

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0309-05

适于 CT 试验的动态加载设备研制及其应用

田 威¹, 党发宁¹, 丁卫华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, 北京 100044)

摘 要: 研制了与医用 CT 配套的便携式实时动态加载设备。该设备由加载主机、作动器、数字测控器 3 部分组成, 拉、压最大出力为 100 kN, 频率为 5 Hz, 可以进行冲击、三角波、正弦波下动态拉、压试验。同时, 利用新研制的加载设备对一级配混凝土进行了正弦波压缩荷载条件下的 CT 试验, 获得了清晰的混凝土试件在动荷载作用下裂纹的开裂、扩展、贯通的全过程 CT 图像, 结果表明所研制的加载设备为混凝土类脆性材料的动力 CT 试验奠定了基础。

关 键 词: 混凝土; CT; 实时加载; 设备

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Development of a dynamic loading apparatus for CT experiment and its application

TIAN Wei¹, DANG Fa-ning¹, DING Wei-hua¹, 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: A portable real-time dynamic loading apparatus with support of medical CT is developed. This loading apparatus consists of loading host machine, actuator and digital monitoring; and the greatest pressure output of 100 kN, frequency of 5 Hz; the apparatus is available to perform the dynamic tension, compression test with impact, triangular, sine wave. In addition, the CT test is conducted by the one graded concrete sample, in the sine wave compression load condition; under dynamic loading, the crack propagation, coalescence, through the whole process of CT images are obtained. The apparatus laid the foundation for dynamic CT test of brittle materials.

Key words: concrete; CT; real-time loading; apparatus

1 引 言

计算机层析成像技术 (computerized tomography, 简称 CT 技术), 具有动态、定量和无损伤等测试特点, 很快被用以量测各种材料在受力过程中内部结构的变化情况。在岩土工程领域也已有很多应用 CT 试验研究岩土材料内部受力变化^[1-8]。

进行岩土类材料力学性能的 CT 扫描时与 CT 机时配套的加载设备尤为重要。1999 年葛修润^[7]首次设计了与医用 CT 配套的专用静力加载设备, 明确提出了加载过程的 CT 实时扫描问题。该设备是为冻土工程国家重点试验室的 CT 机配套研制的专用设备, 仅可进行混凝土小试件的单轴、常规三轴静力压缩实时 CT 扫描试验, 不能够进行动力加载试验,

尤其是不能进行动力拉伸。西安理工大学丁卫华首先进行了混凝土动力加载和再卸载后的 CT 扫描试验, 分析了动力荷载作用后混凝土破坏过程的 CT 图像, 探索了用 X 射线 CT 技术研究混凝土动力破坏的机制。但是, 进行混凝土动力 CT 观测试验时, 由于缺乏与 CT 配套的动力加载装置, 只能进行加载、卸载后的 CT 扫描试验, 不能进行加载过程中的实时 CT 扫描。由于扫描时试件已经卸载, 裂纹可能已重新闭合, 在图像中难以显示, 影响了试验的效果。

高拱坝等结构体的抗震安全问题主要体现在混凝土的动力开裂破坏, 为了从细观力学角度实时观测混凝土, 在动力荷载作用下微裂纹的萌生、发展和宏观裂纹的扩展过程, 研究混凝土的动力破坏机制和能够实现现在动载条件的与 CT 机配套的新加载

收稿日期: 2008-07-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 90510017); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50679073); 西安理工大学优秀博士基金项目 (No. 602-210806)。

第一作者简介: 田威, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩土土计算力学方面的研究。E-mail: tianwei816@yahoo.com.cn

设备,满足动态加载实时 CT 扫描成为关键。

西安理工大学受国家自然科学基金重大研究计划重点项目的资助,进行了适合 CT 扫描用的动力加载设备研制工作;对其工作原理、设计方法、压力仓体材料选取,与 CT 扫描机联合工作原理以及在 CT 扫描机上工作的稳定性等问题进行了研究。设计和研制了适用于混凝土、岩石类材料细观力学试验研究的加载仪器。

2 设计思路与技术难点

与 X 射线 CT 机配套的动态拉、压材料试验机主要由加载主机、作动器、数字测控器 3 部分组成。该设备工作原理与一般材料试验机相同。通过采用伺服阀控制上、下压力室进油量来控制活塞的前、后移动速度和压力,从而对试件进行动态拉、压试验。同一般材料试验机不同,与 X 射线 CT 机配套的动态材料试验机要求体积小便于移动,因此,选用压力仓筒本身作为反力架,形成自平衡系统,称为便携式材料试验机。加载主机工作原理如图 1 所示。

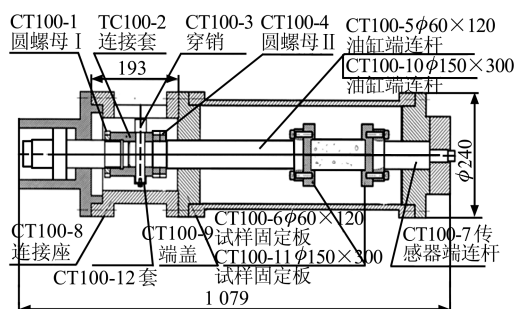


图 1 加载主机示意图

Fig.1 Sketch of loading host machine

由于需要与医用 CT 配套工作,便携式材料试验机的设计需克服如下技术难点:①压力仓体材料必须选用高强度、低 X 射线吸收系数材料,以降低对压力仓内混凝土扫描形成 CT 图像的干扰;②作动器连同压力仓体一起能够被 CT 机的病床推动进入扫描空间,必须重量轻、体积小、噪音及振动小、无油渍污染等;③便携式要求油箱体积不能太大;④由于压力仓体及油箱体积小,直接影响到试样尺寸、试样与压头的粘接方法、试样的装配应力、加载频率和轴压值、应力应变的准确测量等问题。

3 关键技术与仪器性能

经过 2 年多时间的研制与调试,研制的仪器已经定型,基本满足设计要求。仪器设计样机见图 2,轴向拉、压最大出力为 100 kN,频率为 5 Hz。



图 2 动态试验机

Fig.2 Dynamic experimental machine

关键技术难题的克服方法和主要部件性能:

(1) 加载主机:加载主机如图 1、3 所示。系统由双向动态伺服油缸、活塞、连接螺母、支柱、压力室缸体、试样粘接板、试样拉伸活塞、力传感器组成。试件两端由凹槽(戴帽)粘接板,可以增加粘接力,减少试件在安装、加载过程中可能产生的移动或扭矩。铝合金铸造压力仓能满足有围压时设计强度的要求,且对 X 射线的吸收率小,可以保证测得的混凝土试样 CT 图像的清晰度。压力室末端装有压力传感器,能够实时量测载荷大小;双向动态伺服油缸与三轴压力室直接连接,油缸的活塞与试样拉伸活塞用连接螺母相连接,油缸活塞上所受的力传递到压头上,使试样受压,油缸内压力缓慢增加,试样所受的载荷也随之增加,带动活塞运动,从而为试件提供拉、压载荷。试样直接与测力传感器相连,试样受到的力与传感器受到的力是一致的,摩擦力不影响力的测试结果。试样的变形可以由安装于同位置处的位移传感器量测。

加载主机重量小于 45 kg,便于移动和运输。体积小,能够放置在病床上自由出入 CT 扫描空间(CT 设备的指标为病床最大宽度为 320 mm,CT 扫描空间最大为 $\phi 770$ mm)。



图 3 加载主机图

Fig.3 Loading host machine

(2) 作动器:作动器采用液压加载方式,伺服液压采用高压齿轮油浸泵,其压力范围 0~100 kN;围压加载亦采用液压加载方式,其压力范围 0~5

MPa; 通过伺服阀控制伺服油源的液压油来控制侧向压力。为减少噪音采用日本不二越高压齿轮油泵, 并增加隔音措施。系统实际运行时噪音小、振动小、性能稳定、无油渍污染。

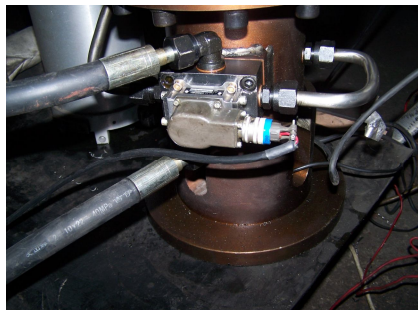


图4 作动器
Fig.4 The actuator

(3) 控制器: 数字控制器 (EDC) 采用德国 DOLI 公司生产的数字测控器, 如图 5 所示。该控制器以试验力、位移其中之一作为闭环控制参数, 实现两种方式的闭环控制。并且, 这两种控制方式在试验过程中可以实现无冲击转换, 可以实现恒压、恒速率加 (减) 压试验和正弦波、三角波等动态加载方式。围压压力控制也是采用 EDC 控制器, 通过控制器可以实现恒围压、恒速率加 (减) 压试验。控制程序能够按照在给定的频率范围内设定的斜坡、脉冲波、正弦波、三角波、梯形波、方波、程序波等波型加载, 并可以有不同的频率和幅度。

控制器可以由计算机程序来控制其进行工作, 也可单独进行控制, 在这种控制状态下试验数据及曲线都可以实时地进行显示和存储和进行曲线分析。试验结束可以打印试验曲线及试验报告。



图5 数字控制器
Fig.5 The digital controller

4 试样制备与试验过程

4.1 试样制备

仪器的仓体结构决定了试样体积不能太大, 本

次研制的仪器可以进行 C20 混凝土规格为 $\phi 60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的动态拉、压破坏试验和 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的动态拉破坏试验。

本次试验的对象是规格为 $\phi 60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的一级配 C15 混凝土圆柱试件。试样水灰比为 0.40。骨料为泾河卵石, 粒径为 $5 \sim 20 \text{ mm}$, 砂料为西安铲河中砂, 标准条件下养护 28 d 进行试验。将试件两端用钢刷打磨成毛糙面, 以增加粘结力, 再在 2 个法兰内及侧壁、试件端面、顶部侧壁涂适量 A、B 胶, 控制胶的用量, 将厚度控制在 1 mm 左右。在对中夹具中粘结试件, 夹具是保证法兰两端的拉压杆对中的机械装置, 见图 6。如此装样的方法目的是为了消除试样的初始装配应力。拉压杆对中后, 活动试件, 将两端法兰压紧。凝固 24 h, 把连在一起的拉压杆、法兰、试件从夹具中取下, 即满足装样条件。

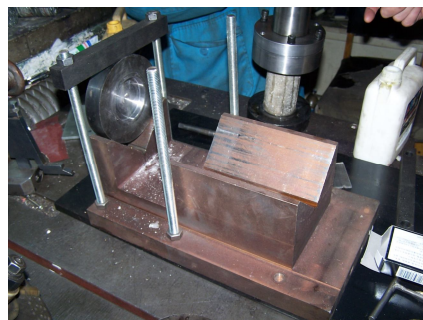


图6 装样夹具
Fig.6 Loading fixture

为了避免试件的断裂部位出现在试样与接头的粘结部位, 试件两端设置凹槽 (戴帽) 粘接板, 黏结后的试样如图 7 所示。

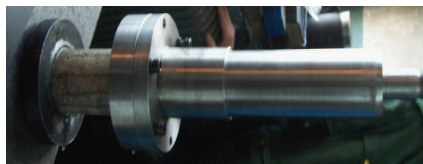


图7 粘结后的试样
Fig.7 Specimen after bonded

4.2 试验条件

本次试验在西安市中心医院 Marconi M8000 螺旋 CT 机上进行。用新研制的便携式混凝土 CT 试验加载设备进行混凝土圆柱体试件正弦波压缩动力试验。CT 分辨率为 24 线对/厘米, 图像大小为 1024×1024 , 成像速度最快为 0.5 s 内扫描 4 层 CT 图像。

4.3 加载与扫描过程

试验前将试件安装在便携式混凝土 CT 试验加载仪器中, 试件的承压面应与成型时的顶面相垂直。将加载仪器放入 CT 机, 开动加载控制器, 开始扫描。扫描在加载后不卸载在线进行。当试件接近破坏而开始迅速变形时, 停止调整油门, 直至试件破坏, 并记录破坏荷载。

根据样品配制情况, 预估的破坏荷载为 90 kN。采用正弦波形加载, 循环加载荷载随时间的变化曲线方程为

$$F = A_i \sin(2\pi ft) + F_0 \quad (1)$$

式中: F_0 为初始静载; A_i 为各循环的幅值; f 为循环频率。此次加载中令 F_0 为 0, 加载频率为 2 Hz, 每种振幅振次为 10 次, 逐渐加大振幅。扫描时停止加载, 但不卸载, 保持在压力峰值。加载初期采用应力控制, 后期采用应变控制。

每次扫描时固定轴压, 扫描间距为 1 cm, 扫描厚度为 3 mm, 每次扫描 5 个断面, 断面的空间位置见图 8, 直到试样破坏时停止试验, 共进行了 5 次扫描。

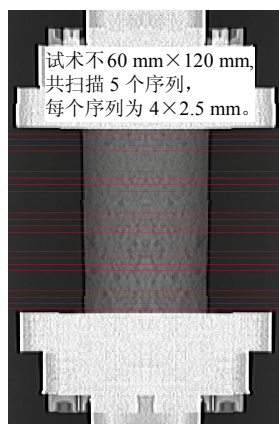


图 8 CT 扫描空间定位图
Fig.8 Location of CT scanning

图 9 为动态正弦波荷载-时间曲线, 由于此幅图需显示全部加载过程, 比例尺小, 加载的正弦曲线按比例被压缩, 因此波形无法看清, 实际上大比例显示的正弦波形非常理想。另外, 本试验是在调试混凝土 CT 试验系统的背景下进行的, 停止加载用于 CT 扫描的时间不长, 一般为数分钟。

5 试验结果及分析

5.1 试验结果

采用以上新研制的便携式材料试验机与医用 CT 配套, 形成混凝土力学性能 CT 试验系统, 得到

的混凝土随应力变化的系列 CT 图像, 见图 10。可以清晰地观察到各断面裂纹起裂、扩展、贯通的全过程。

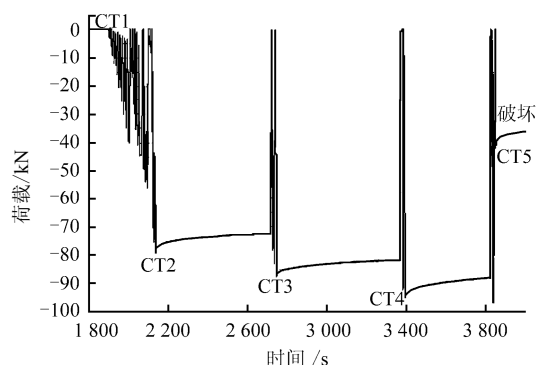


图 9 荷载-时间曲线
Fig.9 Curves of load-time

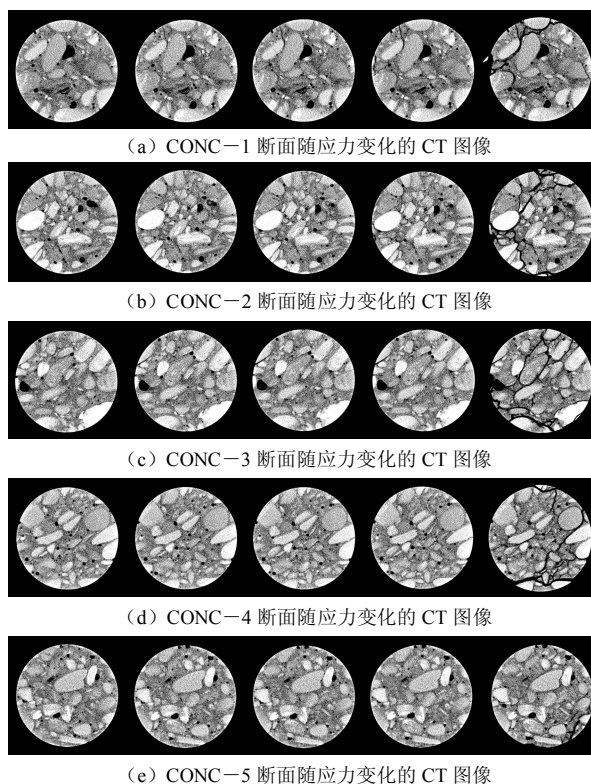


图 10 CT 试验结果图
Fig.10 Experiment results of CT

5.2 试验结果分析

由于骨料密度大, 图中明亮的区域即为骨料区域。从图 10 中可以看出, 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, 孔洞产生于试件制备的过程之中, 其分布不规律。

正弦波动压条件下破坏后的裂纹分布特征与静

载有一定的差别, 静载下, 起裂点较少, 裂纹分布一般围绕骨料在砂浆中扩展, 不穿过骨料。显示骨料的高强度影响。而在动压作用下, 材料破坏时多个部位同时有破裂产生, 裂纹相对平直, 可能穿过骨料发展, 说明动力条件下加载速率有明显提高时, 裂纹追随能量释放最快路径发展, 而静力时裂纹追随结构最弱方向发展, 可以从一个侧面解释材料的动强度比静强度大的原因。

从图 11 各断面平均 CT 数随应力变化曲线中可以看出, 混凝土动压的破坏过程分为压密、扩容、CT 尺度裂纹扩展、破坏 4 个阶段。压密的标志是统计区域 CT 数平均值增加, 扩容的标志是统计区域 CT 数平均值减小, CT 尺度裂纹扩展的标志是统计区域 CT 数平均值急速下降和随应变的增长应力快速衰减。

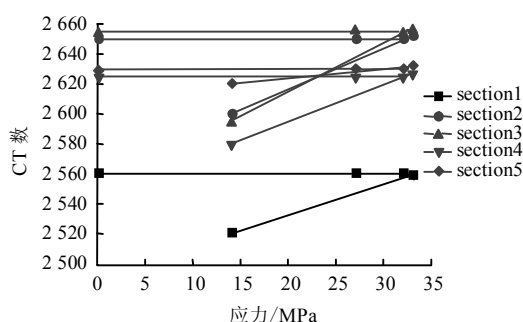


图 11 各断面平均 CT 数随应力变化曲线
Fig.11 Relationship between CT data and stress

6 结 语

本文介绍了最新研制成功的便携式 CT 实时加载设备的组成、技术指标及其特点, 该仪器是国内最新为 CT 试验配套的动态实时加载设备, 可以实现动态加载, 尤其是能进行动力拉伸试验。通过多次试验。结果表明, 新研制的动态加载设备可以满足混凝土材料动力试验 CT 实时观测的需要。目前采用的小级配试件虽不能反映出大体积全级配混凝土的动力力学特性, 但可以为全级配混凝土材料动力力学特性研究提供参考。

本仪器还存在以下明显的不足, 尚需在以后的实践中不断改进: 由于受到加压仓空间体积的限制, 目前只能采用小级配试件; 新研制的动态加载设备与 CT 独立运行, 还未能达到联动测试; 由于一次 CT 扫描的时间接近一个动力加载周期, 只能做到在选择的相位点中止加载后扫描, 还未能实现真正的动力实时扫描。

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 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.
- [2] 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—1593.
DANG Fa-ning, LIU Yan-wen, DING Wei-hua, et al. Quantitative analysis of concrete CT images based on damage-fracture evolution theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1588—1593.
- [3] 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]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1421—1425.
- [4] 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]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2006, 4(1): 1—7.
- [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.
- [6] 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.
- [7] 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[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 497—502.
- [8] 党发宁. 岩土破损演化理论(II): 物理状态指标与分区破损理论[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 673—679.
DANG Fa-ning. Damage-fracture evolution theory of rock and soil(II): Physical state indexes and divisional damage-fracture theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(5): 673—679.