第 56 卷 第 5 期 2023 年(总 231 期) 西北地质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 56 No. 5 2023(Sum231)

DOI: 10.12401/j.nwg.2023006

不同含水率与围压下伊犁高温冻土 三轴力学试验特性研究

朱赛楠1,赵慧1,*,魏云杰1,郑剑锋2,王文沛1,张楠1

(1. 中国地质环境监测院,北京 100081; 2. 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)

摘 要:为了探究含水率与围压变化对高温冻土物理力学性质的影响,以新疆伊犁河谷高温冻结黄土为研究对象,开展了黄土的矿物成分、物理性质,以及不同含水率和围压条件下冻土的三轴压缩试验。结果表明:伊犁黄土的粉粒与黏粒粒组含量占比较高,对冻融作用的反应敏感。低含水率时表现为应变软化现象,破坏形态以脆性剪切破坏为主,饱和含水率时表现为应变硬化现象,破坏形态以塑性鼓胀变形破坏为主,软化系数随含水率增大而逐渐减小。随着含水率增大,峰残内摩擦角逐渐降低,峰残黏聚力逐渐增大,变形模量逐渐增大。随着围压增大,弹性模量和损伤演化特征参数均逐渐降低,引入的损伤力学本构模型能够较好地描述高温冻土在不同含水率和围压影响下的应力应变全过程。研究成果可为伊犁河谷冻融滑坡成灾机理研究提供力学参数与理论依据支撑。

关键词:伊犁黄土;高温冻土;三轴试验;峰值强度;残余强度;损伤力学模型 中图分类号:P642.3 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2023)05-0140-11

Experimental Study on Triaxial Mechanical Properties of High–Temperature Frozen Loess under Different Moisture Content and Confining Pressure in Yili, Xinjiang

ZHU Sainan¹, ZHAO Hui^{1,*}, WEI Yunjie¹, ZHENG Jianfeng², WANG Wenpei¹, ZHANG Nan¹

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In order to explore the influence of moisture content and confining pressure on the physical and mechanical properties of high-temperature frozen loess, taking the loess as the research object in Yili valley, Xinjiang. The mineral composition and physical properties of loess, as well as the triaxial compression tests under different moisture content and confining pressure were carried out. The results show that the content of silt and clay is high in Yili loess, which is sensitive to freezing-thawing. At low water content, the failure mode is strain softening and brittle shear failure, while at saturated water content, the failure mode is strain hardening and plastic bulging deformation failure. The softening coefficient decreases gradually with water content increasing.

收稿日期: 2022-05-17;修回日期: 2022-11-23; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目:国家重点研发计划课题"重大崩滑灾害隐患精准识别与风险评价研究"(2021YFC3000404),"复合链生灾害监测 与人工智能预测技术"(2022YFC3004302),中国地质调查局项目"重大高位远程地质灾害防治技术集成应用" (DD20179609、DD20190637、DD20221748)联合资助。

作者简介:朱赛楠(1984-),男,博士,高级工程师,主要从事工程地质与地质灾害等方面的研究。E-mail: 6057817@qq.com。 * **通讯作者:**赵慧(1981-),女,高级工程师,主要从事地质灾害与防治方面的工作。E-mail: 330169675@qq.com。

With the increase of water content, the peak residual friction angle gradually decreases, the peak residual cohesion gradually increases, and the deformation modulus increases. With the increase of confining pressure, the elastic modulus and characteristic parameters of damage evolution gradually decrease, and the damage mechanics constitutive model introduced can better describe the whole process of stress and strain of high-temperature frozen loess under different water content and confining pressure. The research results can provide mechanical parameters and theoretical basis for the study of mechanism of freeze-thaw landslide in Yili Valley.

Keywords: Yili loess; high-temperature frozen soil; triaxial test; peak strength; residual strength; damage mechanics model

新疆伊犁河谷地区广泛发育黄土冻融滑坡,据有 时间记载的380处黄土滑坡中,发生在冻融期内的有 161 处,占总数的 42%(徐张建, 2007;朱赛楠等, 2019)。 冻融黄土滑坡的形成一方面是由于冻融循环作用破 坏了冻土内部结构,降低了土体的力学强度;另一方 面是冻土温度变化改变了土体的渗透性,阻断了地下 水渗流排泄通道(Chamberlain, 1979; Othman et al., 1993)。与黄土高原的黄土相比,伊犁黄土的粉粒含 量较高,砂粒含量低,干密度偏低,含水率较高,存在 一定数量的大孔隙,结构较疏松(叶玮等,2005;尹光 华等,2009)。其中,多数冻融滑坡发生时处于高温冻 土的状态,高温冻土是一种由土、冰、未冻水和空气 等多相介质组成的复合多孔集合材料,温度的微小波 动都会引起冻土中未冻水含量发生较大变化,从而导 致冻土力学性质发生明显的变化,高温冻土的温度一 般为-1.5~0℃(赖远明等, 2007)。高温冻土的物理 力学性质具有强烈的不稳定性,极易在温度变化的影 响下发生实质性改变。因此,对高温冻土工程地质特 性的研究,特别是物理力学性质的研究对黄土冻融滑 坡失稳机理具有重要意义(宋友桂等, 2010; 刘世伟等, 2012;张艳玲等, 2021;王海芝等, 2022)。

高温冻土又称近相变区冻土,与常规冻土本质的 区别是未冻水的存在,高温冻土本质上是塑性冻土, 具有较大的压缩性,常规冻土以脆性为主,压缩性较 差。高温冻土中含水率的不同,表现出来的物理力学 性质也具有较大差异,也直接影响冻土的工程地质性 质。崔托维奇(1985)通过研究认为,常规冻土的体积 压缩系数随着含水率增大而增大。朱元林等(1982)、 苏凯等(2013)发现高温高含冰量冻土具有较大的压 缩性,体积压缩系数随着土体温度升高而增大,随着 含水率的增大而减小。研究人员通过大量现场试验 与室内试验,逐步加深了含水率变化影响高温冻土强 度和变形这一问题的认识。Jessberger(1981)、赖远明 等(2007,2009)分析了不同温度和围压下砂土强度随 含水率的变化规律,给出了相应的冻土强度屈服准则。 并从高温冻土内部缺陷随机分布角度,建立了高温冻 土的单轴随机损伤本构模型,进行了高温冻土强度可 靠性分析。马巍等(1994,1995,1998)通过不同温度和 围压条件下冻土蠕变试验,给出了冻土蠕变及蠕变强 度随时间降低的方程式,并提出了冻土蠕变强度的抛 物型屈服准则。证实了冻土蠕变过程中其变形不为 零的事实,而且分析了剪应力强度与冻土的变形的关系。

关于冻土本构关系的研究,早期大都是将冻土作 为连续介质来看待,通过简单的弹性理论、塑性理论 或其他线性理论建立本构模型,忽略了冻土内部多相 介质与多孔缺陷的集合特性。近年来,经过大量学者 深入研究,将损伤力学理论引入了冻土力学的研究中 从微细观角度解释冻土强度与破坏特征,较好的还原 了冻土力学的应力应变关系(马巍等,2012;尹光华等, 2009)。Gurson 等(1975)从微孔洞损伤对材料变形行 为的影响角度,建立了细观本构模型。葛修润等 (2000)、任建喜等(2001)通过单轴和三轴荷载作用下 岩石破坏全过程的 CT 扫描试验分析了岩石细观损伤 扩展规律和损伤破坏特性,定义了基于 CT 数的损伤 变量。朱赛楠等(2016)结合 CT-三轴试验研究了三 峡库区侏罗系泥岩破坏过程中的细观损伤特性,提出 将不同围压下泥岩在屈服点的应变值作为岩石损伤 的门槛应变值。曹文贵等(2011)从岩石微元强度合 理度量方法研究入手,引进统计损伤理论,建立了能 模拟应变软硬化全过程的岩石统计损伤本构模型,并 提出了参数确定方法。张慧梅等(2010)提出了冻融 损伤、受荷损伤与总损伤的概念,运用损伤力学理论 建立了冻融受荷岩石损伤模型。颜荣涛等(2018)引 人有效水合物饱和度、温压条件参数来考虑温度和孔 隙压力变化对含水合物沉积物力学特性的影响,建立 了考虑赋存模式、温度和孔隙压力影响的损伤本构

模型。

142

基于以上分析,笔者以伊犁高温冻土的物理力学 性质为切入点,通过伊犁黄土的物理性质、矿物成分 试验,以及不同含水率和围压条件下高温冻土的三轴 压缩试验,获取了应力应变曲线,深入分析了含水率 和围压变化对高温冻土峰残强度与变形特征、剪切强 度参数和剪切破坏形态等方面的影响。基于损伤力 学本构模型,表征并验证了伊犁高温冻土三轴压缩变 形的力学行为。研究成果可为伊犁河谷冻融滑坡成 灾机理研究提供力学参数与理论依据支撑。

伊犁黄土矿物成分与物理性质 1

伊犁黄土取样地点位于新疆伊宁县皮里青河 "3·24"滑坡,该滑坡发生时正值冬末春初气温回暖 之际,受季节性冻融作用影响强烈,具有多期次、渐进 式的滑动特点,并且形成了堵溃型滑坡-泥石流灾害链, 滑坡发生前三天最低气温为-2~0℃,处于高温冻土 环境下。此次试验试样为第四系晚更新世(Qp)伊犁 黄土,黄褐色,均匀无层理,垂直节理裂隙发育。采用 D8 Advance X-射线衍射仪进行试样的矿物成分分析, 得到伊犁黄土矿物衍射图谱与矿物成分含量(图1、 图 2)。可以看出,伊犁黄土主要由青金石、石英、钠 长石、斜绿泥石和白云母组成,含量分别为61.94%、 15.08%、14.79%、5.89%和2.30%。通过现场与室内试 验测定,得出试样1[#]—5[#]的颗粒粒径分布曲线(图 3), 结果表明伊犁黄土中粉粒(0.075~0.005 mm)含量占 优,达到 73.63%~81.13%;细砂(0.25~0.075 mm)含量 为 6.46%~16.64%; 黏粒(<0.005 mm)含量为 5.46%~ 12.41%。土的粒径分布情况直接影响着土体结构受 冻融作用影响的程度,颗粒粒组直径越小(一般认为 小于 0.075 mm 的颗粒),对冻融作用的反应越敏感,









Fig. 3 Grain size distribution curve of Yili loess

称为冻融敏感性粒组,伊犁黄土中粉粒和黏粒均值占 了约88.37%, 冻融敏感性较高。伊犁黄土的基本物理 性质参数见表1。

试验条件与方法 2

图 3

2.1 试验设备

冻土三轴压缩试验所用设备是 MTS-810 振动三 轴材料试验机(图4)。该仪器能进行动、静应力状态 下冻融土的恒荷载或恒变形速率的单轴、三轴抗压试 验,具有等速率载荷,等速率应变,等速率行程等控制 模式,试验过程由试验机配套的控制程序自动控制, 数据自动采集。试验机最大轴向荷载为100 kN, 精度 为±0.5%; 轴向位移范围为±75 mm, 精度为 1%; 围压加 载范围为 0~20 MPa, 频率为 0~50 Hz, 温度范围为 -30 ℃~常温, 围压加载系统的加压液体采用 10 号航 空液压油。

表1 伊犁黄土的基本物理性质统计表

		Tab. 1	Basic phys	sical propert	ies of Yili loess		
序号	干密度 (g/cm ³)	孔隙比	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	压缩模量 <i>E_{s1-2}(MPa)</i>	渗透系数 (cm/s)
1	1.55	0.507	26.73	18.28	8.45	17.5	1.40×10 ⁻⁵
2	1.55	0.509	24.59	17.04	7.56	16.8	1.30×10 ⁻⁵
3	1.55	0.512	29.05	19.62	9.43	17.9	1.31×10 ⁻⁵
4	1.56	0.503	23.88	15.98	7.90	18.1	1.15×10 ⁻⁵
5	1.54	0.495	23.96	16.55	7.41	17.7	1.22×10^{-5}



图 4 MTS-810 三轴材料试验机 Fig. 4 Triaxial material testing machine (MTS-810)

2.2 试验方法

为提高试验的可比性,采用统一批量重塑制样。 将野外采取的土样烘干、碾碎、筛选后,按干密度 1.55 g/cm³重塑,配制成含水率分别为 10.1%、16.2% 和 28.2% 的 3 种土样。在限制蒸发的密封条件下保持 约 6 h,使土体中水分均匀分布,然后在特制模具中制 成高 125.2 mm、直径 61.8 mm 的圆柱体样品。将试样 连模具抽气后一起放入制冷箱,保持温度为-1 ℃ 环 境中冻结 48 h 后脱模,然后在-1 ℃ 恒温 12 h 以上进 行试验。

三轴压缩试验设计冻结温度-1℃,设计含水率 3组,分别为低含水率状态10.1%、天然状态16.2%和 饱和状态28.2%;设计围压3组,分别为0.050 MPa、 0.125 MPa和0.175 MPa,共9组试验。加载正应力及 剪应力之前所有传感器先采集数据30~60 min,待应 变传感器稳定后匀速连续施加围压,达到预设值并稳 定10 min 后,保持围压不变,开始匀速连续施加正应 力直至试样破坏。具体试验设计方案见图5。



3 试验结果分析

3.1 不同含水率和围压的应力应变曲线

常规三轴试验中,土体所受的偏应力与其轴向应 变之间的关系一般有应变硬化型和应变软化型2种。 对于应变硬化型的土体,在破坏前,其偏应力随着轴 向应变的增加有着逐渐上升的趋势;而对于应变软化 型的土体,其偏应力随着轴向应变的增加而达到某一 峰值后转为下降的曲线。在冻结过程中,土体内部结 构与土颗粒的排列方式会发生改变。冻结对土体的 应力-应变的影响不仅与土的类型有关,而且与土工 试验所采用的应力路径和排水路径有关。图 6 是不 同含水率高温冻土的三轴试验应力-应变曲线(图中 σ3 表示围压)。可以看出,当含水率分别为10.1%、 16.2%时,冻土的应力-应变曲线可分为压密阶段、弹 性变形阶段、塑性变形阶段、应变软化阶段和失稳破 坏阶段,随着应变增大,所需应力逐渐减小;当含水率 为28.2%时,冻土的应力-应变曲线在试验过程中只 有压密阶段、弹性变形阶段、塑性屈服阶段和应变硬 化阶段,未发生大变形破坏,继续发生变形需要施加 更大的应力。





with different moisture content

3.2 含水率和围压对强度和变形特征的影响

根据土工试验方法标准,计算出高温冻土试样的 峰值应力应变和残余应力应变(表 2)。对于含水率 为 28.2%的应变硬化型土样曲线,峰值应力取轴向应 变为 15%时对应的主应力差值(中华人民共和国住房 和城乡建设部, 2019),该含水率的试样在试验时间内 未出现峰值应变、残余应变和残余应力。

高温冻土的变形特征是复杂的物理、力学过程, 受组成冻土的气体、固体(土颗粒)、液体(未冻水)和 黏塑性体(冰)的变形特性及迁移作用控制(刘世伟,

表 2 不同含水率与围压下的应力与应变统计表

Tab. 2 Stress and strain under different water content and con-

fining pressure							
含水率 w(%)	围压 σ₃(MPa)	峰值 应力 <i>σ_p</i> (MPa)	峰值 应变 <i>ɛ_p(%)</i>	残余 应力 σ _r (MPa)	残余 应变 <i>ɛ</i> _r (%)		
	0.050	0.568	1.500	0.542	8.500		
10.1	0.125	0.724	3.500	0.697	8.751		
	0.175	0.860	4.671	0.830	13.429		
16.2	0.050	0.855	5.492	0.821	12.979		
	0.125	1.044	11.065	0.968	18.055		
	0.175	1.098	12.232	1.046	19.802		
28.2	0.050	1.448	-	-	-		
	0.125	1.486	-	-	-		
	0.175	1.506	-	-	_		

2012)。有研究表明,高温冻土相较于低温冻土在一 定荷载作用下具有明显的变形特征,高温高含冰量冻 土层厚度越大,升温幅度越大,产生的变形量越大 (Zheng, 2010)。不同围压下含水率与峰值应变和残 余应变的关系曲线可以看出(图 7),含水率由 10.1% 升高到 16.2%,峰值应变和残余应变均增大。相同 含水率时,峰值应变和残余应变随围压增大而 增大。





不同含水率下围压与峰值应变和残余应变的关 系曲线可以看出(图 8),围压由 0.05 MPa 升高到 0.175 MPa,峰值应变和残余应变均增大,增幅略有不同。其 中当含水率为 10.1%,围压为 0.125 MPa 时,残余应变 随围压增幅较小。随着含水率的增加,峰值应变的曲 线斜率逐渐增大,高温冻土的应变增幅也越大,受围 压的影响逐渐增大; 而残余应变的曲线斜率逐渐减小, 高温冻土的应变增幅也越小, 受围压的影响逐渐减小。





高温冻土的强度由土颗粒、未冻水和冰的结合强 度共同决定,显然,高温冻土中含水率越高,冰的含量 也越高(Ting et al., 1983)。冻结状态下的土体在某些 方面类似于岩体性质,具有很高的瞬时强度,类似于 软岩甚至可以与半坚硬岩石相媲美(维亚洛夫, 2005)。 不同围压下含水率与峰值应力、残余应力的关系曲线 可以看出(图 9),随着含水率增大,峰值应力和残余应 力均逐渐增大。相同围压条件下,峰值应力和残余应 力均逐渐增大。相同围压条件下,峰值应力随含水率 增大,其增幅不变。由表 2 和图 9 可知,含水率为 10.1%时,高围压 0.175 MPa 与低围压 0.05 MPa 的峰 值应力差为 0.292 MPa;含水率为 16.2%时,峰值应力 差为 0.243 MPa;含水率均 28.2%时,峰值应力差为 0.058 MPa,随着含水率增大,高温冻土的峰值应力差



Fig. 9 Relationship between water content and peak stress and residual stress

有逐渐降低的趋势,即不同围压下的峰值应力受含水 率增加的影响越来越小。

不同含水率下围压与峰值应力和残余应力的关 系曲线(图 10)可以看出,在不同含水率条件下,峰值 应力与残余应力均随围压增大而增大,其增幅基本保 持不变。随着含水率的增加,峰值应力和残余应力的 曲线斜率逐渐降低,高温冻土应力增幅越小,受围压 的影响逐渐降低。



图 10 围压与峰值应力和残余应力的关系图



变形模量可以反映土层的变形特性,表征应力与 应变的关系。计算出含水率为10.1%和16.2%应力应 变曲线峰值后的平均变形模量(图11)。可知,同一围 压条件下,变形模量随着含水率增大而增大,即产生 同样形变量时,含水率为16.2%所需的应力大于含水 率为10.1%。高温冻土应变软化的能力随着含水率增 大而减弱,到含水率为28.2%时,应变软化现象消失, 出现应变硬化现象。



图 11 不同含水率高温冻土的峰后平均变形模量曲线图 Fig. 11 Average post-peak deformation modulus curve with different moisture content

为了进一步表征高温冻土在不同含水率条件下的力学特性,定义应力相对软化系数 k(吴杨等,2020)为:

$$k = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p} \tag{1}$$

式中:k为应力相对软化系数; σ_p 为表示峰值应力; σ_r 为残余应力。

当 k 值越大, 软化特性越明显, 当 k 值越小, 软化 特性越不明显; 当 k 值接近 0 时, 软化特性逐渐消失, 变为应变硬化曲线。

根据公式(1)与表 2 计算出高温冻土在不同含水 率和围压条件下的应力相对软化系数,并绘制出含水 率与应力相对软化系数曲线(图 12)。可以看出,在不 同围压条件下,k 值随着含水率增大而逐渐减小,表明 应变软化程度逐渐减弱;在相同含水率条件下,k 值也 随着围压增大而逐渐减小,表明应变软化程度逐渐减 弱,应变硬化程度增大。



图 12 不同含水率高温冻土的应力相对软化系数曲线 Fig. 12 Stress relative softening coefficient curve of high-temperature frozen loess

3.3 不同含水率的剪切强度参数变化规律

根据不同含水率三轴试验结果,绘制温冻土的摩 尔应力圆与破坏包络线,通过摩尔-库伦强度理论计算 出高温冻土的抗剪强度参数 *c*、φ 值(表 3)。

高温冻土含水率与内摩擦角的关系曲线(图 13) 可以看出,随着含水率增加,峰值内摩擦角和残余内 摩擦角均逐渐降低;含水率为 10.1%时,峰值内摩擦 角低于残余内摩擦角,含水率为 16.2%时,峰值内摩 擦角高于残余内摩擦角。其中,峰值内摩擦角与含水 率的关系满足二次函数关系,可以采用二次多项式描 述,即:

$$\varphi_p = aw^2 + bw + c \tag{2}$$

式中: a、b为常数,见图 8中拟合公式,不同围压

表 3 不同含水率的剪切强度参数表

Tab. 3 Shear strength parameters of different water content

ヘルガ	峰值内	峰值	残余内	残余	
百小平	摩擦角	黏聚力	摩擦角	黏聚力	
w(%)	$\varphi_p(\circ)$	$c_p(MPa)$	$\varphi_r(\circ)$	$c_r(MPa)$	
10.1	32.5	0.122	37.0	0.076	
16.2	30.2	0.219	28.4	0.218	
28.2	10.9	0.588	_	_	



图 13 含水率与内摩擦角的关系图 Fig. 13 Relationship between water content and internal friction angle

下峰值应力与拟合曲线吻合程度较好,相关系数为 0.996。

高温冻土含水率与黏聚力的关系曲线(图 14)可 以看出,随着含水率增加,峰值黏聚力和残余黏聚力 均逐渐增大。含水率为 10.1% 和 16.2% 时,峰值黏聚 力均高于残余黏聚力。其中,峰值黏聚力与含水率的 关系满足二次函数关系,可以采用二次多项式描述,即:

$$c_p = aw^2 + bw + c \tag{3}$$

式中: *a*、*b*为常数,见图 15 中拟合公式,不同围 压下峰值应力与拟合曲线吻合程度较好,相关系数为 0.997。

3.4 剪切破裂特征

不同含水率的高温冻土在三轴压缩试验过程中 发生变形破坏时,其破坏形态呈现出不同特征,类似 于岩石的破坏形态(马芹永等,2018)。采用图像二值 化处理法提取试样的破裂形态(图15)。含水率为 10.1%试样的破坏形态图显示(图15a),(a₁)试样破裂 面贯通为近似"X"共轭型,在试样中部相交,与水平 向相交的最小角度为70°;(a₂)试样破裂面贯通为倒 "Y"型,在试样中上部相交;(a₃)试样破裂面贯通为 正"Y"型,在试样中下部相交。含水率为16.2%试 样的破坏形态图显示(图15b),(b₁)试样为贯通剪切



图 14 含水率与黏聚力的关系图

Fig. 14 Relationship between moisture content and cohesion





(a₂) σ₃=0.125 MPa a. 含水率 10.1%



 $(b_1) \sigma_3 = 0.05 \text{ MPa}$



(b₃) σ₃=0.175 MPa

(a₃) $\sigma_3 = 0.175$ MPa

 $(c_3) \sigma_3 = 0.175 \text{ MPa}$

(b₂) σ₃=0.125 MPa
b. 含水率 16.2%



(c₁) σ_3 =0.05 MPa

(c₂) σ₃=0.125 MPa c. 含水率 28.2%

图 15 不同含水率伊犁高温冻土的破坏形态图 Fig. 15 Destruction patterns of Yili loess

破裂;(b₂)试样破裂面贯通为正"Y"型,在试样中下 部相交;(b₃)试样为多重剪切破裂,存在3个相交破裂 面,相交位置分别在试样中上部和中下部。含水率为 28.2%试样的破坏形态图显示(图15c),试样均发生鼓 胀变形,未出现大变形破裂面;当应变为24%时,(c₁) 鼓胀变形后直径为105.4 mm;(c₂)鼓胀变形后直径为 103.3 mm;(c₃)鼓胀变形后直径为91.5 mm,随着围压 增大鼓胀变形直径逐渐降低。

综上所述,高温冻土实质上是冰、水、土、气的混 合体,当未冻水含量远远大于冰含量时,其接近于融 化状态,而当含冰量大于未冻水含量时,基本处于冻 结状态,含水率对高温冻土的破坏形态具有一定的影 响作用(王海芝,2022)。含水率为10.1%和16.2%的 高温冻土破坏形态以脆性剪切破坏为主,有明显的破 裂面;含水率为28.2%的高温冻土破坏形态以塑性鼓 胀变形破坏为主,没有明显的破裂面。

4 本构模型验证

高温冻土在一定的冻融条件下,内部随机分布的 微裂纹、孔洞等微缺陷不断产生、扩展,导致土体内 部出现冻融损伤,在受荷变形后损伤不断演化为宏观 裂隙最终破裂。根据文中高温冻土在不同含水率条 件下的应力应变曲线变化特征,引入损伤力学本构模 型来描述高温冻土演化全过程的力学特性(宁建国等, 2007)。损伤本构关系为

$$\sigma = E\varepsilon \exp\left(-\frac{1}{n}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^n\right) \tag{4}$$

式中:σ为应力值;E为无损冻土的弹性模量,即 初始弹性模量;ε为应变值;ε_f为应力峰值所对应的应 变值;n为表征材料损伤演化特征的材料参数。

冻土中任意点的应力σ与冻土的弹性模量、极限 强度、应变峰值及该点的应变有关。

根据高温冻土试样的应力应变全过程试验数据, 采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法对损伤本 构模型进行验证,得到试样相应的模型参数(表 4)。 可以看出,在不同含水率条件下,随着围压增大,弹性 模量*E*和损伤演化特征参数*n*均逐渐降低,即冻土试样 由塑性破坏向脆性破坏逐渐过渡。

表 4 损伤本构模型参数表

Tab. 4 Damage constitutive model parameters

含水率w(%)	围压σ ₃ (MPa)	E(MPa)	$\varepsilon_f(\%)$	n	R^2
	0.050	37.87	1.500	0.142	0.948
10.1	0.125	20.69	3.500	0.123	0.970
	0.175	18.41	4.671	0.122	0.964
	0.050	15.57	5.492	0.132	0.928
16.2	0.125	9.44	11.065	0.123	0.904
	0.175	8.98	12.232	0.122	0.912
	0.050	10.95	13.227	0.101	0.959
28.2	0.125	9.36	15.874	0.094	0.970
	0.175	7.62	19.762	0.093	0.963
		-	-	-	-

将试验数据与通过公式(4)损伤本构模型拟合的 曲线对比(图 16)可以看出,损伤本构模型能够较合理 的描述高温冻土在不同含水率和围压下的应力应变 全过程,即压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段、 应变软化阶段和失稳破坏阶段的变形特征,拟合曲线 的最小相关系数为 0.904~0.970。





the model fitting curve

5 结论

(1)伊犁黄土的粉粒与黏粒粒组含量较高,对冻融作用的反应敏感。低含水率高温冻土峰后表现出应变软化特征,饱和含水率高温冻土峰后表现出应变硬化特征,未发生大变形破坏。

(2)随着含水率增大,峰值应力和残余应力受含

水率增加的影响越来越小。产生同样形变量时,含水 率越大所需应力就越大。软化系数随着含水率和围 压的增大而逐渐减小,应变软化程度逐渐减弱,应变 硬化程度增大。

(3)随着含水率增加,峰值内摩擦角和残余内摩 擦角均逐渐降低,峰值黏聚力和残余黏聚力均逐渐增 大。低含水率时,高温冻土破坏形态以脆性剪切破坏 为主。饱和含水率时,破坏形态以塑性鼓胀变形破坏 为主,没有明显的破裂面。

(4)在不同含水率条件下,随着围压增大,弹性模量和损伤演化特征参数均逐渐降低,即冻土试样由塑性破坏向脆性破坏逐渐过渡。

参考文献(References):

- 曹文贵,赵衡,张永杰,等.考虑体积变化影响的岩石应变软硬 化损伤本构模型及参数确定方法[J].岩土力学,2011, 32(3):647-654.
- CAO Wengui, ZHAO Heng, ZHANG Yongjie, et al. Strain softening and hardening damage constitutive model for rock considering effect of volume change and its parameters determination method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 647–654.
- 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- Tsytovich H A. The mechanics of frozen ground [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩石细观损伤扩展规律的CT实时 试验[J].中国科学E辑:技术科学,2000,30(2):104–111.
- GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. Real-Time CT test of mesodamage propagation law of rock[J]. Science in China, 2000, 30(2); 104–111.
- 赖远明,李双洋,高志华,等.高温冻结粘土单轴随机损伤本构 模型及强度分布规律[J].冰川冻土,2007,29(6):969-976.
- LAI Yuanming, LI Shuangyang, GAO Zhihua, et al. Stochastic damage constitutive model for warm frozen soil under uniaxial compression and its strength distribution[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 969–976.
- 赖远明,张耀,张淑娟,等.超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J].岩土力学,2009,30(12):3665-3670.
- LAI Yuanming, ZHANG Yao, ZHANG Shujuan, et al. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3665–3670.

刘世伟,张建明.高温冻土物理力学特性研究现状[J].冰川冻

土,2012,34(1):120-129.

- LIU Shiwei, ZHANG Jianming. Review on physic-mechanical properties of warm frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 120–129.
- 马芹永, 郁培阳, 袁璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 593-600.
- MA Qinyong, YU Peiyang, YUAN Pu. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 593–600.
- 马巍,吴紫汪,常小晓,等.剪应力强度和平均法向应力对冻土 变形的相互影响[J].自然科学进展,1998,8(1):77-81.
- MA Wei, WU Ziwang, CHANG Xiaoxiao, et al. The influence of shear stress strength and mean normal stress on the frozen soils deformation[J]. Progress in Nature Science, 1998, 8(1): 77–81.
- 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.
- MA Wei, WU Ziwang, SHENG Yu. Creep and creep strength of frozen soil[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 1994, 16(2); 113–118.
- 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 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, 王大雁. 中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J]. 岩土工程 学报, 2012, 34(4): 625-640.
- MA Wei, WANG Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4); 625–640.
- 宁建国,朱志武.含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分 析[J].力学学报,2007,39(1):70-76.
- NING Jianguo, ZHU Zhiwu. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(1): 70–76.
- 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425-431.
- REN Jianxi, GE Xiurun. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 425–431.
- 宋友桂,史正涛.伊犁盆地黄土分布与组成特征[J].地理科学, 2010,30(2):267-272.

- SONG Yougui, SHI Zhengtao. Distribution and compositions of loess sediments in Yili Basin, central Asia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 267–272.
- SU Kai, ZHANG Jianming, LIU Shiwei, et al. Compressibility of warm and ice-rich frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 369–375.
- 王海芝, 王颂, 周剑, 等. 樟木堆积体斜坡动力稳定性与极限承载力评价[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 262-273.
- WANG Haizhi, WANG Song, ZHOU Jian, et al. Dynamic stability analysis and ultimate bearing capacity evaluation of Zhangmu landslide deposit[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 262–273.
- 维亚洛夫 C C. 冻土流变学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- VAYALOV C C. Rhelogy of Frozen Soil [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- 吴杨,崔杰,李能,等.岛礁吹填珊瑚砂力学行为与颗粒破碎特 性试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3181–3191.
- WU Yang, CUI Jie, LI Neng, et al. Experimental study on the mechanical behavior and particle breakage characteristics of hydraulic filled coral sand on a coral reef island in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3181–3191.
- 徐张建,林在贯,张茂省.中国黄土与黄土滑坡[J].岩石力学与 工程学报,2007,26(7):1297-1312.
- XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297–1312.
- 颜荣涛,张炳晖,杨德欢,等.不同温-压条件下含水合物沉积物 的损伤本构关系[J].岩土力学,2018,39(12):4421-4428.
- YAN Rongtao, ZHANG Binghui, YANG Dehuan, et al. Damage constitutive model for hydrate-bearing sediment under different temperature and pore pressure conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4421–4428.
- 尹光华,王兰民,袁中夏,等.新疆伊犁黄土的物性指标、动力 学特性与滑坡[J].干旱区地理,2009,32(6):899-905.
- YIN Guanghua, WANG Lanmin, YUAN Zhongxia, et al. Physical index, dynamic property and landslide of Ili loess[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 899–905.
- 叶玮, 矢吹真代, 赵兴有. 中国西风区与季风区黄土沉积特征对 比研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 789–794.
- YE Wei, SADAYO Yabuki, ZHAO Xinyou. Comparison of the sedimentary features of loess between the westerly and monsoon regions in China[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(6):

789-794.

- 张艳玲, 陈亮, 闫金凯, 等. 基于 DAN-W 模型的高速远程滑坡 灾变过程分析[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 204-211.
- ZHANG Yanling, CHEN Liang, YAN Jinkai, et al. Study on the catastrophic process of rapid and long Run-out landslides based on DAN-W[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 204–211.
- 张慧梅,杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471-476.
- ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471–476.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- 朱赛楠,李滨,冯振.三峡库区侏罗系泥岩 CT 损伤特性试验研 究[J].水文地质工程地质,2016,43(1):72-78.
- ZHU Sainan, LI Bin, FENG Zhen. Research on CT damage characteristics of the Jurassic mudstones in the Three Gorges Reservoir area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 72–78.
- 朱赛楠,殷跃平,王文沛,等.新疆伊犁河谷黄土滑坡冻融失稳 机理研究[J].地球学报,2019,40(2):339-349.
- ZHU Sainan, YIN Yueping, WANG Wenpei, et al. Mechanism of

freeze-thaw loess landslide in Yili River valley, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2019, 40(2): 339–349.

- 朱元林,张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29-39.
- ZHU Yuanlin, ZHANG Jiayi. Elastic and compressive deformation of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 29–39.
- Chamberlain E J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1/2/3/4): 73–92.
- Gurson A L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1975.
- Jessberger H L. A state-of-the-art report. Ground freezing: mechanical properties, processes and design[J]. Engineering Geology, 1981, 18(1/2/3/4): 5–30.
- Othman M A, Benson C H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(2): 236–246.
- Ting J M, Torrence Martin R, Ladd C C. Mechanisms of strength for frozen sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(10): 1286–1302.
- Zheng Bo. Investigation for the deformation of embankment underlain by warm and ice-rich permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(2): 161–168.