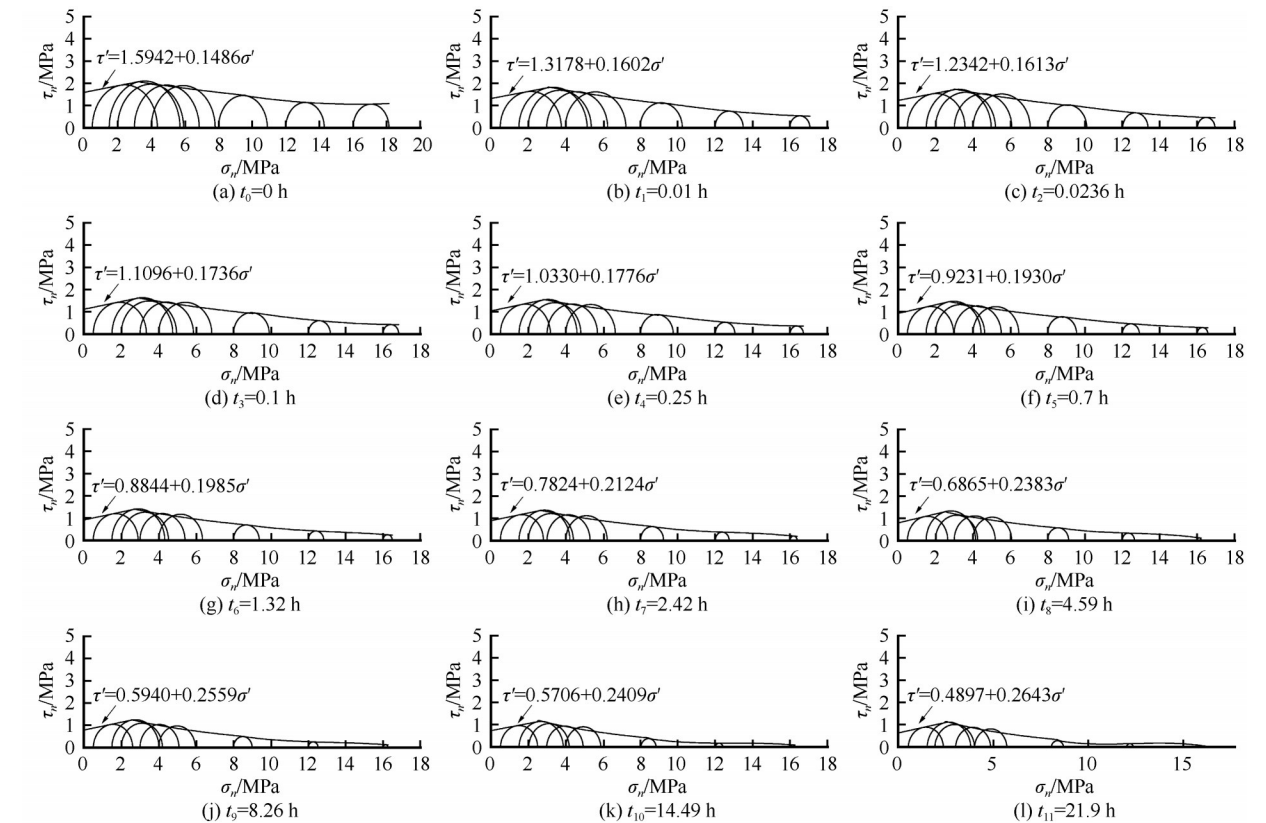


图8 不同松弛历时下的莫尔应力包络线

Fig. 8 The Mohr strength envelopes at various relaxation durations

12个松弛历时时刻对应的等效黏聚力和等效内摩擦角列于表5。随着时间的发展, c' 逐渐减小, φ' 则逐渐增大,即冻土的黏聚力作用减弱,而摩擦作用增强。冻土的黏聚力与内摩擦角这两个关键强度参数均与时间直接相关,具有率相关特性。在

评价冻土强度特性及相关参数时,时间的影响不可忽略,该影响在常规三轴试验中常体现为加载速率(应力率或应变率)。冻土的黏聚力主要取决于冻土中冰的胶结作用,该胶结作用既大幅提高了冻土瞬时强度,也使得冻土成为强流变材料,流变过程会弱化该联结作用,从而表现为冻土的黏聚力随时间发展而降低,这是冻土强度衰减的重要组成部分。另一方面,获取冻土等效黏聚力和内摩擦角在本文中取自围压为0.5 MPa和1.5 MPa的试验结果,在此围压范围内,围压的增大会压密土体,提高冻土强度,围压增大所产生的摩擦强化作用为主导。强度衰减过程中,0.5 MPa围压下的衰减程度和速度均大于1.5 MPa围压的情况,这由图3(b)中应力松弛率的结果可以印证。这使得包络线在下降过程中会发生逆时针转动,表现为内摩擦角逐渐增大。

表5 不同松弛历时下的等效黏聚力(c')与内摩擦角(φ')
Table 5 Equivalent cohesion (c') and internal friction angle (φ') at various relaxation durations

t/h	c'/MPa	$\varphi'/(^\circ)$	t/h	c'/MPa	$\varphi'/(^\circ)$
0	1.594	8.451	1.32	0.884	11.230
0.01	1.318	9.101	2.42	0.782	11.990
0.0236	1.234	9.164	4.59	0.687	13.403
0.10	1.110	9.850	8.26	0.594	14.353
0.25	1.033	10.069	14.49	0.571	13.545
0.70	0.923	10.922	21.90	0.490	14.806

为定量分析等效黏聚力和等效内摩擦角随松驰历时的变化规律,将各松驰历时下的 c' 和 φ' 绘制于半对数图内,如图9所示。在半对数坐标系中,等效黏聚力和等效内摩擦角随时间发展呈线性变化,可分别表示为

$$c'(t) = -0.246 \lg t + 0.857 \quad (5)$$

$$\varphi'(t) = 1.765 \lg t + 11.800 \quad (6)$$

式中: \lg 为对数函数,以10为底。本文所求得的等效黏聚力的量值及其随松驰历时的变化规律与维亚洛夫^[7]通过球形压板法所测得的多类土质的长期黏聚力强度试验结果极为接近。可以猜想,冻土三轴应力松驰试验所确定的等效 c' 与长期黏聚力强度之间可能存在某种相互关系,但此关系需通过大量的相关试验结果来建立。冻土的长期黏聚力与内摩擦角是多种冻土地基承载力计算方法中的重要参数^[1,7],若此关系存在,则可更加准确、便捷地对冻土地基承载力进行评价。

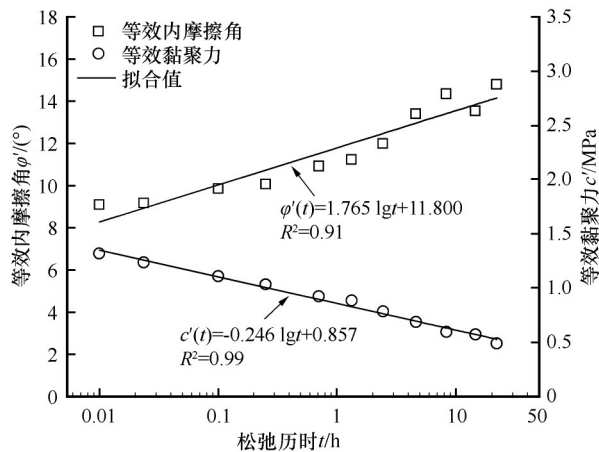


图9 等效黏聚力与内摩擦角随时间的变化

Fig. 9 Variations of equivalent cohesion and internal friction angle with time

以上对冻土两种强度机制在松驰过程中的衰减规律的研究加深了对冻土强度衰减特性的认知,接下来在此基础上对冻土强度面随时间发展的演化过程进行深入的分析和讨论。本试验中,预应变量为15%,松驰初始点即为该试样的破坏强度点。将各围压下的强度点绘制于 p - q 空间内可得到冻结兰州路基土的强度包络面(图10)。马巍等^[34]基于蠕变试验将冻土的抛物线屈服准则推广为长期强度准则,且当强度包络线的位置随时间和温度变化时,包络线保持几何一致。该抛物线型长期强度准则可很好地描述前两个围压阶段冻土强度面随时间发展的演化规律。但由图10可知,本试验中人工

冻结路基土的初始强度面随围压升高存在明显的三阶段特征,即快速增大,快速降低和缓慢降低。经过多年来大量学者的研究,这一现象可归结于围压对冻土的两种影响机制在不同工况下耦合的结果:①围压较小时,围压压密土体,并增大了土体内固体颗粒的接触正应力,使得固体颗粒间的摩擦、咬合作用增强,从而增大了冻土的强度;②高围压时,冻土内的部分冰晶逐渐破碎、融化,对于粗颗粒土,甚至出现土颗粒破碎,土体结构受到损伤,降低了冻土的强度^[19,21,24]。高低围压的界定相对于不同类型的冻土是不同的。围压对冻土强度的影响本质上是压力改变冻土内在结构性联结作用的具象表现。冻土的流变特性受制于其内冰的结构联结作用,因而冻土的结构性差异也可能导致其流变特性存在差异。本文试验结果已证实,在相等的大预应变、预应变率和温度下,高围压下围压的升高(本文中为 $\sigma_3 > 1.5$ MPa)会直接减弱冻土的抗松驰能力,围压越大,松驰度越高,16 MPa下残余强度小于初始强度的10%。因此,研究高围压下冻土强度衰减特征需要使用能够完整描述冻土强度包络面三阶段特性的强度准则。Shen等^[35]基于大量试验结果,建立了考虑应力路径影响的冻土非线性强度准则,该准则可完整描述冻土强度随围压升高的三阶段发展特征,其数学形式为

$$q = \frac{q_m^3}{a_1 b (p - p_m + a_2)^2 + q_m^2} + \frac{q_{cr}(p - p_m)}{p + p_{cr}} \quad (7)$$

$$b = \tan \varphi' \quad (8)$$

式中: φ' 为等效内摩擦角; q_m 和 p_m 分别为试验强度面峰值强度及对应的平均应力; a_1 和 a_2 为试验参数;

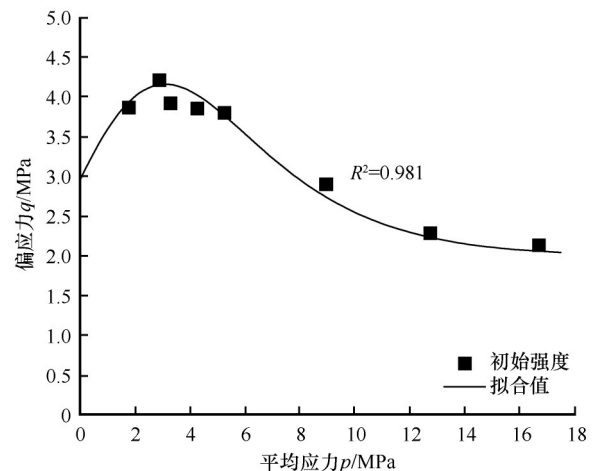


图10 初始强度面

Fig. 10 Initial strength surface

q_{cr} 和 p_{cr} 为假定的第三阶段稳定强度和对应的平均应力,且当平均应力 p 趋于无穷大时,该强度准则变为 $q=q_{cr}$,即 von Mises 强度准则。使用该强度准则拟合初始强度面的结果如图 10 所示,该准则可较好地描述冻结路基土强度随围压增大的变化特征。本文以此强度准则来研究人工冻结路基土在复杂应力状态下的强度衰减特征,并基于此将该强度准则推广为长期强度准则。

基于试验结果获取的松弛历时 $t_0 \sim t_{11}$ 共计 12 个时刻不同围压下各松弛曲线所对应的应力状态,整理得到各时刻下的试验强度点,汇总于图 11。可以发现,初始时刻与松弛历时 $t_1=0.01$ h 强度面的距离随着围压的增大而明显变大。各围压下 t_1 与 t_{11} 时刻强度差值随着围压增大逐渐减小。具象化来说,强度面随时间的发展除高度下降外,还发生了一定程度的顺时针转动,且强度面第三阶段先变陡后变缓。强度面第三阶段的变化反映了冻结路基土高围压下的强度衰减程度更高,且松弛初期更加剧烈。这表明冻土强度包络面的第三阶段在随时间的发展过程中无法保证几何一致性。高围压下冻结路基土的强度包络面随时间发展在 p - q 空间内的变化过程是复杂的空间和形状的变化。处理这类问题最直接有效的方法是对任意时刻强度包络面的数学描述进行参数分析。使用式(7)作为所有松弛历时下强度面的数学模型,对其中的参数 a_1 、 a_2 、 q_{cr} 和 p_{cr} 进行敏感性判断发现, a_2 和 p_{cr} 可为常数。由

式(7)的结构和参数定义可知, a_2 的作用为调节试验强度面与理论强度面峰值位置的对应关系; p_{cr} 代表试样进入稳定第三阶段的假定平均应力值,理论上是冻土内部结构对围压的临界响应值,为材料的固有特性,不会随松弛过程发生改变,本试验中 p_{cr} 的值与多应力路径下(温度 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}_a=7.62\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$)的结果^[35]相同也印证了这一点。因此,需要进行拟合的参数仅有 a_1 和 q_{cr} 。对 12 个松弛历时时刻的强度面进行最佳拟合,拟合曲线结果如图 11 所示,拟合参数见表 6。为使图像清晰,仅展示了部分拟合曲线,该模型可较合理地描述冻结路基土在任一时刻的试验强度面。

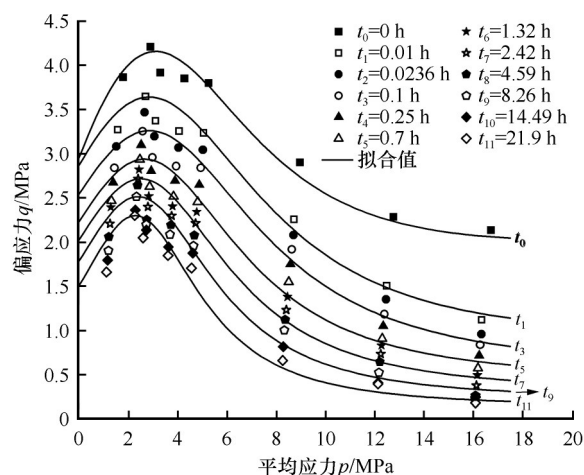


图 11 不同松弛历时下 p - q 平面内的强度包络面
Fig. 11 Strength envelope surfaces in p - q stress space at various relaxation durations

表 6 不同松弛历时下的强度面拟合参数

Table 6 Fitting parameters of strength surface at various relaxation durations

编号	t/h	q_m/MPa	p_m/MPa	b	a_1	a_2/MPa	q_{cr}/MPa	p_{cr}/MPa
t_0	0	4.214	2.904	0.149	3.300		3.00	
t_1	0.01	3.652	2.708	0.160	2.210		1.20	
t_2	0.0236	3.470	2.666	0.161	2.097		0.90	
t_3	0.10	3.257	2.587	0.174	1.861		0.75	
t_4	0.25	3.100	2.534	0.178	1.781		0.66	
t_5	0.70	2.938	2.479	0.193	1.767		0.60	
t_6	1.32	2.824	2.440	0.199	1.721	0	0.50	11
t_7	2.42	2.719	2.407	0.212	1.722		0.41	
t_8	4.59	2.644	2.382	0.238	1.689		0.27	
t_9	8.26	2.517	2.336	0.256	1.648		0.30	
t_{10}	14.49	2.366	2.289	0.241	1.646		0.21	
t_{11}	21.90	2.302	2.269	0.264	1.526		0.19	

该强度准则中参数 b 和 q_m 通过计算直接获取。任一松弛历时 t 下参数 b 可根据本文研究成果计算,

即式(6)和式(8); q_m 为峰值强度,服从长期强度方程,在本文中可按下式计算。

$$q_m(t) = \frac{3.652}{\left(\frac{t}{0.01}\right)^{0.079}} \quad (9)$$

将 q_{cr} 与松弛历时的关系绘制于图 12(a)。分析后发现, q_{cr} 同样遵从长期强度方程。

$$q_{cr}(t) = \frac{1.2}{\left(\frac{t}{0.01}\right)^{0.205}} \quad (10)$$

参数 q_{cr} 随松弛历时发展的规律表明 q_{cr} 可能为某一围压下试样的强度值。而 q_{cr} 与 q_m 随时间发展的变化代表了冻土强度在两种围压状态下的衰减过程, 结合前述对等效黏聚力的分析, 实际上这其中包含了冻土黏聚力的降低。

对于常规三轴压缩试验, 加载全过程围压 σ_3 为常数, 且具有轴对称条件, 平均应力 p 与偏应力 q 定

义为 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 。则可得

$$p_m(t) = \frac{q_m(t)}{3} + \sigma_3 \quad (11)$$

结合式(9)、式(11), 则可计算任意时刻下 p_m 的值。参数 a_1 与松弛历时在半对数坐标中的关系如图 12(b) 所示, 参数 a_1 与松弛历时呈对数关系。

$$a_1(t) = -0.172 \lg t + 1.766 \quad (12)$$

式中: \lg 为对数函数, 底为 10。

根据以上分析, 该强度准则在 p - q 空间内可改写为

$$q(t) = \frac{q_m(t)^3}{a_1(t)b(t)[p - p_m(t)]^2 + q_m(t)^2} + \frac{q_{cr}(t)[p - p_m(t)]}{p + 11} \quad (13)$$

由式(6)、(8)~(13)就可以确定任意时刻下冻土的强度包络面, 即通过应力松弛试验确定了考虑高围压影响的冻土长期强度准则。

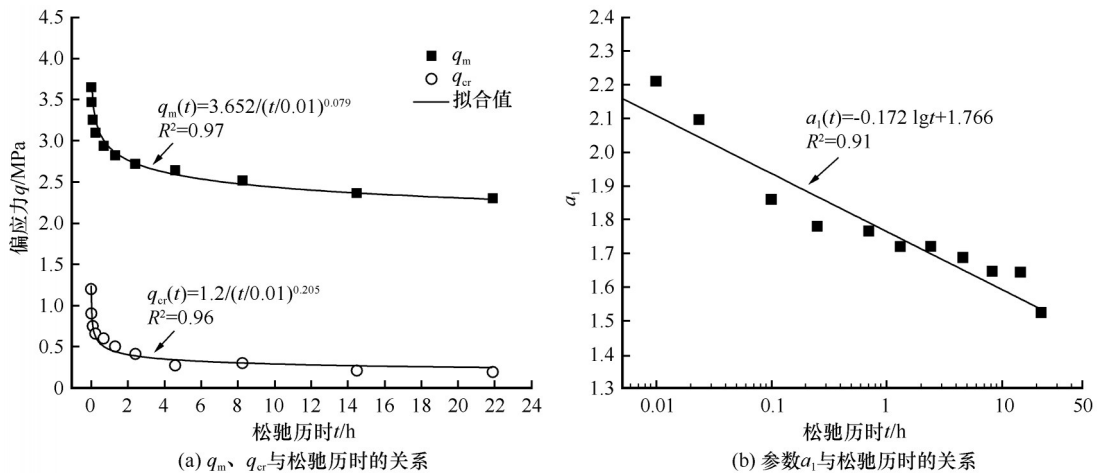


图 12 强度包络面关键参数与松弛历时的关系

Fig. 12 Relationships between key fitting parameters of strength envelope surface and relaxation duration:

q_m , q_{cr} -relaxation duration (a) and parameter a_1 -relaxation duration (b)

3 结论

本文通过强度点处的应力松弛试验研究了复杂应力状态下冻结路基土的应力松弛特性及其强度衰减特性, 得到以下结论:

(1) 冻土的应力松弛过程受围压影响明显, 围压超过 1.5 MPa 时, 随围压增大, 松弛度线性增大。围压为 16 MPa 下的松弛度超过了 90.32%, 而 1.5 MPa 下仅为 41.94%。

(2) 围压会影响冻土强度衰减速率, 从而影响冻土的长期强度。冻土强度在半对数坐标中随时间发展而线性降低, 当围压大于 1.5 MPa 时, 直线斜率随围压升高而线性增大, 即冻土强度衰减速率随围压增大而升高。

(3) 冻土的强度衰减过程中, 黏聚力逐渐下降, 内摩擦角逐渐增大, 且均与松弛历时的对数呈线性关系。通过三轴应力松弛试验获得的等效黏聚力衰减规律及量值与球形压板法的直接测量结果接近, 这为获得冻土的长期强度及其黏聚力参数的提供了新的研究思路和试验方法。

(4) 随着时间增长, 具有三阶段特征的冻土强度包络面无法保证严格的几何一致性。强度包络面随时间的发展除水平下降外, 还发生了一定程度的顺时针转动, 且强度面第三阶段先变陡后变缓。基于对冻土试验强度包络面特征的分析以及强度参数在强度衰减过程中的演化规律, 本文建立了考虑应力松弛效应的冻土率相关强度理论。

参考文献(References):

- [1] Ma Wei, Wang Dayan. Mechanics of frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 2014. [马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [2] Cheng Guodong, Yang Chengsong. Mechanics related with frozen ground in construction of Qinghai-Tibet Railway [J]. Mechanics in Engineering, 2006, 28(3): 1-8. [程国栋, 杨成松. 青藏铁路建设中的冻土力学问题[J]. 力学与实践, 2006, 28(3): 1-8.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Karpenko F S, Kalbergenov R G, Kutergin V N, et al. Determination of rheological properties of frozen soils by relaxation method [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 57(5): 364-369.
- [5] Wu Yaping, Liu Yazun, Xie Changqun, et al. Experiment on concrete single pile-frozen soil rheological effect under cyclic loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(4): 19-26. [吴亚平, 刘亚尊, 谢长群, 等. 循环荷载下混凝土单桩-冻土流变效应试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(4): 19-26.]
- [6] Vyalov S S, Mirenburg Yu S. Improved methods of testing piles in frozen soils [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1990, 27(4): 155-161.
- [7] Vyalov S S. Rheology of frozen soil [M]. Liu Jiankun, Liu Yaojun, Xu Yan, trans. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. [维亚洛夫 C C. 冻土流变学[M]. 刘建坤, 刘尧军, 徐艳, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2005.]
- [8] Vyalov S S. Rheological fundamentals of soil mechanics [M]. Du Yupei, trans. Beijing: Science Press, 1987. [维亚洛夫 C C. 土力学的流变原理[M]. 杜余培, 译. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [9] Ladanyi B, Benyamina M B. Triaxial relaxation testing of a frozen sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(3): 496-511.
- [10] Wu Ziwang, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Uniaxial stress relaxation of frozen loess [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, 15(1): 125-128. [吴紫汪, 马巍, 常小晓, 等. 冻结黄土的应力松弛[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 125-128.]
- [11] Wu Ziwang, Ma Wei. Strength and creep of frozen soil [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1994. [吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.]
- [12] Cong Shengyi, Nie Zhong, Hu Qingli. A disturbed state concept-based stress-relaxation model for expansive soil exposed to freeze-thaw cycling [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(9): 2621-2630.
- [13] Wang Songhe, Qi Jilin. Experimental study of relaxation characteristics of warm permafrost [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1660-1666. [王松鹤, 齐吉林. 高温冻土松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1660-1666.]
- [14] Wang Songhe, Qi Jilin. Stress relaxation of warm frozen soil under drained and undrained conditions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 833-838. [王松鹤, 齐吉林. 排水和不排水条件下高温冻土松弛特性研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 833-838.]
- [15] Wang Songhe, Qi Jilin, Yao Xiaoliang. Stress relaxation characteristics of warm frozen clay under triaxial conditions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 69(1): 112-117.
- [16] Lacerda W A. Stress relaxation in soils [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12(3): A33.
- [17] Akai K, Adachi T, Ando N. Existence of a unique stress-strain-time relation of clays [J]. Soils and Foundations, 1975, 15(1): 1-16.
- [18] Oda Y, Mitachi T. Stress relaxation characteristics of saturated clays [J]. Soils and Foundations, 1988, 28(4): 69-80.
- [19] Ma Wei, Wu Ziwang, 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.
- [20] Ma Wei, Wu Ziwang, Sheng Yu. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 7-11. [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.]
- [21] Xu Xiangtian, Lai Yuanming, Dong Yuanhong, et al. Laboratory investigation on strength and deformation characteristics of ice-saturated frozen sandy soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 69(1): 98-104.
- [22] Zhang Shujuan, Du Haimin, Harbor J. The effect of confining pressure and water content on compressive strength and deformation of ice-rich silty sand [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2017, 28(1): 298-305.
- [23] Qi Jilin, Ma Wei. A new criterion for strength of frozen sand under quick triaxial compression considering effect of confining pressure [J]. Acta Geotechnica, 2007, 2(3): 221-226.
- [24] Zhou Zhiwei, Ma Wei, Zhang Shujuan, et al. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 9-18.
- [25] Chen Xiangsheng. Ground freezing method [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. [陈湘生. 地层冻结法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.]
- [26] Cheng Zhibin, Zhang Bujun. Discussion on key technology of freezing construction in deep mine soft rock stratum [J]. Coal Engineering, 2018, 50(6): 51-53. [程志彬, 张步俊. 深立井软岩地层冻结施工关键技术探讨[J]. 煤炭工程, 2018, 50(6): 51-53.]
- [27] Shu En, Song Haiqing, Cai Haibing, et al. Analysis on heterogeneity of freezing pressure in deep mine shafts of coal mine [J]. Mine Construction Technology, 2021, 42(4): 45-51. [舒恩, 宋海清, 蔡海兵, 等. 煤矿深立井井壁冻结压力非均匀性分析[J]. 建井技术, 2021, 42(4): 45-51.]
- [28] Wang Jianping, Liu Weimin, Wang Heng. Comparisons on ground freezing constructions in 1 000 m depth mine shafts [J]. Mine Construction Technology, 2017, 38(4): 34-37. [王建平, 刘伟民, 王恒. 近千米深井冻结施工比较[J]. 建井技术, 2017, 38(4): 34-37.]
- [29] Ma Wei, Wang Dayan. Status quo and reflections of the deep frozen soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1123-1130. [马巍, 王大雁. 深土冻土力学的研究现状与思考[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1123-1130.]
- [30] Zhou Zhiwei, Ma Wei, Zhang Shujuan, et al. Experimental investigation of the path-dependent strength and deformation behaviours of frozen loess [J]. Engineering Geology, 2020, 265: 105449.
- [31] Li Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. [李广信. 高等土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.]
- [32] 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. [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.]
- [33] Yang Yugui, Lai Yuanming, Chang Xiaoxiao. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(1): 39-45.
- [34] Ma Wei, Wu Ziwang, Sheng Yu. Creep and creep strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(2): 113-118. [马巍, 吴紫汪, 盛煜. 冻土的蠕变及蠕变强度[J]. 冰川冻土, 1994, 16(2): 113-118.]
- [35] Shen Mingde, Zhou Zhiwei, Zhang Shujuan. Effect of stress path on mechanical behaviours of frozen subgrade soil[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022, 23(5): 1061-1090.

Long-term strength attenuation characteristics and yield criterion of frozen soil

SHEN Mingde^{1,2}, ZHOU Zhiwei^{1,2}, MA Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Frozen soil is generally regarded as a strongly rheological geomaterial. The strength attenuation of frozen soil is an important inducement for disease and instability in subgrade engineering, pile engineering and artificial freezing construction. Few efforts have been made to investigate the attenuation characteristics of strength envelope surface for frozen soil under complex stress states experimentally and theoretically. Considering this, at a temperature of $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, a series of triaxial stress relaxation tests under various confining pressures were carried out on the frozen subgrade soil specimens at strength points. The degeneration of strength parameters and stress attenuation process of frozen soil under complex stress states were systematically studied. The degradation law and mechanism of cohesion and internal friction angle are synchronously revealed in the stress relaxation process. Testing results indicate that the stress relaxation process of compacted frozen soil is significantly influenced by confining pressure. The stress relaxation ratio is increasing linearly with the rise of confining pressure if the confining pressure is beyond 1.5 MPa. The anti-relaxation ability of frozen soil is greatly reduced during high confining pressure conditions: the stress relaxation ratio of frozen soil is only 41.94% under 1.5 MPa, but exceeds 90.30% under 16 MPa. The strength of frozen soil attenuates linearly with time in the semi-logarithmic coordinate system. When the confining pressure is higher than 1.5 MPa, the strength attenuation rate of frozen soil increases with the rise of confining pressure. As the development of stress relaxation of frozen soil, cohesion decreases linearly but internal friction angle increases linearly with time in the semi-logarithmic coordinate system. It manifested that the cementation in frozen soil shows evident rheological features and it is a key inducement for strength attenuation. Moreover, the attenuation law and value of cohesion in frozen soil which is measured by triaxial stress relaxation test are similar to the spherical template indenter test results. This may provide a new test method for obtaining the long-term strength and cohesion of frozen soil. On the basis of test results, the stress states of frozen soil in all stress relaxation curves at 12 relaxation durations were captured, and the rate-dependent variation characteristics of strength envelope in p - q stress space were analyzed in detail. Under high confining pressures, the strength envelope of frozen soil shows different geometric features as time goes on. In addition to the decline of level, the strength surface exhibits clockwise rotation with time, and the third stage sharply decreases at first and then becomes flat. Based on the analysis of characteristics of experimental strength surface and evolution law of strength parameters during the stress relaxation process, a rate-dependent strength theory for frozen soil considering the stress relaxation effect is established in this paper.

Key words: frozen soil; rheology; strength attenuation; strength criterion

(责任编辑: 齐吉琳)