

# 非饱和板岩裂隙扩展机制 CT 试验研究

戴永浩<sup>1</sup>, 陈卫忠<sup>1</sup>, 王者超<sup>1</sup>, 朱维申<sup>1, 2</sup>, 蒲毅彬<sup>3</sup>, 王雁然<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. 武汉大学 土木建筑学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 板岩内部不仅含有大量的由黏土类矿物组成的层理、片理, 且还含有数量众多的微裂隙及微孔洞, 这使得其力学特性显得相当复杂。采用 CT 机及配套岩石三轴试验加载设备, 完成了 2 个锦屏 II 级电站非饱和板岩试样的单轴压缩破坏 CT 实时试验, 得到了试样破坏的各个阶段的 CT 图像。通过对 CT 图像的分析处理, 从微观角度分析板岩微裂纹萌生、扩展, 直至宏观裂纹形成并贯通的整个演化过程, 解释含水层理和垂直层理 2 种情况下非饱和板岩破坏方式不同的机制。根据 CT 原理, 推导基于 CT 数的非饱和岩石标量型损伤变量的计算公式。

**关键词:** 岩石力学; 非饱和板岩; 裂隙扩展; CT 试验

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)12 - 2537 - 09

## STUDY ON CRACK PROPAGATION OF UNSATURATED SLATE BY CT TESTS

DAI Yonghao<sup>1</sup>, CHEN Weizhong<sup>1</sup>, WANG Zhechao<sup>1</sup>, ZHU Weishen<sup>1, 2</sup>, PU Yibin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. Research Center for Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Slate is a common geological material in geotechnical engineering. Traversed by joints and schistositys with clay minerals, the mechanical characteristics of slate are complex; and the existence of the numerous microscopic cracks and voids aggravates the complexity. Using the loading equipment corresponding CT machine, the CT real-time tests of two unsaturated jointed slate samples from Jinping-II Hydropower Station under triaxial compression are conducted. The typical CT images in failure process are obtained. With the obtained CT images, the evolution processes of crack initiation, propagation, coalescence, and finally macroscopic fracture formation are analyzed in the microscopic scale; and the differences of failure mechanisms with different strata distributions are explained. Based on the principle of CT, the scalar damage variants of unsaturated rocks are presented with the CT values.

**Key words:** rock mechanics; unsaturated slate; crack propagation; computerized tomography(CT) test

## 1 引言

板岩是西部水利水电岩体工程中经常遇到的一

种复杂介质, 板岩中发育有大小不等的层理、片理及微裂隙和微孔洞, 这些缺陷的存在都将与岩体的强度、变形和渗透性等密切相关, 使得其力学行为显得更为复杂。已有的研究成果表明: 板岩的各向

**收稿日期:** 2006 - 04 - 07; **修回日期:** 2006 - 04 - 25

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50379052); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704)

**作者简介:** 戴永浩(1978 - ), 男, 2000 年毕业于河南理工大学采矿工程系, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: dyhchina@163.com

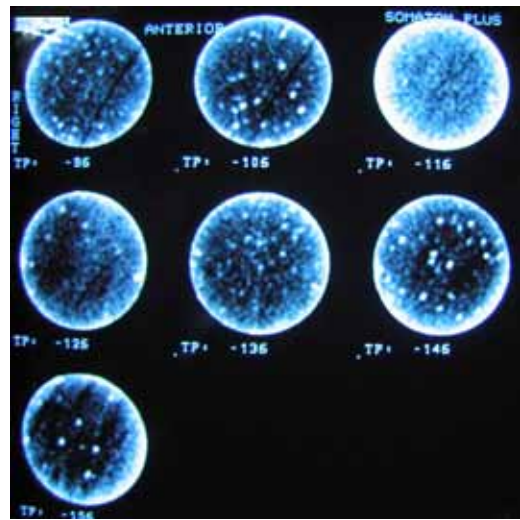
异性主要是由于层理引起的。当载荷方向与层理面方向一致时，其破坏为剪切破坏；当载荷方向与层理面平行时，其破坏为张拉型破坏；当载荷方向介于两者之间时，会发生复合型破坏。板岩经水饱和后，其抗压、抗拉强度及弹性模量均有所降低，这已为众多试验研究和理论研究所证实。然而，对这些现象的物理的、微观层次的认识方面尚欠深入，对其损伤演化的机制尚不甚清楚，因此有必要借助先进的试验方法作进一步的研究。

本文采用 CT 无损检测技术，从细观的角度研究不同饱和度条件下板岩的损伤演化机制。CT 检测因具有多层面扫描，可采用国际标准圆柱形试样无损检测方法。1986 年日本首先研制成功室内受压岩样弹性波 CT 机，并用该机对受压岩样内部裂隙发展过程进行研究，成为岩石力学 CT 技术研究和应用的开端<sup>[1]</sup>。1989~1991 年，S. Raynaud 等<sup>[1~3]</sup>分别利用 CT 机研究受轴对称荷载的岩石内部破坏机制。F. Verhelst 等<sup>[4]</sup>于 1995 年利用 X 射线 CT 机研究岩样的微裂缝和不均一结构。H. Kawakata 等<sup>[5]</sup>于 1997 年用 X 射线 CT 机研究 Westerly 花岗岩在三轴压缩时的损伤扩展特性。杨更社<sup>[6]</sup>于 1995 年在最早应用医用 X 射线 CT 机对岩石的初始损伤特性进行研究，给出用 CT 数表示的岩石损伤变量公式。1999 年，葛修润等<sup>[7]</sup>研制与岩土 CT 专用三轴加载装置，从而实现试验过程中的实时扫描。任建喜等<sup>[8~10]</sup>、简浩等<sup>[11]</sup>和李廷春<sup>[12]</sup>相继进行众多单轴、三轴岩石 CT 实时试验。本次试验研究选取含水平层理和垂直层理的 2 个非饱和节理板岩试样，通过单轴压缩条件下的 CT 实时破坏试验，研究非饱和板岩破坏过程中微裂隙的损伤演化规律。

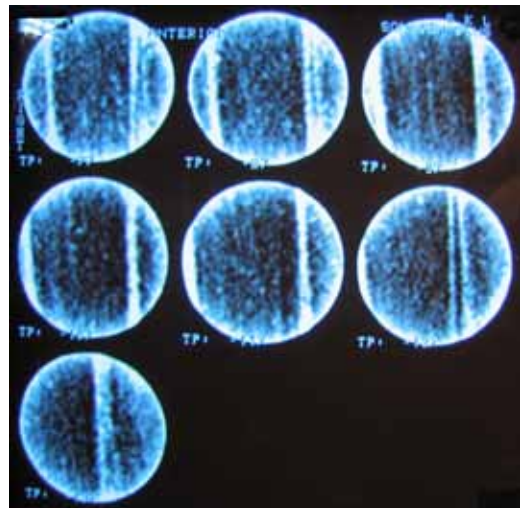
## 2 板岩的岩性特征及 CT 试验

### 2.1 板岩的岩性特征

本次试验所用试样采自雅砻江锦屏 II 级电站的板岩，其主要成分有石英、黏土类胶结物及黑云母等。板岩试样初始扫描图见图 1。从 CT 初始扫描图中可看出，试样 1 中硬质层理沿水平分布，第 3 扫描层穿过该层，其他层仅发现有硬质晶粒散布，微裂纹和微孔洞分布较密，试样的饱和度为 86.65%。试样 2 可明显发现两条硬质岩脉沿竖向穿过试样，倾角接近 90°，形成竖向的层理面，试样的饱和度为 78.86%。其中，在试样 1 的中上部位，



(a) 试样 1(层理水平分布)



(b) 试样 2(层理竖直分布)

图 1 板岩试样初始扫描图

Fig.1 Original CT images of slate samples

有一竖向天然裂隙贯穿第 1, 2 扫描层，裂隙竖向长度 1~2 cm，横向宽度 3 cm，厚度 0.1~0.2 mm，其倾角接近 90°。

### 2.2 CT 试验

试验所用 CT 机为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 1998 年购买的德国西门子 SOMATOM-PLUS 型 X 射线螺旋 CT 机(见图 2(a))，该机空间分辨率为 0.35 mm×0.35 mm，可识别最小体积为 0.12 mm<sup>3</sup>，密度对比分辨率为 0.3%(3Hu)。试验专用配套加载设备(见图 2(b))是由葛修润等<sup>[7]</sup>课题组于 1999 年研制成功的，该机最大轴向设计压力为 400 kN，围压为 20 MPa，轴向工作行程 40 mm，位移传感器量程 0~50 mm，精度 0.31%。岩石试样尺寸采用国际标准尺寸，为 φ50 mm×100 mm。试验通



(a) CT 机



(b) 三轴加载装置

图 2 试验设备

Fig.2 Test equipment

过位移控制方式实现, 其速率为  $3 \times 10^{-4}$  mm/s。在试样加载过程中, 采用 CT 机进行无扰动实时扫描, 直至试样在轴压的作用下被破坏。对试样 1 共扫描 9 次, 每次 7 层; 试样 2 共扫描 6 次, 每次 7 层。扫描层厚均为 3 mm, 层间距为 10 mm。

试样单轴压缩应力 - 应变关系曲线如图 3 所示, 扫描点应力 - 应变对照表见表 1, 2。

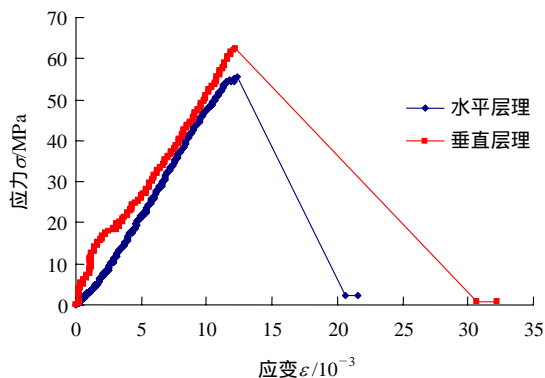


图 3 非饱和板岩单轴压缩应力 - 应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of unsaturated slate under uniaxial compression

表 1 试样 1 各次扫描对应应力 - 应变表

Table 1 Stresses and strains of various scanning sections for sample 1

序号	应变/ $10^{-3}$	应力/MPa	序号	应变/ $10^{-3}$	应力/MPa
1	0.00	0.00	6	8.42	40.36
2	1.85	5.85	7	10.07	47.99
3	4.11	17.46	8	10.47	48.72
4	5.14	22.27	9	11.30	53.21
5	6.78	30.74			

表 2 试样 2 各次扫描对应应力 - 应变表

Table 2 Stresses and strains of various scanning sections for sample 2

序号	应变/ $10^{-3}$	应力/MPa	序号	应变/ $10^{-3}$	应力/MPa
1	0.00	0.00	4	7.49	38.21
2	2.29	17.06	5	9.16	46.48
3	4.99	26.17	6	10.61	53.70

### 3 试验结果及分析

试验得到每一扫描层各个阶段的扫描图像(此处不再列举)。对得到的 CT 图像, 必须进行相关信息的提取, 才能进行更深入的分析。本次试验对 CT 图像量化信息的提取采用的方法是: (1) 对任一扫描层, 本文都选定了 3 个椭圆形兴趣区域(range of interesting, ROI), 该区域不能太小, 也不能太大: 太小则数据变化敏感, 易受偶然因素的影响; 太大则容易掩盖局部现象, 文中区域面积采用  $2 \sim 7$  cm<sup>2</sup>, 记录其平均 CT 数、方差、面积和位置信息。连续测量同样区域的数据, 就可分析该区域在试样破坏全过程中的连续变化。(2) 在兴趣区域内, 通过调整 CT 值统计范围的上下限, 寻找反映裂隙区(或裂纹)范围的 CT 阈值, 做出二值化 CT 图并观察其变化, 记录裂隙区的面积和裂隙区内的 CT 均值, 可更准确地分析裂隙区的演化过程。

试样各扫描层兴趣区域的选取如图 4 所示, 其中椭圆 1 为裂隙较发育区域; 椭圆 2 为与椭圆 1 位置基本对称的较致密等面积区域, 将与较“软弱”的椭圆 1 区域对比分析; 椭圆 3 包含椭圆 1, 椭圆 3 和椭圆 1 相减所得的环形区域即为主裂隙边缘部分, 以观察和记录主裂隙边缘的损伤演化过程。通过对扫描层内兴趣区域的量化数据的提取, 得到

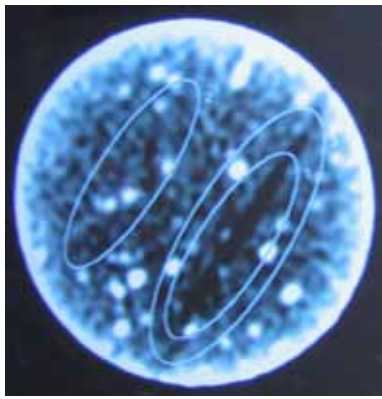


图 4 兴趣区域选取图

Fig.4 ROIs of the sample's scanning section

各扫描层兴趣区域的 CT 数、方差及裂隙区的面积、CT 数和方差信息，并绘制曲线图。

篇幅所限，此处只选择试样 1 的第 2, 3 扫描层展开详细分析，其他层不再详细论述。试样 1 第 2, 3 扫描层的 CT 数和方差见表 3, 4。CT 数、CT 方差与应变的关系图见图 5~8，其兴趣区域的裂隙区

面积演化图见图 9~10。

由于试样 2 破坏显示出强烈的脆性，破坏前基本上一直处于线性压密阶段，破坏过程很突然，因此没有捕捉到屈服段的 CT 图像。由于其变化较单一，且变化较小，所以不在此对各层做详细分析，仅列出其第 4 扫描层兴趣区域 3 的裂隙区面积演化图(图 11)。

(1) 从试样 1 第 2 扫描层 CT 图像可知(见图 9)，该层发育有一较大宏观裂纹，该裂纹连通性较好，裂纹边缘有细小微裂纹发育。初始状况下，兴趣区域 1(含裂纹)的 CT 数最低，裂纹边缘的 CT 数最高。从开始加载到应变  $4.11 \times 10^{-3}$  的阶段，各兴趣区域的 CT 数都在平缓升高，兴趣区域 1 的 CT 方差先下降后上升，而兴趣区域 2, 3 的方差平稳减小。结合其裂隙区演化图(见图 9，图中高亮部分为裂隙区)可知，该阶段主裂纹长度和宽度都在减小，微裂纹数量减少，裂纹区总的面积也减小。该阶段层内物质被压密，物质得到强化。

表 3 试样 1 第 2 扫描层 CT 数及方差

Table 3 CT values and variances of the 2nd scanning section for sample 1

应变 $\varepsilon/10^{-3}$	椭圆 1		椭圆 2		椭圆 3		外环
	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数
0.00	2 123.5	55.73	2 152.3	41.48	2 142.5	59.28	2 162.28
1.85	2 130.6	53.54	2 158.3	42.53	2 148.3	59.55	2 166.73
4.11	2 130.9	54.23	2 160.7	45.03	2 150.4	59.19	2 170.70
5.14	2 132.2	54.52	2 159.5	46.66	2 150.8	60.04	2 170.17
6.78	2 134.1	56.23	2 160.3	43.58	2 152.1	60.38	2 170.84
8.42	2 136.2	59.50	2 164.0	44.79	2 153.7	62.63	2 171.92
10.07	2 130.3	64.12	2 164.7	47.29	2 151.0	65.74	2 172.55
10.48	2 118.2	79.20	2 165.1	44.14	2 146.0	78.80	2 174.95
11.30	2 116.5	86.10	2 163.4	45.81	2 142.9	81.95	2 170.39

表 4 试样 1 第 3 扫描层 CT 数及方差

Table 4 CT values and variances of the 3rd scanning section for sample 1

应变 $\varepsilon/10^{-3}$	椭圆 1		椭圆 2		椭圆 3		外环
	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数	方差	CT 数
0.00	2 209.9	36.58	2 268.6	56.97	2 227.9	51.37	2 252.14
1.85	2 211.8	33.04	2 270.3	56.30	2 229.1	50.09	2 252.39
4.11	2 217.8	34.72	2 274.3	54.89	2 233.7	50.13	2 255.11
5.14	2 218.9	33.75	2 274.8	53.38	2 234.4	47.83	2 255.27
6.78	2 215.9	33.8	2 274.7	55.66	2 233.4	49.23	2 256.96
8.42	2 213.5	33.87	2 273.4	53.18	2 230.8	49.09	2 254.09
10.07	2 209.9	37.83	2 274.3	53.27	2 228.5	51.52	2 253.54
10.48	2 200.4	38.12	2 272.3	51.76	2 221.2	51.70	2 249.21
11.30	2 198.1	42.13	2 271.8	51.81	2 219.2	54.09	2 247.61

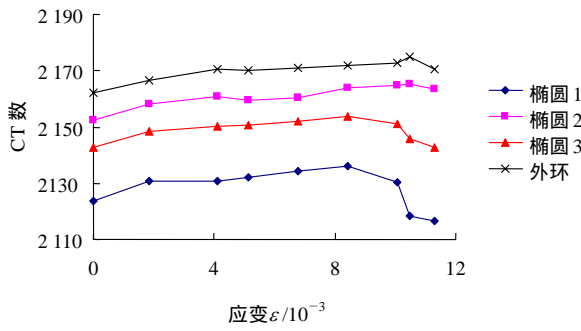


图5 试样1第2扫描层CT数-应变曲线

Fig.5 Curves of CT values vs. strain of the 2nd scanning section for sample 1

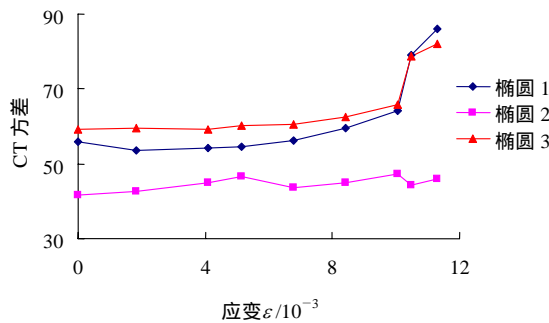


图6 试样1第2扫描层CT方差-应变曲线

Fig.6 Curves of CT variances vs. strain of the 2nd scanning section for sample 1

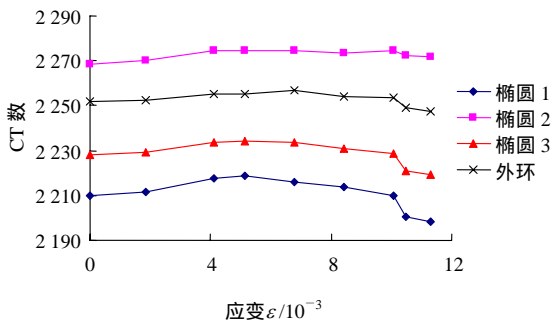


图7 试样1第3扫描层CT数-应变曲线

Fig.7 Curves of CT values vs. strain of the 3rd scanning section for sample 1

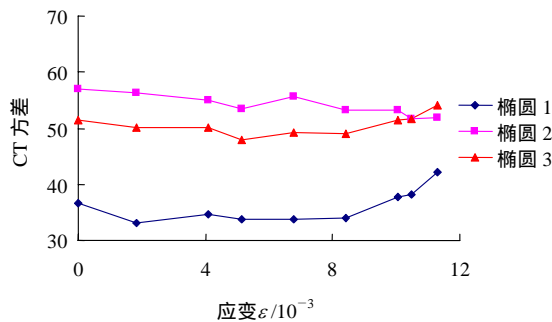


图8 试样1第3扫描层CT方差-应变曲线

Fig.8 Curves of CT variances vs. strain of the 3rd scanning section for sample 1

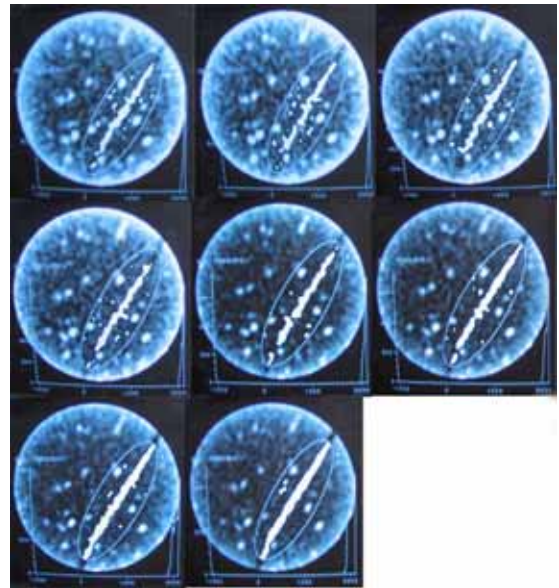


图9 试样1第2扫描层兴趣区域3裂隙区演化图

Fig.9 Damage evolution of the 2nd scanning section's ROI3 for sample 1

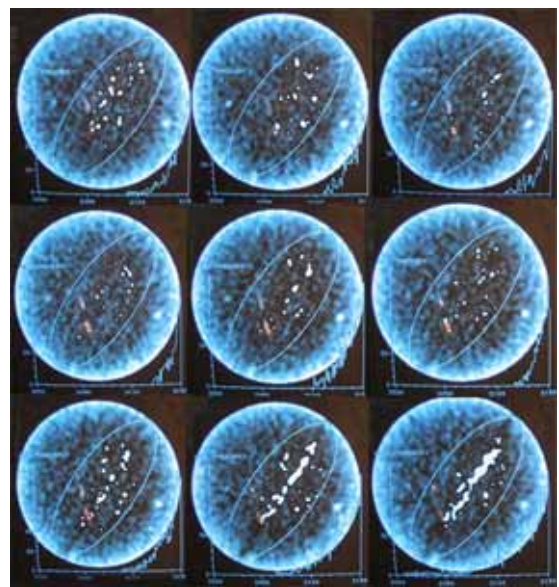


图10 试样1第3扫描层兴趣区域3裂隙区演化图

Fig.10 Damage evolution of the 3rd scanning section's ROI3 for sample 1

应变为  $4.11 \times 10^{-3} \sim 5.14 \times 10^{-3}$  的阶段, 兴趣区域1的CT数上升速率变小, 其他区域CT数都降低, 裂隙区面积略有上升, 表明损伤开始演化, 主裂纹长度和宽度又有所增加, 同时有新的微裂纹产生, 说明损伤发展。

应变为  $5.14 \times 10^{-3} \sim 10.07 \times 10^{-3}$  的阶段, 各区域的CT数都在平稳升高, 说明试样由于受压, 试样密度在增加。但从裂隙区演化图上则显然可看出, 宏观裂纹的长度和宽度都在增加, 而宏观裂纹边缘

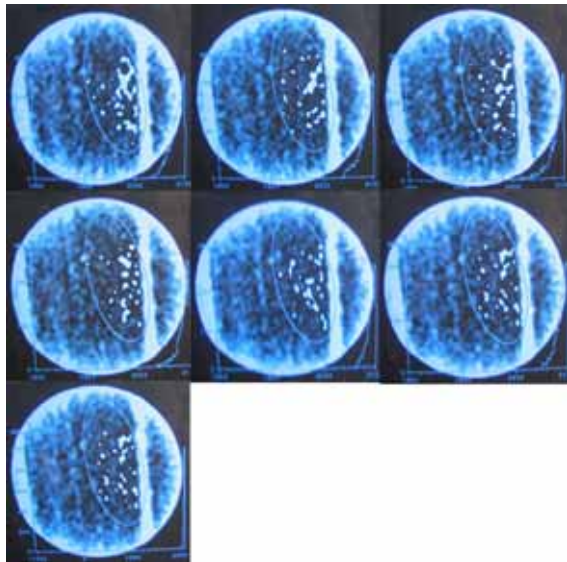


图 11 试样 2 第 4 扫描层兴趣区域 3 裂隙区演化图  
Fig.11 Damage evolution of the 4th scanning section's ROI3 for sample 2

的微裂纹数量则减少，至应变为  $10.07 \times 10^{-3}$  时，边缘部分的微裂纹已基本闭合。应变为  $10.47 \times 10^{-3} \sim 11.30 \times 10^{-3}$  的阶段，各兴趣区域的 CT 数都急剧下降，裂隙区面积迅速增大，试样迅速达到峰值强度并破坏。该阶段宏观裂纹的长度和宽度迅速增加并贯穿整个试样，宏观裂纹边缘则进一步减少，说明宏观裂纹边缘物质反被压实。

(2) 从试样 1 第 3 层 CT 图像可知(见图 10)，初始状态下，该层各兴趣区域 CT 数都比其他层要高很多，说明该层物质要比其他层相对致密，岩石完整性较好，属于试样中的硬质夹层。微裂纹和微孔洞数量较少，呈杂乱状态分布，没有比较大的宏观裂纹，初始损伤较小。

从开始加载到应变为  $4.11 \times 10^{-3}$  的阶段，各兴趣区域的 CT 数都缓慢升高，方差都有所下降，该阶段微裂纹的数量和面积都在减小，物质被压密。

应变为  $4.11 \times 10^{-3} \sim 5.14 \times 10^{-3}$  的阶段，各区域的 CT 数基本上不再增加，或增加很小，而方差数都较快的降低，结合裂隙区损伤演化图可知，该阶段微裂纹扩展长大，并有新的微裂纹萌生，损伤开始发展。

应变为  $4.11 \times 10^{-3} \sim 10.07 \times 10^{-3}$  的阶段，除兴趣区域 2 的 CT 数基本不变外，其他各区域的 CT 数都平稳下降，裂隙区面积增大，微裂纹的分布开始显现出一定的方向性。

应变为  $10.47 \times 10^{-3} \sim 11.30 \times 10^{-3}$  的阶段，各区

域的 CT 数急剧下降，方差快速升高，裂隙区面积迅速增大。微裂纹汇合贯通形成宏观裂纹并贯穿试样，试样最终破坏。

## 4 板岩损伤演化机制及损伤变量的计算

### 4.1 损伤演化机制

从上述分析可知，锦屏 II 级电站板岩的大量节理、片理及微裂纹和微孔洞等缺陷所形成的初始损伤使其呈现强烈的各向异性，且由于微裂隙的发展演化而使得其力学行为更为复杂。从试样裂隙面积演化图(见图 12, 13)可看出，试样 1 裂隙演化更为复杂，多数层位裂隙都在不断的压缩和张开，在试样发生破坏前裂纹已经有所张开，而试样 2 裂隙在试样破坏前裂隙面积变化不大，但破坏前裂隙面积都有所减小，其破坏很突然。从图 12 可知，试样不同扫描层的演化规律并不很一致，如试样 1 第 6 扫描层破坏前裂隙面积一直在减小，最后突然张开破坏，而第 7 层裂隙区面积则一直在增大。即使是同一层不同区域，其演化也不完全一致。

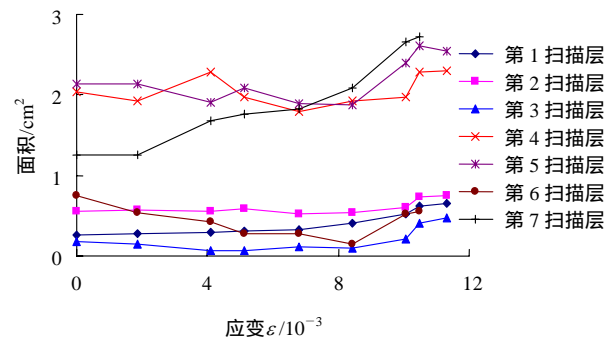


图 12 试样 1 兴趣区域 3 裂隙面积 - 应变曲线图  
Fig.12 Curves of crack area vs. strain of ROI3 for sample 1

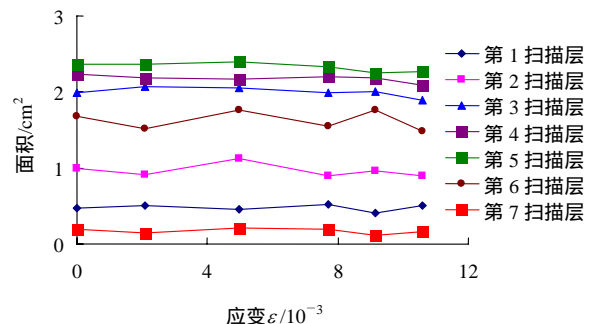
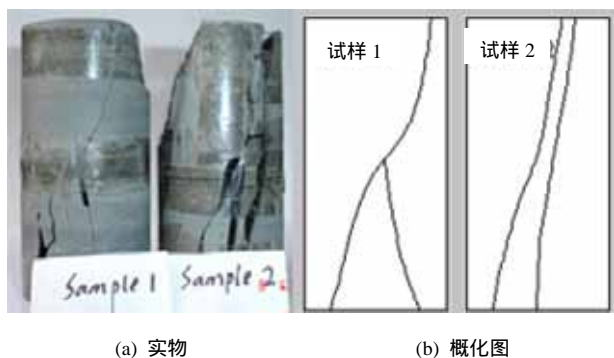


图 13 试样 2 兴趣区域 3 裂隙面积 - 应变曲线图  
Fig.13 Curves of crack area vs. strain of ROI3 for sample 2

从试样损伤演化过程分析可知, 损伤演化总是首先发生在较“薄弱”的区域, 即已有主裂纹区域和较大的低密度区域, 并在硬质夹层的控制下演化发展成为贯通性宏观裂纹, 最后使得试样破坏。

试样1的主裂纹形成过程为: 加载以后, 上部原有宏观裂纹缓慢增长, 当应变达到  $8.42 \times 10^{-3}$  时, 试样下部与原有裂纹对角部位的较弱带形成宏观裂纹, 并向上发展, 最终上下宏观裂纹在试样中部将硬质夹层剪断从而贯通。试样2形成的主裂纹则沿中部层理面竖向发展, 其形成过程很短暂, 没有捕捉到这一过程的CT图像。

从试样最终的破坏形态上来看, 试样1的主裂道路径为沿试样对角方向的一条剪切裂纹为主, 在剪切裂纹下部, 有一条长度较短的劈裂纹与剪切裂纹交叉, 表明其破坏以剪切破坏为主, 同时伴随有张拉型的劈裂破坏。试样2则形成竖向沿层理面的两条主裂纹, 其破坏为沿层理面的张拉型解理破坏。试样破坏后复原图见图14。



(a) 实物 (b) 概化图

图14 试样破坏后复原图

Fig.14 Recovery images of the samples

通过对2种不同层理分布板岩试样破坏过程的分析对比, 大致可把该非饱和板岩单轴压缩条件下的损伤演化过程分为2种情况来讨论:

(1) 当载荷方向与层理面垂直时, 其损伤演化大致可分为4个阶段:

① 损伤弱化阶段。该阶段初始微裂纹和微孔洞被压缩, 其数量减小, 微孔洞体积缩小, 材料基质颗粒之间互相挤压, 一些较大的微裂纹被分割成几个小裂纹从而不再连续, 物质变得更为致密, 损伤被弱化。该阶段对应于试样1应变为  $(0.00 \sim 4.11) \times 10^{-3}$  的阶段。

② 损伤演化初期。该阶段微裂纹不再被压缩

闭合, 而是开始起裂发展, 微裂纹有重组现象。该阶段对应于试样1应变为  $(4.11 \sim 5.14) \times 10^{-3}$  的阶段。

③ 损伤演化中期。该阶段宏观裂纹长度和宽度都平稳增加, 裂隙区面积增加, 微裂纹在局部汇合贯通形成较大的裂纹, 新的微裂纹不断产生并最终连成一片, 微裂纹的分布更趋向于有一定方向性。该阶段损伤发展速率较快。该阶段对应于试样1应变为  $(5.14 \sim 10.07) \times 10^{-3}$  的阶段。

④ 损伤演化后期。在沿宏观主裂纹长度方向上, 原来成片的微裂纹区最后汇集成一条主要的宏观裂纹, 并与已有宏观主裂纹连通, 最终贯通试样。该阶段对应于试样1应变为  $10.07 \times 10^{-3}$  以后的阶段。

(2) 当载荷方向与层理面平行时, 其损伤演化大致可分为2个阶段:

① 损伤缓慢弱化阶段。该阶段持续时间较长, 试样各区域CT数缓慢上升, 裂隙区面积平缓下降, 微裂纹受压闭合, 数量减少。试样2应变  $10.61 \times 10^{-3}$  以前的阶段都属于这一阶段。

② 损伤演化阶段。微裂纹迅速沿平行于层理面方向汇合贯通, 在硬质层理附近的软弱带形成宏观裂纹, 试样发生张拉型解理破坏。

## 4.2 板岩损伤变量的计算

损伤变量的计算, 是岩石损伤力学研究中的一个重点。根据前人研究成果, 本文建立基于CT的非饱和岩石标量型损伤变量的计算公式, 并对试样的损伤变量进行计算。

通过CT机的数学建模, 杨更社<sup>[6]</sup>给出如下的损伤变量表达式:

$$D = -\frac{1}{m_0^2} \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为CT机的空间分辨率,  $\Delta\rho$  为密度变化值,  $\rho_0$  为岩石密度。

葛修润等<sup>[7]</sup>根据CT数与岩石材料的密度成正比这一CT原理, 将CT数引入, 所导出的损伤变量为

$$D = \frac{\alpha_c}{m_0^2} \left( 1 - \frac{1000 + H}{1000 + \alpha_c H_r} \right) \quad (2)$$

式中:  $\alpha_c$  为初始损伤因子, 其值应大于1, 可由CT试验得到的本构模型与CT试验中实测到的应力-应变关系曲线的拟合确定;  $\alpha_c$  为闭合影响系数, 与

岩石的孔隙率有关； $H_r$  试样基质材料的 CT 数； $H$  为试样的 CT 数。

通过引入饱和度  $S_r$  的概念来推导基于 CT 数的非饱和和节理岩体损伤变量的计算公式。首先提出 2 条假定：(1) 无损伤基质岩石不吸水，岩石中的水分完全由其中的缺陷所容纳；(2) 岩石孔隙中仅被水和空气所填充。

根据 CT 原理，CT 图像的 CT 值为

$$H = \rho\mu \tag{3}$$

式中： $\mu$  为材料对 X 射线的吸收系数。

根据假定，有

$$H = \rho\mu^m = (1-\alpha)\rho_r\mu_r^m + S_r\alpha\rho_w\mu_w^m + (1-S_r)\alpha\rho_a\mu_a^m \tag{4}$$

式中： $\rho_r, \rho_w, \rho_a$  分别为试样基质材料、水和空气密度； $\mu_r^m, \mu_w^m, \mu_a^m$  分别为试样基质材料、水和空气对 X 射线的吸收系数； $S_r$  为试样饱和度； $\alpha$  为孔隙率。

根据式(4)，有

$$\alpha = \frac{H - \rho_r\mu_r^m}{S_r\rho_w\mu_w^m + (1-S_r)\rho_a\mu_a^m - \rho_r\mu_r^m} = \frac{H - H_r}{S_rH_w + (1-S_r)H_a - H_r} \tag{5}$$

式中： $H_w, H_a$  分别为水和空气的 CT 数。

分析单元内的密度，其可表示为

$$\rho = (1-\alpha)\rho_r + S_r\alpha\rho_w + (1-S_r)\alpha\rho_a \tag{6}$$

若忽略掉空气的密度，即  $\rho_a = 0$ ，则有

$$\rho = (1-\alpha)\rho_r + S_r\alpha\rho_w \tag{7}$$

将式(5)代入式(7)，并由  $H_w = 0$  (水的 CT 数为 0) 可得

$$\rho = \rho_r - \frac{H - H_r}{(1-S_r)H_a - H_r} (\rho_r - S_r\rho_w) \tag{8}$$

结合式(1)，且  $\Delta\rho = \rho - \rho_0, H_a = -1\ 000$ ，则有

$$D = \frac{-1}{m_0^2} \left[ \frac{H_r - H}{1\ 000(1-S_r) + H_r} \frac{S_r\rho_w - \rho_r}{\rho_0} + \frac{\rho_r}{\rho_0} - 1 \right] \tag{9}$$

因此，知道某一时刻的 CT 值  $H$ ，即可由式(9)得出其损伤变量。式(9)即为基于 CT 数的非饱和和节理岩石标量型损伤变量计算公式。

根据式(9)，对试样 2 第 3 扫描层(该层为硬质层理)兴趣区域的损伤变量进行试计算，计算结果见

表 5 和图 15。

表 5 试样 2 第 3 扫描层兴趣区域损伤变量计算表  
Table 5 Computed damage variance values of the 3rd scanning section's ROI3 for sample 2

应变/ $10^{-3}$	损伤变量 $D$			
	椭圆 1	椭圆 2	椭圆 3	外环
0.00	0.043 1	0.029 1	0.031 0	0.014 8
1.85	0.041 0	0.027 3	0.029 6	0.014 5
4.11	0.034 5	0.022 9	0.024 6	0.011 5
5.14	0.033 2	0.022 3	0.023 8	0.011 3
6.78	0.036 5	0.022 4	0.024 9	0.009 5
8.42	0.039 2	0.023 9	0.027 8	0.012 6
10.07	0.043 1	0.022 9	0.030 3	0.013 2
10.48	0.053 6	0.025 1	0.038 3	0.018 0
11.30	0.056 1	0.025 6	0.040 5	0.019 8

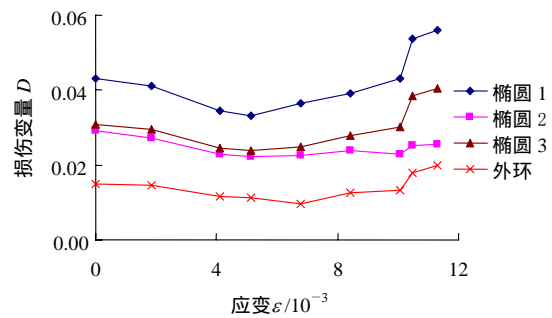


图 15 试样 2 第 3 扫描层兴趣区域损伤变量 - 应变曲线图  
Fig.15 Curves of damage variance vs. strain of the 2nd section's ROI3 for sample 2

在工程实际中，更关心的是试样整体损伤变量的变化，此时应将式(9)中的  $H$  项替换为试样整体的平均 CT 数  $H_m$ 。 $H_m$  的计算办法是，将各个扫描层面的 CT 数求和然后平均，作为试样的整体平均 CT 数，记录各次扫描试样的  $H_m$ ，则可得到试样整体损伤变量的变化规律。这里，扫描层数的多少将决定计算的精度，葛修润等<sup>[7]</sup>建议对一个试样应该扫描 30 层。

### 5 结 语

(1) 板岩的层理状构造是造成其各向异性的主要原因，板岩中微裂纹的发展演化受层理控制。单轴压缩条件下，含水平层理和垂直层理试样的破坏模式是不同的。前者是岩石中的微裂纹发展、贯通



并形成对角型宏观裂纹, 最终将硬质层理剪断, 以剪切破坏为主; 后者则主要是微裂纹的萌生、发展受硬质夹层的“控制”, 汇合贯通形成平行于层理面的宏观裂纹, 从而引起试样沿层理面的解理破坏, 其破坏以张拉型破坏为主。

(2) 当板岩试样含水平层理时, 其损伤演化过程大致可分为4个阶段: 损伤弱化阶段; 损伤演化初期; 损伤演化中期; 损伤演化后期。

当试样含垂直层理时, 其损伤演化过程可大致分为2个阶段: 损伤缓慢弱化阶段; 损伤演化阶段。

(3) 根据CT原理, 推导基于CT数的非饱和节理岩石标量型损伤变量的计算公式, 并对板岩损伤变量进行了计算。

### 参考文献(References):

- [1] Raynaud S, Fabre D, Mazerolle F. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry[J]. *Tectonophysics*, 1989, 159: 149 - 159.
- [2] Fabre D, Mazerolle F, Raynaud S. Characterization tomodensitometrique de la porosite et de la fissuration de rockes sedimentaires[A]. In: Maury V, Fourmaintraux D, ed. *Rocks at Great Depth*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. 297 - 304.
- [3] Vinagard H L, de Wal J A, Wellington S L. CT studies of brittle failure in Castlegate sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(5): 441 - 448.
- [4] Verhelst F, Vervoort A, Debosscher P H, et al. X-ray computerized tomography: determination of heterogeneities in rock samples[A]. In: Sakurai S ed. *Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics*[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. 105 - 108.
- [5] Kawakata H, Cho A, Yanagidani T, et al. The observations of faulting in Westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1997, 34(3): 151 - 162.
- [6] 杨更社. 岩体损伤及检测[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.(Yang Gengshe. *Rock Mass Damage and Measuring*[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998.(in Chinese))
- [7] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩土损伤力学宏观试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(Ge Xiurun, Ren Jianxi, Pu Yibin, et al. *Macro- and Micro-experiment Study on Damage Mechanics of Rocks and Soils*[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [8] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬. 节理岩石卸载损伤破坏过程CT实时检测[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 575 - 578.(Ren Jianxi, Ge Xiurun, Pu Yibin. *Real-time CT test of damage failure process of jointed rock sample in unloading confining pressure*[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 575 - 578.(in Chinese))
- [9] 任建喜, 葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化微观机制及其本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(4): 425 - 431.(Ren Jianxi, Ge Xiurun. *Study on rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading*[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(4): 425 - 431.(in Chinese))
- [10] 任建喜, 惠兴田. 裂隙岩石单轴压缩损伤扩展微观机制CT分析初探[J]. *岩土力学*, 2005, 26(增1): 48 - 52.(Ren Jianxi, Hui Xingtian. *Primary study on meso-damage propagation mechanism of cracked-sandstone using computerized tomography under uniaxial compression*[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Supp.1): 48 - 52.(in Chinese))
- [11] 简浩, 朱维申, 李术才, 等. 模拟节理岩体水压致裂的CT实时试验初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 22(11): 1 655 - 1 662.(Jian Hao, Zhu Weishen, Li Shucai, et al. *Real-time CT test of hydraulic fracture process for jointed rockmasses*[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 22(11): 1 655 - 1 662.(in Chinese))
- [12] 李廷春. 三维裂隙扩展的CT试验及理论分析研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.(Li Tingchun. *CT testing analysis and theoretical study on propagation of penny shaped 3D fractures under compression*[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.(in Chinese))