

文章编号: 1001-4888(2009)03-0184-07

混凝土单轴压缩下细观损伤特性的 CT 研究^{*}

田威¹, 党发宁¹, 梁昕宇¹, 陈厚群^{1,2}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院 工程抗震中心, 北京 100044)

摘要: 混凝土是一种非均质的材料, 在细观层次上将混凝土看作由骨料、砂浆和两者之间的界面组成的三相复合材料。本文利用 CT 技术对混凝土的细观损伤过程进行实时扫描观测, 获得了混凝土试件实时静力压缩 CT 图像, 提取出图像上各点的 CT 数并根据分区理论定义了一个基于 CT 数的统计损伤变量。通过对图像和 CT 数以及损伤变量的分析表明混凝土试件在静力压缩条件下经历了压密阶段、扩容阶段, 损伤急剧增大到破坏的细观损伤演化全过程, 以此反映了混凝土细观损伤演化的特性。进而通过细观损伤对混凝土材料裂纹的扩展、贯通以及最后失稳破坏的破坏实质进行了有益的探索。

关键词: 混凝土; 细观损伤; CT(计算机处理 X 线断层摄影术); CT 数; 损伤变量

中图分类号: TU22

文献标识码: A

0 引言

近年来随着损伤力学在岩土力学研究中的广泛开展, 混凝土损伤力学的研究取得了丰硕的成果。Dougill^[1]首次将损伤理论应用于对混凝土的研究中, 后来很多学者都先后进入了这个研究领域, 他们对混凝土损伤的研究主要集中在对混凝土损伤本构模型的研究和疲劳累积损伤的研究两个方面, 提出了若干个混凝土的损伤模型和损伤演变方程。杨更社、谢定义^[2]最先利用 CT 数的空间分布规律对岩石的损伤演化情况进行了研究, 随着研究的深入提出了式(1)的 CT 数损伤变量:

$$D = \frac{1}{m_0} \left(1 - \frac{E(\rho)}{\rho_0} \right) = - \frac{1}{m_0} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (1)$$

式中 ρ_0 为试件基质材料的密度; $E(\rho)$ 为试件某时刻材料的密度均值; m_0 为 CT 的空间分辨率。

作彦卿、丁卫华等在文[3]中提出了如式(2)的密度损伤增量的概念, 并推导出其与体应变的关系式:

$$\Delta D = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} = \frac{H_i - H_0}{1000 + H_0} \quad (2)$$

$$\epsilon_v = \frac{\Delta D}{1 + \Delta D} = \frac{H_0 - H_i}{1000 + H_i} \quad (3)$$

式中 ρ_0 、 ρ_i 分别为试件初始和任意应力状态时的密度; m_0 为 CT 机的空间分辨率; H_0 、 H_i 为某一点获任意区域内在初始状态或任意应力状态时的 CT 数; ϵ_v 为体应变。

这些建立的损伤变量解释了很多混凝土材料的损伤和破坏现象。其中, 以宏观损伤模型居多。然而混凝土是一种复杂的人工合成材料, 从细观上认为混凝土是由骨料、水泥砂浆和二者粘结带组成的三

^{*} 收稿日期: 2009-01-15; 修订日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90510017); 国家自然科学基金资助项目(50679073)资助; 西安理工大学优秀博士基金项目(602-210806)

通讯作者: 党发宁(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为岩土计算力学。E-mail: dangfn@163.com

相材料。混凝土的破坏实际上是裂纹的萌生、扩展和贯通的演化过程,基于宏观层次建立的损伤模型往往忽略了混凝土材料内部复杂的细观结构,难以揭示材料损伤破坏的物理机理,因此,对混凝土损伤过程的研究除了从平均的角度进行研究外,更关键的还应从混凝土的细观结构入手。

计算机层析成像技术(即 CT 技术)作为一种无损检测技术,可以动态、定量地测量材料在受力过程中内部结构的变化。近年来 CT 技术在探测岩石细观损伤过程方面取得了许多有意义的成果。任建喜^[4-6]进行了单轴和三轴荷载作用下岩石破坏全过程的细观损伤演化规律的实时动态试验,得到了不同荷载作用下岩石从裂纹萌生、伸长、增宽、分叉、断裂到破坏等各个阶段清晰的 CT 图像。作彦卿、丁卫华^[3,7]对单轴和三轴压缩条件下岩石的损伤演化进行了阶段划分,提出了密度损伤增量的概念,对裂纹的力学机理进行了分析和宽度测量,建立了密度损伤增量与体应变的关系;陈厚群^[8,9]应用 X 射线 CT 对单轴压缩条件下混凝土的细观破裂过程进行了实时扫描观测,获得了混凝土试件内部 CT 尺度裂纹开裂、扩展、连通的全过程 CT 图像。党发宁^[10,11]利用集合论知识,基于 CT 数研究了破损产生的位置及破损判据,提出了安全区、损伤进行区和破损区的概念,给出了加卸载准则,建立了混凝土本构关系的分区描述和混凝土破损空间本构理论。将破损演化理论应用于混凝土 CT 图像的定量分析。

本文根据混凝土圆柱体试件损伤演化过程的 CT 图像,通过对混凝土 CT 灰度图像和各断面 CT 数进行分析,研究混凝土试件 CT 损伤演化过程与应力的关系,运用细观统计理论得到了各断面的损伤变量,并总结出应力与损伤变量的关系,探索了混凝土细观损伤演化过程的机理。

1 试验设计和试验过程

1.1 试验条件

混凝土圆柱体试件规格为 $\Phi 60\text{mm} \times 120\text{mm}$,强度为 C15,水灰比为 0.40。骨料为泾河卵石,粒径为 5~20mm,砂料为西安铲河中砂。标准条件下养护 28 天进行试验。

1.2 试验设备

采用西安市中心医院影像中心 Marconi M8000 螺旋 CT 扫描仪,空间分辨率 24 线对/cm,图像分辨率为 1024×1024 ,成像速度最快为 0.5s 内扫描 4 层 CT 图像。加载设备采用西安理工大学最新研制的便携式混凝土 CT 试验加载设备,此设备由加载主机、作动器、数字测控器三部分组成,拉、压最大出力为 100kN,频率为 5Hz,可以进行冲击、三角波、正弦波下动态拉、压试验。

此次试验采用荷载控制,加载速率为: $1.2 \times 10^{-3} \text{ kN/s}$,直到混凝土已经发生破坏停止加载。每个试样共扫描 5 次,每次扫描 7 个断面,扫描厚度 2.5mm。

1.3 试验过程

根据试验设计,在加载之前首先进行初次 CT 扫描,随后在应力应变曲线形状稍有变化时再进行扫描,获得 5 个应力阶段混凝土试件的 7 个断面灰度 CT 图像。由于试验所获得图片较多,我们取最终加载取得的图像为分析目标。图 1 是扫描定位图,说明扫描部位。

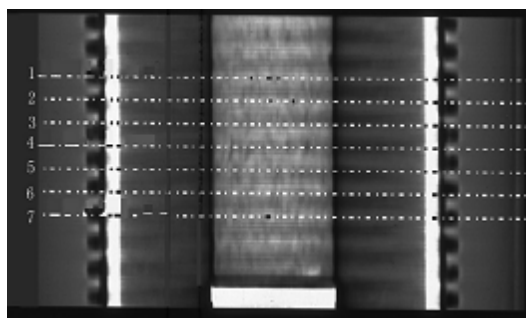


图 1 混凝土样的 CT 扫描部位

Fig.1 Location of CT scanning of concrete sample

图 2 是试样的应力应变关系与 CT 扫描状态图,在 $\sigma=0\text{MPa}$ 进行扫描 1,在 $\sigma=18.01\text{MPa}$ 进行扫描 2,在 $\sigma=19.69\text{MPa}$ 进行扫描 3,在 $\sigma=20.03\text{MPa}$ 进行扫描 4,在 $\sigma=18.74\text{MPa}$ 进行扫描 5。由以

下曲线表明,初始扫描时,曲线基本呈直线状态,属于弹性阶段,在第 2 次扫描之后,曲线偏离直线状态,进入屈服阶段。在第 5 次扫描时,已经进入软化阶段。

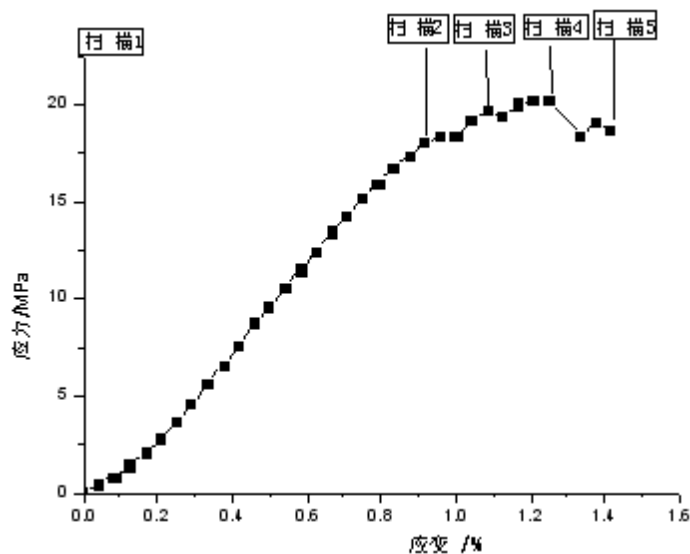


图 2 混凝土试样的应力应变关系与 CT 扫描状态图

Fig. 2 Relation between stress and strain and CT scanning state of concrete sample

2 混凝土细观损伤特性的 CT 研究

由于各试样所获得的 CT 图像太多,限于篇幅此处只列轴向应力为 0、18.01、19.69、20.03、18.74MPa 5 个应力阶段的混凝土试件 5 个断面,为图 1 中的 1~5 扫描层的 CT 图像,本文以这 25 幅图为依据,首先分析混凝土细观损伤发展及裂纹演化规律如图 3 所示。

由于骨料密度大,所以图中较亮区域即骨料区域,从图中可以看到骨料形状以及断面中骨料的空间分布位置,但骨料区域边界无法从图中直接确定。砂浆区域亮度略低于骨料区域,该区域中分布有亮度较高的微小区域,这是砂浆中密度较大的小砂砾。断面中亮度最低区域为孔洞及裂纹区域,孔洞在试件制备过程中就已经产生,其分布极不规则,裂纹在断面轴向应力达到峰值 $\sigma=20.03\text{MPa}$ 前形成。由于混凝土的脆断特性,某一点从损伤出现到破损的时间很短,裂纹萌生、贯通都很快,难于准确捕捉,所以很难抓到裂纹萌生过程的图像。

从图 4 中可以看出不同扫描层的 CT 数变化不同。在应力为 18.01 MPa 前(包括 18.01MPa)扫描层 2、4、5 的 CT 数平均值在增大,说明微裂纹和孔洞被压密,造成混凝土密度增加,引起断面中 CT 数平均值增加,即出现压密的过程。此过程实际上是一个损伤弱化的过程,混凝土强度会有所提高。在轴向应力为 19.69 MPa 时,各层 CT 数平均值变化很平稳,在应力为 19.69 MPa 之后试件各断面的 CT 数平均值明显的减小,此时是微裂纹开始萌生并稳定扩展阶段,表现为断面 CT 数平均值明显下降,试件体积出现膨胀,密度迅速减小,表明已进入扩容阶段,裂纹逐渐形成。在应力达到 20.03MPa 后各断面的 CT 数平均值急剧减小,表明裂纹加剧的扩展,试件已经发生破坏。

3 混凝土损伤变量

CT 识别不仅可以进行扫描层面内的定量分析,而且为建立混凝土损伤本构关系奠定了坚实的试验基础。在混凝土 CT 试验过程中,不仅能观察到混凝土的细观破坏过程,并且能够通过 CT 数的大小及分布规律的变化与混凝土的损伤变量联系起来。

由于混凝土材料都存在不同程度的初始损伤,通过 CT 图像中分辨单元的相对密度(即 CT 数)信息的变化体现。每个单元均经历了整个加载阶段,问题是在材料失效时各部分受损程度不同。为弄清楚破损的细观机理,有必要归类分区。基于此将岩土类材料分为安全区、损伤进行区和破损区分别进行

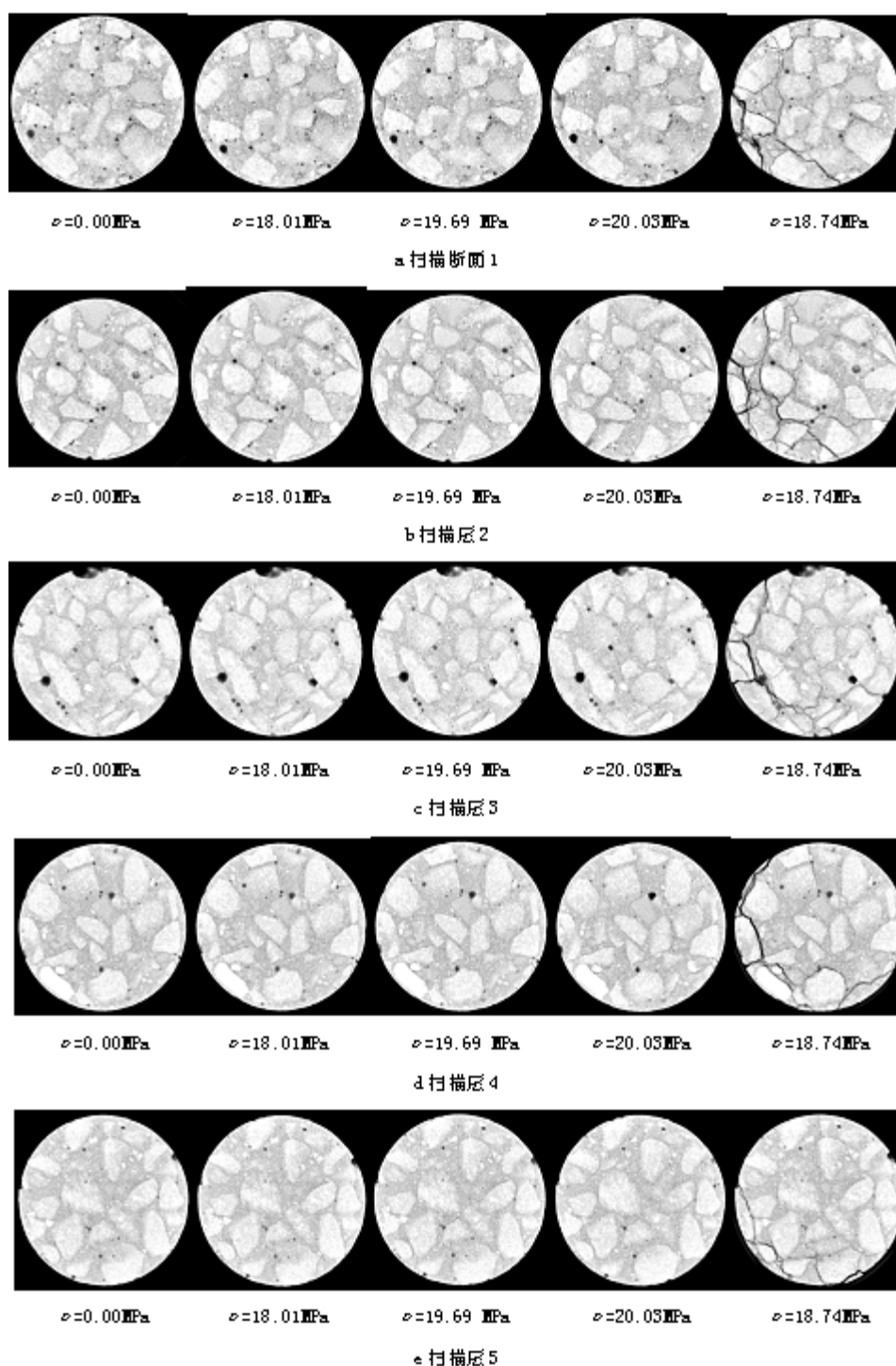


图3 不同轴向应力时各扫描层灰度CT图像

Fig. 3 Cross-section under different stress of CT image

研究^[11]。由于损伤进行区和破损区是由包含了部分损伤和完全损伤的CT点构成的集合,均含有破损信息,因此在建立损伤变量时应把这两区合起来考虑。现有CT损伤力学的研究成果中所定义的密度损伤变量多建立在全局统计域的基础之上,一定程度上掩盖了损伤局部化现象。出于细观统计损伤力学的思想,本文采用式(4)计算损伤变量^[11]。

$$D = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_{j0}} = 1 - \frac{H_{mi}}{H_{m0}} \quad (4)$$

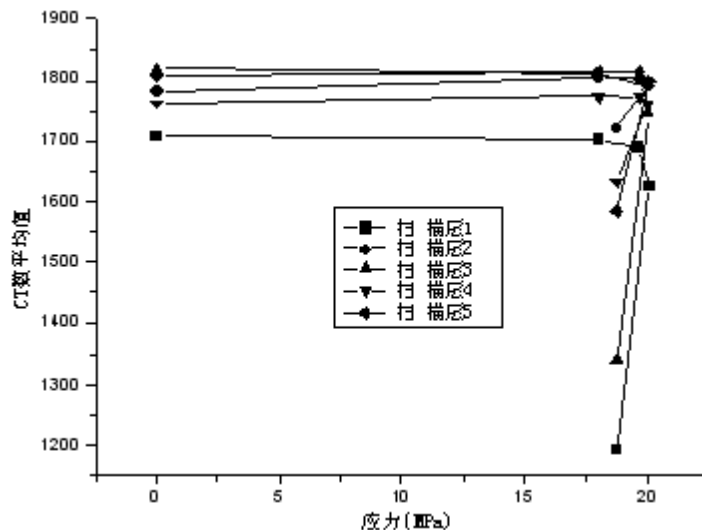


图 4 每个扫描层的平均 CT 数与应力关系曲线

Fig. 4 Relationship between averaged CT values on five layers and stress

其中, m 为初始扫描时安全区的 CT 单元数; n 为损伤进行区和破损区的 CT 单元数总和; H_i 为 CT 单元在某级荷载作用下损伤进行区或破损区中某 CT 单元上的 CT 数; H_{j0} 为 CT 单元在无损伤状态的 CT 数。 H_{m0} 为混凝土初始状态的 CT 数; H_{mi} 为某一应力阶段的混凝土 CT 数。由于自然界不存在严格意义的无损混凝土, 本文利用加载过程中安全区 CT 数均值的最大值近似代替无损状态的 CT 数。需要注意的是此时各区的几何信息和 CT 数均是变化的, 所以其反映了一个动态的损伤过程。

这样建立在一定统计意义上的点的信息就反映了具有相似性质的某一类点所组成的区域上的变化情况。

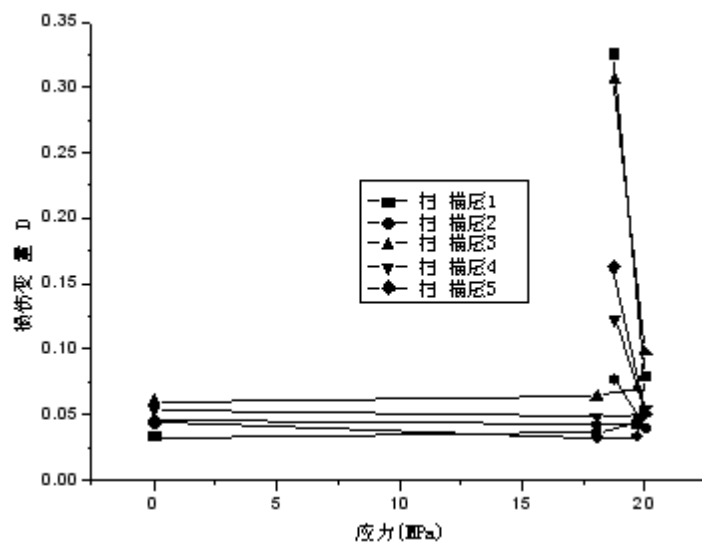


图 5 损伤变量与应力关系曲线

Fig. 5 Relationship between damage variable and stress

用式(4)计算出混凝土损伤演化过程中不同损伤演化阶段的损伤变量。由图 5 可以得知, 随着应力的增加, 损伤变量 D 呈非线性增大。说明混凝土微观损伤演化是一个不可逆非线性累积过程; 初始损

伤变量并不等于0,原因是混凝土材料中存在微裂纹和孔洞等初始损伤,在应力达到18.01MPa时,可以看到损伤变量有所减小,这是由于部分微裂纹和空洞被压密的原因。此阶段是损伤弱化的阶段。在应力19.69MPa时这一阶段是损伤演化的稳定阶段。当应力为19.69MPa后,损伤变量突然开始增大,是损伤演化最快的阶段,从CT灰度图也可以看到这一阶段是混凝土破坏的前兆;20.03MPa以后损伤变量一直快速增大,直至试件破坏。该曲线可以反映出混凝土试件经历最初的开始损伤、损伤的弱化即一个压密的阶段、损伤的稳定发展即一个扩容阶段,到损伤急剧增大到破坏的全过程,这与各断面CT数曲线反映的基本一致,反映出了混凝土损伤演化的特性。

4 结语与讨论

本文基于混凝土CT试验,通过混凝土CT的灰度图像、CT数和损伤变量的分析,将混凝土试件在单轴压缩条件下的细观损伤特性进行分析。可以得到以下结论:(1)混凝土力学行为的CT研究在一定程度上揭示了混凝土受力损伤的细观机理,是观测细观损伤特性的有效手段。(2)通过CT数曲线和不同应力阶段损伤变量曲线的研究,混凝土试件经历最初的开始损伤、损伤弱化即一个压密的阶段、损伤的稳定发展、即一个扩容阶段,到损伤急剧增大到破坏的全过程,反映出了混凝土损伤演化的特性。(3)本文提出的损伤变量本质上是基于细观统计损伤力学所建立的密度细观损伤变量,与现有CT损伤力学的研究成果中所定义的损伤变量相比,能够更好的反映出材料损伤局部化的现象,但是要与宏观力学的劣化建立联系,仍需要更深入的探索。(4)CT扫描试验成本极高,而由于混凝土结构的非均质,损伤破坏规律复杂,如何有效利用CT技术和取得的数据,揭示混凝土损伤演化规律还需要深入的研究。

参考文献:

- [1] Dougill J W, et al. Mechanics in Eng. ASCE, EMD, 1976(102):333—335.
- [2] 杨更社,谢定义,张长庆等. CT技术在岩石损伤检测中的应用研究[J]. 实验力学, 1998, 13(4):451—456 (YANG Geng-she, XIE Ding-yi, ZHANG Chang-qing, et al. Application of CT Technique in the Damage Detection of Rock Materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(4):451—456(in Chinese))
- [3] 仵彦卿,丁卫华,蒲毅彬等. 压缩条件下岩石密度损伤增量的CT动态观测[J]. 自然科学进展, 2000, 10(9):830—835 (WU Yan-qing, DING Wei-hua, PU Yi-bin, et al. CT dynamic observation of the granite density scathing increment under pressures[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(9):830—835(in Chinese))
- [4] 葛修润,任建喜,蒲毅彬等. 岩石细观损伤演化规律的CT实时试验研究[J]. 中国科学 E, 2000, 30(2):104—111 (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bin, et al. Real-in time CT test of the rock meso-damage propagation law [J]. Science in China (Series E), 2000, 30(2): 104—111(in Chinese))
- [5] 任建喜,葛修润,杨更社. 单轴压缩岩石损伤扩展细观机理CT实时试验[J]. 岩土力学, 2001, 22(2):130—133 (REN Jian-xi, GE Xiu-run, YANG geng-she. CT real-time testing on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 130—133(in Chinese))
- [6] 葛修润,任建喜,蒲毅彬等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的CT动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5):497—502 (GE Xiu-run, REN Jian-xi, PU Yi-bing, et al. A real in time ct triaxial testing study of meso damage evolution law of coal. Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5):497—502(in Chinese))
- [7] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬等. 基于X射线CT的岩石内部裂纹宽度测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9):1421—1425 (DING Wei-hua, WU Yan-qing, PU Yi-bin, et al. Measurement of crack width in rock interior based on X-ray CT[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9):1421—1425(in Chinese))
- [8] 陈厚群,丁卫华,党发宁等. 混凝土CT图像中等效裂纹区域的定量分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(1):1—7 (CHEN Hou-qun, DING Wei-hua, DANG Fa-ning, et al. Quantitative analysis of equivalent crack region in CT images of concrete[J]. Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(1): 1—7 (in Chinese))
- [9] 陈厚群,丁卫华,蒲毅彬等. 单轴压缩条件下混凝土细观破裂过程的X射线CT实时观测[J]. 水利学报, 2006, 37(9):1044—1050 (CHEN Hou-qun, DING Wei-hua, PU Yi-bin, et al. Real time observation on meso fracture process of concrete using X-ray CT under uniaxial compressive condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering,

2006, 37(9): 1044—1050(in Chinese))

- [10] 党发宁. 岩土破损演化理论(I): 破损空间[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 513—519 (DANG Fa-ning. Damage-fracture evolution theory of rock and soil(I): Damage-fracture space [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 513—519(in Chinese))
- [11] 党发宁, 尹小涛, 丁卫华等. 基于 CT 试验 的岩体分区破损本构模型, 岩石力学与工程学报[J]. 2005, 24(22): 4004—4010 (DANG Fa-ning, Yin Xiao-tao, Ding Wei-hua, et al. Sub area breakage constitutive model of rock mass based on CT test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4004—4010 (in Chinese))

CT Real-Time Observation of Meso-Damage Process for Concrete Material under Uniaxial Compression

TIAN Wei¹, DANG Fa-ning¹, LIANG Xin-yu¹, CHEN Hou-qun^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Concrete is a heterogeneous material and may be considered as three-phase composites consisting of aggregate, mortar and interface between aggregate and mortar. Real time scanning observation on the evolution of meso-damage in concrete was carried out by means of CT technology, and the real time scanning CT image of static compression was obtained. The CT image data were collected and a statistical damage variable based on CT number was defined according to the divisional zones theory. Analysis of concrete CT image, CT data and damage variable under static compression shows that concrete specimen has experienced different stages of condense, expansion of volume, crack rapid propagation and failure, therefore the characteristics of concrete meso-damage evolution is reflected. Through the meso-damage evolution, the process of crack propagation, coalescence and failure in concrete material is explored instructively.

Keywords: concrete; meso- damage; CT(Computerized Tomography); CT data; damage variable