

冻融循环条件下单裂隙岩体损伤破坏特征研究

王川¹, 汪志恒², 孟祥龙¹, 常建新³, 李勇^{2,3*}

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南

³山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

Email: *yongli@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年8月27日; 录用日期: 2020年9月9日; 发布日期: 2020年9月16日

摘要

我国疆域辽阔, 在西部高海拔地区, 昼夜温度变化明显, 冻融循环现象普遍存在, 而冻融作用会严重影响到裂隙岩体的物理力学性质, 大大增加岩土工程的建设难度, 而目前正在进行建设的川藏铁路部分区段正处于高寒区。因此, 研究冻融作用对于裂隙岩体强度与稳定性的影响, 越来越具有实际的工程应用价值。但是, 国内外相关研究大多集中在理论分析与室内试验方面, 而基于数值模拟的计算分析仍鲜有报道。故本文依托FLAC^{3D}有限差分软件, 并基于应变软化本构模型, 对历经不同冻融循环次数后的具有不同裂隙倾角的岩体进行了单轴抗压模拟试验, 而后利用模拟试验过程中获得的数据信息, 从应力-应变曲线、峰值应力、残余应力以及塑性区发展规律等多个角度对裂隙岩体在冻融荷载耦合作用下的损伤破坏特征进行了分析与总结。研究表明, 冻融作用会明显降低裂隙岩体的强度, 加速破坏进程, 并且其影响力会随冻融循环次数的增加而愈加凸显。

关键词

裂隙岩体, 冻融循环, 应变软化, 岩体损伤机理, 数值模拟

Damage Characteristics of Rock Specimens with Single Flaw under the Action of Freeze-Thaw Cycles

Chuan Wang¹, Zhiheng Wang², Xianglong Meng¹, Jianxin Chang³, Yong Li^{2,3*}

¹Shandong Hi-Speed Group, Jinan Shandong

²Geotechnical & Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan Shandong

³School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Email: *yongli@sdu.edu.cn

*通讯作者。

文章引用: 王川, 汪志恒, 孟祥龙, 常建新, 李勇. 冻融循环条件下单裂隙岩体损伤破坏特征研究[J]. 土木工程, 2020, 9(9): 901-912. DOI: 10.12677/hjce.2020.99095

Abstract

China has a vast territory. In the high altitude area of western China, the temperature changes obviously day and night, and the freeze-thaw cycle is ubiquitous. The freeze-thaw action will seriously affect the physico-mechanical properties of fractured rock mass and greatly increase the difficulty of geotechnical engineering construction. At present, a part of the Sichuan-Tibet railway under construction is just in the high and cold region, therefore, it is of more and more practical engineering application value to study the influence of freeze-thaw action on the strength and stability of fractured rock mass. However, most of the relevant previous studies focus on theoretical analysis and laboratory tests, while the computational analysis based on numerical simulation is still rarely reported. Owing to these reasons, this paper is based on FLAC^{3D} (finite difference software and strain softening constitutionality model), and uniaxial compressive simulation tests have been carried out for rock masses with different fracture dips after different freeze-thaw cycles. Then the damage and failure characteristics of fractured rock mass under the action of freeze-thaw cycles and load coupling have been analyzed and summarized by the stress-strain curve, peak stress, residual stress and the development law of plastic zone by using the data obtained in the simulation test. The results show that the freeze-thaw effect can significantly reduce the strength of fractured rock mass and accelerate the failure process, and its influence will become more prominent with the increase of freeze-thaw cycles.

Keywords

Fractured Rock Mass, Freeze-Thaw Cycles, Strain Softening, Mechanism of Rock Mass Damage, Numerical Simulation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国对西部地区的开发力度逐渐加大,依次建设完成青藏公路、青藏铁路以及西气东送等多个重点项目,而举世瞩目的川藏铁路工程也被正式提上日程。在西部地区,尤其是青藏高原地区,地质地貌种类复杂多样,开发难度极大,面临包括地形高差、地震频发、山地自然灾害以及冻融作用等诸多地质问题。而其中,冻融作用是影响高寒地区工程设计与建设的关键因素,有关研究表明,冻融时的冻胀力,低温时岩石强度的变化以及融化后岩石的强度损失,是灾害产生的主要源头[1] [2]。因此,研究岩石在冻融循环作用下损伤破坏机制具有重要的工程意义。

冻融作用对岩石力学性质的影响早已引起了国内外研究学者的兴趣。研究学者普遍认为,对于冻融环境中的岩体损伤破坏,是因为岩体受到天然缺陷的影响,冻融损伤的过程实际上是反复的冻胀荷载作用引起的[3] [4] [5]。因此在现阶段,有关研究大多集中于岩石损伤的识别和鉴定,以及通过对比岩体试验前后的物理力学指标变化,对岩体的损伤状况作出评价。在岩体冻融损伤的识别方面,贾海梁等[6]基于 SEM 技术,观测了冻融环境下砂岩孔隙环境,据此对岩石微观损伤定量分析进行了研究和探索;任建喜等[7]基于 CT 扫描技术,利用自制的三轴 CT 加载系统,获得了冻结裂隙岩石在加卸荷过程中的 CT 图

像,并分析了其演化结果;李杰林等[8]选取寒区花岗岩为试样,利用核磁共振技术,得到了岩样在不同循环次数后的内部微观结构图像;Park等[9]以闪长岩,玄武岩和凝灰岩作为样本,在实验室模拟冻融环境,并根据CT图像和SEM图片,研究了岩石的内部微观变化。在试验测试及理论方面,贾海梁等[10]通过试验对砂岩的孔隙率进行了研究,并建立了冻融作用下的损伤模型;Gao等[11]从耗能的角度研究了砂岩在荷载作用下的破坏机理,并基于此建立了岩石冻融演化模型;Nicholson等[12]对10种沉积岩进行冻融试验,并提出了4种岩石劣化模型。

数值模拟在近年来也被大量用来解决岩体裂隙扩展方面的问题,Bahaaddini等[13]采用PFC软件对平行多节理的岩体模型进行了模拟,总结出5种岩体破坏模式;李树忱等[14]基于弹性损伤力学,利用FLAC^{3D}软件对深部岩体的破裂演化过程进行了模拟分析;汪子华等[15]利用FLAC^{3D}研究了节理条数和倾角对节理岩体力学特性的影响;申艳军等[16]从理论角度推导出低温下裂隙岩体的冻胀演化解析式,并以Comsol-Multiphysics软件进行了验证。由上述内容不难发现,在试验和理论方面,对于冻融作用对岩石力学性质影响的研究已经相当成熟,而在数值模拟方面却报道不多。因此,本文将基于FLAC^{3D}中的应力-应变软化模型,对单裂隙岩体在冻融荷载耦合作用下的损伤与破坏模式进行模拟与分析。

2. 本构模型与基本参数的选取

2.1. 本构模型的选择

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)是由Itasca公司开发的连续介质仿真计算软件,有二维和三维计算程序两个版本,其中三维计算程序FLAC^{3D}相较于其他软件,采用“混合离散法”模拟塑性破坏和流动,精准度更高;以动态运动方程进行求解,使得模拟过程不存在数值上的障碍;利用显示差分法求解微分方程,便利对系统演化过程的跟踪。

在FLAC^{3D}计算程序中,内置有12种岩土本构模型,在进行数值模拟的本构模型选择时,要根据工程材料的已知力学属性和本构模型的适用范围进行综合考虑。对于岩体裂隙扩展过程的模拟,多采用Mohr-Coulomb模型,其具有计算效率高且模拟效果较好的特点,但是该模型无法直接计算出塑性应变,即不能够模拟岩石达到峰值强度后的应变软化现象,并且无法获得岩石材料的残余强度。而FLAC^{3D}提供的应力-应变软化模型则很好地解决了这个问题,该模型实际上是Mohr-Coulomb模型的衍生,在弹性变形阶段两者的计算结果是相同的,而在达到屈服极限之后,应力-应变软化模型能够很好地模拟出应变软化现象。所以,本文最终选用应变软化模型来进行数值模拟过程。

2.2. 基本参数的确定

在对于模拟试验,所需的参数包括密度 ρ ,体积模量 K ,剪切模量 G ,粘聚力 c ,内摩擦角 φ ,抗拉强度 σ_t 。在FLAC^{3D}中,使用的变形参数为体积模量 K 和剪切模量 G ,这是因为 K 表征材料的抗体积变形能力, G 表征材料的抗剪切变形能力,而通常提供的变形参数是杨氏模量 E 和泊松比 ν ,因此需要转化,转换关系如式(1)和式(2)所示:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \#(1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \#(2)$$

本试验采用的粗砂岩初始力学参数见表1。

对于冻融循环后弹性模量的变化,阎锡东等[17]根据Mori-Tanaka方法建立了相关的关系式:

Table 1. Initial mechanical parameters of coarse sandstone
表 1. 粗砂岩初始力学参数

弹性模量(E/GPa)	泊松比 ν	密度($\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力(c/MPa)	内摩擦角($\varphi/^\circ$)	抗拉强度(σ_t/MPa)
18	0.3	2500	21	45	1.2

$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + \pi\alpha} \quad \#(3)$$

其中 E' 为冻融循环后的弹性模量, E 为初始弹性模量, α 为裂纹密度参数, 表示为 $\alpha = N(a + n(\Delta a))^2$, a 为裂隙半长度, N 为单位面积上平均半长度为 a 的裂纹的数量。

由于试验采用应变软化模型, 因此还需要确定岩石参数和峰后应变变化参量之间的关系, 由张帆等[18]的研究可知, 在应变软化过程中, 粘聚力的值会随应变变化参量的增大而逐渐减小, 而内摩擦角的大小几乎保持不变。则基于上述内容, 同时参考田延哲等[19]实验室试验的数据和结果, 可对各级次冻融循环后的数值模型参数进行计算拟定, 共分为四种情况, 冻融次数分别为 0、30、60、90, 对应各参数如下表 2 所示。

Table 2. Numerical model parameters
表 2. 数值模型参数

试验编号	冻融次数(次)	密度($\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量(K/GPa)	剪切模量(G/GPa)	粘聚力(c/MPa)	内摩擦角($\varphi/^\circ$)
1	0	2500	15	6.9	21	45
2	30	2500	12.5	5.8	17.5	45
3	60	2500	9.2	4.2	16	45
4	90	2500	6.7	3.1	15	45

3. 基于 FLAC^{3D} 的单轴压缩试验模拟

3.1. 试验方案与模型建立

为同时考虑在冻融环境下不同裂隙倾角对岩体强度和破坏特征的影响, 数值模拟试验同时引入了冻融循环次数和裂隙倾角两个变量。取裂隙岩体的裂隙倾角分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° , 为了便于对比, 还设置了一组完整模型试样。而后对应上述每种模型, 分别考虑其在进行了 0、30、60、90 次冻融循环后的情况进行单轴压缩试验模拟, 并记录相应的应力-应变曲线以及塑性区扩展分布图等。

数值模型采用 CAD 和 ANSYS 软件建立, 根据岩石单轴压缩试验的尺寸比例要求, 取模型的尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。裂隙置于模型的中心位置, 且为非贯通型裂隙, 即从模型的一侧面起, 垂直穿入模型 20 mm , 裂隙与模型侧面共面部分的长度同样设为 20 mm , 裂隙厚度为 0.4 mm 。如图 1 所示。

在 CAD 软件中按上述尺寸将模型几何绘制出后, 将其导入到 ANSYS 软件中进行网格的划分。网格划分完毕后, 完整岩体模型含 134 个节点, 393 个单元; 裂隙倾角为 0° 时岩体模型含 10,334 个节点, 46,226 个单元; 裂隙倾角为 30° 时岩体模型含 11,268 个节点, 52,070 个单元; 裂隙倾角为 60° 时岩体模型含 11,940 个节点, 55,694 个单元; 裂隙倾角为 90° 时岩体模型含 11,596 个节点, 53,901 个单元。图 2 为其中一种工况下岩体模型的网格划分的情况。

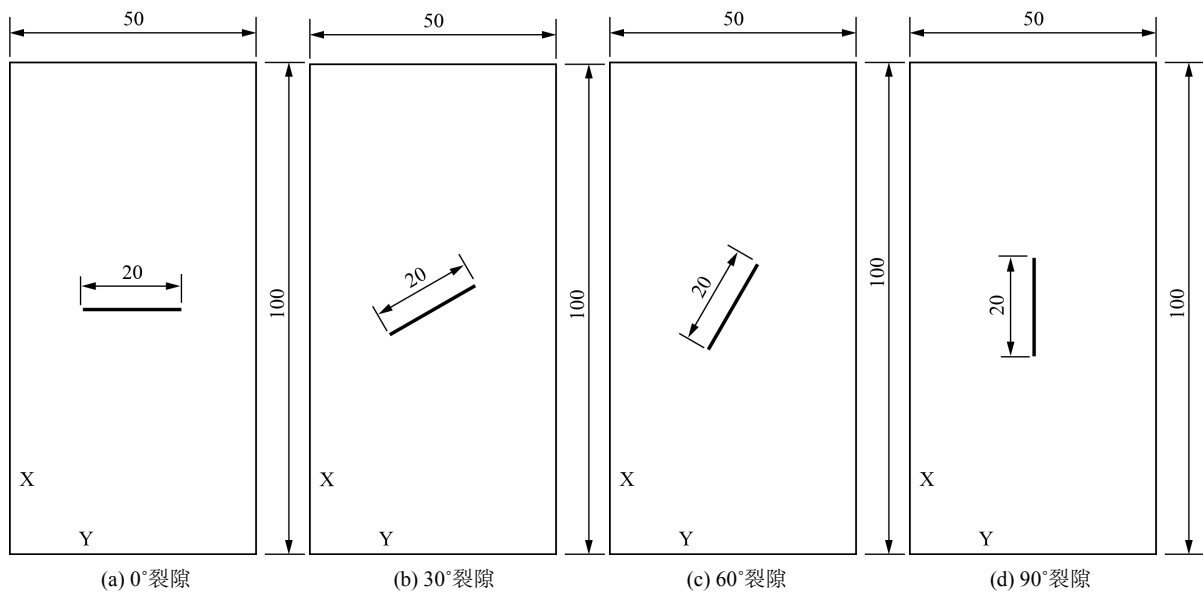


Figure 1. The models with different fracture dip (Unit: mm)
图 1. 不同裂隙倾角模型(单位: mm)

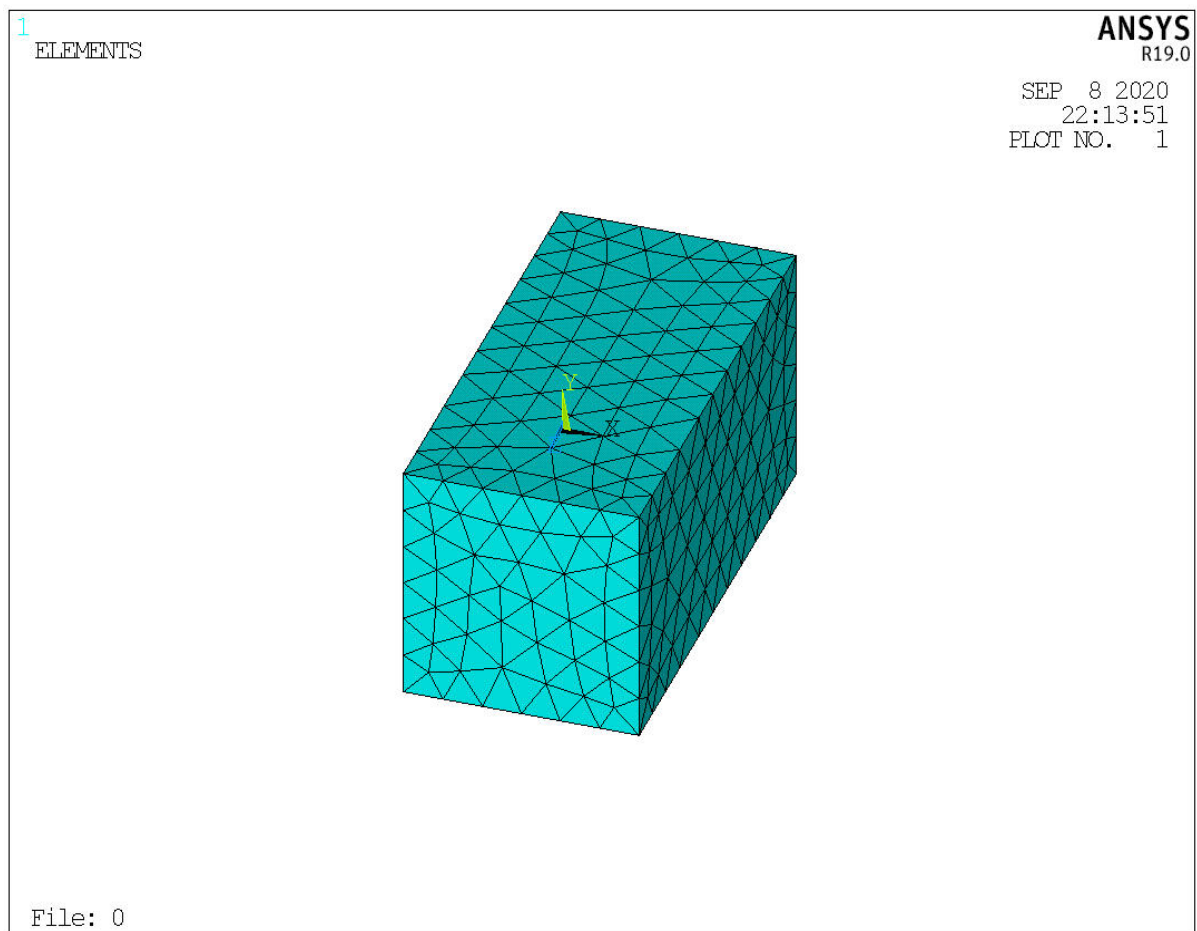


Figure 2. Meshing
图 2. 网格划分

3.2. 边界条件与监测点的设定

把网格划分后的模型导入到 FLAC^{3D} 软件中, 并将模型各面进行分组, 以便后续边界条件和外荷载的施加与设定。而后将模型的岩石部分定义为应变软化模型, 并赋予相应的力学性质参数, 至于裂隙部分, 则设为空模型。最后, 在模型顶面和底面施加荷载, 侧面为自由面, 采取的加载方式为轴向位移加载, 大小为 0.0001 mm/s, 则后续内容中所提到的运算步实际指的是试验过程中的加载时间, 即 1 步等于数值模拟试验中的 1 s。以裂隙倾角为 0° 时的模型为例, 边界条件设定后的模型见图 3。

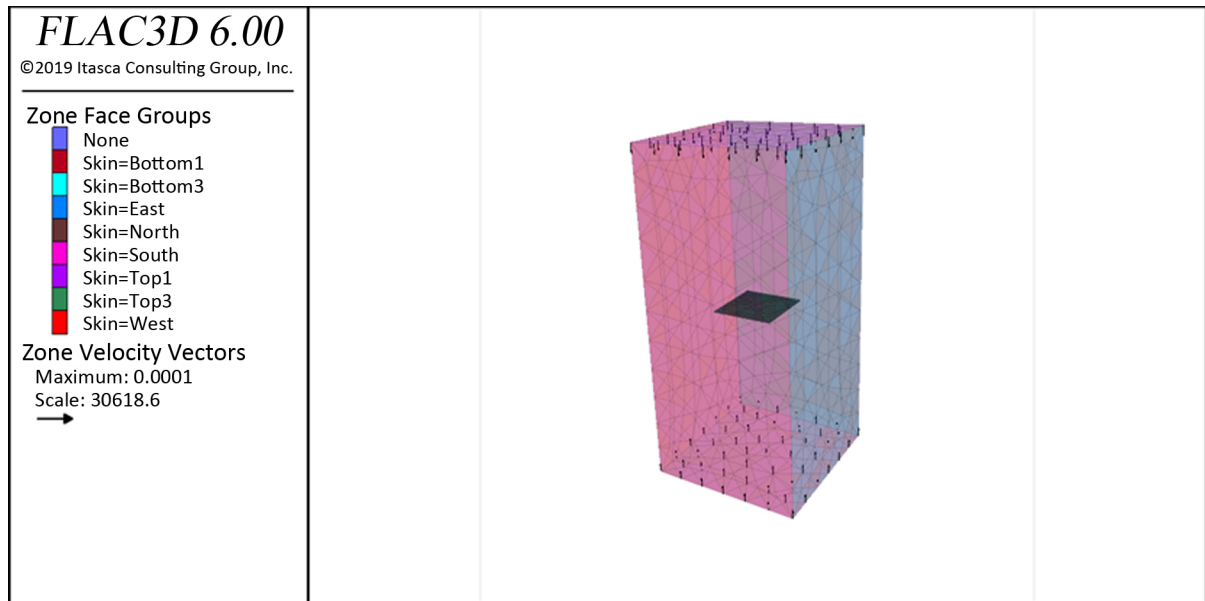


Figure 3. The numerical model after boundary conditions are set
图 3. 边界条件设定后的模型

为了获得岩体模型的应力 - 应变曲线, 故在模型顶部设监测点, 分别为 $P_1(25,25,100)$, $P_2(0,0,100)$ 。其中, 在 P_1 点处同时监测其 z 向位移和应力; 在 P_2 点处仅监测其 z 向应力。根据有限差分法的相关理论, 可知顶面各点处的位移可以认为是相同的, 故可用 P_1 点处的位移来代表整个顶面的位移。至于应力, 由于顶面各点处应力均不相同, 故采用平均应力进行代替。

4. 结果分析

4.1. 不同冻融循环次数下裂隙岩体的损伤破坏特征

根据实验方案, 在每种裂隙倾角条件下均分别进行了 4 组实验, 但限于文章篇幅, 在下述部分内容中仅列出了其中几组具有代表性的数据结果。为了分析结果更加全面, 将从应力 - 应变关系曲线、峰值强度、残余强度以及塑性区分布等三个不同方面进行对比总结。

1) 应力 - 应变关系曲线

以完整模型和裂隙倾角为 30° 时模型的模拟结果为例, 将得到的各级冻融循环次数下的岩体应力 - 应变曲线综合绘制在同一坐标系下, 并进行对比分析, 相关图像如下图 4、图 5 所示。

根据上述曲线, 经过对比可知在历经不同冻融循环次数后, 模拟结果中岩体的应力 - 应变曲线的形态是基本相同的, 但可以明显看到峰值应力、残余应力以及弹性段的倾角都随冻融循环次数的增加而相应减小。

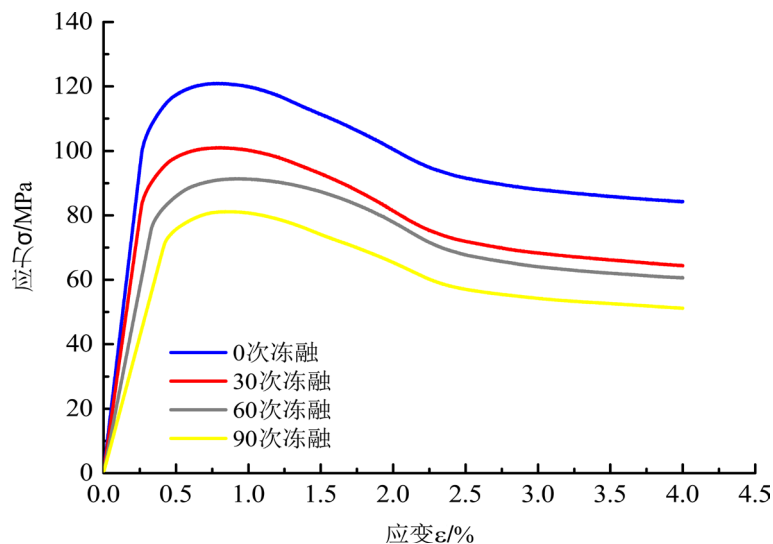


Figure 4. Stress-strain curve of the complete rock mass
图 4. 完整岩体应力 - 应变关系曲线

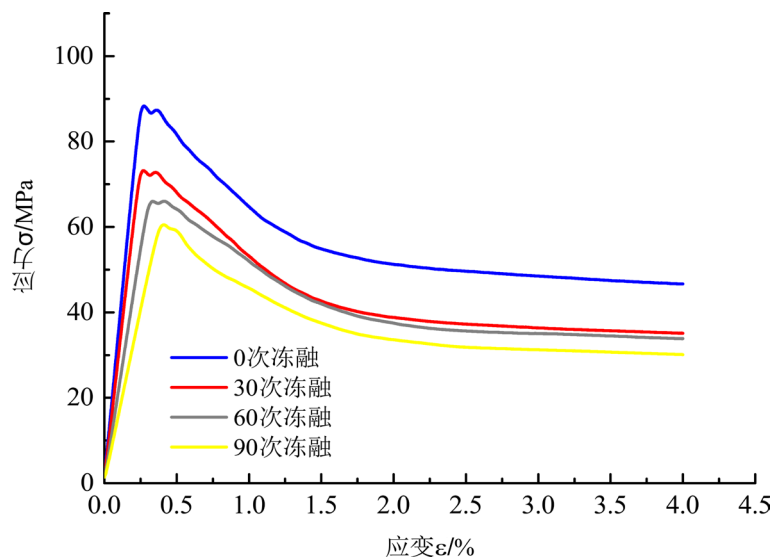


Figure 5. Stress-strain curve of rock mass with 30° fractured
图 5. 裂隙倾角为 30°时岩体应力 - 应变关系曲线

2) 峰值强度与残余强度

将每种工况下模拟所得到的岩体峰值强度和残余强度提取出来，并以冻融循环次数为横轴，峰值强度和残余强度竖轴分别绘制点线图，进行对比分析。如图 6 和图 7 所示。

根据上述曲线，经过对比可知，岩石的峰值强度和残余强度都会随着冻融循环次数的增加而发生明显的下降。此外，经过计算可以得到，在历经 30 次、60 次以及 90 次冻融循环后，对于完整岩石，其峰值强度损失率分别为 16.46%，24.44%，32.85%，残余强度损失率分别为 23.58%，28.08%，39.26%；对于 0°裂隙岩体，其峰值强度损失率分别为 16.74%，24.44%，31.01%，残余强度损失率分别为 24.50%，27.58%，34.75%；对于 30°裂隙岩体，其峰值强度损失率分别为 17.08%，25.23%，31.45%，残余强度损失率分别为 24.73%，27.52%，35.46%；对于 0°裂隙岩体，其峰值强度损失率分别为 16.67%，24.24%，31.11%，残余强度损失率分别为 26.79%，29.46%，37.06%；对于 90°裂隙岩体，其峰值强度损失率分别

为 16.64%，24.16%，29.90%，残余强度损失率分别为 22.38%，27.86%，38.22%。

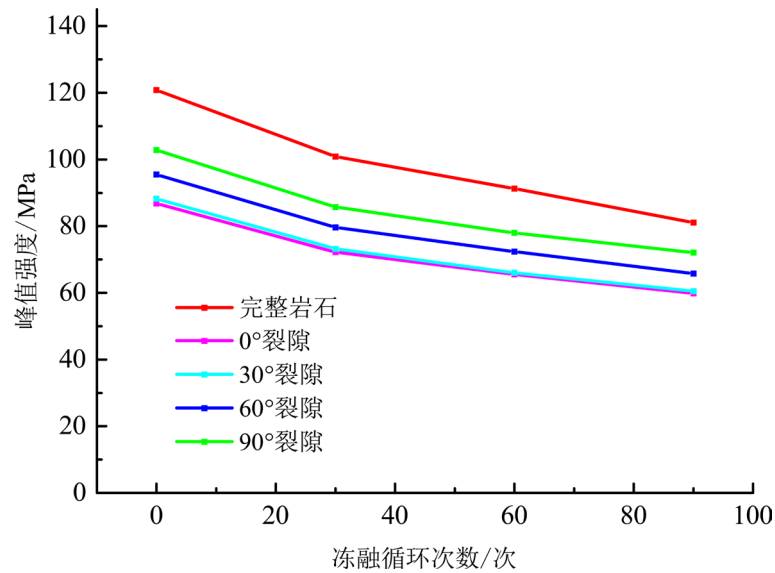


Figure 6. Relationship between peak strength and the number of freeze-thaw cycles
图 6. 峰值强度与冻融循环次数关系图

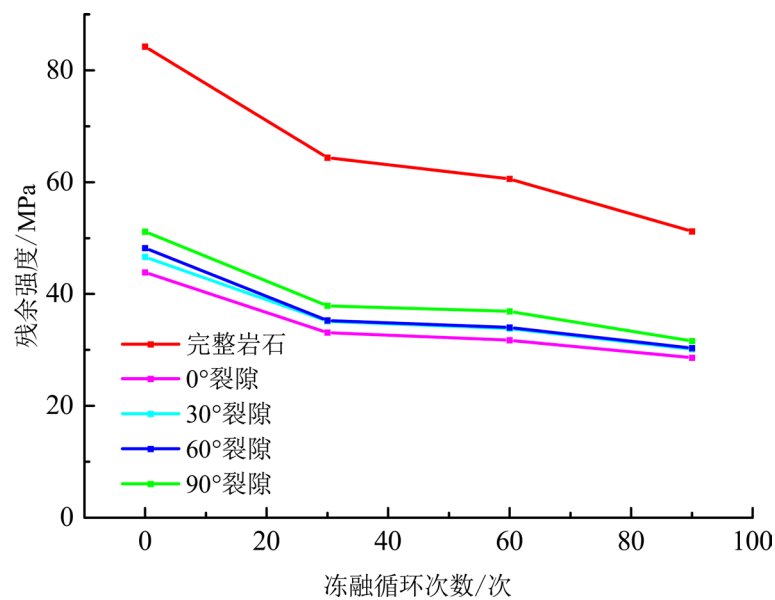


Figure 7. Relationship between residual strength and the number of freeze-thaw cycles
图 7. 残余强度与冻融循环次数关系图

对比分析上述峰值强度和残余强度在各级冻融循环之后的损失率，可知峰值强度和残余强度在前 30 次冻融循环后都发生了明显的下降，在之后峰值强度的下降趋势渐于平缓，而残余强度在中间 30 次循环过程中几乎没有变化，再之后才又开始缓慢降低。

3) 塑性区扩展分布情况

通过分析塑性区的发展与分布情况可以更好的总结裂隙岩体在冻融荷载耦合作用下的破坏特征，由于试验组数较多，此处仅列出裂隙倾角为 30°的岩体在经过 0 次(即无冻融作用)和 90 次冻融循环后，加

载过程中的塑性区的发展情况。如下图 8 和图 9 所示。

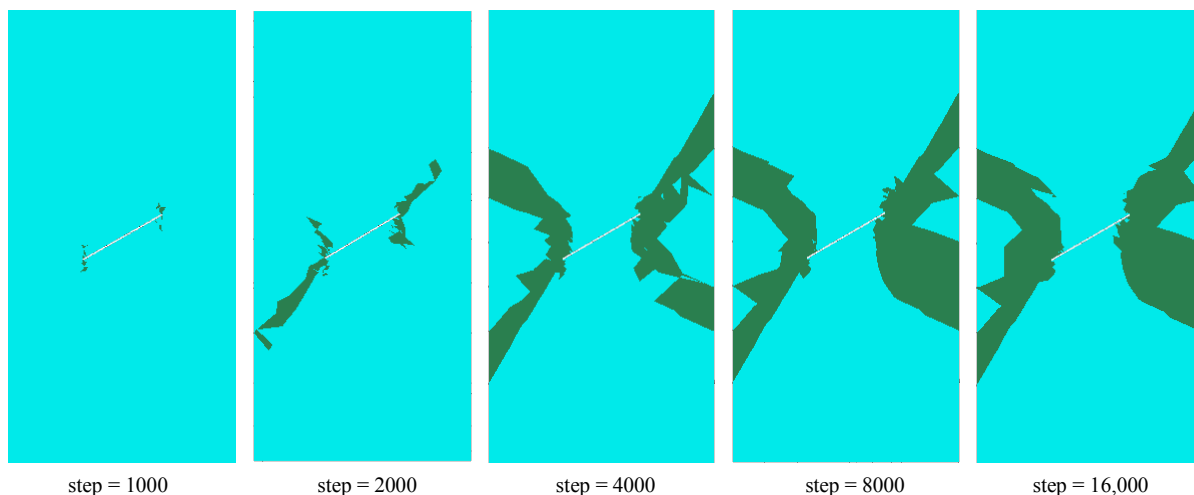


Figure 8. The plastic zone development of 30° fractured rock mass after 0 freezing-thawing cycles

图 8. 0 次冻融循环后 30°裂隙岩体塑性区开展情况

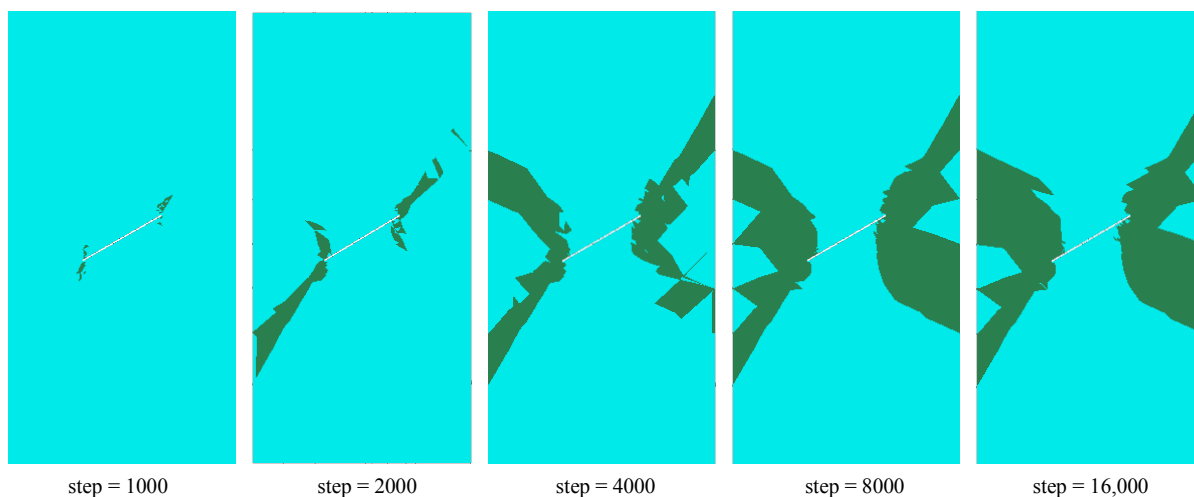


Figure 9. The plastic zone development of 30° fractured rock mass after 90 freezing-thawing cycles

图 9. 90 次冻融循环后 30°裂隙岩体塑性区开展情况

对比上述图片可知，冻融循环次数对于塑性区的发展规律不会造成影响。塑性区均是从裂隙的两个部端的上下两侧开始萌生，并分别沿着与水平面近似夹角为 45°与 135°的方向逐渐向外扩展，直至到达岩体侧壁，最终在岩体两侧形成以裂隙为中心的“W”型塑性区域，并造成岩体损伤破坏。不同的是，经历多次冻融后的裂隙岩体，其塑性区的发展速度有较为明显的提升，扩展范围也有一定程度的增大。

由上述可见，尽管所采用的数值模型无法将岩体在冻融循环作用下所受到的各种力学效应考虑在内，但相应的模拟结果已经从很大程度上反映出冻融循环作用对于岩石损伤破坏所造成的影响，满足了对比分析的基本要求。

4.2. 不同裂隙倾角下岩体的冻融损伤破坏特征

同样基于控制变量的思想进行对比分析，与分析冻融循环次数对于岩体的损伤破坏特征所采取的角度一样，将从应力 - 应变关系曲线、峰值强度、残余强度以及塑性区分布等三个不同方面进行总结。

1) 应力 - 应变关系曲线

以进行了 0 次(即无冻融作用)与 90 次冻融循环后的模拟结果为例,将得到的不同裂隙倾角条件下的裂隙岩体应力 - 应变曲线综合绘制在同一坐标系下,并进行对比分析,相关图像如下图 10 和图 11 所示。

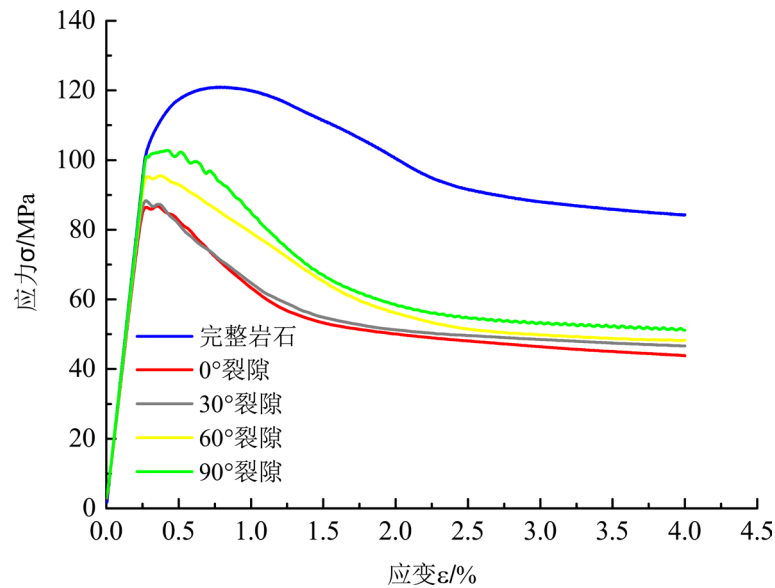


Figure 10. Stress-strain curve after 0 freeze-thaw cycles

图 10. 0 次冻融循环后应力 - 应变关系曲线

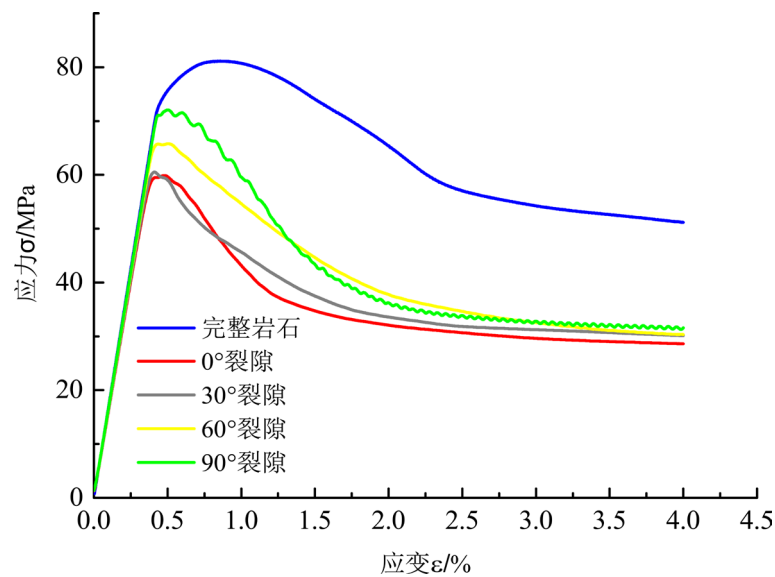


Figure 11. Stress-strain curve after 90 freeze-thaw cycles

图 11. 90 次冻融循环后应力 - 应变关系曲线

对比上述曲线可知,在同样的冻融循环次数条件下,各曲线的走势基本相同,但裂隙的存在会明显降低岩石的强度,0°裂隙倾角和 30°裂隙倾角的曲线几近相同,且较早到达强度峰值;不同倾角下的裂隙岩体的应力 - 应变关系曲线随着加载的进行而趋于重合。

2) 峰值强度与残余强度

相关曲线与上文图 6 和图 7 相同, 根据 4.1 相应部分对于峰值强度与残余强度的分析结果, 可知不同裂隙倾角下, 岩体强度的损失率十分接近; 0° 裂隙倾角和 30° 裂隙倾角对应的岩体峰值强度较小, 随着裂隙角度的增加, 峰值强度会有较为明显的回升。

3) 塑性区扩展分布情况

取历经 90 次冻融循环后的不同裂隙倾角岩体, 在模拟加载了 16,000 步后的塑性区发展情况为例, 进行对比分析, 如图 12 所示。

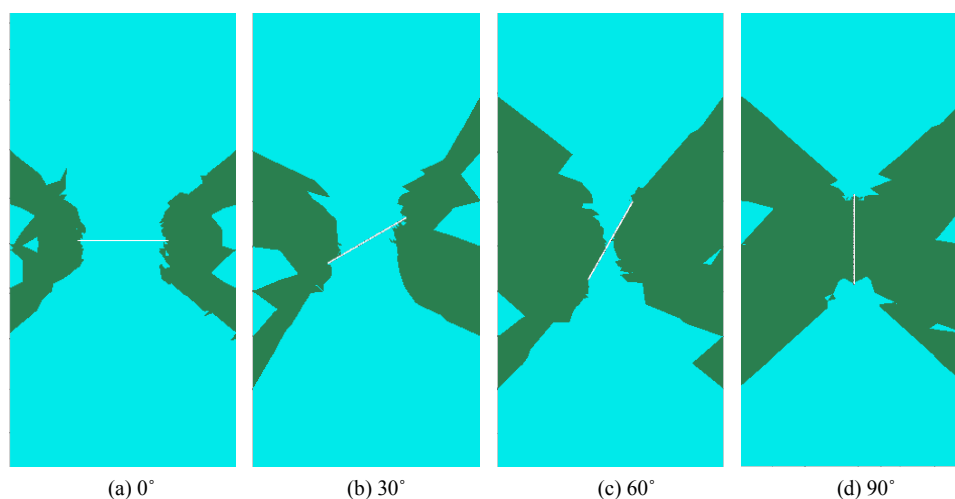


Figure 12. Plastic zones distribution of rock mass with different fracture dip angles after 90 freeze-thaw cycles

图 12. 90 次冻融循环后不同裂隙倾角岩体塑性区分布图

通过上图对比, 可知裂隙倾角对于塑性区的扩展范围具有十分明显的影响, 随着裂隙角度的增大, 塑性区的发展范围也随之增大, 但塑性区基本上均呈对称分布的“W”型结构, 证明不同裂隙倾角下岩体的损伤机理与破坏特征是一致的。

5. 结论

通过利用数值模拟方法, 分别对不同裂隙倾角下和不同冻融循环次数下的单裂隙岩体冻融损伤破坏特征进行综合对比分析, 可以得到以下结论:

1) 相同裂隙倾角条件下, 在历经不同冻融循环次数后, 岩体的应力 - 应变曲线形态是相同的, 但峰值应力、残余应力以及弹性段的倾角都随冻融循环次数的增加而相应减小。此外, 岩体峰值强度和残余强度在前 30 次冻融循环后下降明显, 之后峰值强度下降趋势渐于平缓, 而残余强度在中间 30 次循环过程中几乎没有变化, 之后又开始缓慢降低。

2) 相同冻融循环次数下, 不同裂隙倾角对岩体强度的影响程度有所差异, 0° 裂隙倾角和 30° 裂隙倾角对应的岩体峰值强度较小, 影响显著, 但随着裂隙角度的增加, 岩体峰值强度会有较为明显的回升。

3) 在冻融荷载耦合作用下, 裂隙岩体的破坏特征与常规条件下的规律是一致的, 但是冻融作用的存在会大大加速裂隙岩体的破坏进程。

基金项目

山东省交通厅科技发展计划(2019B47_1)和国家自然科学基金(51879149)。

参考文献

- [1] Winkler, E.M. (1968) Frost Damage to Stone and Concrete: Geological Considerations. *Engineering Geology*, **2**, 315-323. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(68\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(68)90010-0)
- [2] Inada, Y.K. and Yokota, K. (1984) Some Studies of Low Temperature of Rock Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **21**, 145-153. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)91532-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)91532-8)
- [3] 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测[M]. 西安: 陕西科学出版社, 1998: 1-90.
- [4] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, 1(1): 14-18.
- [5] 唐江涛, 裴向军, 裴钻, 荆翔. 冻融循环作用下岩石的损伤研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 101-105.
- [6] 贾海梁, 项伟, 谭龙, 张伟丽, 曾雯, 曹慎, 程超杰. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879-895.
- [7] 任建喜. 冻结裂隙岩石加卸载破坏机理 CT 实时试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 641-644.
- [8] 李杰林, 周科平, 张亚民, 许玉娟. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1208-1214.
- [9] Park, J., Hyun, C.U. and Park, H.D. (2015) Changes in Microstructure and Physical Properties of Rocks Caused by Artificial Freeze-Thaw Action. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **74**, 555-565. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0630-8>
- [10] 贾海梁, 刘清秉, 项伟, 张伟丽, 郎林智. 冻融循环作用下饱和砂岩损伤扩展模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3049-3055.
- [11] Gao, F., Cao, S.P., Zhou, K.P., Lin, Y. and Zhu, L.Y. (2020) Damage Characteristics and Energy-Dissipation Mechanism of Frozen-Thawed Sandstone Subjected to Loading. *Cold Regions Science and Technology*, **169**, Article ID: 102920. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102920>
- [12] Nicholson, D.T. and Nicholson, F. (2000) Physical Deterioration of Sedimentary Rocks Subjected to Experimental Freeze-Thaw Weathering. *Earth Surface Process and Landforms*, **25**, 1295-1307. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200011\)25:12<1295::AID-ESP138>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200011)25:12<1295::AID-ESP138>3.0.CO;2-E)
- [13] Bahaaddini, M., Sharrock, G. and Hebblewhite, B.K. (2013) Numerical Investigation of the Effect of Joint Geometrical Parameters on the Mechanical Properties of a Non-Persistent Jointed Rock Mass under Uniaxial Compression. *Computers and Geotechnics*, **49**, 206-225. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.10.012>
- [14] 李树忱, 冯现大, 李术才, 袁超, 李文婷, 孙倩. 深部岩体分区破裂化现象数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1337-1344.
- [15] 汪子华, 熊良宵. 含多组平行节理岩体的单轴压缩试验及数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(4): 36-40.
- [16] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 刘慧. 低温环境下含表面裂隙硬岩温度场及冻胀演化过程分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 521-529.
- [17] 阎锡东, 刘红岩, 邢闯锋, 李超. 冻融循环条件下岩石弹性模量变化规律研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2315-2322.
- [18] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 张勇慧. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 2651-2655.
- [19] 田延哲, 徐拴海. 冻融循环条件下岩石物理力学指标相关性分析[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(4): 24-27.