

# 冻融作用对西藏某边坡新鲜岩石结构影响的CT实验与分析

周志东<sup>1,2</sup>, 陈世杰<sup>2</sup>, 高静<sup>1</sup>

(1. 中国人民武装警察部队水电第三总队, 四川成都 611130; 2. 中科院寒区与旱区冻土实验室, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**在西藏高寒地区, 冻融作用特别强烈, 石海、石河和石坡随处可见。冻融作用对新鲜无明显裂隙岩石结构的影响如何, 是一个值得探讨的问题。为此, 进行了CT实验设计与分析, 得出了影响有但是相对较小的结论。

**关键词:**冻融作用; 新鲜岩石结构; 实验; 分析; 西藏

**中图分类号:** TU458; TU452; [TU42]; [TV221.2]

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2016)04-0006-03

## 1 实验设计

冻融作用使岩体结构产生变化, 在较为干燥和潮湿的条件下, 其对新鲜无裂隙的岩石会产生怎样的影响, 笔者对此在中科院寒区与旱区研究所冻土工程国家重点实验室进行了实验模拟。

为了获取冻融作用对新鲜岩石的结构影响, 从西藏某水利工程边坡选择了2组闪长玢岩新鲜岩样进行了1次实验(基本干燥情况的冻融与CT扫描)。

## 2 相对干燥情况下的岩石冻融实验

### (1) 实验项目。

①对2个闪长玢岩样品进行了CT扫描, 每个样品取3层有效数据进行分析。

②将样品反复冻融50次后, 对样品再次进行CT扫描。

③测量冻融前后试样的CT数据, 得到试样的CT数据。

### (2) 实验使用的主要仪器:

PHILIPS Brilliance 16 螺旋CT机、CT 试验图像处理软件、可编程冻融循环试验机。Brilliance 16 螺旋CT机参数: 该CT系统的空间分辨率为0.208 mm, 密度分辨率为0.3%。扫描电压(管电压)为90~140 kV, 扫描电流(管电流)为30~500 mA。

### (3) 实验过程。

首先, 对2#、3#试样浸泡48 h后放入CT机

中, 进行初次扫描。

其次, 将完成初次扫描的2#、3#试样装入冻融循环机, 反复冻融50次, 其中-5℃冻结4 h, 5℃融化4 h, 每个冻融循环为8 h。待完成冻融循环实验后对样品再次重新定位进行CT扫描。

最后, 记录冻融前后测量感兴趣区的CT数据。

### (4) CT数据的基本方程。

在一定的扫描条件下, 经校准的CT扫描图像反演出扫描层面的数据分布, 采用卷积算法, 在满足一定的空间分辨率条件下图像点的CT数值:

$$H = 1000(\mu_{rm} - \mu_w) / \mu_w \quad (1)$$

式中  $H$  为CT数;  $\mu_{rm}$  为图像点(及其邻域)的X射线吸收系数;  $\mu_w$  为纯水的X射线吸收系数。由式(1)可见, 真空的CT数为-1000, 纯水的CT数为0。

### (5) CT损伤定义。

经过硬化改正的CT数据、具有规范的CT数和标准差, 分别代表了感兴趣区的密度和离散程度。

在初始状态和实验过程中, 这些数据会发生变化。有多种CT岩土损伤定义, 依据杨更社、仵彦卿等CT损伤理论, 岩土CT损伤变量可定义为:

$$D = \frac{H_0 - H_i}{1000 + H_0} \quad (2)$$

考虑到仪器分辨率的影响, 则:

$$D = \frac{1}{m_0^2} \left( \frac{H_0 - H_i}{1000 + H_0} \right) \quad (3)$$

式中  $m_0$  为CT机的空间分辨率(本次实验CT机的空间分辨率为0.208 mm);  $H_0$  为试样初始

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 中科院冻土工程国家重点实验室开发基金课题(SKLFSE201205)资助。

CT 数;  $H_i$  为  $i$  时刻损伤后的试样 CT 数。

(6) 实验数据。

①2#试样浸水 48 h 后扫描。

2#试样初始参数:高度为 109.9 mm;直径为 54 mm;质量为 656.25 g。

浸水 48 h 后:高度为 109.9 mm;直径为 54 mm;质量为 656.98 g。

冻融循环 50 次后:高度为 109.9 mm;直径为 54 mm;质量为 656.47 g。

CT 实验扫描条件:层厚 3 mm;扫描电压 120 kV;扫描电流 185 mA;重建矩阵  $512 \times 512$ ,放大倍率:1;滤波函数:EC。

CT 扫描的层位与测量区域的划分见图 1。

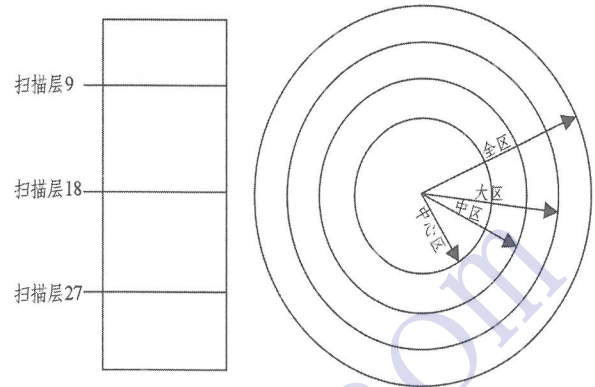


图 1 扫描层位及测量区域的划分示意图

表 1 闪长玢岩 2#岩样冻融前后 CT 测量值表

扫描次	定位层		全区	大区	中区	中心区	
1(冻融前)	9	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7	
		ME	2 224.7	2 219	2 184.6	2 148.6	
		SD	231.7	72.8	55.4	37.8	
	18	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7	
		ME	2 218.3	2 214.2	2 186.1	2 151.4	
		SD	225	60.8	48.8	39.5	
	27	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7	
		ME	2 215.7	2 213.9	2 185.5	2 149.6	
		SD	232.9	61	48	31.5	
	2(冻融后)	9	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
			ME	2 223	2 218	2 183.5	2 147.9
			SD	230.9	71.2	51.9	37.4
18		AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7	
		ME	2 215.1	2 213.8	2 185.4	2 148.8	
		SD	231.7	63	52.8	34.1	
27		AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7	
		ME	2 214.1	2 212.9	2 185	2 148.6	
		SD	225.9	60.2	48.4	31.2	
		9	$\Delta$ ME	-1.7	-1	-1.1	-0.7
		18	$\Delta$ ME	-3.2	-0.4	-0.7	-2.6
		27	$\Delta$ ME	-1.6	-1	-0.5	-1

注:AR 为断层测量区域面积;ME 为测量区域 CT 均值;SD 为测量区域 CT 值标准差; $\Delta$ ME 为冻融前后 CT 均值的变化量。

2#试样冻融前后所测感兴趣区域(ROI) CT 均值呈现规律性变化,具体表现见图 2 和表 1。冻融前后三个层位不同区域的  $\Delta$ ME 均略有减少,试样冻融后 CT 值略有减少,表明试样的密度略有减小,有物质迁出。按照式(2)、式(3)计算其损伤略有增加,但增幅较小。

3#试样浸水 48 h 后扫描。

3#试样初始参数:高度为 110.48 mm;直径为 54.6 mm;质量为 671.64 g。

浸水 48 h 后:高度为 110.48 mm;直径为 54.6 mm;质量为 673.15 g。

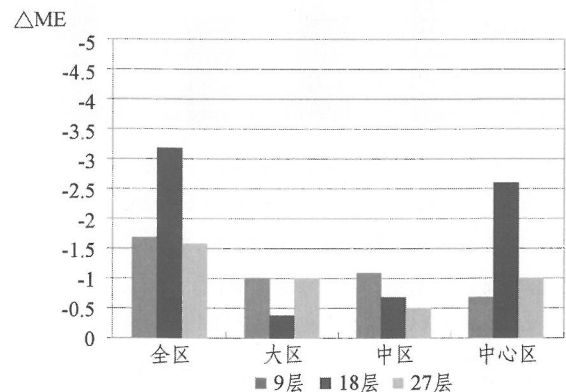


图 2 2#闪长玢岩岩样冻融前后 CT 变化值图

表 2 3#闪长玢岩岩样冻融前后 CT 变化值表

扫描次	定位层	全区	大区	中区	中心区	
1(冻融前)	9	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
		ME	2 252.4	2 214.2	2 177.9	2 137
		SD	150.3	80.8	63.5	41.7
	18	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
		ME	2 254.7	2 219.5	2 189.5	2 149.3
		SD	142.1	77.2	68.6	51.1
		AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
		ME	2 248.9	2 215.9	2 186.4	2 146.7
		SD	137.5	71.4	59.7	41.4
2(冻融后)	9	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
		ME	2 250	2 210.6	2 174.4	2 135.5
		SD	145.7	80.1	60.9	43.6
	18	AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
		ME	2 249.7	2 215.5	2 186.1	2 142.7
		SD	145.6	78.3	71.1	46.5
		AR	2 283.2	1 717.8	1 142.1	570.7
		ME	2 243.3	2 213.1	2 183.8	2 142.4
		SD	148	71.9	62.4	43.6
9	ΔME	-2.4	-3.6	-3.5	-1.5	
	18	ΔME	-5	-4	-3.4	-6.6
	27	ΔME	-5.6	-2.8	-2.6	-4.3

注: AR 为断层测量区域面积;ME 为测量区域 CT 均值;SD 为测量区域 CT 值标准差;ΔME 为冻融前后 CT 均值的变化量。

冻融循环 50 次后:高度为 110.48 mm;直径为 54.6 mm;质量为 672.02 g。

CT 实验扫描条件:层厚 3 mm;扫描电压 120 kV;扫描电流 185 mA;重建矩阵 512 × 512;放大倍率:1;滤波函数:EC。

3#试样冻融前后反映的规律性变化同 2#实验,具体表现如图 3 和表 2 所示:冻融前后三个层

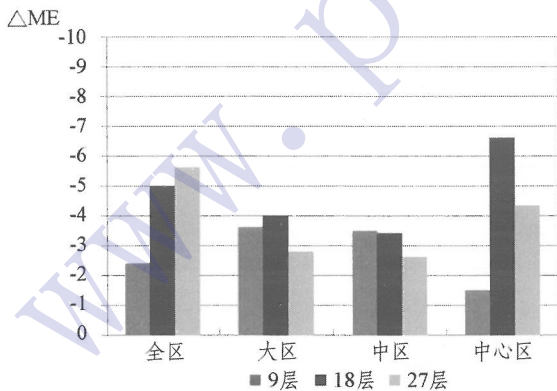


图 3 3#闪长玢岩岩样冻融前后 CT 变化值图

位不同区域的 ΔME 均略有减少,试样冻融后 CT 值略有减少,表明试样的密度略有减小,有物质迁出。按照式(2)、式(3)计算其损伤略有增加,但增幅仍然较小。与 2#试样相比,3#试样的密度和损伤增加幅度略大,表明 2 个试样内部细观结构

存在差异。

(7)实验结果分析。

①2#、3#试样冻融后 CT 值变化规律均相同,冻融循环后的 CT 值均小于冻融循环前,分析其原因为:试样饱水后,在冻融循环过程中,大部分水分在温度达到 0℃ 以上就已经散失掉了,使得试样内部发生水分的迁移,致使其密度略有减小。按照式(2)、式(3)计算损伤变量虽然略有增加,但试样内部细观结构未发生变化。

②若不考虑水分的迁移对试样的影响,在本次实验温度条件下的冻融过程对岩体的结构损伤作用不明显。

③由对比可知:3#试样冻融前后水分的散失大于 2#试样,从而使得 3#试样冻融前后的 CT 值变化量 ΔME 略大于 2#试样,说明 2 个试样内部细观结构存在细微差异。

3 结 语

在相对干燥条件下,冻融对新鲜岩体的影响是存在的。但是由于闪长玢岩岩石的致密性、裂隙少,水的自由通道少,对岩石的结构影响相对较小,CT 值变化不是很明显。本次研究只是针对岩石短期的寒冻作用进行的实验。但是地质历史是 (下转第 11 页)



4.4 求灰色关联系数

灰色关联系数按照下列公式求解:

$$\Delta_{ij} = |Y'_i(j) - X_i(j)|$$

$$\Delta_{\min} = \min(\Delta_{ij})$$

$$\Delta_{\max} = \max(\Delta_{ij})$$

$$V_{ij} = \frac{X_i(j) - \min_j X_i(j)}{\max_j X_i(j) - \min_j X_i(j)}$$

据此求得关联系数矩阵 V:

$$V = \begin{bmatrix} 0.368 & 0.683 & 0.864 & 0.618 & 0.497 & 0.422 & 0.368 \\ 0.368 & 0.497 & 0.719 & 0.848 & 0.584 & 0.451 & 0.368 \\ 0.412 & 0.706 & 0.802 & 0.566 & 0.452 & 0.381 & 0.333 \\ 1 & 0.984 & 0.977 & 0.976 & 0.98 & 0.987 & 1 \\ 1 & 0.989 & 0.977 & 0.976 & 0.98 & 0.978 & 1 \\ 1 & 0.928 & 0.897 & 0.892 & 0.903 & 0.94 & 1 \\ 1 & 0.915 & 0.829 & 0.74 & 0.658 & 0.778 & 0.528 \end{bmatrix}$$

4.5 求关联度

关联度按照下式求解:

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

据此求得关联度矩阵 R:

$$R = [0.546, 0.548, 0.522, 0.986, 0.99, 0.937, 0.778]$$

4.6 关联度排序

按照从大到小的顺序排列,各因素影响大小分别为:

$$\varphi > C > b > \mu > \alpha > h > \gamma$$

5 结语

综上所述,笔者得出的结论如下:

(1)中间主应力参数 b 和 Lode 应力参数 μ 确实对边坡稳定性有一定的影响。

(上接第 8 页)

一个长期的演化过程,长期的冻融作用可能会导致岩体结构发生巨变。

参考文献

[1] 朱立平,王家澄,彭万威,陶兆祥. 寒冻条件下热力作用对岩石破坏的模拟实验及其分析[J]. 地理研究,2000,19(4):437-443.

[2] 杨更社,蒲毅彬,等. 冻融循环条件下岩石损伤扩张初探[J]. 煤炭学报,2002,27(4):357-360.

[3] 周志东,陶然,等. 高原高寒地区边坡变形破坏机制与综

(2)通过灰关联分析可得,在影响边坡稳定性的七个主要因素中,土体内摩擦角 φ 和粘聚力 C 对边坡稳定性影响最为敏感,中间主应力参数 b 和 Lode 应力参数 μ 对边坡稳定的影响次之,坡角 α 和坡高 h 对边坡稳定性的影响较小,而容重 γ 对边坡稳定性的影响最小。

(3)在边坡优化设计和治理中,可以通过改变敏感性较强的因素,如内摩擦角 φ 和粘聚力 C 等,进而达到明显的改善效果。

参考文献:

[1] 李小春,许东俊,刘世煌,等. 真三轴应力状态下拉西瓦花岗岩的强度、变形及破裂特性试验研究[D]. 北京:中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集,中国科学出版社,1994,153-159.

[2] Zhou Wei-yuan, The development and state of art of rock mechanics in China: Application of computer methods in Rock Mechanics, Shaanxi Sci and Tech Press, 1993, Vol. 1, 81-88

[3] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.

[4] 甘勇,胡卫东. 边坡稳定性影响因素的灰色关联分析[J]. 大众科技,2010,18(7):87-88.

[5] 马景洋. 滑坡的稳定性分析与治理措施[J]. 江西建材,2014,36(15):131-132.

作者简介:

魏海兵(1987-),男,陕西延安人,助理工程师,硕士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

焦永春(1986-),男,青海西宁人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;

高静(1984-),女,河南新乡人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

合治理技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2015.

作者简介:

周志东(1969-),男,湖南新化人,高级工程师,博士,中科院冻土工程国家重点实验室客座研究员,从事水利水电工程施工技术与应急救援等工作;

陈世杰(1983-),男,甘肃高台人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术研究工作;

高静(1984-),女,河南新乡人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)