

DOI: 10.11779/CJGE201610005

岩石冻融循环试验建议性方案探讨

申艳军¹, 杨更社¹, 荣腾龙², 刘 慧¹, 吕伍杨³

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 岩石冻融循环试验是低温岩石力学基础性试验, 其主要涉及冻融循环温度、冻融时长、循环次数等3个指标。但目前关于指标的选取, 国内外的试验规程或相关学者研究成果, 均未给出明确参考依据, 对岩石冻融循环试验方案的确定造成较大困扰。本研究旨在明确各指标的确定办法, 提出建议性岩石冻融循环试验方案。首先, 展开国内外冻融循环试验方案的全面综述, 指出目前冻融循环试验方案确定时所存在问题, 并藉此明确冻融循环试验方案思路; 接着, 针对以上三大影响指标, 通过设计室内岩石冻融循环试验, 详细探讨冻融循环温度、冻融时长、循环次数对岩石物理、力学参数的影响, 最终根据试验结果, 明确出针对不同岩性、孔隙率所对应的建议性试验方案。本研究将为后期冻融循环指标选取及标准化试验方案建立提供技术借鉴。

关键词: 岩石力学; 冻融循环试验; 温度; 时长; 循环次数

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)10-1775-08

作者简介: 申艳军(1984-), 男, 博士, 2007年毕业于中国地质大学(武汉)土木工程专业, 现为副教授, 主要从事裂隙岩体冻融损伤及断裂特征研究。E-mail: shenyanjun993@126.com。

Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock

SHEN Yan-jun¹, YANG Geng-she¹, RONG Teng-long², LIU Hui¹, LÜ Wu-yang³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of

Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 3. Faculty of Engineering, China

University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The freeze-thaw cycle test on rock is a fundamental test in low-temperature rock mechanics field, which mainly involves three indexes: freeze-thaw cycle temperature, time period of the cycle and cycle number. At present, there isn't a clear reference about the selection of these indexes from the worldwide experimental procedures or scholars, which brings any huge obstacle to the enactment of the scheme for freeze-thaw cycle tests on rock. The methods to confirm the indexes of this kind of experiment are determined, and a test scheme for freeze-thaw cycle of rock is proposed. Firstly, a comprehensive review of the worldwide freeze-thaw cycle test schemes is summarized and the problems to enact this test scheme are pointed out, and the ideas about the proposed test scheme is clarified. Then, by designing the indoor rock freeze-thaw cycle tests, the influence of these three indexes on the physical and mechanical parameters of rock is discussed. According to the results, the proposed test method with different lithologies and porosities is clearly defined. This study will provide a reference for the selection of freeze-thaw cycle indexes and standard freeze-thaw test methods.

Key words: rock mechanics; freeze-thaw cycle test; temperature; time period; cycle number

0 引 言

冻融循环系指材料因遭受外界环境围绕冰点温度一次或多次升降而产生内部冻结、融化交替现象, 是寒区最为常见的现象, 也是影响寒区工程安全与稳定性重要因素。随着中国“一带一路”国家战略实施, 寒区大量岩土工程将要开工建设或上马, 低温岩石力学问题也被提升至全新高度。

对岩石材料而言, 在负温环境下, 岩石中的孔隙

水结成冰而产生体积膨胀, 进而产生巨大冰胀力; 而后气温回升冰点温度以上时, 冰融化成水, 水分沿孔隙或裂隙进一步入渗, 冰胀力逐步解除。实际上而言, 冻融循环过程是伴随着温度场、应力场、渗流场动态

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302228); 中国博士后科学基金项目(2013M532070, 2014T70931); 陕西省重点科技创新团队项目(2014KCT-30); 陕西省博士后科学基金项目(2014051)

收稿日期: 2015-09-25

变化的过程。

关于岩石冻融循环试验，国内外学者进行了大量的工作，得到了大量关于岩石在冻融循环作用下物理力学参数的演化特性，对于指导寒区岩体工程具有重要指导意义。但是，落脚至冻融循环试验本身，试验方案对试验结果影响的重要性不言而喻。对于试验方案而言，主要涉及 3 个方面指标：冻融循环温度、冻融时长、循环次数，不同的试验指标对试验结果将造成显著差异。然而，关于以上 3 个指标如何确定，目前，国内外不论试验规程或相关研究成果并未明确参考依据，对冻融循环方案的确定造成一定程度困扰。

本文针对岩石冻融循环试验方案展开深入探讨，首先，对国内外冻融循环试验方案展开全面综述，指出冻融循环试验方案确定方面存在的问题，并藉此明确冻融试验指标确定思路；而后，针对 3 大影响指标，通过设计相关室内试验，详细探讨冻融循环温度、冻融时长、循环次数对岩石力学特性影响；最后，根据试验结果，明确针对不同岩性、孔隙率所对应的建议性试验方案，为以后类似冻融循环试验指标选取及标准化试验方案建立提供参考。

1 国内外冻融循环试验方案综述

1.1 国内外相关学者冻融循环试验方案综述

冻融循环试验是进行寒区岩土工程特性确定的基

本试验，国内外相关学者进行了大量类似试验，针对冻融循环温度、冻融时长、循环次数等 3 个指标，对国内外学者冻融循环试验条件进行详细统计归纳，如表 1。

从表 1 中可以看出，针对砂岩、页岩等较软岩多采用“冻结温度为-20℃，融化温度为 20℃（常温）”的冻融循环温度，而冻结时长、融化时长略有差异，从 6~12 h 不等；而针对花岗岩、灰岩、安山岩等硬岩，考虑其结构致密，冻融循环造成损伤效应不够显著，采用“冻结温度为-40℃，融化温度为常温（20℃）或更高温度（40℃）”的冻融循环温度，而冻结时长、融化时长也存在较大差异，从 4~16 h 不等。

而对于冻融循环次数，相关学者采用的数值差异显著，数值从 20 次到 280 次；诚然，对于不同岩性、不同结构发育形式，其冻融劣化损伤效果存在显著差异，但从试验效果评判角度，明确何种岩性、何种孔隙率对应的合适冻融循环次数，可有效指导正确的试验方案设计，避免出现次数过少或过多问题。

1.2 国内外试验规程冻融循环试验方案综述

国内外相关试验规范对冻融循环试验条件已进行了一定介绍，经归纳，各试验规程中岩石冻融循环试验方案如表 2 所示。

从以上国内规范中可看出，关于冻融循环温度及时长主要采用为：冻结温度为-20±2℃，冻结时长 4 h，

表 1 国内外学者岩石冻融循环试验方案总结

Table 1 Summary of test schemes on freeze-thaw cycles of rock by worldwide scholars

作者	冻结温度/℃	冻结时间/h	融化温度/℃	融化时间/h	循环次数/次	岩性
杨更社等 ^[1]	-20	12	20	12	20	砂岩、页岩、煤
刘成禹等 ^[2]	-36.5	4	20	4	20	花岗岩
徐光苗等 ^[3]	-20	12	20	12	30	红砂岩、页岩
刘华等 ^[4]	-20	14	20	10	30	花岗岩、安山岩
蒋立浩等 ^[5]	-20	6	65	6	40	花岗岩
周科平等 ^[6]	-40	4	20	4	30	花岗岩
苏伟 ^[7]	-20	14	20	10	30	石英砂岩、灰岩、花岗斑岩
母剑桥等 ^[8]	-30	4	常温	4	50	花岗岩、砂岩、千枚岩
张慧梅等 ^[9-10]	-20	6	20	6	60/100	红砂岩、页岩
路亚妮等 ^[11]	-40	6	40	6	60	类岩石材料
刘红岩等 ^[12]	-20	12	20	12	100	类岩石材料
闻磊等 ^[13]	-20	12	20	12	30	花岗岩、灰岩
方云等 ^[14]	-30	12	常温	12	35	砂岩
陈有亮等 ^[15]	-15	4	20	4	100	花岗岩
Ross ^[16]	-18	1.5	24	1.5	25	类岩石材料
Park 等 ^[17]	-20	4	10	4	50	闪长岩、玄武岩、凝灰岩
Bayram ^[18]	-20	2	20	2	25	大理岩
Khanlari 等 ^[19]	-20	15	20	9	30	砂岩
Ghobadi 等 ^[20]	-20	12	20	6	60	砂岩
Freire-Lista 等 ^[21]	-12	6	20	6	280	花岗岩

表 2 国内外试验规程岩石冻融循环试验方案总结

Table 2 Summary of test schemes on freeze-thaw cycles of rock by worldwide test procedures

试验规程	冻结温度/℃	冻结时间/h	融化温度/℃	融化时间/h	循环次数/次	备注
《工程岩体试验方法标准》 (GB T50266—2013) [22]	-20±2	4	20±2	4	25	强制饱水, 冻融循环次数为 25 次, 根据需要可采用 50 次或 100 次
《公路工程岩石试验规程》 (JTG E41—2005) [23]	-15	4	20±5	4	10~25	自由饱水, 循环次数可采用 10 次、15 次、25 次
《铁路工程岩石试验规程》 (TB10115—2014) [24]	-20±2	4	20±2	4	15~25	强制饱水, 一般寒冷地区, 循环次数采用 15 次, 严寒地区循环次数采用 25 次
《水利水电工程岩石试验规程》[24] (SL264—2001) [25]	-20±2	4	20±2	4	20	根据工程需要确定次数, 以 20 次为宜, 寒冷地区不少于 25 次
《天然饰面石材试验方法》 (GB/T9966—2001) [26]	-20±2	4	20±2	4	25	置于 20±2℃清水自然浸泡 48 h, 而后取出放入-20±2℃冷冻箱, 冻结时长 4 h, 后放入流动清水中, 融化时长 4 h, 反复冻融 25 次
《The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014》, ISRM 2015[27]	-20±2	15	20±2	9	30	置于 20℃水自然浸泡 48 h, 而后取出放入-20±2℃冷冻箱, 冻结时长 15 h, 后进行水浴升温, 融化时长 9 h, 冻融循环次数 30 次, 每 5 次进行试验观测
《Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions》, ASTM D 5312-04, 2004.[28]	-18±2.5	16	32±2.5	8	依据冻融影响区划系数 (F-TSI)	冻融影响区划系数(F-TSI)依据全美冻区区划图确定, 以 5 次循环为特性观测单元, 最大冻融循环次数不超过 55 次
《Natural Stone Test Methods—Determination of Frost Resistance》UNE-EN 12371, 2011.[29]	-12	6	20	6	280	置于 20℃清水自然浸泡 48±2h, 而后取出放入冷冻箱, 要求从 20℃降至-8℃, 时长 4 h, 后从-8℃降至-12℃, 时长 2 h; 此后泡水融化, 要求-12℃升至 20℃, 融化时长 6 h, 以每冻融 70 次为一个单元

泡水融解温度为 20±2℃, 融解时长为 4 h。其中冻结、融解温度依据为中国严寒地区最冷月月平均气温在 -20℃左右, 融解温度为传统认为室温温度 (20℃), 而对冻结、融解时长尚无明确依据; 关于冻融循环次数, 相关规范尚无统一结论, 多倾向于 25 次, 但具体依据未明确给出。

从国外常用的 ISRM (国际规范)、ASTM (美国规范) 及 UNE-EN (欧洲规范) 的试验规范关于岩石冻融试验方法规定来看, 关于冻融温度及时长存在较大差异, 相较而言, 美国 ASTM 规程冻融温度梯度更大, 冻融时长更长, 其循环次数考虑全国冻区分布统计区划, 但次数明显偏少。

综上统计分析, 对国内外相关学者及规程关于冻融循环试验方案的描述及规定, 目前尚未形成统一、标准的冻融循环试验条件, 对于不同岩性、不同孔隙率采用何种冻融循环试验条件尚无明确试验依据, 造成试验结果的相互对照性存在一定问题, 且无法明确指导试验方案设计。

2 温度对冻融循环试验效果影响分析

依据上节统计结果, 关于冻结、融解温度尚未形成统一标准, 现设计多组不同冻融循环温度对比试验, 探讨温度对冻融循环试验的影响效果, 藉此确定更为科学、合理的建议冻融循环温度。

2.1 试验方案设计

本试验选用 2 种不同岩性：花岗岩和砂岩，为体现孔隙率的影响效果，针对砂岩选用 2 种不同孔隙率大试件进行取样试验，各 5 组试样，经充分饱水后，分别采用 $-10^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 冻融循环温度进行试验，循环时长各 4 h，其中花岗岩循环次数采用 100 次，砂岩冻融循环次数采用 50 次，以试样单轴饱和抗压强度作为判别指标，花岗岩每 20 次循环进行加载试验，砂岩每 10 次循环进行加载试验，详细试样及冻融试验参数如表 3 所示。

表 3 试样及冻融试验参数表

Table 3 Samples and test parameters of freeze-thaw cycles						
岩性	孔隙率/%	冻融循环温度/ $^{\circ}\text{C}$				循环次数/次
花岗岩	1.41	± 10	± 20	± 30	± 40	100
砂岩 1	14.2	± 10	± 20	± 30	± 40	50
砂岩 2	27.6	± 10	± 20	± 30	± 40	50

2.2 试验结果及分析

对花岗岩和两种孔隙率的砂岩展开不同冻融循环温度对比试验，而后进行单轴加载试验测定冻融循环温度对试样强度的影响作用，详细试验结果见图 1。

从试验结果可看出，不同冻融循环温度下岩石单轴抗压强度呈现极为相似的降低规律，且温度梯度越大，强度降低相对显著，但差距不大。

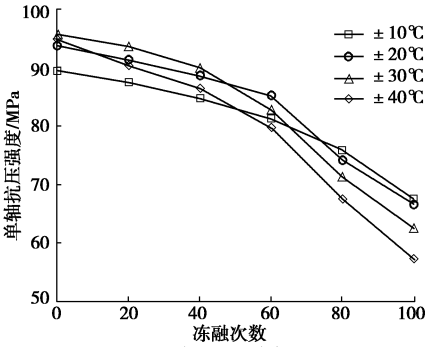
相较冻融循环次数、岩性及孔隙率作用的影响，冻融循环温度对岩石强度的影响甚小，甚至于可以忽略不计，即选用何种冻融循环温度对试验结果影响作用不大。

既然冻融循环温度影响作用不大，故确定冻融循环温度时，应选择符合中国寒区实际温度情况，且方便室内试验操作，同时要与国内试验规程保持相似等原则，综合以上考虑，推荐采用“ $-20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ”的建议性冻融循环温度，详细解释如下：

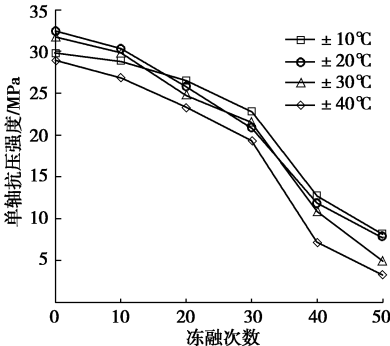
(1) 中国多年冻土区（严寒区）最冷月平均气温在 $-20^{\circ}\text{C}\sim -15^{\circ}\text{C}$ ，按照中国寒区划分标准^[30]，最冷月平均气温低于 -3°C ，且超过 10°C 的月数 <5 个月即为寒区，可见选用 -20°C 作为冻结温度可足够涵盖中国寒区各种低温状况。

(2) 传统室内常温试验系指 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的温度环境，将该温度作为融化温度，一方面该温度条件诸多试验设备容易调节，另一方面，与其他常温试验能可保持一致性，便于试验操作。

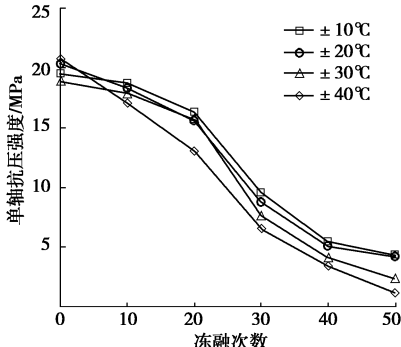
(3) 国内多数规范（包括国标），均推荐采用“ $-20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ”的冻融循环温度，将该温度作为标准化冻融循环温度，可保持与国内试验标准一致性，便于推广。



(a) 花岗岩 (孔隙率1.41%)



(b) 砂岩1 (孔隙率14.2%)



(c) 砂岩2 (孔隙率27.6%)

图 1 不同冻融循环温度作用下岩石强度对比试验
Fig. 1 Comparative tests on rock strength under different freeze-thaw cycle temperatures

3 时长对冻融循环试验效果影响分析

冻结、融解时长对于冻融循环试验效果影响显而易见，也是决定冻融循环整体试验周期的重要指标，将影响到整个试验进度及成本。但目前，关于时长的选取，同样无统一标准及试验依据，在实际操作中，多根据试验整体进度要求选择，或依据寒区昼夜温变近似选取冻结、融解时长各 12 h，具有一定盲目性。虽国内规范多推荐采用各 4 h 时长，但在条文说明中并未给出明确依据，有待深入探讨。

出现诸上问题的主要原因在于，究竟多长时间岩石试样内部可实现完全冻结或融解，很难进行试验观察或测定，温度传感器等测定手段仅可测定表面温度，难以测定岩石内部真实温度；而采用无损观测手段成为解决该问题的最佳办法。

3.1 试验方案设计

基于无损观测方法, 提出采用测试冻融循环试验下的试样热物理参数, 来“间接”反映其内部真实冻结、融化状况, 不失为好的试验方案, 详细试验设计如下:

同样选择花岗岩、2 种不同孔隙率砂岩的试样, 对试样充分饱水后, 展开“ $-20^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ”的冻融循环试验, 从 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}$ 冻结过程中, 分别在 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 12 h 后进行试样导热系数测定, 观测试样导热系数的改变。而后, 同样展开融解过程的导热系数测定, 依据导热系数的变化情况确定岩石试样内部是否完全冻结或融解。

其理论依据在于: 对岩石材料本身而言, 其随着温度改变导热系数变化很小, 真正意义上导致岩石导热系数突变的原因在于孔隙内的水冰相变作用, 因水、冰显著的导热系数差异, 在孔隙水冻结过程中导热系数急剧变化, 而当水完全冻结成冰, 试样导热系数基本稳定, 此时表明试样已完全冻结或融解。

同时, 为同时反映循环次数对冻融循环试验的影响效果, 分别对以上试样进行了第 1 次、第 20 次循环的导热系数变化测定。

3.2 试验结果及分析

对花岗岩和两种孔隙率的砂岩展开不同冻结、融解时长对应下的导热系数测定, 用于详细确定试样完全冻结及融解所需时间, 进而明确合适的冻融时长, 详细试验结果如图 2 所示。

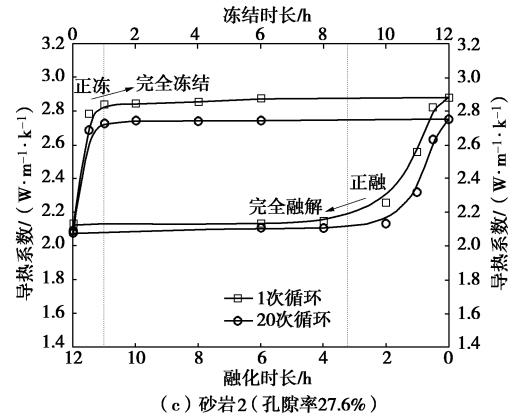
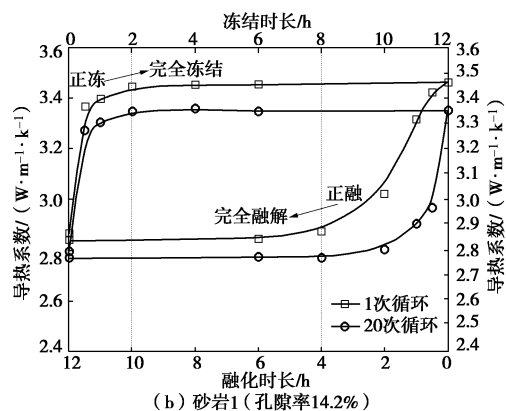
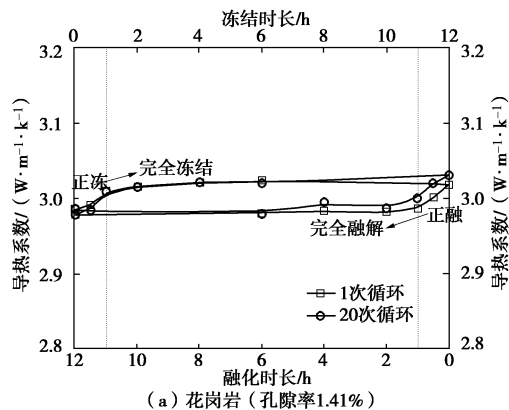


图 2 不同冻融时长作用下岩石导热系数变化特征

Fig. 2 Variation of thermal conductivity of rock under different freeze-thaw cycle time periods

从试验结果中可得出以下结论:

(1) 对于孔隙率较低的花岗岩而言, 随着冻结、融解时长增加, 不论是 1 次或 20 次循环, 其导热系数均很快趋于稳定, 对应冻结、融解时长均为 1 h, 说明对孔隙率极低坚硬岩石, 在冻融循环温度一定情况下, 因水冰相变作用极少参与, 其完全冻结、融解时间主要取决于热传导参数值, 故可通过热传导参数进行冻结、融解时长换算。

(2) 对于存在一定孔隙率的砂岩而言, 在冻结、融解初期, 导热系数出现明显改变, 但随着冻结、融解的深入, 导热系数趋于稳定, 表明此时试样已完全冻结或融解, 可见, 对于具有一定孔隙率的岩石, 可采用依据导热系数“间接”判定其完全冻结或融解。

(3) 对于存在一定孔隙率的砂岩而言, 冻结、融解初期的导热系数改变速率与孔隙率大小密切相关, 孔隙率越大, 导热系数越快趋于稳定, 反映岩石更快地进入完全冻结或融解状态。

(4) 对冻结、融解过程而言, 导热系数趋于稳定时间并不一致, 其中冻结过程时, 导热系数更快趋于稳定, 对孔隙率为 14.2% 砂岩 1 而言, 对应时长为 2 h, 对孔隙率为 27.6% 砂岩 2, 对应时长为 1 h; 而在融解过程中, 导热系数改变相对缓慢, 孔隙率 14.2% 的砂岩 1, 对应时长为 4 h, 对孔隙率为 27.6% 砂岩 2, 对应时长为 3 h。

(5) 随着冻融循环次数增加, 岩石整体导热系数逐渐降低, 且伴随冻结、融解过程, 导热系数更快趋于稳定, 反映随着冻融循环增加, 完全冻结、融解对应时长逐渐缩短, 说明冻融循环次数对于岩石冻融损伤的显著效应。

基于以上分析, 结合国内外相关试验规程, 提出建议性冻结、融解时长, 可采用以下方法:

(1) 对于孔隙率大于 10% 的胶结不良中硬岩、软岩, 其对应的冻结、融解时长可分别采用 2, 4 h 进

行冻融循环试验;若有试验条件,可采用导热系数测定方法综合判定最佳试验时长。

(2) 对于孔隙率小于 10%、表面无显著开口孔隙的致密坚硬岩石而言,对应的冻结、融解时长均采用 1 h 进行冻融循环试验。

4 循环次数对冻融循环试验效果影响分析

冻融循环次数是冻融循环试验的主要参数,也是影响冻融循环试验效果的最重要指标,关于循环次数的选择,应结合冻融作用下试样的物理力学参数劣化效果来综合确定,而目前,尚无形成明确研究结论,直接影响试验方案的选取。

本节通过对国内外冻融循环试验进行统计分析,明确循环次数对岩石强度的劣化效应,并结合以上提出的冻融温度、时长建议方案对不同岩性、孔隙率岩石进行测定,综合提出循环次数的确定思路。

4.1 循环次数对岩石强度劣化效应统计分析

冻融循环次数主要依据冻融作用下试样的物理力学参数劣化特征确定,具体劣化程度的判定,一般要依据工程对象的功用性来确定,本文依据国内外学者相关冻融循环强度损伤试验成果,选取冻融系数 R_f [21] 作为判定指标来确定冻融循环次数。

因不同学者采用不同的岩石材料,且试验方案迥异,为便于对比分析,对冻融循环下的岩石强度变化进行归一化处理,分析循环次数造成的岩石强度劣化影响,详细统计结果 [2-3, 6-9, 11, 13, 19] 见图 3 所示。

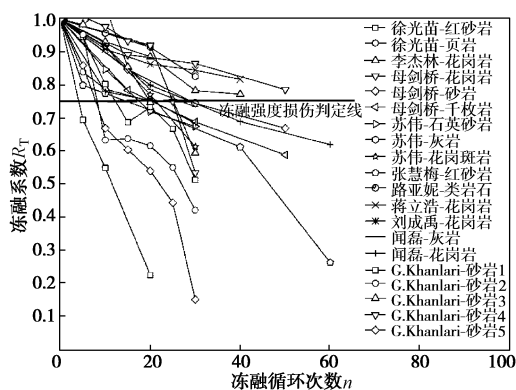


图 3 不同冻融次数下岩石冻融系数 R_f 变化特征

Fig. 3 Variation of freeze-thaw coefficient R_f of rock under different freeze-thaw cycles

从整体统计结果来看,在冻融系数 $R_f < 0.75$ 之后,岩石强度出现明显降低,且参考《公路工程岩石试验规程》[23],从岩石功用性而言,在强度折减至原来 75% 后,其工程安全性将难以保障,以此作为判定标准,用于确定其循环次数将更合理。

但需要指出,冻融后加载试验属于破坏试验,在

冻融完成后逐一加载测试确定合适循环次数并不可行,仍需探讨一种无损测试手段,且同时与冻融系数 R_f 具有较好匹配性。

4.2 试验方案设计

基于以上思路,设计不同循环次数的冻融循环试验,并选取 2 个指标:①冻融系数 R_f ;②波速降 λ_f 进行综合判定。

依据上 2 节探讨的标准化冻融温度、时长,对花岗岩、2 种不同孔隙率砂岩试样展开冻融循环试验,其中,对花岗岩进行 120 次循环,对砂岩进行 60 次循环,每 10 次循环后,分别进行声波波速测定、单轴加载试验,确定波速降 λ_f 和冻融系数 R_f 的变化。

4.3 试验结果及分析

通过对花岗岩、孔隙率为 14.2% 砂岩 1, 27.6% 砂岩 2 进行每 10 次循环的冻融系数 R_f , 波速降 λ_f 测定,详细试验结果见图 4 所示。

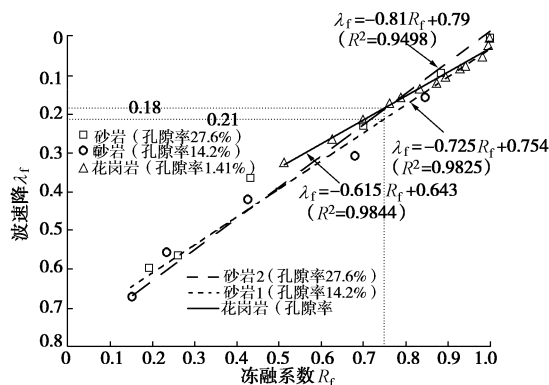


图 4 不同冻融次数下岩石冻融系数与波速降关联

Fig. 4 Correlation between freeze-thaw coefficient and wave velocity of rock under different freeze-thaw cycles

从图 4 中可得到以下结论:

(1) 不论对于花岗岩,还是孔隙率为 14.2%, 27.6% 砂岩,各自对应的波速降 λ_f 与冻融系数 R_f 具有较好的关联性,说明采用声波波速测试手段反映岩石的冻融劣化效应是可行的。

(2) 通过建立的波速降 λ_f 与冻融系数 R_f 关联式,可较好预测不同波速对应的岩石强度值,可实现用于“无损”测试对“有损”试验的预测。

(3) 通过波速降 λ_f 与冻融系数 R_f 关联式,基于冻融系数 $R_f = 0.75$ 的冻融损伤判定值得出各自对应的波速降,分别为: λ_f (花岗岩) = 0.182; λ_f (砂岩1) = 0.21; λ_f (砂岩2) = 0.183,对应波速降 λ_f 取值为 0.18~0.21。

(4) 依据以上判定,对照不同冻融循环次数试验结果,花岗岩、孔隙率为 14.2%, 27.6% 砂岩各自对应的循环次数分别为: 90 次、25 次、20 次。

基于以上分析,结合国内外相关试验规程及同行研究成果,对于冻融循环次数确定建议采用:

(1) 冻融循环次数的确定建议综合依据①冻融系

数 R_f 、②波速降 λ_f 联合判定, 其中加载试验冻融系数 R_f 判定值为 0.75, 声波测试波速降 λ_f 判定值取 0.2。

(2) 在无法进行加载破坏试验时, 推荐采用声波无损测试手段, 通过测定对应波速降 λ_f , 待其达到对应的判定值后, 对应的循环次数即为试验所需冻融循环次数。

(3) 冻融循环次数的选取应以 5 次循环为基本单元, 并应参考工程功用性综合确定, 以本次试验为例, 对于孔隙率小于 10%、表面无显著开口孔隙的致密坚硬花岗岩, 推荐冻融循环次数为 90 次; 而孔隙率大于 10% 的胶结不良的砂岩, 推荐循环次数分别为 25 次、20 次。

5 结 论

(1) 对目前岩石冻融循环试验方案综述表明, 不论是国内外学者或相关试验规程, 均未形成统一、标准的冻融循环试验条件, 对不同岩性、不同孔隙率采用何种冻融循环试验条件缺少明确试验依据。

(2) 冻融循环温度较循环次数、岩性及孔隙率等因素, 对岩石强度影响甚小。对于冻融循环温度确定, 综合依据中国寒区实际温度情况、室内试验操作方便, 及原有试验规程尽可能相似等原则, 建议采用 “ $-20 \pm 2^\circ\text{C} \sim 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ” 的循环温度。

(3) 提出采用测试岩石导热系数反映其真实冻结、融解时长, 并藉此推荐的冻结、融解时长为: 孔隙率大于 10% 的胶结不良中硬岩、软岩, 冻结、融解时长分别为 2, 4 h; 孔隙率小于 10%、无显著开口孔隙的致密坚硬岩石, 冻结、融解时长均采用 1 h。

(4) 对于冻融循环次数确定, 建议综合依据①冻融系数 R_f 、②波速降 λ_f 判定, 其中冻融系数 R_f 判定值取 0.75, 波速降 λ_f 判定值取 0.2, 并优先推荐声波波速无损测试手段。

参考文献:

- [1] 杨更社, 蒲毅彬. 冻融循环条件下岩石损伤扩展研究初探[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 357 - 360. (YANG Geng-she, PU Yi-bin. Initial discussion on the damage propagation of rock under the frost and thaw condition[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 357 - 360. (in Chinese))
- [2] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 37 - 40. (LIU Cheng-yu, HE Man-chao, WANG Shu-ren, et al. Experimental investigation freeze-thawing damage characteristics of granite at low temperature[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2005, 20(1): 37 - 40. (in Chinese))
- [3] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076 - 3082. (XU Guang-miao, LIU Quan-sheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076 - 3082. (in Chinese))
- [4] 刘 华, 牛富俊, 徐志英, 等. 循环冻融条件下安山岩和花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 557 - 563. (LIU Hua, NIU Fu-jun, XU Zhi-ying, et al. Acoustic experimental study of two types of rock from the Tibetan Plateau under the condition of freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 557 - 563. (in Chinese))
- [5] 蒋立浩, 陈有亮, 刘明亮. 高低温冻融循环条件下花岗岩力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 319 - 323. (JIANG Li-hao, CHEN You-liang, LIU Ming-liang. Experimental study of mechanical properties of granite under high/low temperature freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 319 - 323. (in Chinese))
- [6] 周科平, 许玉娟, 李杰林, 等. 冻融循环对风化花岗岩物理特性影响的实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊 1): 70 - 74. (ZHOU Ke-ping, XU Yu-juan, LI Jie-lin, et al. Experimental study of freezing and thawing cycle influence on physical characteristics of weathered granite[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 70 - 74. (in Chinese))
- [7] 苏 伟. 冻融循环对岩石物理力学性质及边坡稳定性影响的研究[D]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2012. (SU Wei. Study on physical and mechanical properties of rocks and slope stability under freeze -thaw cycle[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2012. (in Chinese))
- [8] 母剑桥, 裴向军, 黄 勇, 等. 冻融岩体力学特性实验研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 103 - 108. (MU Jian-qiao, PEI Xiang-jun, HUANG Yong, et al. Experimental research on mechanical characteristics of rock with cycles of freezing-thawing action[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 103 - 108. (in Chinese))
- [9] 张慧梅, 杨更社. 水分及冻融循环对红砂岩物理力学特性的影响[J]. 实验力学, 2013, 28(5): 635 - 641. (ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. On the influence of moisture and freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties of red sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(5): 635 - 641. (in Chinese))
- [10] 张慧梅, 杨更社. 水分及冻融效应对页岩力学特性影响的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(2): 95 - 99.

- (ZHANG Hui-mei, YANG Geng-she. Experimental studies on moisture and freeze-thaw effect of mechanical properties of shale[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, **36**(2): 95 - 99. (in Chinese))
- [11] 路亚妮, 李新平, 肖家双. 单裂隙岩体冻融力学特性试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, **10**(3): 593 - 598, 649. (LU Ya-ni, LI Xin-ping, XIAO Jia-shuang. Experimental analysis on mechanical characteristic of single cracked rock mass under freeze-thaw condition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, **10**(3): 593 - 598, 649. (in Chinese))
- [12] 刘红岩, 刘冶, 邢闯锋, 等. 循环冻融条件下节理岩体损伤破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1547 - 1554. (LIU Hong-yan, LIU Ye, XING Chuang-feng, et al. Test study of damage failure of jointed rock mass under freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1547 - 1554. (in Chinese))
- [13] 闻磊, 李夕兵, 尹彦波, 等. 冻融循环作用下花岗斑岩和灰岩物理力学性质对比分析及应用研究[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(3): 632 - 639. (WEN Lei, LI Xi-bing, YIN Yan-bo, et al. Study of physico-mechanical properties of granite porphyry and limestone in slopes of open-pit metal mine under freezing-thawing cycles and their application[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(3): 632 - 639. (in Chinese))
- [14] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2433 - 2442. (FANG Yun, QIAO Liang, CHEN Xing, et al. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang grottos[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2433 - 2442. (in Chinese))
- [15] 陈有亮, 王朋, 张学伟, 等. 花岗岩在化学溶蚀和冻融循环后的力学性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2226 - 2235. (CHEN You-liang, WANG Peng, ZHANG Xue-wei, et al. Experimental research on mechanical properties of granite in chemical dissolution under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2226 - 2235. (in Chinese))
- [16] ROSS Anderson. Assessment of timbercrete for freeze/thaw durability by testing to ASTM C1262-05a[R]. Rotorua: Timbercrete Rotorua Ltd, 2006.
- [17] PARK Jihwan, HYUN Chang-Uk, PARK Hyeong-Dong. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, **74**(2): 555 - 565.
- [18] BAYRAM Fatih. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012(83/84): 98 - 102.
- [19] KHANLARI G, SAHAMIEH R Z, ABDILOR Y. The effect of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of Upper Red Formation sandstones, central part of Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(8): 5991 - 6001.
- [20] GHOBADI M H, BABAZADEH R. Experimental studies on the effects of cyclic freezing-thawing, salt crystallization, and thermal shock on the physical and mechanical characteristics of selected sandstones[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **48**(3): 1001 - 1006.
- [21] FREIRE-LISTA D M, FORT R, VARAS-MURIEL M J. Freeze-thaw fracturing in building granites[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, **113**(5): 40 - 51.
- [22] GB/T50266—2013 工程岩体试验方法标准[S]. 2013. (GB/T50266 — 2013 Standard for tests methods of engineering rock mass[S]. 2013. (in Chinese))
- [23] JTG E41—2005 公路工程岩石试验规程[S]. 2005. (JTG E41 — 2005 Tests methods of rock for highway engineering[S]. 2005. (in Chinese))
- [24] TB 10115—2014 铁路工程岩石试验规程[S]. 2014. (TB 10115—2014 Code for rock test of railway engineering[S]. 2015. (in Chinese))
- [25] SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 2001. (SL264 — 2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric power engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [26] GB/T 9966.1—2001 天然饰面石材试验方法[S]. 2001. (GB/T 9966.1 — 2001 Test methods for natural facing stones[S]. 2001. (in Chinese))
- [27] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014[S]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [28] ASTM D 5312-04, 2004 Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions[S]. 2004.
- [29] CEN. UNE-EN 12371. Natural stone test methods—determination of frost resistance[S]. 2011.
- [30] 陈仁升, 康尔泗, 吴立宗, 等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(4): 469 - 475. (CHEN Ren-sheng, KANG Ersi, WU Li-zong, et al. Cold regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(4): 469 - 475. (in Chinese))