

季节性循环冻融下岩质边坡稳定性分析

王迪¹, 何玉蝶², 殷维^{2*}

(1. 湖南省自然资源事务中心; 2. 湖南省地质灾害调查监测所)

摘要:为探究循环冻融对岩质边坡稳定性的影响,以中国东北某矿山受季节性循环冻融影响的岩质边坡为研究对象,考虑 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4 种冻融温度梯度,探究 1, 3, 5, 7 次循环冻融下岩体力学特性劣化规律,并基于 MSDP 准则开展岩质边坡稳定性评价。研究表明:随着冻融温度梯度降低和循环冻融次数增加,试样内部冻缩加剧,试样抗压强度降低 2.9 %~20.3 %,抗拉强度降低 6.1 %~24.8 %,内聚力和内摩擦角分别降低 6.5 %~13.7 %、2.2 %~17.3 %;当冻融温度梯度固定时,试样拉压力学性能随循环冻融次数增加出现大幅度降低,再次回升后趋于稳定,3 次完整循环冻融下试样力学特性降幅最大。疲劳损伤作用下试样内部裂隙不断扩张发育,间断形的裂纹逐渐衍生贯通,裂纹数量随循环冻融次数的增加而增多,细观角度分析冻融对岩体强度劣化的实质是循环冻融下产生的疲劳损伤。基于 MSDP 准则下求算出的安全系数小于常规极限平衡法求算的安全系数。冻融温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、循环冻融 7 次时安全系数最低,循环冻融作用下,试样内部发生了不可逆的结构性损伤,试样强度劣化后抗滑力下降,边坡安全系数随之降低。计算结果可为循环冻融作用下岩质边坡稳定性评价提供参考。

关键词:循环冻融;温度梯度;抗压强度;抗拉强度;极限平衡理论;边坡工程;稳定性分析

中图分类号:TD854⁺.6

文章编号:1001-1277(2025)01-0069-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250111

引言

随着露天矿山的进一步推进,边坡稳定性成为制约露天矿山开采安全性的重要因素。相较于常规隐患而言,边坡失稳不仅会导致工期延后、维护成本增加,还直接威胁人民生命、财产安全^[1-2]。研究表明,影响工程岩质边坡稳定性的外因包括强降雨、冻融、渗流、强风化、循环振动等^[3]。其中,循环冻融对边坡稳定性的影响是通过强化内部节理裂隙形成内部损伤,从而劣化岩体强度,增加边坡失稳滑移风险。因此,开展季节性循环冻融对岩质边坡稳定性的影响研究,对中国北方寒冷地区的矿山边坡稳定性分析具有重要参考价值。

目前,边坡稳定性分析方法分为现场监测分析法、地质分析法、理论分析法和相似模拟法 4 类^[4]。其中,极限平衡法是理论分析法中最具代表性的方法。20 世纪 20 年代,FELLENIUS^[5]提出瑞典圆弧法后,BISHOP^[6]在 20 世纪 50 年代对圆弧法作了改进,提出安全系数定义;同时 JANBU^[7]充分考虑了条间法向力为水平作用力,通过极限平衡确定了安全系数;BELANDRIA 等^[8]运用极限平衡法,建立了边坡

节理裂隙分析模型,对安全系数进行准确求解;国内学者朱合华等^[9]和吴顺川等^[10]利用 Hoek-Brown 准则对岩质边坡失稳滑移规律进行探究;徐卫亚等^[11]运用极限平衡法求算出边坡支护加固力学角度的最佳位置;AUBERTIN 等^[12]在 Hoek-Brown 准则基础上提出了 MSDP (Miss schleiche drucker prager, MSDP) 准则。冻融条件下岩质边坡安全系数会降低,更易造成失稳破坏。周科平等^[13]通过探究不同程度循环冻融对岩体损伤程度开展试验研究,结果表明,随着冻融次数增加,岩体损伤程度增大,强度降低;闻磊等^[14]对不同岩性岩体开展冻融试验,冻融会造成岩体内部损伤,强化节理裂隙,并将结果应用于工程岩质边坡稳定性分析之中。

上述研究表明,循环冻融对岩体力学参数有着不同程度的弱化作用。针对循环冻融作用下的岩质边坡稳定性分析,基于极限平衡法求解岩质边坡安全系数的研究较少,且 Hoek-Brown 准则计算过程中易出现奇异性。鉴于此,本文以中国东北寒区某露天矿山岩质边坡为研究对象,矿区年平均气温 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度可达 $-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$;最大冻土厚度达 2.04 m。为探究矿山边坡在季节性循环冻融作用下的稳定性,开展室内

收稿日期:2024-08-05;修回日期:2024-10-08

基金项目:自然资源部部省合作试点项目(2023ZRBSHZ056);湖南省自然资源厅地质勘查项目(BSDZSB43202401)

作者简介:王迪(1991—),女,工程师,从事地质灾害防治工作;E-mail:474921943@qq.com

*通信作者:殷维(1991—),男,工程师,从事野外一线水工环地质工作等;E-mail:3202647227@qq.com

冻融试验和常规力学测试,研究循环冻融作用对岩体强度参数的弱化影响。另一方面,为避免计算过程中出现奇异性,根据 MSDP 准则求算主应力间的关系后,再利用极限平衡法求解边坡安全系数。这在保障矿山安全高效开采的同时,也为寒区岩质边坡稳定性研究、工程利用、地质灾害防治提供参考。

1 试验方案

1.1 试验概况

通过现场调研及地质勘查可知,该矿山目前开采方法为露天台阶法开采,设计边坡的服务年限为 70 a,最终边坡高度 710 m,设计边坡角为 44°。西部边坡下部为矿区主断裂,断裂破碎带较厚;矿区西北部绿泥石化强烈,高岭土化发育。岩性以角砾岩、细粒花岗岩为主,由于绿泥石化均沿细小裂隙呈薄膜状发育,存在裂隙水情况下冬季低温形成冻土,夏季常温时融化,常年的循环冻融对岩质边坡造成一定损伤,强降雨及采矿过程中爆破等因素易造成边坡岩石失稳。对现场岩质边坡进行钻孔取样,经过不同温度梯度、循环次数冻融处理后,开展物理力学性能测试,试验遵循《工程岩体分级标准》^[15],最后利用 MSDP 准则求算坡体主应力间的关系,获取滑面剪应力、抗滑力及下滑力和安全系数,对循环冻融作用下的岩质边坡稳定性进行评价,边坡稳定性评价流程如图 1 所示。

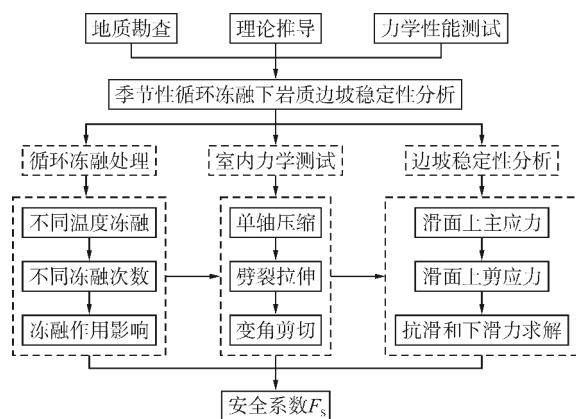


图 1 循环冻融作用下岩质边坡稳定性评价流程

Fig. 1 Stability evaluation flowchart for rock slopes under cyclic freeze-thaw

1.2 测试系统

依托 MTS Landmark 高频疲劳试验系统进行试验,该系统为电-液伺服的高频疲劳试验机,可用于测试金属及非金属材料的动静态力学性能,也可进行腐蚀、高低温环境下的力学性能测试。对现场细粒花岗岩质边坡取芯,制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体试样,均分成 4 组,试样烘干处理后再置于恒温箱中养护 24 h,养护完成后每组取 4 个试样开展冻融试验,设置

4 组温度梯度为 -5°C 、 -10°C 、 -15°C 、 -20°C ,分别进行 1, 3, 5, 7 次冻融处理。每个温度梯度下冻结 12 h,然后常温(25°C)条件下解冻 12 h 为 1 个循环,对照组不进行冻融处理。试样冻融损伤变量定义为:

$$D = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \quad (1)$$

式中: D 为动态损伤指标(%); v_1 为冻融损伤试验前通过试样的波速(m/s); v_2 为冻融损伤试验后通过试样的波速(m/s)。

将不同循环冻融处理下试样进行波速、质量、尺寸测算,并根据式(1)计算冻融损伤,循环冻融下试样损伤统计如表 1 所示。由表 1 可知:循环冻融下试样质量发生了改变,这是由于在冻融作用下,附着在岩石试样内部的水分子固结成冰,产生的冻胀力大于岩石试样颗粒间的胶结力,导致部分从整体试样中脱落,进而试样质量发生变化。当冻融次数较小时,试样表面剥落量较低;随着循环冻融次数增加,表面碎屑剥落量减少,由于内部原生裂隙不断扩大,但内部物质不会剥落出整体,因此剥落量逐渐趋于稳定,冻融温度/次数为 $-20^\circ\text{C}/7$ 次时,试样剥落量最大,达到 0.40 g。不同冻融温度、次数下冻融损伤程度为 1.28%~6.31%;随着冻融温度降低,冻融次数增加,试样内部损伤程度增大。

为获取冻融处理下试样强度劣化特性,采用英国 INSTRON 1342 试验平台开展单轴压缩、劈裂拉伸、直剪等力学试验测试,试验系统具备拉伸、压缩、弯曲、疲劳等试验功能,可对待测试样的低周疲劳特性及断裂等力学性能进行测试。通过计算机数据采集系统对试验结果进行分析,揭示不同循环冻融下试样强度劣化规律及损伤特性。试验测试系统装置如图 2 所示。

1.3 MSDP 准则下主应力关系求解

极限平衡法求解安全系数时,屈服曲线计算过程中易出现奇异性,AUBERTIN 等为克服此项难题,组合 M-S 准则和 D-P 准则各自特点而提出 MSDP 准则,结合现场岩质边坡安全系数求解,充分验证 MSDP 准则适用于各种类型岩质边坡结构面计算,同时该准则能够较好地反映不同损伤程度下岩体屈服特征,其表达式为:

$$\sqrt{J_2} - \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{(\sigma_c - \sigma_t) I_1 f + \sigma_c \sigma_t} = 0 \quad (2)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (4)$$

$$f = 1 + \frac{3\alpha^2 \langle I_1 - I_T \rangle}{\sigma_c - \sigma_t} \quad (5)$$

$$\langle I_1 - I_T \rangle = \frac{I_1 - I_T + |I_1 - I_T|}{2} \quad (6)$$

表 1 循环冻融作用下试样损伤统计

试验编号	冻融参数(温度/次数)	试样尺寸/(mm×mm)	冻融前波速/(m·s ⁻¹)	冻融后波速/(m·s ⁻¹)	冻融质量损失/g	冻融损伤/%
1	25 ℃/0 次	φ50.1×100.3	4.57	4.57	0	
2	-5 ℃/1 次	φ50.5×100.1	4.68	4.65	0.08	1.28
3	-5 ℃/3 次	φ50.3×100.4	4.58	4.53	0.11	2.17
4	-5 ℃/5 次	φ50.1×100.6	4.69	4.61	0.12	3.38
5	-5 ℃/7 次	φ50.2×100.1	4.42	4.33	0.15	4.03
6	-10 ℃/1 次	φ50.6×100.4	4.71	4.65	0.09	2.53
7	-10 ℃/3 次	φ50.5×100.3	4.59	4.53	0.15	2.60
8	-10 ℃/5 次	φ50.1×100.7	4.76	4.67	0.27	3.75
9	-10 ℃/7 次	φ51.1×100.2	4.47	4.38	0.29	3.99
10	-15 ℃/1 次	φ50.8×100.4	4.64	4.56	0.14	3.42
11	-15 ℃/3 次	φ50.4×100.1	4.59	4.51	0.15	3.46
12	-15 ℃/5 次	φ50.3×100.2	4.57	4.48	0.29	3.90
13	-15 ℃/7 次	φ50.3×100.5	4.61	4.51	0.32	4.29
14	-20 ℃/1 次	φ50.2×100.4	4.73	4.65	0.24	3.35
15	-20 ℃/3 次	φ50.1×100.6	4.64	4.54	0.35	4.26
16	-20 ℃/5 次	φ50.1×100.1	4.96	4.83	0.39	5.17
17	-20 ℃/7 次	φ50.2×100.3	4.68	4.53	0.40	6.31

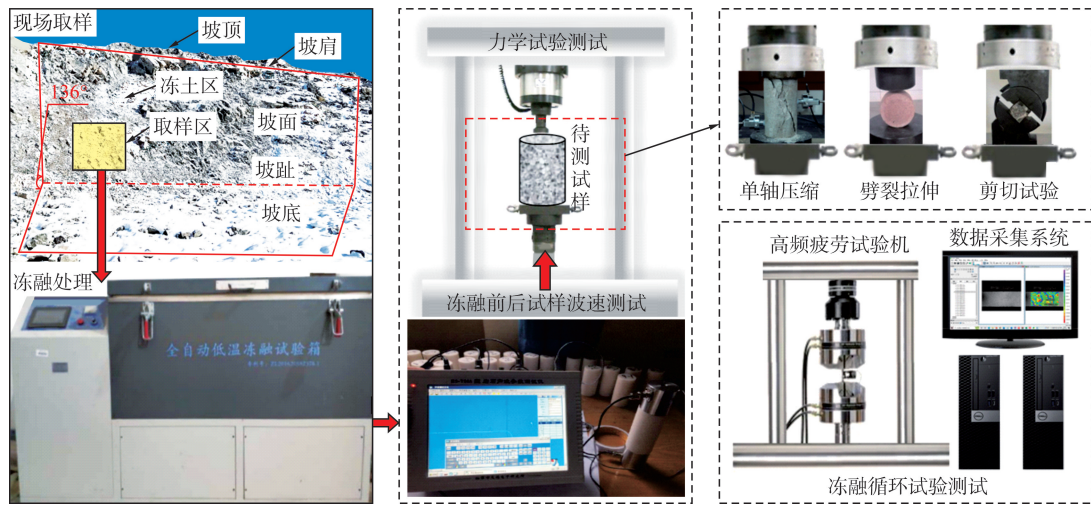


图 2 试验测试系统装置

Fig.2 Equipment in the experimental test system

$$I_T=\frac{\sigma_c-\sigma_t}{12\alpha^2}-\frac{\sigma_c\sigma_t}{\sigma_c-\sigma_t} \tag{7}$$

$$\alpha=\frac{2\sin \varphi}{\sqrt{3}(3-\sin \varphi)} \tag{8}$$

式中： J_2 为应力偏量的第 2 个变量； σ_c 为试样单轴抗压强度 (MPa)； σ_1 为试样最大主应力 (MPa)； σ_t 为试样劈裂抗拉强度 (MPa)； I_1 为应力张量的第一不变量； f 为参数； σ_2 为中间主应力 (MPa)； σ_3 为最小主应力 (MPa)； I_T 为破坏准则的抛物线与线性阶段之间的过渡条件； α 为破坏准则参数； φ 为试样内摩擦角 (°)。

针对常规三轴试验,通常为了方便计算,将中间主应力数值等同于最小主应力,因此联立式 (1) ~ (7),得到简化后的 MSDP 准则表达式:

$$F=\frac{\sqrt{3}}{3}[\sigma_1-\sigma_3-\sqrt{(\sigma_c-\sigma_t)(\sigma_1+2\sigma_3)}f+\sigma_c\sigma_t] \tag{9}$$

为进一步将 MSDP 准则应用于岩质边坡稳定性分析并求解安全系数,先建立该准则强度包络线和摩尔应力圆之间的关系,求算该准则在 $\tau-\sigma_n$ 的空间表达式,再对其中大小主应力关系进行求解^[1],得到进一步简化后的 MSDP 准则表达式:

$$F=\frac{\sqrt{3}}{3}\{\sigma_1-\sigma_3-\sqrt{n_1(\sigma_1+2\sigma_3)[m_1(\sigma_1+2\sigma_3)+m_2]}+n_2\} \tag{10}$$

$$m_1=\frac{3\alpha^2}{\sigma_c-\sigma_t},m_2=1-\frac{3\alpha^2I_T}{\sigma_c-\sigma_t} \tag{11}$$

$$n_1=\sigma_c-\sigma_t,n_2=\sigma_c\sigma_t \tag{12}$$

引入 Hoek 和 Bray 的经典平面边坡滑动计算模型^[16],边坡高度 h ,边坡角 i ,滑动平面长 l ,滑面角 θ ,选取边坡研究单位自重及地下水重力 G ,岩质坡面超载

为 q , 地下渗流水、裂隙水对滑动平面的作用力为 W_1 和 W_2 , 以此对循环冻融强度弱化的边坡稳定性进行分析, 求取滑面上正应力 (如式 (9) 所示), 再利用正应力与剪应力的关系求算剪应力, 最后求解坡体抗滑力及下滑力, 根据岩质边坡极限平衡分析获取安全系数 F_s , 如式 (14) 所示。

$$\sigma_p = \frac{(G + ql) \cos \theta - W_1 \sin \theta - W_2}{l} \quad (13)$$

$$F_s = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\tau_p l}{(ql + G) \sin \theta + W_1 \cos \theta} \quad (14)$$

同时, 运用常规极限平衡法求解不同循环冻融处理下边坡的安全系数, 将求解获得的安全系数与基于 MSDP 准则下求解的安全系数进行对比。

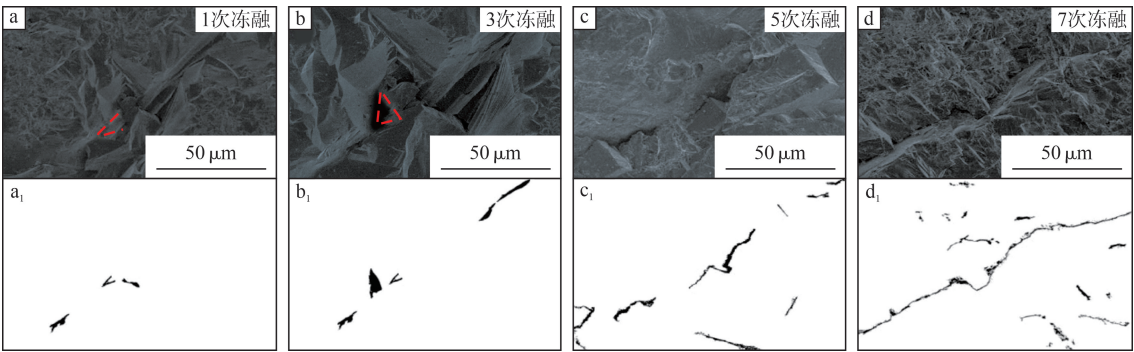


图 3 不同循环冻融次数的试样细观损伤特性图 (放大 1 000 倍)

Fig. 3 Microscopic damage characteristics of specimens under different times of cyclic freeze-thaw (1 000 × magnification)

针对矿区岩质边坡Ⅲ-2 段进行钻孔取芯, 进行拉压力学测试后得到该区段岩体抗压强度为 76.9 MPa, 抗拉强度为 6.57 MPa, 直剪试验获取试样内聚力和内摩擦角分别为 8.47 MPa、46.7°。将常温 25 ℃ 环境下试样作为对照组, 对不同冻融温度梯度、循环冻融次数处理后试样作为试验组, 开展力学参数测试, 试验结果如表 2 所示, 内聚力、内摩擦角变化规律如图 4

2 试验结果及分析

2.1 冻融作用下岩体强度参数弱化

对不同冻融处理下试样截面开展细观 SEM 扫描, 放大倍数取 1 000。-20 ℃ 温度下, 不同循环冻融次数的试样细观损伤特性图如图 3 所示。运用 MATLAB 结合图像识别技术实现区域裂隙生长算法, 对 SEM 图像 (如图 3-a、b 所示) 裂隙识别后进行数字二值化处理 (如图 3-a₁、b₁ 所示)。由图 3 可知: 随着冻融次数增加, 疲劳损伤作用下试样内部裂隙不断扩张发育, 间断形的裂纹逐渐衍生贯通, 且附件裂纹数量随循环冻融次数的增加而增多, 细观角度分析冻融对岩体强度劣化实质是循环冻融下产生的疲劳损伤。

所示。由表 2 可知: 随着冻融温度梯度降低, 试样抗压强度、内聚力和内摩擦角整体趋势降低。随着循环冻融次数增加, 试样抗压强度、内聚力和内摩擦角整体趋势也降低。抗压强度降低 2.9 %~20.3 %, 抗拉强度降低 6.1 %~24.8 %, 内聚力和内摩擦角降低 6.5 %~13.7 %、2.2 %~17.3 %。

由图 4 可知: 当冻融温度梯度固定时, 随着循环

表 2 循环冻融作用下试样力学试验结果

Table 2 Mechanical test results of specimens under cyclic freeze-thaw

试验编号	冻融参数(温度/次数)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	备注
1	25 ℃/0 次	76.9	6.57	8.47	46.7	对照组
2	-5 ℃/1 次	74.6	6.17	8.16	45.7	
3	-5 ℃/3 次	66.5	5.58	7.88	42.6	
4	-5 ℃/5 次	69.5	5.69	8.12	44.9	
5	-5 ℃/7 次	68.4	5.72	8.04	43.2	
6	-10 ℃/1 次	73.8	5.97	8.17	44.8	
7	-10 ℃/3 次	64.5	5.35	7.83	41.5	
8	-10 ℃/5 次	66.7	5.49	7.97	43.6	
9	-10 ℃/7 次	67.5	5.45	7.84	42.1	
10	-15 ℃/1 次	69.2	5.64	8.03	43.6	
11	-15 ℃/3 次	62.5	5.09	7.66	40.5	
12	-15 ℃/5 次	65.8	5.44	7.69	41.7	
13	-15 ℃/7 次	65.4	5.31	7.81	42.5	
14	-20 ℃/1 次	68.9	5.59	7.84	41.9	
15	-20 ℃/3 次	61.3	4.94	7.54	38.7	
16	-20 ℃/5 次	65.5	5.19	7.73	38.6	
17	-20 ℃/7 次	64.7	5.28	7.68	39.5	

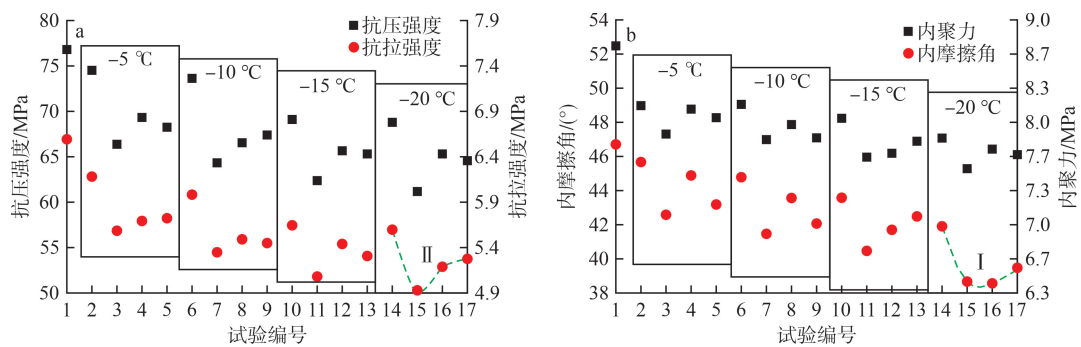


图 4 循环冻融作用下试样拉压强度结果

Fig. 4 Results of tensile and compressive strength of specimens under cyclic freeze-thaw

冻融次数增加,试样拉压物理力学参数出现不同程度的劣化,当完整循环冻融次数为 3 次时,试样拉压力学性能降幅最大,根据图 4 中拟合曲线 II,随着循环冻融次数增加,试样拉压力学性能先出现大幅度降低,再趋于回升并逐渐稳定。循环冻融初次作用下试样发生冻缩,内部颗粒在冻缩作用下部分出现掉落原有稳定排列,形成新的颗粒排列,同时内部原生节理裂隙扩展,综合作用下对试样造成损伤,因此试样的拉压力学强度降低。随着冻融次数增加,试样内部颗粒排列趋于稳定,受冻缩影响较小,试样拉压力学强度变化趋于稳定。

当温度梯度固定时,循环冻融次数对试样内聚力和内摩擦角的影响规律与拉压力学参数变化趋势类似。试样内聚力受冻融温度梯度、循环次数影响较小。当循环冻融次数固定时,随着冻融温度降低,试样内部颗粒分散性增大,内部颗粒断开原有接连而发生内部变形,试样内聚力和内摩擦角随之降低。

2.2 边坡稳定性分析

该矿山岩质边坡岩性以花岗岩为主,根据矿区地质勘查报告:矿区内无地表水流经,岩质边坡不存在超载现象,边坡角为 44°,台阶边坡高度为 18 m;边坡内部未受冻融影响的区域岩体抗压强度为 76.9 MPa,抗拉强度为 6.57 MPa,内聚力和内摩擦角分别为 8.47 MPa、46.7°;矿山目前服务年限为 5 a,矿区最低气温可达-20.8 °C。对试样进行循环冻融损伤后,实际边坡岩体抗压强度降低了 14.82 %,取 65.5 MPa;抗拉强度降低了 21.01 %,取 5.19 MPa;内聚力和内摩擦角分别取 7.73 MPa、38.6°。运用 MSDP 准则,对边坡稳定性进行评价并求算边坡安全系数,结果如表 3 所示。

由表 3 可知:基于 MSDP 准则与常规极限平衡法求算出的未受冻融作用边坡安全系数分别为 1.583 和 1.551。随着冻融温度降低及循环冻融次数增加,2 种方法求解的安全系数值不断降低,且基于 MSDP 准则下求算出的安全系数小于常规极限平衡法求算的安全系数。冻融温度-20 °C,循环冻融次数为 7 次时,

表 3 矿山现场岩质边坡力学参数及安全系数汇总

Table 3 Summary of mechanical parameters and safety factors for rock slopes in mines

试验编号	冻融参数 (温度/次数)	常规法求解 安全系数	基于 MSDP 准则 求解安全系数
1	25 °C/0 次	1.583	1.551
2	-5 °C/1 次	1.575	1.543
3	-5 °C/3 次	1.551	1.524
4	-5 °C/5 次	1.542	1.502
5	-5 °C/7 次	1.522	1.493
6	-10 °C/1 次	1.565	1.525
7	-10 °C/3 次	1.553	1.492
8	-10 °C/5 次	1.538	1.474
9	-10 °C/7 次	1.524	1.463
10	-15 °C/1 次	1.555	1.516
11	-15 °C/3 次	1.547	1.484
12	-15 °C/5 次	1.525	1.471
13	-15 °C/7 次	1.514	1.462
14	-20 °C/1 次	1.539	1.505
15	-20 °C/3 次	1.521	1.482
16	-20 °C/5 次	1.502	1.461
17	-20 °C/7 次	1.493	1.453

安全系数最低,2 种方法计算的结果分别为 1.493 和 1.453。循环冻融作用下,试样内部发生了不可逆的结构性损伤,试样强度劣化后抗滑力下降,边坡安全系数随之降低。计算结果可为循环冻融作用下岩质边坡稳定性评价提供参考,寒区岩质边坡稳定性评价基础上需考虑循环冻融在岩体内部形成的累积损伤。

3 结 论

通过对露天矿山岩质边坡现场取样,考虑-5 °C、-10 °C、-15 °C、-20 °C 4 种冻融温度梯度,1,3,5,7 次循环冻融对岩质边坡岩体的损伤,并基于 MSDP 准则开展岩质边坡稳定性评价,最终求算冻融损伤下岩质边坡安全系数,得出主要结论如下:

1) 循环冻融次数固定时,随着冻融温度梯度降

低,抗压强度降低 2.9 %~20.3 %,抗拉强度降低 6.1 %~24.8 %,内聚力和内摩擦角分别降低 6.5 %~13.7 %、2.2 %~17.3 %。试样内部冻缩加剧,颗粒分散性增大,试样内聚力和内摩擦角降低,同时造成试样拉压力学性能劣化。

2)冻融温度梯度固定时,随着循环冻融次数增加,试样拉压力学性能出现大幅度降低,再次回升后趋于稳定,3次完整循环冻融下试样力学特性降幅最大。疲劳损伤作用下试样内部裂隙不断扩张发育,间断形的裂纹逐渐衍生贯通,裂纹数量随循环冻融次数的增加而增多,细观角度分析冻融对岩体强度劣化实质是循环冻融下产生的疲劳损伤。

3)随着冻融温度降低及循环冻融次数增加,基于 MSDP 准则与常规极限平衡法求算出的安全系数不断降低,基于 MSDP 准则下求算出的安全系数小于常规极限平衡法求算的安全系数。冻融温度 -20°C ,循环冻融次数为 7 次时安全系数最低,循环冻融作用下,试样内部发生了不可逆的结构性损伤,试样强度劣化后抗滑力下降,边坡安全系数随之降低。计算结果可为循环冻融作用下岩质边坡稳定性评价提供参考。

[参考文献]

- [1] 赵明华,刘菁钰,赵衡,等.基于 MSDP 准则的岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):10-18.
- [2] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土学,2011,32(5):1 437-1 451.
- [3] 宋泽宇.季冻区东南岔隧道花岗岩冻融损伤特性研究[D].长春:

吉林大学,2021.

- [4] 李元松,王玉,朱冬林,等.边坡稳定性评价方法研究现状与发展趋势[J].武汉工程大学学报,2021,43(4):428-435.
- [5] FELLENIUS W.Erdstatistich berechnungen mit reibung und kohasion (adhasion) und unter Annahm ebreiszyklindrischer gleitflächen[M]. Berlin:Ernst & Sohn,1927.
- [6] BISHOP A W.The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J].Geotechnique,1954,5(1):7-17.
- [7] JANBU N.Earth pressure and bearing capcity calculations by generalized procedure of slices[C]//ISSMGE.Proceedings of 4th international cofference on soil mechanics and foundation engineering.London:ISSMGE,1957.
- [8] BELANDRIA N, úCAR R, CORREDOR A, et al.Safety factor on rock slopes with tensile cracks using numerical and limit equilibrium models[J].Geotechnical and Geological Engineering,2021,39(3): 2 287-2 300.
- [9] 朱合华,张琦,章连洋.Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):1 945-1 963.
- [10] 吴顺川,金爱兵,高永涛.基于广义 Hoek-Brown 准则的边坡稳定性强度折减法数值分析[J].岩土工程学报,2006,28(11):1 975-1 980.
- [11] 徐卫亚,周家文,石崇,等.极限平衡分析中加固力对岩质边坡稳定性的影响[J].水利学报,2007,15(9):1 056-1 065.
- [12] AUBERTIN M,LI L,SIMON R, et al.Formulation and application of a short-term strength criterion for isotropic rocks[J].Canadian Geotechnical Journal,1999,36(5):947-960.
- [13] 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.
- [14] 闻磊,李夕兵,苏伟.冻融循环影响下金属矿山边坡坚硬岩石物理力学性质研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):689-696.
- [15] 邹爱清,柳赋铮.国标《工程岩体分级标准》的应用与进展[J].岩石力学与工程学报,2012,31(8):1 513-1 523.
- [16] 柴利蒙,孙东东,杨天鸿,等.金宝铁矿南帮顺倾边坡滑坡机理研究及治理工程实践[J].黄金,2022,43(12):33-38.

Stability analysis of rock slopes under seasonal cyclic freeze-thaw

Wang Di¹, He Yudie², Yin Wei²

(1. Hunan Center of Natural Resources Affairs;

2. Hunan Provincial Geological Disaster Survey and Monitoring Institute)

Abstract: To investigate the effect of cyclic freeze-thaw on the stability of rock slopes, this study examines a rock slope in a mining area in Northeast China affected by seasonal cyclic freeze-thaw. 4 freeze-thaw temperature gradients (-5°C , -10°C , -15°C , and -20°C) and 1, 3, 5, and 7 freeze-thaw cycles were considered to explore the deterioration pattern of rock mass mechanical properties. The stability of the rock slope was evaluated based on the MSDP criterion. Results indicate that with decreasing freeze-thaw temperature gradients and increasing cyclic freeze-thaw, internal frost shrinkage intensified, leading to a decrease in compressive strength by 2.9 %~20.3 %, tensile strength by 6.1 %~24.8 %, cohesion by 6.5 %~13.7 %, respectively and internal friction angle by 2.2 %~17.3 %. For fixed freeze-thaw temperature gradients, the tensile and compressive mechanical properties of samples decreased significantly with increasing cyclic freeze-thaw, showed a recovery, and then stabilized. The largest reduction in mechanical properties occurred after 3 complete freeze-thaw cycles. Fatigue damage caused the development and propagation of internal cracks, with discontinuous cracks gradually extending and connecting. The crack quantity increases with cyclic freeze-thaw. According to microscopic analysis, the essence of rock mass strength deterioration is fatigue damage induced by cyclic freeze-thaw. Safety factors calculated using the MSDP criterion were lower than those determined by conventional limit equilibrium methods. The lowest safety factor was observed at -20°C after 7 freeze-thaw cycles. Under cyclic freeze-thaw, irreversible structural damage occurs inside the test samples, leading to decreased sliding resistance due to deteriorated test sample strength, ultimately lowering slope safety factors. These findings provide a reference for evaluating rock slope stability under cyclic freeze-thaw.

Keywords: cyclic freeze-thaw; temperature gradient; compressive strength; tensile strength; limit equilibrium theory; slope engineering; stability analysis