

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.012



# 混凝土拉伸荷载条件下细观破损过程的 CT 试验研究

田 威<sup>1a, 1b</sup>, 党发宁<sup>2</sup>, 谢永利<sup>1b</sup>

(1. 长安大学 a. 建筑工程学院; b. 公路学院, 西安 710061; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048)

**摘 要:**对静力、动力拉伸荷载条件下混凝土的细观破损过程进行了 CT 试验研究, 获得了试样内部裂纹萌生、扩展、贯通的全过程 CT 图像。通过对 CT 图像及图像兴趣区中整体统计区域、局部统计区域 CT 数均值的分析, 研究了混凝土拉伸荷载条件下细观破损过程。结果表明: 静力拉伸荷载条件下, 裂纹在界面的薄弱区域形成后逐渐往相邻的薄弱部位扩展, 两个统计区域 CT 数均值呈降低趋势, 试样破坏时伴有少量骨料被拉断的现象; 动力拉伸荷载条件下, 裂纹从界面薄弱区域形成后追随最快的路径扩展, 局部统计区域 CT 数均值呈下降趋势, 而整体统计区域 CT 数均值变化幅度较小, 破坏后骨料沿界面脱离砂浆粘结, 且试样破裂面更为平整; 由于加载速率的提高, 骨料被拉断的现象非常显著。

**关键词:**混凝土; 细观损伤; 拉伸破坏; CT 试验

**中图分类号:** TU502.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0073-06

## CT test analysis of meso damage and fracture process of concrete under tensile loading

Tian Wei<sup>1a, 1b</sup>, Dang Fanning<sup>2</sup>, Xie Yongli<sup>1b</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061;

2 Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** The real time scanning observation on meso damage process in concrete was carried out using CT technology. CT images of crack propagation, coalescence and failure were obtained under static and dynamic tension. Meso-damage mechanism of concrete under tension was analyzed the mean CT numbers in large statistical region small statistic region of scanning layers ROI. The results showed that the cracks developed in the interface of weak region and expanded to adjacent weak parts the mean CT numbers of the two statistical regions showed decreasing trend. Parts of aggregates were ruptured when the concrete was

**收稿日期:** 2014-06-20

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51009010, 51379015); 中央高校基本科研业务费 (CHD2012ZD014); 中国博士后科学基金 (2012M521727), 陕西省博士后科学基金

**作者简介:** 田威 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程数值仿真、岩土材料细观力学分析研究, (E-mail) tianwei@chd.edu.cn.

**Received:** 2014-06-20

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51009010, 51379015); Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. CHD2012ZD014); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2012M521727); Postdoctoral Science Foundation of Shaanxi Province

**Author brief:** Tian Wei (1981-), PhD, associate professor, main research interests: geotechnical engineering numerical simulation, geotechnical material meso-mechanics analysis, (E-mail) tianwei@chd.edu.cn.

damaged under static tension. While in small statistic region, the cracks developed in the interface of weak region and expanded along the fastest path, and the mean CT numbers showed a decreasing trend. The mean CT numbers in large statistical region changed slightly. The aggregate divorced from mortar along interface, and the failure plane was smoother when the concrete was damaged under dynamic tension. So, the aggregate was ruptured obviously because the loading rate was higher.

**Key words:** concrete; meso-damage; tension fracture; CT test

混凝土材料是一种复杂的多尺度人工材料,其宏观断裂破坏与内部微孔洞、微裂纹的分布以及微裂纹的萌生、扩展和贯通的演化过程密切相关。因此,要深入了解混凝土材料的破损过程就必须对材料的细观损伤特征进行研究。

CT 技术是无损检测混凝土内部细观结构变化、裂纹扩展的有效手段。目前,许多学者利用 CT 技术进行了混凝土细观破损过程的研究<sup>[1-10]</sup>,但由于与 CT 配套的专用加载设备的限制,以及试样拉伸破坏时间持续短很难捕捉到破损全程等原因,研究大都集中在混凝土压缩荷载条件下的细观破损过程,而对混凝土拉伸荷载条件下细观破损过程研究得非常少。

笔者从混凝土细观结构入手进行了二级配混凝土试样在静力、动力拉伸条件下的 CT 试验。以 CT 扫描图像及感兴趣区 CT 数均值的分析为基础,对混凝土拉伸荷载条件下细观破损过程进行研究。

## 1 试验条件与方法

### 1.1 试验条件

试验中将制备的 18 个试样分为 2 大组,每组各 9 个试样分别进行静力和动力拉伸 CT 试验,选取其中的典型试样结果进行分析,所有试样的规格及各指标参数如表 1 所示。

表 1 试样制备

Table 1 The information of specimen

试样规格 (二级配圆柱体)	混凝土 强度	水灰比	水泥 规格	骨料 规格
$\Phi 120 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$	C15	0.50	42.5 硅酸盐水泥	大渡河左岸海流沟 内的各级配花岗岩

扫描设备采用三峡大学仁和医院 PHILIPS brilliance 16 排螺旋 CT 机,具体 CT 机性能与参数如表 2 所示。

表 2 扫描设备

Table 2 The information of CT machine

CT 机规格	图像大小	扫描厚度/mm	扫描时间/s
PHILIPS brilliance 16 排螺旋 CT 机	512×512	0.5	0.4

### 1.2 加载与扫描过程

试验采用新研制的实时动态加载仪,该设备可

实现对混凝土材料的静力、动力加载,尤其是可以进行动力拉伸加载,并在加载过程中与医用 CT 配套进行实时扫描<sup>[11-12]</sup>,加载设备如图 1 所示。

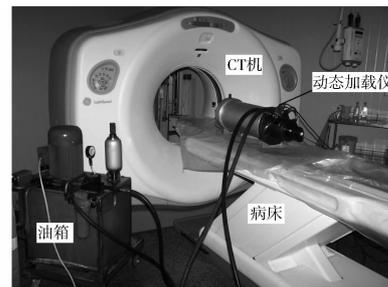


图 1 CT 机与加载设备图

Fig. 1 CT and loading apparatus

试验前先进行粘样,然后将试样安装在便携式混凝土 CT 试验加载设备中,并将加载设备放入 CT 床上,对试样进行加载扫描,如图 1 所示。

## 2 试验结果与分析

通过对静力、动力拉伸荷载条件下的 CT 试验中多个试样破坏形态、破坏特征的分析可以发现:静力拉伸荷载条件下试样中的裂纹在界面形成后逐渐往相邻的薄弱部位扩展,破坏时试样的破裂面均较平整,基本是平行于试样横断面,同时,有部分骨料被拉断;而动力拉伸荷载条件下试样中的裂纹从界面形成后沿最快的路径扩展,破坏时破裂面大都更加平整,也基本是平行于试样横断面,且破坏后多数骨料沿界面脱离粘结,断口出现了较多的新鲜骨料。以试样 CONC048 和 CONC041 为典型代表对混凝土材料在静、动力拉伸荷载条件下的细观破损过程进行详细分析。

### 2.1 混凝土静力拉伸荷载条件下 CT 试验

试样编号为 CONC048,设定的加载过程为:先荷载控制,速率 0.2 kN/s,加至 15 kN,对应位移 0.23 mm,后改位移控制,速率 0.002 mm/s,加至 0.52 mm,试样破坏,对应荷载 31.68 kN,加载曲线如图 2 所示。

试验中扫描点均发现曲线有下弯趋势,分析其原因是由于试样残余应力、粘结试样胶水松弛应力等引起的荷载下降。

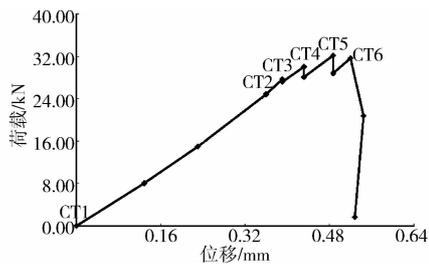


图 2 荷载-位移曲线

Fig. 2 Curve of relation between load and displacement

2.1.1 试验结果 试样每次扫描 48 个断面,共进行了 6 次扫描,由于扫描断面较多,限于篇幅仅给出具有代表性的试样扫描断面的图像进行分析,扫描断面图像随应力变化的顺序排列如图 3 所示,破坏后的照片见图 4。

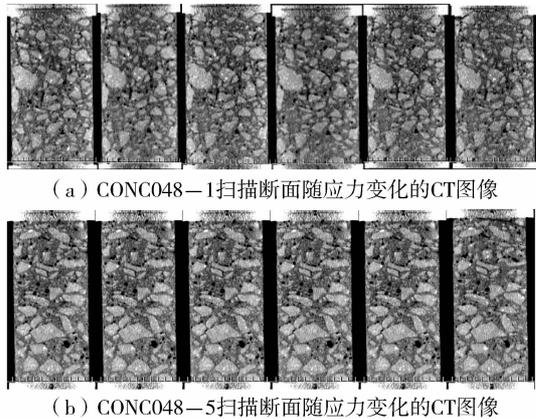


图 3 CONCD-048 纵断面随应力变化的 CT 图像

Fig. 3 Vertical section under different stress of CT image



图 4 破坏后数码相片

Fig. 4 The digital picture of concrete failure

2.1.2 试验结果分析 从图 3 及图 4 中可以看出,破坏面基本平行于试样横断面。前期加载阶段,从图中很难发现微裂纹的萌生、扩展过程。但是,从最后的破坏图中可以发现:裂纹只在骨料与砂浆的界面薄弱区域形成,并逐渐往相邻薄弱部位扩展,试样

破坏后,破裂面相对平整,断口处有少量新鲜骨料出现,如图 4 中圈点所示;试样最终破坏时会形成一条贯穿的宏观主裂纹,宏观主裂纹的形成会加速其周边应变能的释放。同时,由于有效抗拉面积减小在其尖端引起更程度的应力集中,在客观上抑制了其它裂纹进一步的发展。

正如以上所分析,混凝土试样在静力拉伸破坏时,裂纹往往出现于横断面上(垂直于加载方向),并最终形成一条宏观裂纹,若采用各种图像处理方法实际上很难准确分析出裂纹区域的图像变化特点,因此,利用兴趣区域 CT 数均值分析的方法研究混凝土在拉伸荷载条件下的细观破损过程。

首先选定兴趣区域,即整体统计区域与局部统计区域。局部统计区域是试样裂纹萌生、扩展最密集的破坏区域,此区域也称为裂纹敏感区<sup>[13]</sup>;试样破坏时,局部统计区域中的断口部位会出现一条贯穿的暗色低密度带,通过 CT 扫描断面图以及试样破坏数码图即可判断出局部统计区域的选取范围。而整体统计区域的分析可以从整体上把握加载时试样内部的变化,并可以与局部统计区域进行相应的对比。

图 5(a)为选取兴趣区示意图,直角矩形区域为整体统计区域,长度和高度均应尽可能多地覆盖试样纵断面;而弯角矩形区域为局部统计区域,应能覆盖纵断面裂纹区域。由于试样断口处接近端部,肉眼区分度较低,因此,对局部统计区域进行了一定放大,如图 5(b)所示。

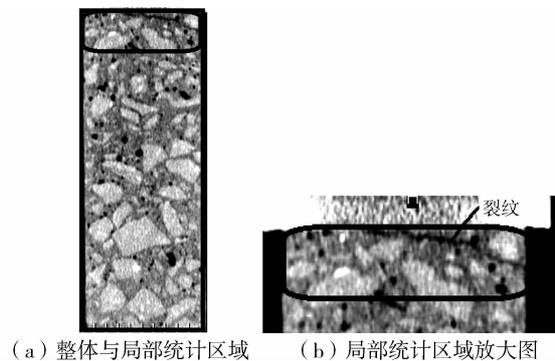


图 5 CONCD-048 兴趣区域的选取

Fig. 5 ROI of CONCD-048

选取试样 CONCD-048 的扫描断面的局部统计区域和整体统计区域的 CT 数均值进行分析。其中局部统计区域 CT 数均值表示扫描断面上裂纹区域(弯角矩形)内 CT 数的平均值。而整体统计区域

CT 数均值表示扫描断面上接近全断面区域(直角矩形)内 CT 数的平均值。所有 CT 数均值由 ENVI 图像处理软件统计得到。

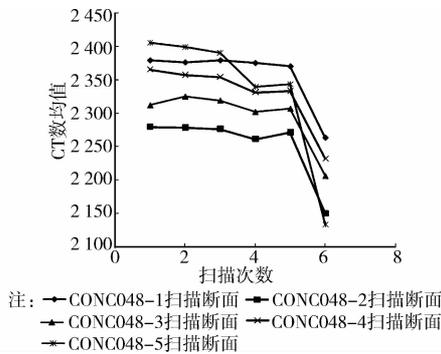


图 6 兴趣区局部统计区域 CT 数均值变化曲线

Fig. 6 Variation of the mean CT numbers in small statistical region

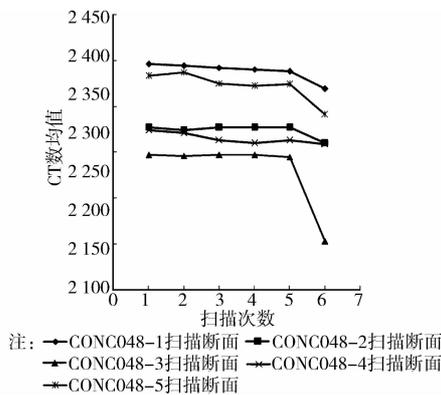


图 7 兴趣区整体统计区域 CT 数均值变化曲线

Fig. 7 Variation of the mean CT numbers in large statistical region

从局部统计区域的 CT 数均值变化曲线图 6 可以看出,静力拉伸荷载条件下,加载初期,混凝土试样局部统计区域 CT 数均值缓慢下降,随着荷载的增加,CT 数均值减小的幅度明显加快,加载后期局部统计区域的 CT 数均值一直呈递减的趋势,直至减小到试样发生破坏。而后期加载过程只是一个残余强度发挥的过程,促使微裂纹贯通形成宏观裂纹。当试样发生破坏时,由于在试样局部统计区域存在一条贯穿的宏观裂纹,因此,局部统计区域 CT 数均值出现了陡降段。

将图 6 与图 7 对比可以发现,在初始加载阶段,两个统计区域的 CT 数均值变化趋势较一致,说明此时段内,混凝土试样的各部分 CT 数均值同步发展。在继续加载的过程中,混凝土试样整体统计区域 CT 数均值变化不明显,而局部统计区域 CT 数均值

变化显著,这说明混凝土在静力拉伸条件下,局部统计区域的 CT 数变化较整体统计区域敏感的多,局部统计区域的损伤发生较早。

## 2.2 混凝土动力拉伸荷载条件下 CT 试验

试样制备、加载仪器、CT 机等与 1.2 节相同。仍采用二级配混凝土圆柱体试样进行动力拉伸 CT 试验。

试样编号为 CONC041,动力拉伸加载波形为正弦波,加载频率 1 Hz,先荷载控制,加载中逐渐加大振幅。扫描时停止加载,但不卸载。加至 15 kN 后改位移控制,增幅 0.01 mm/s,位移加至 0.5 mm 时试样破坏。循环荷载随时间的变化曲线方程如式(1)所示,加载曲线如图 8 所示。

$$F = A_i \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: $A_i$  为循环幅值; $f$  为循环频率。

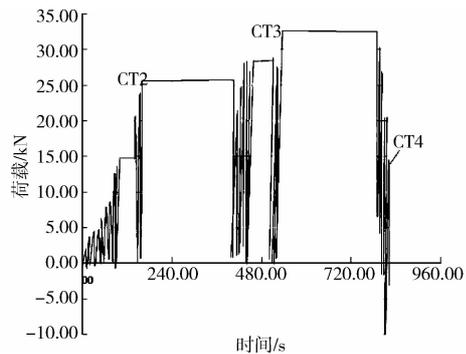


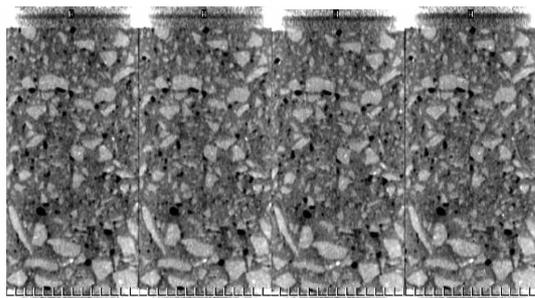
图 8 CONC041 荷载-时间曲线

Fig. 8 Curve of load-time

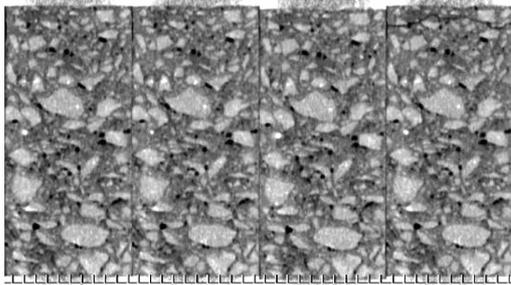
2.2.1 试验结果 试样每次扫描 48 个断面,共进行了 4 次扫描。同样,本文只给出具有代表性的试样扫描断面图像进行分析,扫描断面图像随应力变化的顺序排列如图 9 所示,破坏后的照片见图 10。

2.2.2 试验结果分析 从图 9 及图 10 可以看出破裂面靠近试样的上部,裂纹仍然是从界面薄弱区域形成,追随最快的路径扩展,破坏后多数骨料沿界面脱离粘结,并且表面有少量剥落碎片出现,破裂面更加平整。动载下由于加载速率的提高,断口处有较多的新鲜骨料出现,如图 10 中圈点所示,骨料被拉断的比例显著增大,属于一种瞬时爆发性断裂破坏。

图 11 为选取兴趣区的示意图,与上节的选取方法相同,直角矩形区域为整体统计区域,而弯角矩形区域为局部统计区域。图 12 为兴趣区局部统计区域 CT 数均值变化曲线,图 13 为兴趣区整体统计区域 CT 数均值变化曲线。



(a) CONC041—1扫描断面随应力变化的CT图像



(b) CONC041—5扫描断面随应力变化的CT图像

图 9 CONC041 纵断面随应力变化的 CT 图像

Fig. 9 Vertical section under different stress of CT image

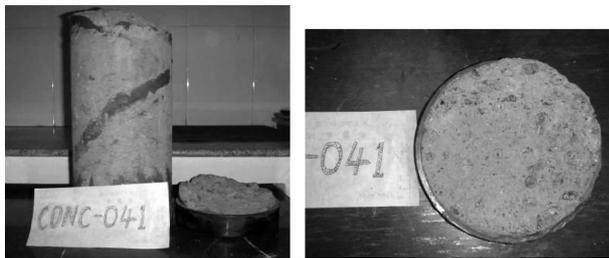


图 10 CONC041 破坏后数码相片

Fig. 10 The digital picture of concrete failure

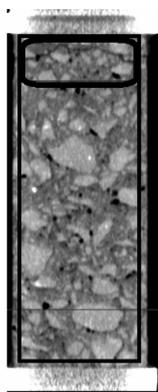


图 11 CONC041 兴趣区域的选取

Fig. 11 ROI of CONC041

从图 12 可以看出,加载初期,混凝土试样局部统计区域附近的 CT 数均值出现了缓慢的下降,而在应力增至接近破坏应力时,CT 数均值下降幅度有

所增加;当试样破坏时,由于局部统计区域的 CT 数均值对宏观裂纹的萌生扩展反映敏感而出现了一定的降低。

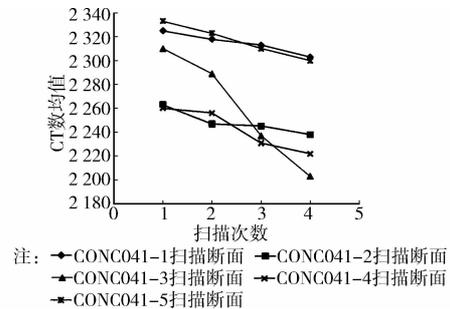


图 12 兴趣区局部统计区域 CT 数均值变化曲线

Fig. 12 Variation of the mean CT numbers in small statistical region

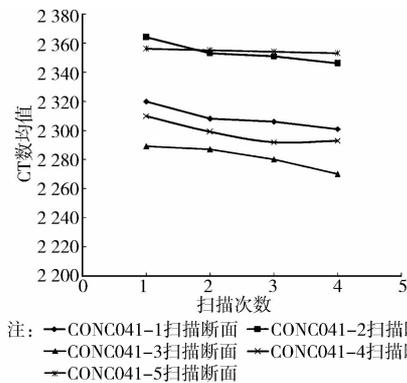


图 13 兴趣区整体统计区域 CT 数均值变化曲线

Fig. 13 Variation of the mean CT numbers in large statistical region

从图 13 可以看出,从初始扫描到试样破坏混凝土整体统计区域 CT 数均值的变化均较小,虽出现了一定的下降过程,但是变化不明显,变化幅度也明显小于静拉试验。其主要原因是:1)混凝土动力拉伸试验过程中破裂持续时间非常短暂,裂纹一出现即伴随着破裂的发生,而整体统计区域内 CT 数均值是全断面区域 CT 数的一个均化,因此,对裂纹的快速出现反映非常迟缓,造成整体统计区域 CT 数均值无法及时准确反映出试样密度的变化。2)由于 CT 扫描成本极高,目前试验中扫描断面数量仍偏少,因此,在对包含裂纹的扫描断面的数据统计也存在一定误差。

### 3 结论

1)通过对兴趣区域分区的 CT 数以及扫描图像的分析,研究了混凝土材料在静、动拉伸荷载条件下的破损过程。其中,两者裂纹均形成于界面等薄弱

区域;破坏时,破裂面都较平整,随着加载速率的提高,骨料被拉断的数量增多。然而裂纹的扩展受到加载速率的影响,静力荷载下,裂纹的扩展追随薄弱面,而动力荷载下,裂纹的扩展追随最快发展路径。实际上是由最小耗能向最快耗能的一种转变。

2)目前,在进行静力拉伸和动力拉伸 CT 试验中,主要是通过实时观察宏观荷载位移-曲线和预估强度来决定扫描时机,存在着较大的扫描误差。因此,如何准确的把握扫描时机,获得细观裂纹演化图像将是下一步重点开展的工作。

### 参考文献:

- [1] 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 H Q, Ding W H, Pu Y B, 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)
- [2] 丁卫华,陈厚群,张建军,等. 高应变率作用下混凝土破裂过程的 X 射线 CT 观测[J]. 建筑结构学报, 2006 (Sup2):758-762.  
Ding W H, Chen H Q, Zhang J J, et al. X-ray CT detecting on concrete fracture process under high strain rate [J]. Journal of Building Structures, 2006 (Sup2): 758-762. (in Chinese)
- [3] 党发宁,刘彦文,丁卫华,等. 基于破损演化理论的混凝土 CT 图像定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8):1588-1594.  
Dang F N, Liu Y W, Ding W H, et al. Quantitative analysis of concrete CT image based on damage-fracture evolution theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(8):1588-1594. (in Chinese)
- [4] 田威,党发宁,陈厚群. 基于图像处理技术的混凝土细观动力破损过程 CT 分析[J]. 水利发电学报, 2009, 28 (5):147-151. (in Chinese)  
Tian W, Dang F N, Chen H Q. CT analysis on dynamic meso-fracture process of concrete based on the image processing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(5):147-151. (in Chinese)
- [5] Wong R C K, Chau K T. Estimation of air void and aggregate spatial distributions in concrete under uniaxial compression using computer tomography scanning [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 35:1566-1576.
- [6] Man H K, van Mier J G M. Damage distribution and size effect in numerical concrete from lattice analyses [J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(9): 867-880.
- [7] Jivkov A P, Engelberg D L, Stein R. Pore space and brittle damage evolution in concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 110:378-395.
- [8] Piotrowska E, Malecot Y, Ke Y. Experimental investigation of the effect of coarse aggregate shape and composition on concrete triaxial behavior [J]. Mechanics of Materials, 2014, 79:45-57.
- [9] 田威,党发宁,梁昕宇,等. 混凝土细观损伤特性的 CT 研究[J]. 实验力学, 2009, 24(3):184-190.  
Tian W, Dang F N, Liang X Y, et al. CT real-time observation of the meso-damage process for concrete material under uniaxial compression [J]. Journal of Experiment Mechanics, 2009, 24(3):184-190. (in Chinese)
- [10] 田威,党发宁,陈厚群. 动力荷载作用下混凝土破裂特征 CT 试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 24(1): 30-34.  
Tian W, Dang F N, Chen H Q. CT experimental study of failure characteristics of concrete under dynamic loading [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 24(1):30-34. (in Chinese)
- [11] 田威,党发宁,陈厚群. 适于 CT 试验的动态加载设备研制及其应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(1):329-313.  
Tian W, Dang F N, Chen H Q. Development and application of the dynamic loading apparatus on CT experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 329-313. (in Chinese)
- [12] 田威,党发宁,陈厚群. 基于单轴压缩 CT 试验的混凝土细观破损分区研究[J]. 水利学报, 2011, 42(8):124-130.  
Tian W, Dang F N, Chen H Q. Research on meso damage-fracture divisional zones of concrete based on uniaxial compression CT experiment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(8): 124-130 (in Chinese)
- [13] 张健. 大岗山拱坝混凝土动力特性 CT 试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010:3.

(编辑 胡英奎)