

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0043

ZHANG Liang, NIU Fujun, LIU Minghao, et al. Effects of freeze-thaw damage and confining pressure on anisotropy strength of bedded rock[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):366-375. [张亮, 牛富俊, 刘明浩, 等. 冻融损伤与围压对层状岩石强度各向异性的影响[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):366-375.]

冻融损伤与围压对层状岩石强度各向异性的影响

张亮^{1,2}, 牛富俊¹, 刘明浩¹, 鞠鑫^{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: 层状岩石具有显著的层理面结构, 层理面结构的方向决定了岩石的各向异性, 相邻层面的岩石物理力学性质差异和连接强度决定了各向异性的强弱, 此外, 层状岩石的层理结构使其易受冻融循环(FT)等风化作用的影响。为了研究冻融损伤与围压对层状岩石强度各向异性的影响, 分别在0、10、20、30和40次的冻融循环和0.5、15、25和40 MPa的围压条件下, 使用岩石三轴试验系统(GCTS)对五种不同层理倾角的层状砂岩试件进行试验。试验结果显示, 冻融循环会使岩石层理面产生裂隙, 更易发生沿层理面的剪切滑移破坏, 冻融40次后, $\beta=0^\circ$ 的试件单轴抗压强度降低14.5%, 而 $\beta=67.5^\circ$ 的试件单轴抗压强度降低57.9%, 使层状岩石的固有各向异性增强。围压对岩石的各向异性影响与其固有各向异性有关, 表现为随着冻融次数的累积, 围压对岩石的应力诱导各向异性由起初的增强逐渐转变为抑制。本研究可为寒区层状岩石工程的设计、施工和安全运行提供理论支持。

关键词: 层状岩石; 冻融循环; 应力诱导; 围压; 各向异性

中图分类号: P642.14; TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0366-10

0 引言

随着寒区资源开发和工程建设的加强, 寒区岩石工程稳定性评价和冻融灾害防治已成为亟待解决的问题。根据现有的地质勘察资料显示, 层状岩石在我国寒区分布广泛^[1]。高海拔地区岩石总是受到季节和昼夜引起的冻融循环, 且处于一定的应力场中。这种赋存环境对岩石变形破坏机制有重要影响^[2]。因此, 研究冻融和荷载作用下层状岩石的各向异性物理力学特征, 对寒区工程建设具有重要的理论和工程意义。

由于降水和冰雪融化, 水会进入岩石的裂隙与孔隙。当温度低于0℃时, 由于水冻结, 其体积会增加9%~10%, 使岩石沿薄弱面出现裂隙^[3]。当温度升高时, 冰融化后, 水在裂隙和孔隙之间迁移, 这一过程导致岩石渗透性增加。FT过程重复时, 岩石强度会减弱, 层状岩石的裂纹会在层理间发育并不断向内延伸^[4]。许多学者研究了冻融循环对岩石物理

力学性质的变化规律^[5-8], 其中包括冻融循环对岩石节理^[9], 孔隙^[10], 岩石矿物成分^[11]等的影响。冻融循环条件下, 由于岩石相邻层理面的密度, 矿物成分存在差异, 会在温度变化过程中表现出相对变形, 从而使相邻层理面之间产生裂隙并逐步发育。目前针对岩石层理面结构冻融损伤的研究明显不足。

在分析层状岩石破坏准则时, 观察不同层理倾角和不同围压下岩石试件的破坏模式是非常重要的。一个理想的失效准则不仅应能预测失效时的应力状态, 而且应能预测失效模式。各向异性岩石在三轴压缩下的破坏模式受应力方向和围压的影响。因此, 它比各向同性岩石要复杂得多。McLamore等^[12]、Niandou等^[13]详细描述了横观各向同性岩石在不同围压下的破坏模式。Tien等^[14]将横观各向同性岩石的破坏简化为两种模式: (1)沿不连续面滑动, (2)穿切不连续面断裂。Tien等^[15]

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-08-16

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0905); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505001)资助

作者简介: 张亮, 博士研究生, 主要从事寒区岩石力学测试与分析。E-mail: zhangliang@lzb.ac.cn

通信作者: 牛富俊, 研究员, 主要从事寒区岩土工程与热融灾害方面研究。E-mail: niufujun@lzb.ac.cn

开发了一种合成层状岩石的样品制备技术。合成层状岩石的整体力学性质与横观各向同性天然岩石的力学性质非常相似,并借助该技术证明围压对层状岩石的各向异性是存在影响的。现有的研究通常考虑了围压对岩石的强化作用,而忽视了围压对层状岩石破坏模式的影响,即应力诱导各向异性多数情况下被忽视。

纵观目前的研究现状,对冻融条件下,层状岩石力学性质的研究缺乏层理结构方向的针对性,对冻融损伤模型和损伤力学性质的研究较少,且大多局限于单轴应力状态,不考虑围压的影响^[16-17]。这使得层状岩石的实际破坏强度与高围压下的预测值差异较大。因此,本文着重研究了围压和冻融损伤对层状岩体各向异性的耦合效应。另外,层状岩石强度与围压通常被视为简单的线性关系,这与实际情况不同^[18-19],基于非线性强度理论的抗压强度预测还有待进一步发展。

由于目前我国很多处在层状岩石分布区的寒区工程项目,如隧道、边坡、矿山等很多都正在规划和建设中。在寒冷的气候条件下,FT会导致岩石出现层理结构性损伤,因此,研究冻融过程及其对层状岩石物理力学性质的影响对于这些工程的稳定性分析是必要的^[20]。本文以寒区岩石工程为背景,研究了不同层理倾角层状砂岩的剪切强度与冻融次数和围压的关系。结合相应条件下岩石破坏模式特征图,综合分析了冻融损伤与应力诱导的耦合作用对层状岩石各向异性的影响。分析了层状岩石冻融损伤的力学特性,讨论了层状岩石的各向异性特征,为寒区层状岩石工程冻融灾害的分析和防治提供了理论支持。

1 试验概况

试验所用岩石选取 G317 国道昌都段沿线黄褐色砂岩,其密度为 $3.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。根据国际岩石力学学会标准,将试样加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱形。所有样品长度误差小于 2 mm,抛光后两端不均匀度在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。端面垂直于轴线,最大偏差小于 0.25° ,试样层理面与轴线的夹角分别为 0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 和 90.0° 。为了尽量减少试样不均匀性对试验结果的影响,所有样品都是从同一岩石上不同方向采集的。在开放式饱水系统中进行了冻融循环试验。每个 T 循环的温度变化程序设置如下:5 h 将温度从 $+20^\circ\text{C}$ 降低至 -20°C ,保持约

3 h,然后再用 5 h 将温度从 -20°C 升高至 $+20^\circ\text{C}$ 并保持约 3 h。冻融循环单个梯度循环次数设置为 10 次,一共 4 个梯度,共计 40 个冻融循环。图 1 显示了由冻融循环引起层状砂岩试件主体中产生的一些新微裂纹。随着冻融循环次数的增加,岩石首先在表面沿层理出现微小裂隙,并逐渐发育,微裂纹扩展,宏观裂纹或断裂产生。FT=40 时,已有部分裂隙贯穿层理面。

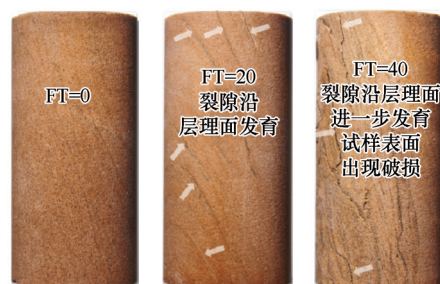


图 1 试样冻融损伤特征

Fig. 1 Freeze-thaw damage characteristics of samples

试验设备为中国科学院冻土工程国家重点实验室岩石三轴试验系统(GCTS)。试验围压分别设定为 0、5、15、25 和 40 MPa。在四个应力水平的试验过程中,每个应力水平的围压保持不变,然后通过位移控制方法施加轴向力。加载速率为 $0.01 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,直至试样断裂。试验得到了不同层理倾角岩样的应力应变曲线,以围压为 5 MPa 的应力条件下岩样在经历不同冻融循环次数后的试验结果为例,如图 2 所示,可以发现层状岩石表现出变形和强度的显著各向异性。为了减小试样的不均匀性对试验结果的影响,对相同试验条件下的三个试样进行重复试验,去掉离散性较大的试验结果,取其余试样强度平均值作为该试验条件下岩样的强度值。

2 层状岩石的破坏模式分析

层状岩石是横观各向同性岩石,在不同的层理倾角下,表现出不同的破坏模式。层状岩石的破坏模式可分为四类。第一类破坏模式为穿切层理面剪切破坏。岩石基体被裂隙面切割,断裂面与岩石的层理面相交。第二类破坏模式为沿层理面剪切破坏。这是一种典型的层状岩石破坏类型。宏观裂纹沿试件层理方向局部形成,剪切破坏沿试件层理方向发生。第三类破坏模式为穿切层理面、沿层理面复合剪切破坏模式。试件两端形成大角度剪

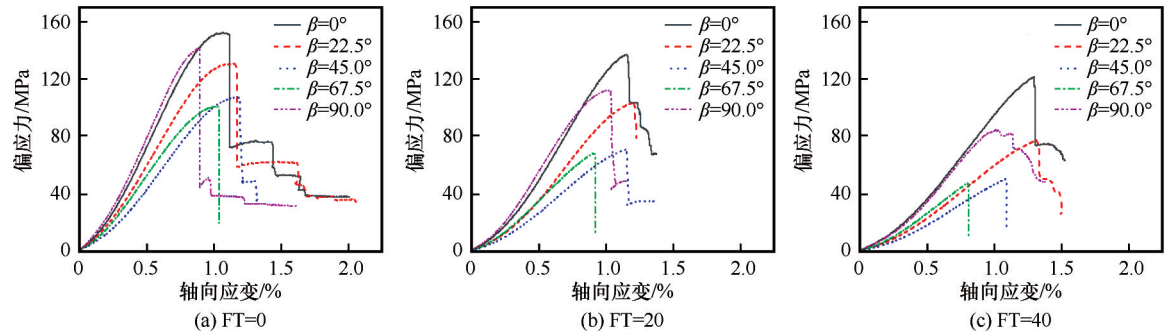


图2 层状砂岩应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of bedded sandstone

切断裂面后,随着应力的增加,剪切断裂面逐渐向多个层理方向渗透。第四类破坏模式为劈裂张拉破坏。沿层理方向的微裂纹首先出现在试件中,微裂纹发展并贯穿,劈拉破坏沿试件层理方向发生。

层状岩石的各向异性破坏特征是由于不同的层理倾角造成的。如图3~4所示,随着层理倾角的

增大(β 从 0° 增加至 90.0°),层状岩石的破坏模式由穿切层理面剪切破坏向沿层理面剪切破坏再向劈裂张拉破坏转变。

图3是未经历冻融循环的岩样在不同围压条件下的三轴压缩试验破坏模式图。在低围压条件下,破坏面不光滑,存在许多裂隙。随着围压的增加,

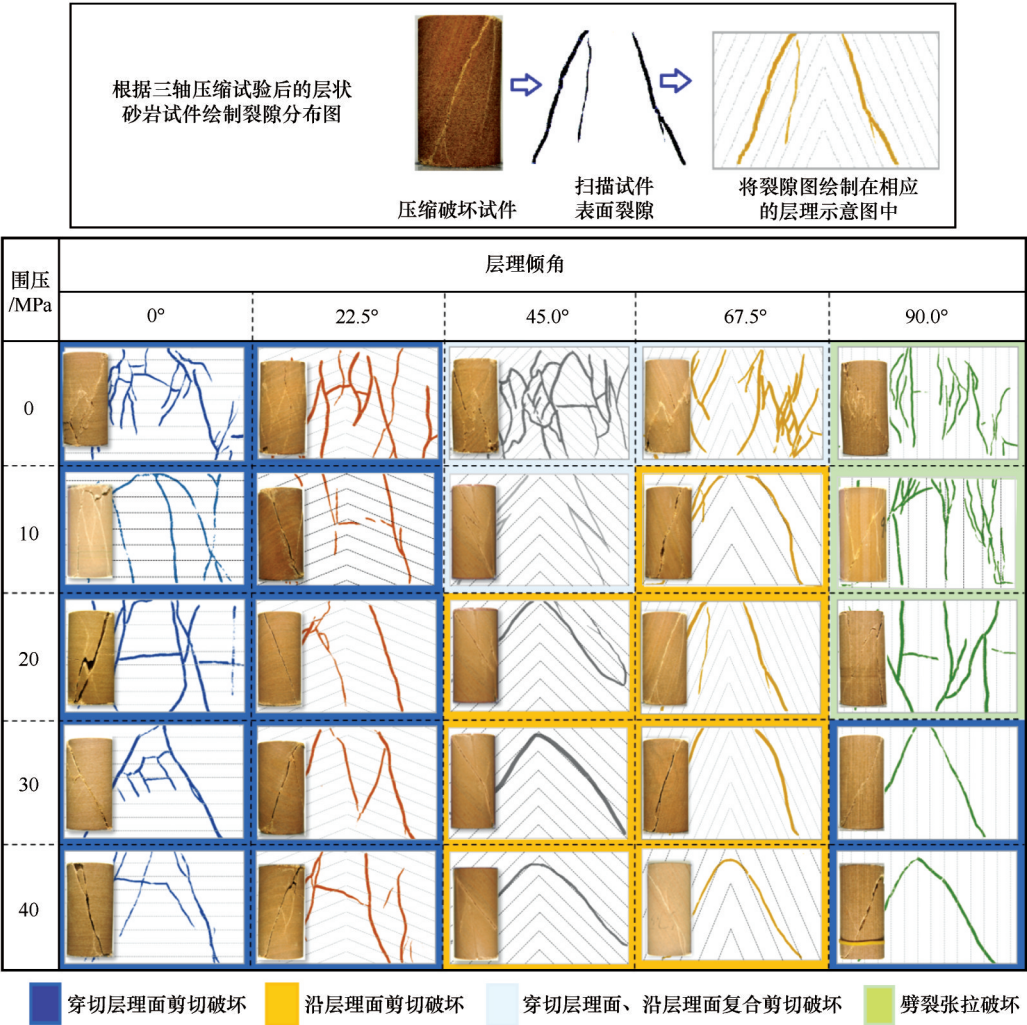


图3 不同围压条件下层状砂岩的破坏模式
Fig. 3 Failure modes of bedded sandstone under different confining pressures

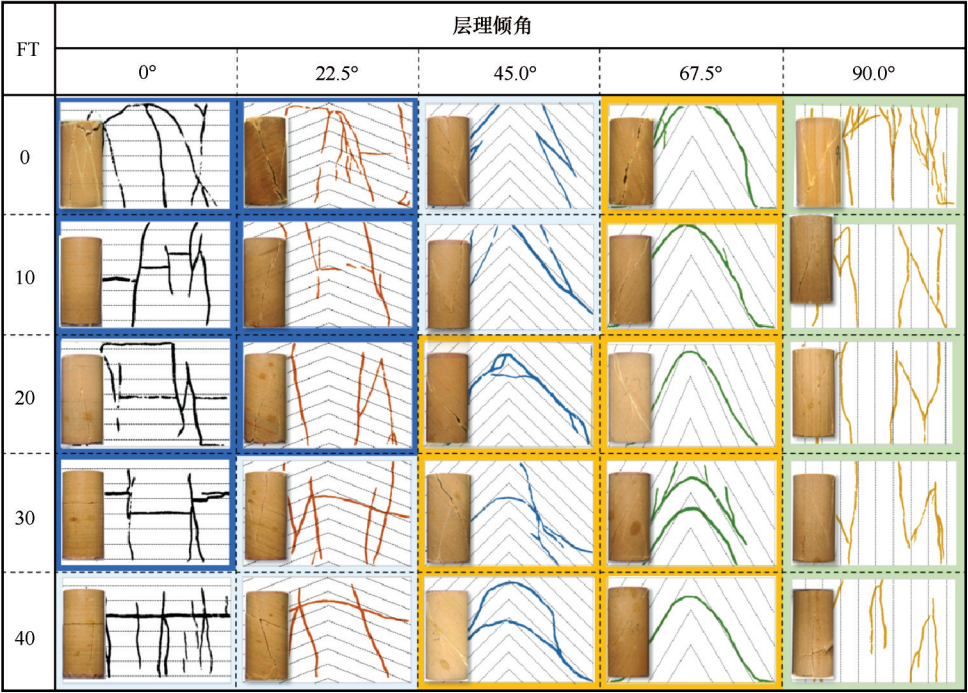


图4 经历不同冻融次数后层状砂岩的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of bedded sandstone after different freeze-thaw cycles

岩样中的裂缝数量明显减少,试样($\beta=45.0^\circ$ 与 67.5°)出现沿层理面的剪切滑移破坏;试样($\beta=0^\circ$ 、 22.5° 、 90.0°)出现穿切层理面的剪切滑移破坏。结合Tien^[15]关于合成层状岩石三轴试验的变形特性研究对围压与层状岩石的破坏模式影响进行分析,层状岩石相邻层的强度和刚度存在差异,当围压升高时,其相邻层的强度与刚度差异变大,岩石韧性行为降低,脆性行为增强。韧性材料的特性,会抑制层面间的滑动;脆性材料的特性则更倾向于层面间的滑动。这表明,围压越高,沿层理面剪切破坏特征越明显,这也是与各向同性岩石的主要区别。

图4是以围压为5 MPa的应力条件下为例,岩样在经历不同冻融次数后的三轴压缩试验破坏模式图。冻融循环会对岩石的破坏模式产生显著的影响,由于冻融损伤使层理面产生裂隙,使岩石的破坏特征更加趋向于沿层理面的剪切、劈拉破坏。与围压对各向异性破坏模式影响不同的是,冻融损伤会使 90.0° 层理倾角试样更易发生劈拉破坏。

3 不同层理倾角砂岩强度受冻融与围压的影响

3.1 冻融循环对层状砂岩强度的影响

冻融循环条件下,层状砂岩强度变化情况如图

5所示。可以发现,随着冻融循环次数的增加,不同层理倾角砂岩的强度均呈线性衰减。通过对比图5中不同层理倾角砂岩强度随冻融次数衰减的速率证明,层理倾角越接近于各向同性岩石三轴剪切破坏面与水平面夹角 $45^\circ+\varphi/2$ (φ 为岩石摩擦角),如 $\beta=45.0^\circ$ 和 67.5° 时,岩石试件强度受冻融影响越大,其中 $\beta=67.5^\circ$ 的岩石试件,单轴抗压强度在40次冻融循环后降低57.9%。反之,层理方向趋向于水平或垂直,如 $\beta=0^\circ$ 或 90.0° 时,强度受冻融影响较小,其中 $\beta=0^\circ$ 的岩石试件,单轴抗压强度在40次冻融循环后降低14.5%,趋向于各向同性砂岩受冻融影响的强度变化规律。

对比图5中不同围压条件下,各层理倾角的砂岩试件强度随冻融次数衰减的速率可以发现,强度衰减速率会不同程度地受到围压的影响。层理方向 $\beta=0^\circ$ 或 90.0° 时,随着围压的升高,砂岩试件强度随冻融次数衰减的速率明显增大。如 $\beta=0^\circ$ 的岩石试件在经历40次冻融循环后, $\sigma_3=0$ MPa应力条件下,强度降低14.5%; $\sigma_3=40$ MPa应力条件下,强度降低26.4%。层理方向 $\beta=45.0^\circ$ 和 67.5° 时,围压对强度衰减速率影响不明显。

3.2 围压对经历不同冻融次数后层状砂岩强度的影响

由上文的分析可知,层状岩石的抗压强度除了

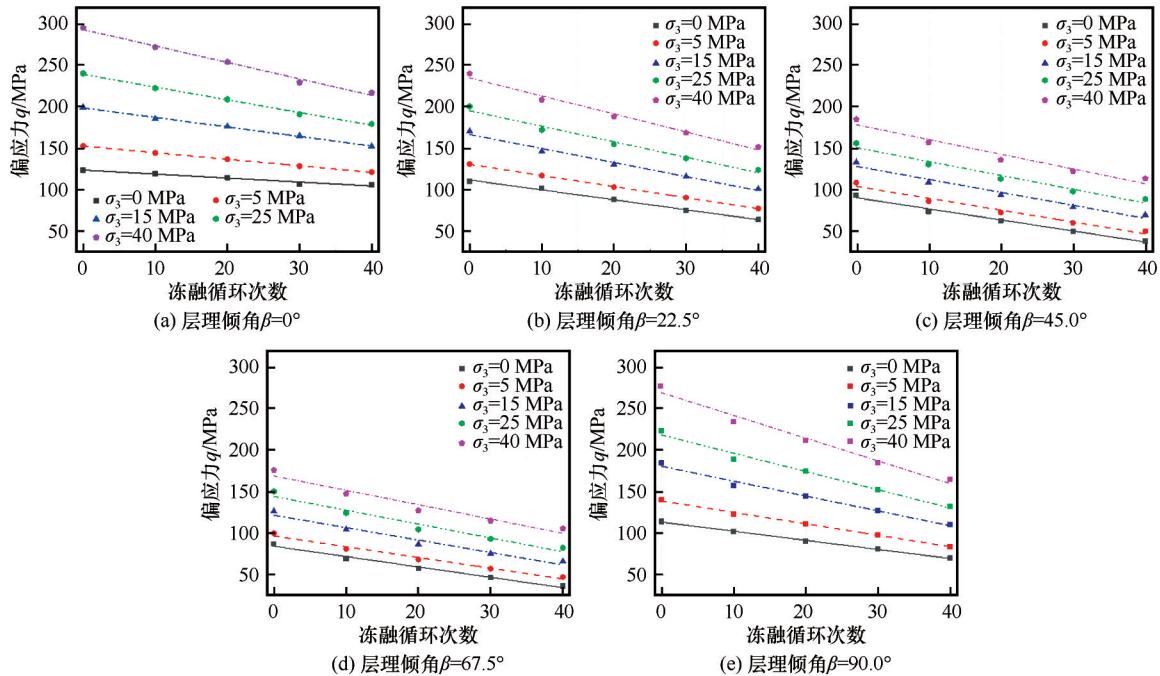


图5 三轴抗压强度与冻融循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between triaxial compressive strength and freeze thaw cycles

与其层理倾向和由冻融循环引起的冻融损伤程度相关外,也与所处应力条件密切相关。层状砂岩强度随围压变化情况如图6所示。可以发现,随着围压的增大,不同层理倾角砂岩的强度均呈非线性增强,且围压越大,岩石冻融前后的强度差值越大。同样,围压对层状砂岩强度的影响也是与层理方向相关的。层理方向趋向于水平或垂直,其冻融前后的强度差值受围压影响显著。如 $\beta=0^\circ$ 和 90.0° 的岩石试件,在 $\sigma_3=40$ MPa应力条件下,冻融前后的强度差值比 $\sigma_3=0$ MPa应力条件下的强度差值分别提高了4.30倍和2.51倍。当层理倾角接近 $45.0^\circ+\varphi/2$,如 $\beta=45.0^\circ$ 和 67.5° 时,冻融前后的强度差值受围压影响不明显。

4 层状岩石的强度各向异性特征

4.1 层状砂岩在 p - q 平面上的临界状态线

不同冻融循环次数条件下的层状砂岩的最佳拟合临界状态曲线(CSL)如图7所示。由图7可以看出,CSL受冻融循环影响显著。层状岩石因为层理倾角的不同,其强度值会在一定的区间内分布。其分布规律表现为,随着平均应力 p 的增大,偏应力 q 的分布区间逐渐扩大。以冻融前后岩石的CSL分布区间为例。随着平均应力 p 的增大,40次冻融后,岩石偏应力 q 的分布区间扩大的程度明显低于未冻融前。这表明,随着冻融循环次数的增加,由应力

条件变化而引起岩样强度差异会降低。不同冻融循环次数条件下的层状砂岩的最佳拟合CSL是一组非线性曲线。不同冻融循环次数条件下的CSL的斜率是不同的,具体为: $k_{FT=40} < k_{FT=30} < k_{FT=20} < k_{FT=10} < k_{FT=0}$,并且剪切强度 q 与平均压力 p 之间的关系可以用幂函数表达。

4.2 不同应力条件下冻融对层状砂岩强度各向异性的影响

为了对层状岩石的各向异性有直观和定量的描述,借鉴Pietruszczak等^[21-24]提出的各向异性理论中各向异性系数 η 的定义和分析($\eta=q_\beta/q_b$,其中 q_β 为某层理倾角岩样剪切强度; q_b 为所有层理倾角岩样剪切强度的最佳拟合值)。

可以发现,随着层理倾角的增大,各向异性系数先减小,后增大。当 β 接近 0° 时,层状岩石的各向异性系数达到最大值;当 β 在 50.0° 和 60.0° 之间时,层状岩石的各向异性系数值降到最低。各向异性系数最大值与最小值的差值的变化规律在一定程度上可以反映层状岩石各向异性的变化规律,其差值越大,各向异性越强。由图8可知,在不同的冻融循环条件下,层状岩石各向异性存在显著差异。对比图8不同种围压条件下,冻融循环对岩石各向异性曲线变化规律的影响可以发现,如图8(a)所示,岩石初始各向异性($\sigma_3=0$ MPa的应力条件下,不存在应力诱导各向异性)在经历冻融循环后提高最显

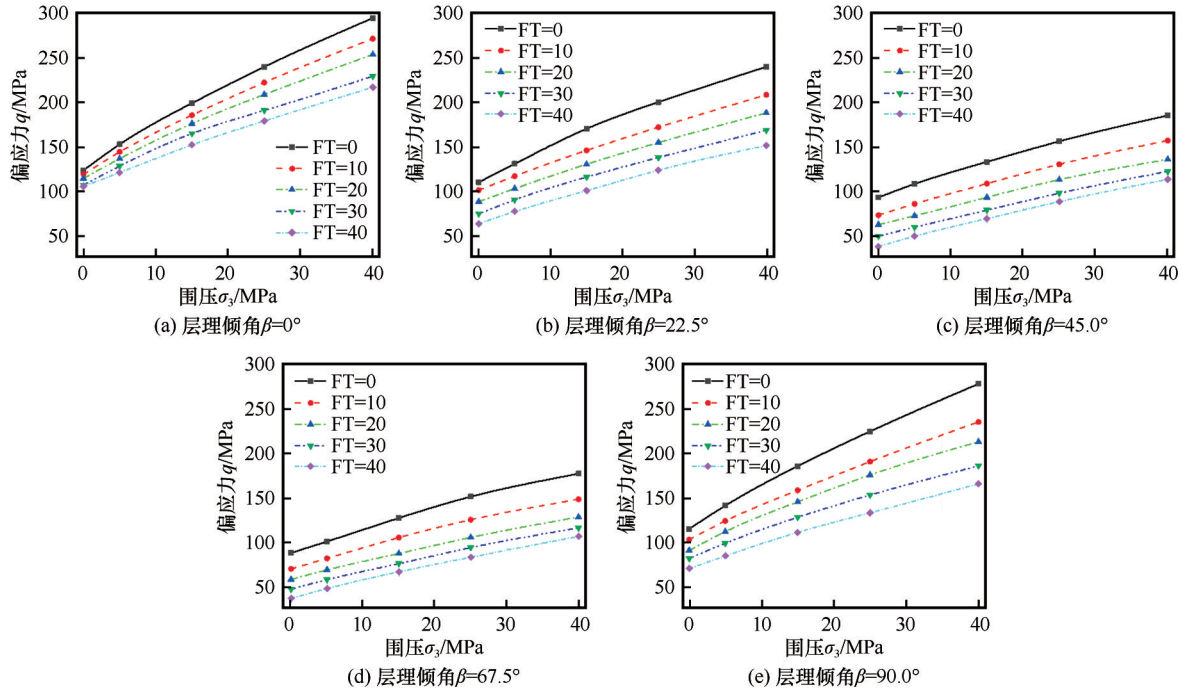


图6 三轴抗压强度与围压的关系

Fig. 6 Relationship between triaxial compressive strength and confining pressure

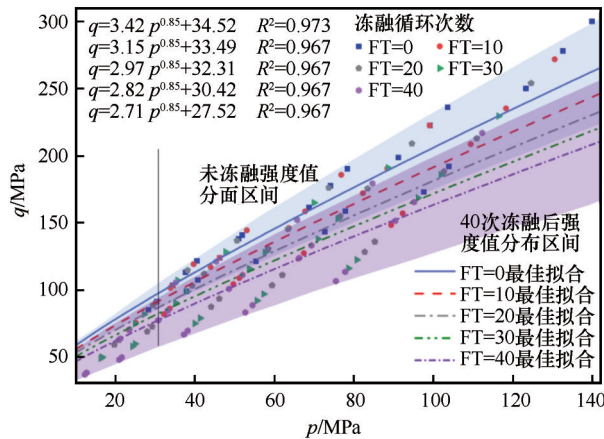


图7 经历不同冻融次数后层状砂岩的临界状态曲线

Fig. 7 Critical state lines of bedded sandstone after different freeze-thaw cycles

著。随着围压的增大,冻融循环对岩石各向异性的影响逐渐降低。结合第3章节中层状岩石的破坏模式,分析该试验现象的主要原因是,在未冻融循环条件下,当试件层理倾角接近最大剪应力平面对应的角度时,围压会使层状岩石更容易发生沿层理面的剪切破坏;当试件层理倾角与最大剪应力平面对应的角度差异较大时,围压会抑制层状岩石沿层理面发生滑移、劈拉破坏,使层状岩石更容易发生穿切层理面的剪切破坏,这使得层状岩石的各向异性增强。围压对层状岩石各向异性的影响与层状岩

石的初始各向异性的关系在下一节进行分析。

4.3 经历不同冻融次数后围压对层状砂岩强度各向异性的影响

不同应力条件下,层状砂岩剪切强度各向异性系数变化情况如图9所示。与冻融损伤对层状砂岩剪切强度各向异性系数的影响规律相比,围压对层状砂岩剪切强度各向异性系数的影响规律表现得更加复杂。围压会对层状砂岩剪切强度各向异性产生影响,且影响的程度与冻融循环次数直接相关。通过对比图9中,经历不同冻融次数后(对应不同初始各向异性)的层状岩石的各向异性曲线变化规律可以发现:层状岩石的应力诱导各向异性与其初始各向异性直接相关。如图9(a)所示,对于初始各向异性较低的层状岩石,围压的增大会增强其各向异性;随着初始各向异性的增大,如图9(d)所示,围压的影响逐渐减弱;随着初始各向异性的继续增大,如图9(e)所示,围压的增大会抑制其各向异性。综合分析可知:初始各向异性较低的层状岩石,围压的增大会增强其各向异性;反之,围压的增大会抑制其各向异性。结合第3章节中层状岩石的破坏模式,分析该试验现象的主要原因是,冻融循环会使层状岩石层理界面出现微细观裂隙等结构性损伤,使得层状岩石在更大的层理倾角范围内发生沿层理面的剪切滑移和劈拉破坏,从而使层状岩石的

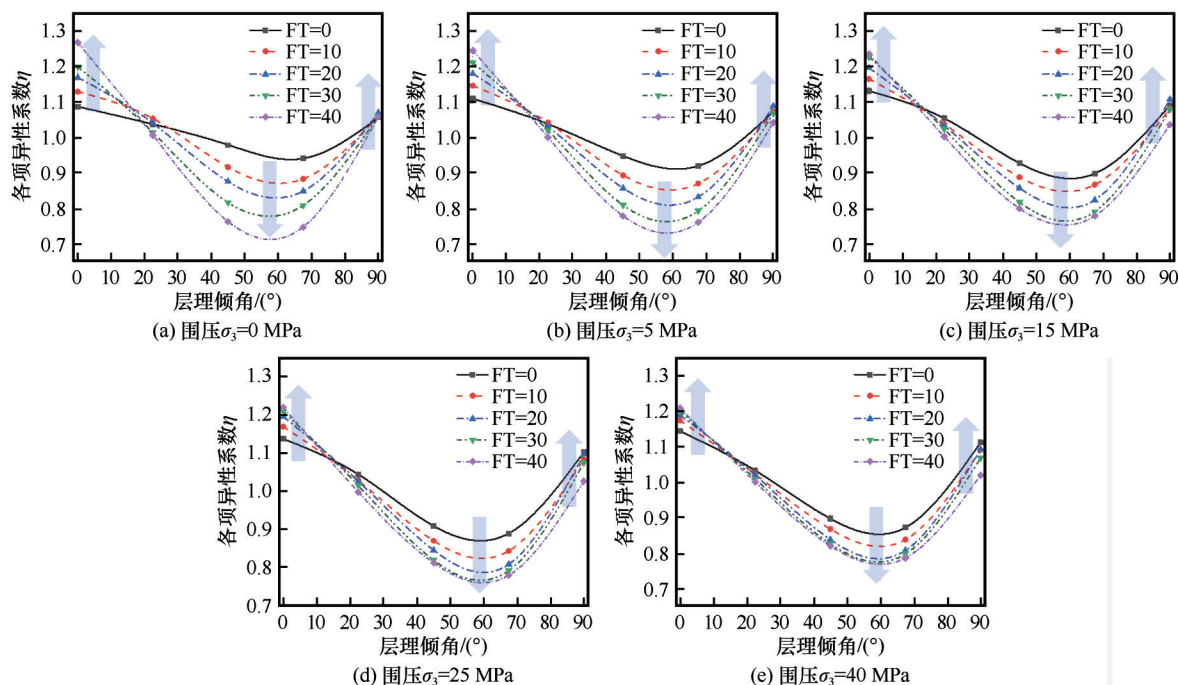


图8 强度各向异性与冻融循环次数的关系

Fig. 8 Relationship between strength anisotropy and freeze thaw cycles

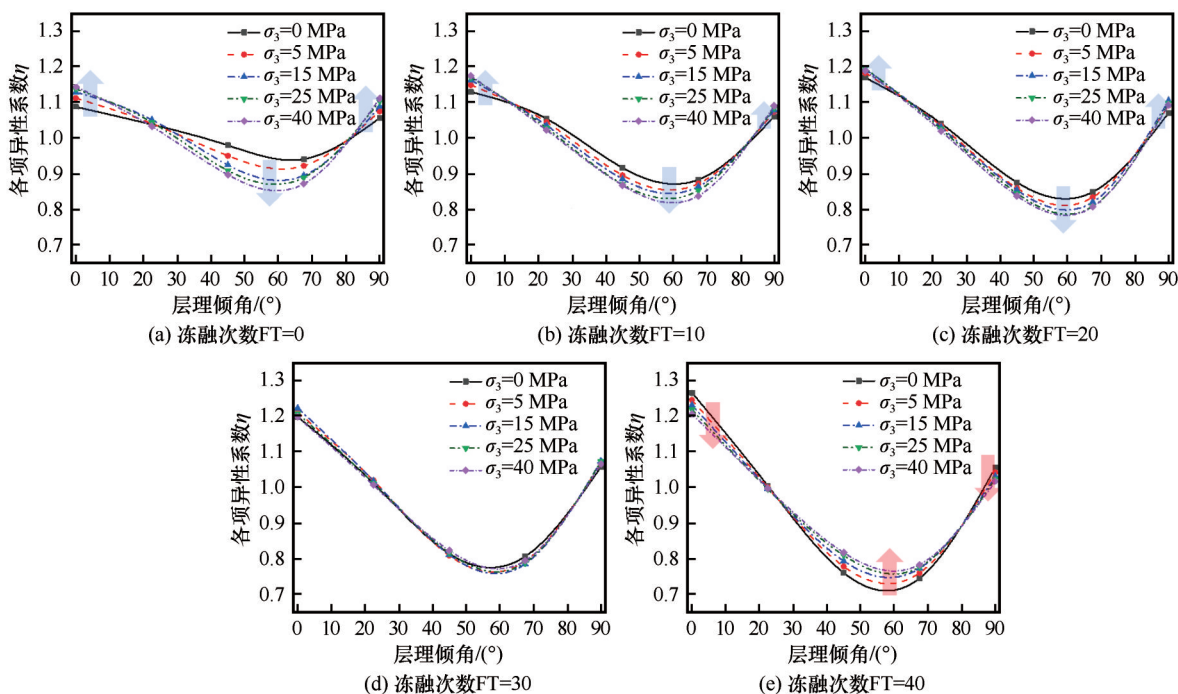


图9 强度各向异性与围压的关系

Fig. 9 Relationship between strength anisotropy and confining pressure

初始各向异性显著增强。而围压的升高会使层状岩石趋向于在最大剪应力平面发生剪切破坏,对于层理倾角不在最大剪应力平面夹角范围内的岩样,会抑制其沿岩层里面发生剪切滑移和劈拉破坏,即层状岩石在初始各向异性较大的条件下,围压的增

大会抑制其各向异性。

5 讨论

本文试验研究的岩石取自 G317 国道昌都段沿线的层状砂岩,旨在以层状砂岩为例,对具有层理

结构的岩石物理力学性质进行分析。层状岩石的破坏模式和强度特性与各向同性岩石表现出显著的差异。根据对已有的层状岩石工程地质灾害考察可以发现,如图10所示,破坏模式主要为沿层理面的剪切滑移破坏和劈拉破坏。层状岩石(如:砂岩、板岩、千枚岩、片麻岩等)在我国西部地区,尤其

是青藏高原广泛分布。这些地区很多位于高海拔地带,由于温差较大,会使岩石经历冻融循环。复杂的应力条件与冻融损伤都会对层状岩石的各向异性产生影响。未来在青藏高原开展与层状岩石有关的工程建设应充分考虑其变形和强度的各向异性特征,以提高工程的稳定性和适应能力。

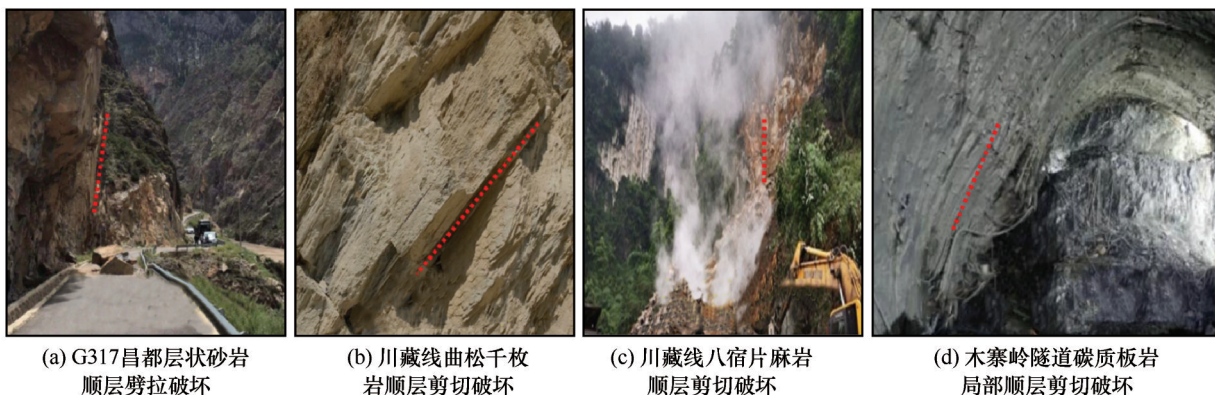


图10 工程中层状岩石的破坏特征

Fig. 10 Failure characteristics of bedded rock in engineering

本文试验结果表明,层状岩石由于层理倾向的差异,表现出物理力学性质的各向异性,且各向异性会受到外部作用的影响。层状岩石的各向异性在实际工程中是不可忽视的,例如在隧道工程中,隧道轴线方向与岩石层理方向的夹角对隧道开挖后围岩破坏模式和支护结构的承载方式有很大影响。在评价边坡整体稳定性时,采用相同的岩石材料参数进行极限平衡、强度折减分析或应力变形分析,得到的分析结果与实际情况明显不一致。因此,对寒区与层状岩石相关的工程设计和建设过程中,其强度和变形的预测应充分考虑岩石的层理方向以及外部的温度条件和应力条件,综合分析冻融损伤与应力条件对层状岩石材料参数的耦合影响,对不同工程项目选址、施工方案的确定的研究和分析。

岩石的各向异性研究是一个多因素耦合的复杂问题,存在一定的不确定性,现有的各向异性强度准则多集中于经验分析,缺乏数学层面的理论推导,无法从机理上对岩石的各向异性进行概念化描述和相关外部因素(如冻融循环、应力条件等)内在联系的表达。因此,建立岩石结构的空分布函数,定量化分析各因素对岩石各向异性的影响,提出相应的各向异性强度准则和本构关系是下一步研究的前进方向。

6 结论

层状砂岩由于具有天然层理结构,易沿层理面发生剪切破坏,剪切强度明显降低。岩石层理倾角的不同决定了其破坏模式的差异,进而导致了层状岩石强度的各向异性。

层状岩石工程相关的设计施工过程中需注意, $40.0^{\circ} < \beta < 70.0^{\circ}$ 区间内,易发生沿层理面剪切滑移的脆性破坏,岩石剪切强度显著降低,且强度受冻融影响衰减速率较高,应尽量避免或合理选择设计方案与施工方法。

冻融损伤会使层状岩石相邻层面产生裂隙,降低层面间的连接强度。随着冻融循环次数的增加,层状岩石的破坏模式受到显著影响,从而使岩石的强度降低,初始各向异性增强。

冻融损伤增大了岩石层理结构间物理力学性质的差异,从而影响了应力诱导的各向异性。随着冻融循环次数的增加,围压对层状岩石各向异性的影响由增强变为抑制。

冻融损伤与应力条件对层状砂岩的各向异性影响是耦合的,对层状岩石的各向异性强度理论和本构关系的进一步研究应该考虑两者的耦合影响。

参考文献(References):

- [1] Yi Shujian, Cui Peng, Wu Chunhao, et al. Control effects of suture zones on distribution of soft rock and its engineering in-

- fluence along Sichuan-Tibet Railway corridor [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 275-288. [易树健, 崔鹏, 伍纯昊, 等. 川藏铁路廊道板块缝合带对软岩分布的控制效应及其工程影响[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 275-288.]
- [2] Liu Quansheng, Liu Xuewei. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 305-320. [刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(2): 305-320.]
- [3] Liu Quansheng, Huang Shibing, Kang Yongshui, et al. A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 120: 96-107.
- [4] Shen Xiaoke, Zhu Jiebing, Wang Xiaowei, et al. Triaxial mechanical properties and strength prediction model of mica quartz schist under freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(3): 83-89, 96. [沈小轲, 朱杰兵, 王小伟, 等. 冻融循环下云母石英片岩三轴力学特性与强度预测模型[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(3): 83-89, 96.]
- [5] Yavuz H, Altindag R, Sarac S, et al. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(5): 767-775.
- [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: 98-102.
- [7] Khanlari G, Abdilor Y. Influence of wet-dry, freeze-thaw, and heat-cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(4): 1287-1300.
- [8] Huang Shibing, Liu Quansheng, Cheng Aiping, et al. A statistical damage constitutive model under freeze-thaw and loading for rock and its engineering application [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 145: 142-150.
- [9] Xu Xinmu, Zhang Yaoping, Fu Yuhua, et al. Shear failure characteristics of rock-like specimens containing joints under freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(2): 483-494. [徐新木, 张耀平, 付玉华, 等. 冻融循环下含节理类岩石试样剪切破坏特性[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(2): 483-494.]
- [10] Zhou Keping, Li Jielin, Xu Yujuan, et al. Experimental study of NMR characteristics in rock under freezing and thawing cycles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(4): 731-737. [周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(4): 731-737.]
- [11] Özbek A. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(2): 595-609.
- [12] McLamore R, Gray K. The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1967, 89(1): 62.
- [13] Niandou H, Shao J F, Henry J P, et al. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(1): 3-16.
- [14] Tien Yongming, Kuo Mingchuan. A failure criterion for transversely isotropic rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(3): 399-412.
- [15] Tien Yongming, Tsao P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(6): 1001-1012.
- [16] Zhang Huimei, Meng Xiangzhen, Yang Gengshe. A study on mechanical properties and damage model of rock subjected to freeze-thaw cycles and confining pressure [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 174: 103056.
- [17] Liu Wei, Zeng Yawu, Xia Lei, et al. Anisotropy of layered rock mass under uniaxial compression [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(1): 145-149, 235. [刘伟, 曾亚武, 夏磊, 等. 单轴压缩下层状岩体的各向异性研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 145-149, 235.]
- [18] Zuo Jianping, Li Hongtao, Xie Heping, et al. A nonlinear strength criterion for rock-like materials based on fracture mechanics [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(4): 594-599.
- [19] Li Xiulei, Chen Chen, Ling Tianqing. A nonlinear true triaxial strength criterion for rocks considering principal stress space characteristics [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(11): 127-135. [李修磊, 陈臣, 凌天清. 一种考虑主应力空间的岩石非线性真三轴强度准则[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(11): 127-135.]
- [20] Pietruszczak S, Krucinski S. Description of anisotropic response of clays using a tensorial measure of structural disorder [J]. *Mechanics of Materials*, 1989, 8(2/3): 237-249.
- [21] Pietruszczak S, Krucinski S. Considerations on soil response to the rotation of principal stress directions [J]. *Computers and Geotechnics*, 1989, 8(2): 89-110.
- [22] Pietruszczak S. On inelastic behaviour of anisotropic frictional materials [J]. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1999, 4(3): 281-293.
- [23] Pietruszczak S, Mroz Z. Formulation of anisotropic failure criteria incorporating a microstructure tensor [J]. *Computers and Geotechnics*, 2000, 26(2): 105-112.
- [24] Zhang Shujuan, Lai Yuanming, Zhang Xuefu, et al. Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(3): 295-302.

Effects of freeze-thaw damage and confining pressure on anisotropy strength of bedded rock

ZHANG Liang^{1,2}, NIU Fujun¹, LIU Minghao¹, JU Xin^{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: Bedded rock has a significant bedding plane structure. The direction of bedding plane determines the anisotropy of rock, and the strength of anisotropy is determined by the difference of rock physical properties and the connection strength of adjacent layers, its bedding structure nature of the vulnerability to the impact of weathering effects such as freeze-thaw (FT) cycles. In this research, bedded sandstone specimens with different bedding dip angles were tested by rock triaxial test system (GCTS) after 0, 10, 20, 30 and 40 FT cycles and under confining pressures of 0, 5, 15, 25 and 40 MPa. The test results show that the FT cycles causes cracks in the rock bedding plane, and shear slip failure along the bedding plane is more likely to occur. After 40 times of FT cycles, the uniaxial compressive strength of the specimen with $\beta=0^\circ$ decreased by 14.5%, while the specimen with $\beta=67.5^\circ$ decreased by 57.9%, which enhanced the inherent anisotropy of the bedded rock. The influence of confining pressure on rock anisotropy is related to its inherent anisotropy, which shows that with the accumulation of freeze-thaw cycles, the stress-induced anisotropy of rock under confining pressure changes from initial enhancement to inhibition. This study provides theoretical basis for the design, construction and safe operation of bedded rock engineering in cold regions.

Key words: bedded rock; freeze-thaw cycle; stress induction; confining pressure; anisotropy

(责任编辑: 温智)