

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.039

冻融循环作用下凝灰质砂岩卸荷蠕变试验研究

熊彩凤^{1,2}, 詹皓辰³, 胡江洋⁴, 周志军³

(1. 云南省公路局, 云南 昆明 650200; 2. 云南华丽高速公路建设指挥部, 云南 丽江 674100;

3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为探究冻融循环对高寒区岩石蠕变特性的影响, 以新疆维吾尔自治区哈密市 G575 东天山特长隧道凝灰质砂岩为研究对象, 开展冻融循环试验、电镜扫描试验以及不同冻融循环次数条件下分级卸围压的三轴卸荷蠕变试验。试验结果表明: 冻融循环对凝灰质砂岩的影响, 在微观上表现为降低矿物颗粒的胶结程度, 宏观上表现为裂隙扩展裂化和颗粒析出裂化两种破坏形式; 对于凝灰质砂岩来说, 卸荷过程和冻融循环作用都导致岩样的蠕变变形能力有所提高, 且径向变形对岩样的变形破坏更加敏感, 对岩样变形破坏起到控制作用。

关键词: 隧道工程; 冻融循环; 卸荷蠕变试验; 稳态蠕变率

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0212-07

Unloading Creep Experiments of Tuffaceous Sandstone under Freeze – Thaw Cycles

XIONG Caifeng^{1,2}, ZHAN Haochen³, HU Jiangyang⁴, ZHOU Zhijun³

(1. Yunnan Highway Bureau, Kunming, Yunnan 650200, China;

2. Yunnan Hua – li Expressway Construction Headquarters, Lijiang, Yunnan 674100, China;

3. School of Highway, Chang’ an University, Xi’ an, Shaanxi 710064, China;

4. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd. Xi’ an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: To understand the effects of freeze-thaw cycles on the creep properties of rocks in high cold area, freeze-thaw test, SEM test, freeze-thaw cycle test and triaxial unloading creep experiments of stepwise unloading pressure under different freeze-thaw cycles were carried out on tuffaceous sandstone in the G575 East Tianshan tunnel in Hami, Xinjiang. The results show that the freeze-thaw cycles can reduce the cementation degree of the mineral particles on the microcosmic level, and two types of failure modes: the fracture expansion and the particle separation and cracking are shown on the macro. For tuffaceous sandstone, the creep deformation ability of rock samples is improved by unloading process and freeze-thaw cycles. Radial deformation is more sensitive to deformation and failure of rock samples, meanwhile it controls the deformation and failure of rock samples.

Keywords: tunnel construction; freeze – thaw cycles; unloading creep experiment; stable creep rate

中国寒区面积广阔, 多年冻土区和季节性冻土区约占国土面积的 70% 以上^[1-2]。其中季节性冻土区内岩土体常年遭受低温冻结和升温融化的循环交替影响, 改变了季节性冻土的物理力学性质。相比于冻土区的冻结作用, 冻融循环作用对岩土体的物理力学性质影响更大。

随着工程建设的需要, 世界各国开展了针对寒

区环境的研究, 为寒区工程的建设运营打下了良好的基础^[3-6]。纵观几十年来的研究成果可以发现, 有关岩石蠕变特性的研究大多基于常规加载条件下的试验研究, 而有关冻融循环岩石卸载条件下蠕变试验研究相对较少。朱杰等^[7]进行不同温度下的三轴蠕变试验, 结合蠕变理论, 引入损伤变量, 建立冻结蠕变损伤本构方程, 并对参数进行辨识。杨

林等^[8]对配置的不同混合料进行冻融循环,再通过弯曲蠕变试验,发现蠕变速率可以作为预估冻融循环作用下车辙发展规律的关键因素。田佳^[9]结合深部软岩工程灾变规律,详述了供水隧洞软岩力学特性、蠕变机理、蠕变量计算及本构模型研究进展。郭臣业等^[10]利用 MTS815 岩石力学试验系统,对砂岩进行一系列加载水平的峰后蠕变试验,其结果对确定掘进巷道围岩支护参数等有重要的参考意义。还有学者对岩石蠕变试验的时效性^[11]、各向异性^[12]以及分级卸荷量^[13]的影响进行了研究。

本文针对不同冻融循环次数下的凝灰质砂岩开展冻融循环、电镜扫描、三轴卸荷蠕变试验,分析其物理力学特性;探索冻融循环次数与相关各力学参数的映射关系;考虑了冻融劣化作用下高应力隧道凝灰质砂岩卸荷蠕变特性,补充和完善了岩石蠕变的相关研究,对寒区工程有一定的工程实践意义。

1 试验方案

1.1 材料准备

东天山隧道位于高寒高海拔地区(见图1),属于强冻融区,区域内岩石长期处于冻融循环状态。通过对东天山隧道沿线地质环境的调查,选取凝灰质砂岩进行冻融循环、三轴压缩以及蠕变试验研究。为了研究冻融循环作用下凝灰质砂岩的物理力学性质,试验选取直径为 50 mm、高为 100 mm 的标准圆柱体试样^[14](见图2)。试样由野外钻孔所得的岩样切割打磨而成,岩样的轴向垂直于岩石沉积方向,试样的制备过程满足岩石体测试规范的基本要求。为了确保试验数据的可比性以及模拟施工现场的浸水条件,试验前需对制备的岩样进行筛选和对加工好的岩样进行饱和试验。进行饱和试验时,需将试样垂直浸入水中,水面高出岩样顶部 3 cm ~ 5 cm,浸泡 72 h 后认为岩样已完全达到饱和。

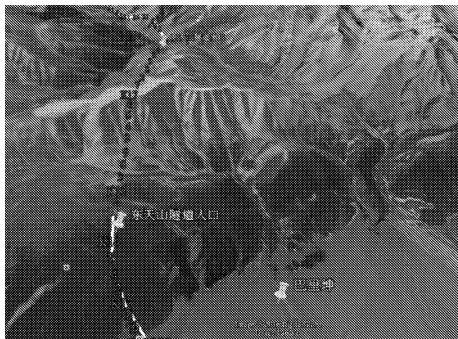


图1 东天山隧道地质概况图



图2 部分岩样

1.2 冻融循环试验

本次冻融循环试验采用可编程高低温试验箱,其温度控制范围为 $-30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$, 温度波动度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 温度偏差 $\leq \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 。该试验箱具有平衡调温控制系统,可满足本文冻融循环试验要求。依据东天山地区气温和《公路工程岩石试验规程》^[14](JTG E41—2005)的规定,在冻融循环过程中动容温度设为 $\pm 20^{\circ}\text{C}$, 温度转换时间间隔为 12 h, 循环周期为 24 h。根据试验要求,设计冻融次数分别为 0 次/d、10 次/d、20 次/d、40 次/d、60 次/d。

在宏观上,随着冻融次数的增大,凝灰质砂岩会出现不同程度的破坏(见图3)。未冻融时岩样完好;冻融 20 次/d 时,岩样开始出现细小的裂纹,裂纹基本在岩样表面;冻融 40 次/d 时,微裂隙进一步向内部发展,裂纹开始扩张,部分岩样边缘出现剥落现象,导致边缘不规则化,但大部分仍停留在微裂隙的扩展层面上;冻融 60 次/d 时,部分表面的裂隙已经贯穿岩样,表现为较大的宏观裂纹。通过试验发现,冻融循环作用下岩样破坏形式有两种:裂隙扩展劣化模式和颗粒析出劣化模式(见图4)。凝灰质砂岩的冻融循环试验中,两种劣化模式是同时存在的,以裂隙扩展劣化模式为主,这是因为凝灰质砂岩本身属于硬脆性岩石,其内部所含胶结程度较弱的矿物颗粒较少,在冻胀力作用下,只有岩样端部的部分矿物颗粒剥落析出。

1.3 电镜扫描试验

本文利用电镜扫描技术,来研究冻融循环作用下凝灰质砂岩的微观结构变化特征。试验设备是 Quanta 650 环境扫描电子显微镜。本文以放大 5 000 倍为例,说明不同冻融次数时凝灰质砂岩在微观结构上的变化特征。岩样放大 5 000 倍的电镜扫描试验结果如图5所示。

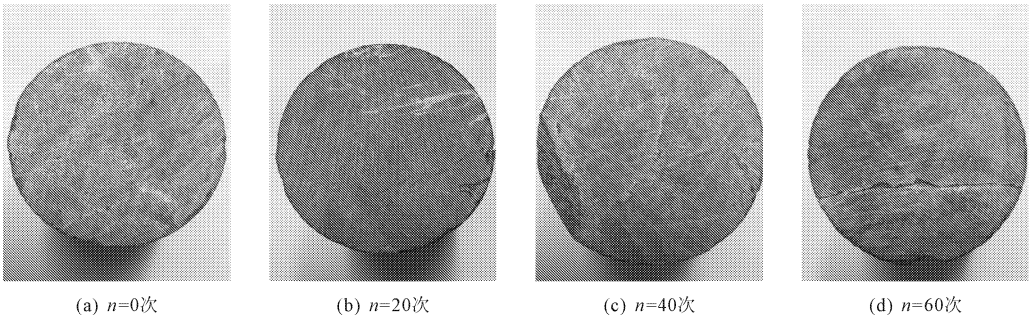


图 3 不同冻融状态下岩样端部破坏情况

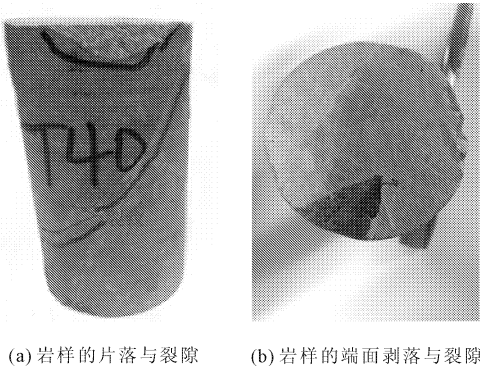


图 4 岩样冻融破坏特征

由电镜扫描结果可知,在微观上冻融前,凝灰质砂岩岩样完整性较好,内部微裂隙不发育,颗粒胶结程度较好;冻融后岩样的结构发生改变,微裂隙由闭合开始张开,部分微裂隙张开且贯通,颗粒胶结性变弱,部分颗粒脱离原来的位置,散落在岩样表面。因此可以认为,冻融循环作用是通过降低凝灰质砂岩的矿物颗粒的胶结程度而影响其微结构,最终改变岩石的强度。

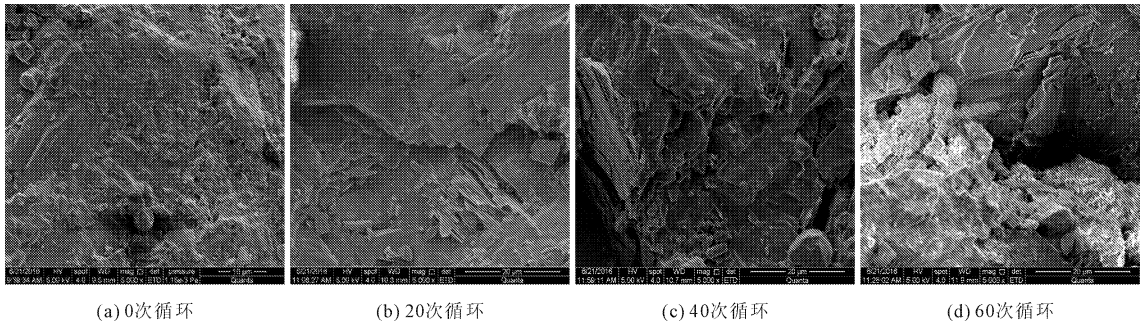


图 5 凝灰质砂岩放大 5000 倍电镜扫描 (SEM) 图片

1.4 三轴卸荷蠕变试验

试验采用 RLM-2000 型岩石三轴流变仪,该仪器为全自动流变伺服仪,其最大负荷为 2 000 kN,最大围压为 70 MPa,最大轴向变形测量值为 10 mm,最大径向变形测量值为 5 mm。本文采取分级卸载的方式进行蠕变试验。为了能够在较短的时间内获取更多的蠕变曲线,并保证岩石在 3 级~5 级内产生破坏,一般第 1 级荷载取为相应条件下岩石极值强度的 65%~75%。因此本文将岩样饱水条件下的三轴抗压强度的 70% 作为第一级荷载,保持轴压不变,逐级卸载围压,每级围压卸荷考虑 $\Delta\sigma_3 = -3$ MPa 水平,直至最终破坏。试验初试围压 $\sigma_3 = 20$ MPa,轴压 σ_1 分别为不同冻融循环次数下凝灰质砂岩峰值强度的 70% 即 178 MPa、166 MPa、154 MPa、

134 MPa、120 MPa。
按照试验设计方案,对冻融 0 次/d(T0 岩样)、10 次/d(T10 岩样)、20 次/d(T20 岩样)、40 次/d(T40 岩样)和 60 次/d(T60 岩样)的凝灰质砂岩岩样分别进行三轴卸荷蠕变试验。
冻融循环 10 次/d 的 T10 岩样经三次卸荷 4 级蠕变后发生破坏,其余岩样经 4 次卸荷 5 级蠕变后发生破坏。最后一级轴向和径向蠕变数据是加速蠕变起点以前的蠕变应变增量,不同冻融循环作用下的卸荷蠕变试验最后一级应力作用下的数据均参照此处理。岩样分别经历 121.6 h、102.5 h、113.6 h、132.5 h、109.3 h 的蠕变变形后发生破坏。由卸荷蠕变曲线可得不同冻融循环次数下每级应力水平的卸荷蠕变参数表(见表 1)。

表 1 不同冻融循环次数下凝灰质砂岩卸荷蠕变参数

岩样 编号	主应力 σ_1/MPa	分级围压 σ_3/MPa	偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3/\text{MPa}$	轴向 ϵ_1 瞬时 应变增量 $/10^{-2}$	径向 ϵ_3 瞬时 应变增量 $/10^{-2}$	轴向 ϵ_1 蠕变 应变增量 $/10^{-2}$	径向 ϵ_3 蠕变 应变增量 $/10^{-2}$
T0	178	20	158	0.4786	-0.1516	0.0528	-0.0396
		17	161	0.0786	-0.0585	0.0425	-0.0407
		14	164	0.0695	-0.0653	0.0433	-0.0437
		11	167	0.0737	-0.0703	0.0470	-0.0491
		8	170	0.0918	-0.0878	0.0474	-0.0788
T10	166	20	146	0.5114	-0.1814	0.0553	-0.0414
		17	149	0.0757	-0.0597	0.0467	-0.0452
		14	152	0.0764	-0.0620	0.0477	-0.0489
		11	155	0.0803	-0.0773	0.0486	-0.0923
T20	154	20	134	0.5907	-0.2117	0.0617	-0.0489
		17	137	0.0781	-0.0574	0.0472	-0.0497
		14	140	0.0820	-0.0660	0.0533	-0.0553
		11	143	0.0891	-0.0780	0.0563	-0.0646
		8	146	0.0847	-0.0864	0.0571	-0.1776
T40	134	20	114	0.6134	-0.2244	0.0696	-0.0537
		17	117	0.0849	-0.0678	0.0638	-0.058
		14	120	0.0839	-0.0717	0.0646	-0.0618
		11	123	0.0843	-0.0811	0.0712	-0.0703
		8	126	0.0912	-0.0853	0.1030	-0.1468
T60	120	20	100	0.6630	-0.2460	0.0678	-0.0612
		17	103	0.0842	-0.0708	0.0794	-0.0683
		14	106	0.0866	-0.0837	0.0742	-0.0785
		11	109	1.1520	-0.0929	0.0804	-0.0812
		8	112	1.3327	-0.0875	0.0728	-0.1160

从表 1 中可以看出在整个蠕变过程中,经历冻融循环的岩样轴向和径向蠕变变化规律与未冻融条件下是一样的。卸荷条件下岩样的蠕变变形能力明显增强,径向蠕变变形能力增加幅度要高于轴向蠕变变形,在卸荷过程中轴向蠕变较为稳定,径向蠕变逐渐增加,卸荷后期出现明显扩容现象。相对于未冻融条件下,冻融循环作用下每一级应力水平作用下的瞬时应变量和蠕变应变变量都略有增长,可见冻融循环作用下导致岩样的蠕变变形能力有所提高。瞬时应变、蠕变应变均随着偏应力水平的增大而增大。

2 岩样卸荷蠕变特性

2.1 轴向和径向蠕变的敏感性

卸荷蠕变和加荷蠕变试验是存在区别的,其中主要的一个方面是径向和轴向蠕变规律不同。本文通过不同冻融次数下的径向与轴向的蠕变增量比来

分析卸荷过程中轴向和径向的敏感性,找出具有控制性的方面,以便后续重点研究。由上述卸荷蠕变结果分析得,对于卸荷蠕变和压缩蠕变,它们在蠕变过程中轴向与径向变形规律是不同的。选取不同冻融次数(0 次/d、10 次/d、20 次/d、40 次/d、60 次/d)的凝灰质砂岩,对每级荷载下径向蠕变增量与轴向蠕变增量的比值($\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1$)随应力差的变化关系进行统计分析。从图 6、图 7 可看出,未冻融与经历冻融循环的岩样,其蠕变比随偏应力变化的规律一致。

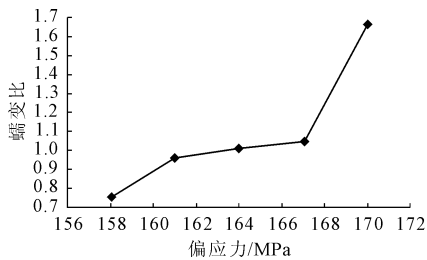


图 6 T0 岩样未冻融凝灰质砂岩岩样蠕变比 ($\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1$)与偏应力关系曲线

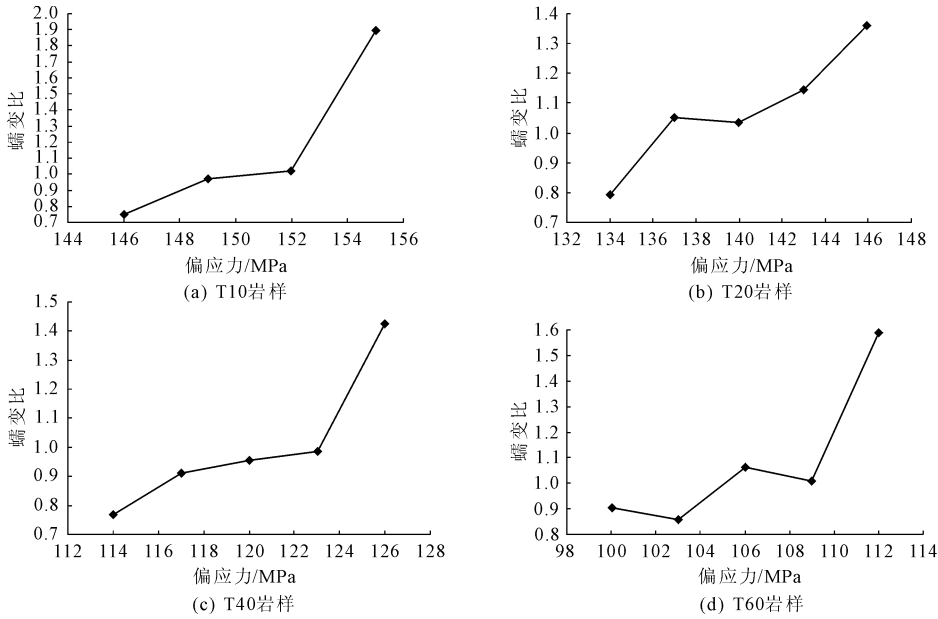


图 7 冻融循环后岩样蠕变比($\Delta\epsilon_3/\Delta\epsilon_1$)与偏应力关系曲线

在各岩样卸围压力蠕变试验第一级荷载中,径向蠕变同轴向蠕变的比值均小于 1,说明初始卸荷阶段以轴向蠕变为主,径向蠕变为辅,但是随着逐级卸荷,径向蠕变与轴向蠕变的比值开始增大,径向蠕变值超过轴向,并且整体呈扩大趋势。如 T0 岩样,蠕变比从第一级卸荷的 0.75,增加到 0.96、1.01、1.16 和 1.26,径向扩容明显,尤其在加速阶段径向扩容尤其显著。径向与轴向蠕变的比值大于 1.00,说明在相同时间内径向较轴向蠕变量大,卸荷过程中局部化的非均匀破坏对轴向构成的损伤不明显,但对径向蠕变影响却很严重,因为岩石材料是非均质性,当其发生局部破裂后,径向变形就不再具有轴对称性。

2.2 体积蠕变特性

岩石体积蠕变及体积扩容现象是岩石,尤其是软岩所具有的一种特性,同时也是岩石流变力学特性研究的重要内容之一。通过对凝灰质砂岩三轴卸荷蠕变试验结果分析可知,凝灰质砂岩作为硬脆性岩石,在冻融作用后卸荷蠕变过程中也会出现体积扩容的现象。而体积应变可用于工程上提前预测岩体的破坏,因此有必要研究岩样的体积蠕变变形特征。

在试验过程中体积应变一般不能通过仪器直接量测,而是通过轴向应变及径向应变实测数据计算(式(1))得到。故可计算不同冻融循环作用下凝灰质砂岩的体积蠕变-时间曲线如图 8 所示。对于体积变形来说,规定压缩为正,膨胀为负,即正值说明

岩样被压缩体积减小,负值说明岩样膨胀体积增大。

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3^{[16]} \tag{1}$$

其中: ϵ_1 为轴向蠕变; ϵ_3 为径向蠕变。

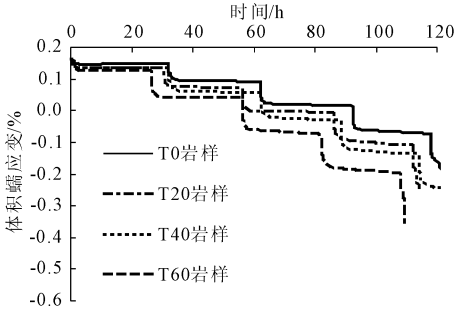


图 8 体积蠕变-时间曲线

由岩样体积蠕变-时间曲线可得到不同冻融循环作用下在不同卸荷过程中岩样的体积蠕变量(见表 2)。由以上研究可知,冻融次数和偏应力水平直接影响了岩样轴向和径向变形。因此这里也从冻融次数和偏应力水平两个因素来分析体积蠕变变形特征,可得到如下规律:

(1) 随着冻融循环次数的增多,岩样从开始受荷到压密所需的时间整体上是减少的,T0 岩样体积压缩的时间是 62 h,T20 岩样体积压缩的时间是 56 h,T40 岩样体积压缩的时间是 61.3 h,T60 岩样体积压缩的时间是 56.7 h,随后岩样开始扩容膨胀。并且随冻融次数的增加体积扩容也趋于显著。

(2) 随着偏应力的增大,瞬时应变增量由正变负,即瞬时体积由压密状态变为膨胀状态,而蠕变应变增量一直为负,说明蠕变体积一直处于膨胀状态。

并且随着偏应力的增大,瞬时体积应变和蠕变体积应变都是增加的。试验数据说明围压在一定程度上对岩石的体积蠕变起到限制作用,尤其是对侧向蠕

变的限制。随着卸围压过程的进行,岩石开始产生明显的损伤劣化现象,即扩容现象。

表 2 体积蠕变统计表

分级卸围压	偏应力/MPa				$\epsilon_v/10^{-3}$			
	T0 岩样	T20 岩样	T40 岩样	T60 岩样	T0 岩样	T20 岩样	T40 岩样	T60 岩样
一级末(20MPa)	158	134	114	100	1.490	1.312	1.267	1.165
二级末(17MPa)	161	137	117	103	0.717	0.423	0.238	0.018
三级末(14MPa)	164	140	120	106	-0.335	-0.651	-0.948	-1.550
四级末(11MPa)	167	143	123	109	-1.520	-2.920	-2.420	-3.260
五级末(8MPa)	170	146	126	112	-3.520	-3.910	-5.100	-5.705

2.3 蠕变速率特征

与大多数岩土材料的蠕变性能相似,凝灰质砂岩完整的三轴卸荷蠕变曲线也是可以分为三个阶段:衰减蠕变、等速蠕变和加速蠕变阶段。通过上述蠕变特性曲线和参数规律,计算得到蠕变速率随时间的变化曲线。当围压为 20 MPa、17 MPa、14 MPa、11 MPa(冻融 10 次时不包括 11 MPa),岩样处于衰减蠕变(减速蠕变)和等速蠕变阶段,蠕变速率随着时间增大而不断减小,最后趋于稳定值。

对于前四级应力水平来说(冻融 10 次/d 时为前三级),在每一次卸围压时,岩石蠕变速率都会发生突变,产生较大的峰值蠕变速率;随后会迅速过渡到衰减蠕变阶段,蠕变速率与时间成反比;最后进入到等速蠕变阶段,这个阶段岩样的速率基本保持稳定,不出现大的波动,而且在整个蠕变过程中,等蠕变阶段是其主要蠕变阶段,它对岩石的长期强度至关重要。统计在不同冻融循环次数下径向稳定蠕变速率见表 3。由表 3 可知,随着卸围压过程的发生,岩样的径向等速蠕变速率逐渐增大,即随着偏应力的增大而增大。在 20 MPa 围压下,与未冻融循环的岩石样品相比,10 次/d、20 次/d、40 次/d 和 60 次/d后,径向稳定蠕变率分别增加到 0%、71.43%、85.71%和 128.60%。

表 3 径向等速蠕变速率统计表

围压 /MPa	径向稳态速率/(10 ⁻⁵ ·h ⁻¹)				
	0 次冻融	10 次冻融	20 次冻融	40 次冻融	60 次冻融
20	0.070	0.070	0.120	0.130	0.160
17	0.180	0.200	0.220	0.300	0.410
14	0.280	0.380	0.400	0.520	0.850
11	0.530	—	0.831	0.880	1.200

3 结 论

以东天山特长隧道凝灰质砂岩为例,通过冻融循环试验、电镜扫描试验、室内三轴卸荷蠕变试验研究,分析了在冻融循环条件下凝灰质砂岩卸荷蠕变的力学特性。主要结论如下:

(1) 在微观上冻融循环作用是通过降低凝灰质砂岩矿物颗粒的胶结程度来影响其微结构,最终改变岩石的强度。岩样宏观破坏形式有裂隙扩展劣化模式和颗粒析出劣化模式。

(2) 凝灰质砂岩在卸荷条件下岩样的蠕变变形能力明显增强,径向蠕变变形增加幅度要高于轴向蠕变变形,在卸荷后期出现明显的扩容现象。冻融循环作用导致岩样的蠕变变形能力有所提高,即随着冻融循环次数的增大,蠕变变形能力先增大再减小,最后趋于稳定。径向变形对岩样的变形破坏更加敏感,对试验岩样变形破坏起到控制作用。因此在实际工程开挖过程中,更应该加强对隧道围压径向变形的监测。

(3) 凝灰质砂岩的径向卸荷蠕变曲线分为三个阶段:衰减蠕变、等速蠕变和加速蠕变阶段。只有偏应力达到某一值后,才会出现加速蠕变阶段。随着冻融循环次数的增加,凝灰质砂岩的脆性降低,延性增加。其减速蠕变阶段和加速蠕变阶段才会越来越明显。

参考文献:

[1] 徐敦祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2001:5-10.
[2] 张旭东.多年冻土地区冻融循环下路基变形规律研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):19-24.
[3] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero

- temperature condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2001, 38(7):1029-1034.
- [4] Park C, Synn J H, Shin H S, et al. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2004, 41(3):81-86.
- [5] Yavuz H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(2):187-192.
- [6] Bayram F. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83-84(none):98-102.
- [7] 朱杰,徐颖,亓燕秋.冻结红层软岩的蠕变特性研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2013,33(4):26-32.
- [8] 杨林,焦厚滨.基于冻融循环蠕变特性的沥青路面车辙试验研究[J].中外公路,2016,32(2):69-74.
- [9] 田佳.深埋软岩供水隧洞蠕变特性研究进展[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):182-189.
- [10] 郭臣业,鲜学福,姜永东,等.破裂砂岩蠕变试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):990-995.
- [11] 张树光,马涛,王有涛.辽西花岗岩三轴蠕变时效性试验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(10):1343-1348.
- [12] 肖明砾,卓莉,谢红强,等.三轴压缩蠕变试验下石英云母片岩各向异性蠕变特性研究[J].岩土力学,2015,36(S1):73-81.
- [13] 黄达,杨超,黄润秋,等.分级卸荷量对大理岩三轴卸荷蠕变特性影响规律试验研究[J].岩土力学,2015,34(S1):2801-2807.
- [14] 陈国庆,郭帆,王剑超,等.冻融后石英砂岩蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2017,38(S1):203-210.
- [15] 公路工程岩石试验规程:JTG E41—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
- [16] 黄兴,刘泉声,康永水,等.砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S1):2653-2662.

(上接第 203 页)

- [7] 刘永军,毕然,腾飞,等.钢筋混凝土框架结构火灾反应全过程数值分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(3):405-411.
- [8] Annerel E, Lu L, Taerwe L. Punching shear tests on flat concrete slabs exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2013, 57:83-95.
- [9] Ngekpe B E, Ode T, Eluozo S N. Application of total-strain crack model in finite element analysis for punching shear at edge connection[J]. International of Engineering and Social Sciences, 2016, 6(12):1-9.
- [10] Adam Wosatko, Jerzy Pamin, Maria Anna Polak. Application of damage-plasticity models in finite element analysis of punching shear[J]. Computers and Structures, 2015, 151:73-85.
- [11] Genikomsou A S, Polak M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS[J]. Engineering Structural, 2015, 98:38-48.
- [12] Salem Hamed, Issa Heba, Gheith Hatem, et al. Punching shear strength of reinforced concrete flat slabs subjected to fire on their tension sides[J]. HBRC Journal, 2012, 8(1):36-46.
- [13] 张帅,刘永军.板柱节点火灾中力学性能数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2019,17(1):131-136.
- [14] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土的高温性能及其计算[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [15] 王建平,丁慧,宋力.抗冲切元件对板柱节点受力性能的影响[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):205-208.