

文章编号: 1001-4888(2009)03-0207-08

与医用 CT 配套的便携式材料试验机的研制 及其在混凝土损伤研究中的应用^{*}

丁卫华¹, 陈厚群², 党发宁¹, 刘云贺¹, 吴利言¹, 王筱柔³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西西安 710048; 2. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100041;

3. 长春市朝阳试验仪器有限公司, 吉林长春 130062)

摘要: 混凝土内部细观裂纹的演化规律研究可以解释其动态特性和损伤破坏机理。X 射线 CT 技术是无损探测混凝土内部细观裂纹萌生、扩展、贯通的有效手段。与医用 CT 配套的便携式材料试验机是进行混凝土 CT 试验的关键加载设备。本文概要介绍研制便携式材料试验机的研制过程。论述实现动态加载的几个关键技术问题, 包括加载设备的便携式要求、加载波形显示、加载控制、试件安装和粘结技术等。经过试验, 表明所研制的加载设备达到了使用要求。混凝土动力压缩条件下突发性裂纹的出现是其动态强度提高的原因之一。

关键词: 混凝土; CT 测试; 便携式材料试验机; 动态加载

中图分类号: TV32

文献标识码: A

0 引言

混凝土材料动力特性研究是混凝土结构抗震安全评价中的薄弱环节和瓶颈, 表现在动态强度设计指标选用的困难上, 这与地震输入和结构动力分析的水平不相适应。充分发挥混凝土材料动态强度, 对提高设计水平、降低工程造价具有十分重要的意义。目前, 混凝土动力特性的研究从理论研究集中在混凝土动态力学性能及其损伤破坏机理方面, 宏观动力学试验侧重于研究全级配混凝土与湿筛混凝土小试件的静动力学特性的差异, 细观数值模拟则重在研究混凝土材料的破坏过程。由于研究方法的限制, 从理论研究、宏观动力学试验目前尚无有效的手段对混凝土破坏过程实施实时观测, 细观数值模拟分析的结果在一定程度上可以解释混凝土动态力学特性和内部结构的损伤破坏机理, 但对这种分析结果缺乏试验验证, 特别是在混凝土破坏过程中细观裂纹的演化过程及对混凝土动态力学性质的影响, 是研究者非常关注的问题。

自从 X 射线医用 CT 发明以后, 材料科学试验就很快利用 CT 技术检测材料的缺陷和内部结构。上世纪八十年代中后期医用 CT 和工业 CT 已被用来探测岩石内部结构, 但这种检测都属于静态受压试验, 即在试件压裂后卸载状态下进行断面的 CT 扫描, 这类试验相对容易实现。如文献[1]采用医用 CT 扫描得到几种岩石试件的断面 CT 图像, 可以得到清晰的岩石内部裂隙图像, 文献[2]采用 CT 扫描得到混凝土试件中骨料、砂浆、孔洞的清晰的 CT 图像。上世纪九十年代初冻土工程国家重点实验室采用医用 CT 探测冻土的内部结构和冻土蠕变的细观机理, 杨更社在国内首次采用该 CT 机对岩石进行了压缩过程中的细观结构变化的观测, 有了初步的实时 CT 观测思路^[3]。

^{*} 收稿日期: 2008-11-9; 修订日期: 2009-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(50649028、90510017); 水利公益性行业科研专项经费项目(2007SHZ1 200701004)资助

通讯作者: 丁卫华(1965—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石和混凝土细观力学研究工作。E-mail: weihuading@163.com

1999 年葛修润^[4]首次设计与医用 CT 配套的专用静态加载设备,明确提出加载过程中的 CT 实时 CT 扫描问题并成功解决,称之为动态的 CT 试验。该设备对冻土、岩石、混凝土材料均能适应,见图 1。图 2 为岩石试样扫描定位图,说明 CT 扫描成像的位置。该 CT 专用三轴加载设备的外形为: $\Phi 240\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$,试验仓内径 $\Phi 142\text{ mm}$,最大轴向压力设计为 400 kN,围压为 20 MPa,轴向工作行程 40 mm,位移传感器量程为 0~50 mm,精度为 0.31%。此试验系统可对国际标准圆柱形岩石试件进行三轴压缩破坏试验,试件尺寸: $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,也可对 $\Phi 61.8\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的土样进行破坏试验。用 CT 机进行实时扫描,可研究试验全过程中试件的变形破坏情况。由于压力腔体放在 CT 机的扫描区,为减少腔体材料对 CT 扫描结果的影响,腔体不能用重金属材料制作,故采用优质的轻金属材料 LY12 加工而成。

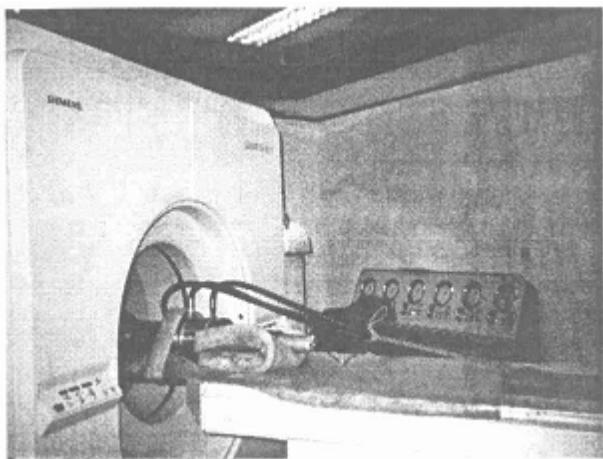


图 1 中国科学院冻土工程国家重点实验室
岩石 CT 试验系统图

Fig. 1 Rock test system by CT in State Key Laboratory of
Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences

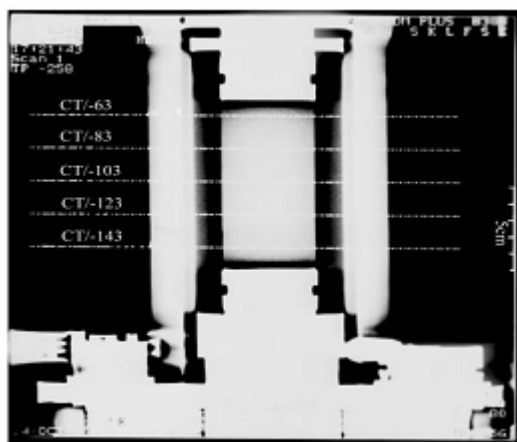


图 2 岩石试样扫描定位图

Fig. 2 Rock sample scan location figure

与该加载设备配套的 CT 机为 SIEMENS SOMATOMplus 型 X 射线螺旋 CT 机,空间分辨率为 $0.35\text{ mm} \times 0.35\text{ mm}$,可识别的最小体积为 0.12 mm^3 (厚度 1 mm),密度对比分辨率为 0.3%(3 Hu)。根据材料组成结构的不同,细观力学所研究对象的尺度可以从数 nm 到数毫米,采用上述 CT 机进行岩石细观损伤扩展规律试验可满足上述尺度的下限。

John S. Lawer 采用数字图像关联术(Digital Image Correlation, DIC)分析混凝土表面破裂模式,采用自行研制的 X 射线显微 CT(XMT,相当于工业 CT)分析内部裂纹的三维特征,发现 DIC 对小裂纹的宽度和位置更有效,X 射线 CT 能成功地描述大裂纹的形态,能体现裂纹演化过程中内部结构特征的影响,并根据混凝土破裂后的 CT 图像讨论了骨料形状、裂纹形状对混凝土强度和韧性的影响^[5]。不足之处是混凝土样品尺寸太小,为 $38.1\text{ mm} \times 12.7\text{ mm} \times 12.7\text{ mm}$ 的棱柱体,并且扫描样品一层获得一幅 CT 的时间很长,完成一次试验大约需 24 小时,扫描时样品需缓慢转动。图 3 为该显微 CT 试验系统图。

针对混凝土动力特性细观机理的探索问题,上述混凝土 CT 试验系统存在的问题是加载设备不能实现动态加载,尤其是不能进行动力拉伸,已有的医用 CT 混凝土试验系统不能满足混凝土材料动力试验 CT 实时观测的需要。

因此迫切需要研制与医用 CT 配套的便携式材料试验机,以求在医用 CT 试验系统中实现混凝土动态加载试验。

1 设计思路

1.1 关于 CT 机的确定

CT 扫描设备确定的首要原则是能够识别混凝土材料内部的细观裂纹。混凝土 CT 图像中的细观

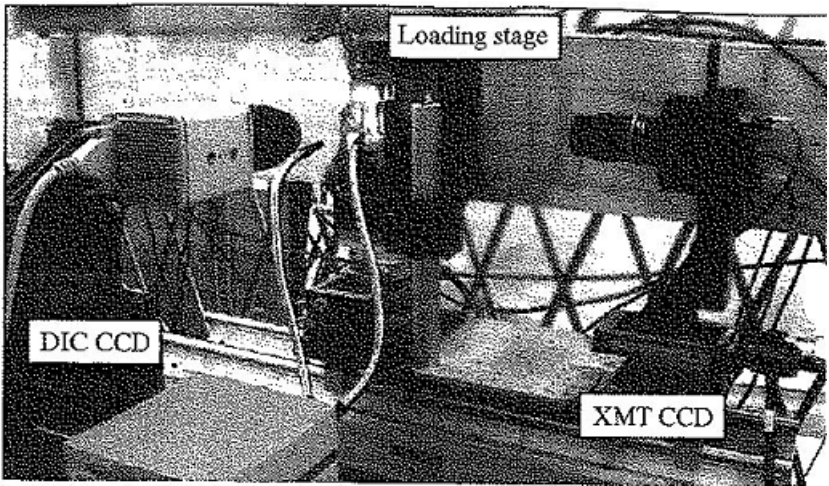


图 3 John S. Lawer 的混凝土显微 CT 试验系统
Fig. 3 Concrete micro-CT system by John S. Lawer

裂纹是以线状或环状低密度带影像体现出来的。混凝土内部的裂纹宽度很小,即便采用图像增强的方法后,最初能看到的宽度数量级小于 0.1mm。一般在混凝土受压强度峰值的 60%~80%附近细观裂纹开始萌生,稍有扩展或连通,宏观应力应变曲线的形状就会偏离线形状态。由于混凝土材料的骨料、砂浆、空洞等组分密度相差很大,因此常规医用 CT 扫描得到的混凝土 CT 图像较清晰图像分辨率能够满足所要求的 CT 扫描条件。

本文的混凝土 CT 试验系统的扫描设备确定为采用医用 CT。

1.2 设计目标

采用医用 CT,研制与其配套的专用加载设备,主要针对一、二级配的水工混凝土试件在动态加载的条件下进行 CT 扫描,获得在不卸载情况下任意时刻、任意断面的 CT 图像,以观察混凝土内部细观结构和裂纹萌生、扩展、连接、贯通的过程。

1.3 与医用 CT 配套的便携式材料试验机工作原理

与医用 CT 配套的专用加载设备工作原理与一般材料试验机相同。所不同的是,以压力室腔体本身作为反力架,形成自平衡系统,这与葛修润设计的与医用 CT 配套的专用加载设备原理相同。通过采用伺服阀控制上、下压力室的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,这是与葛氏仪器最大的不同点,见图 4 的与医用 CT 配套的便携式材料试验机设计原理图。

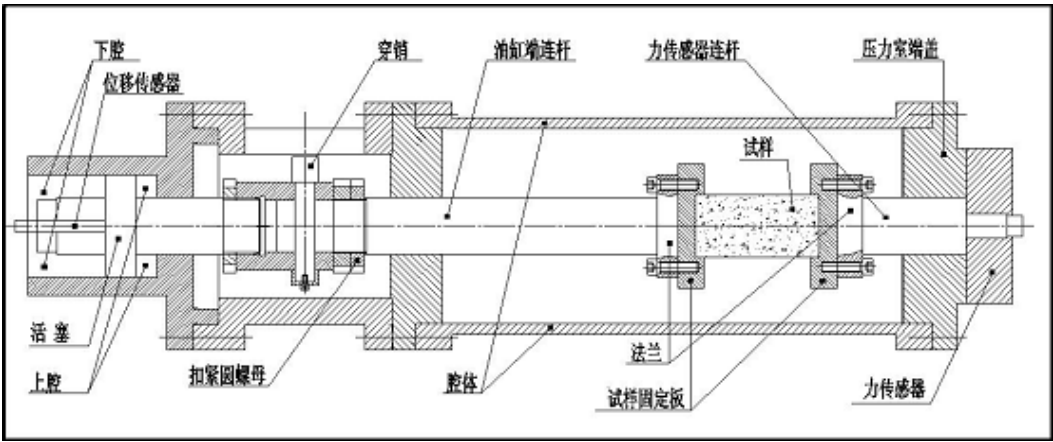


图 4 与医用 CT 配套的便携式材料试验机设计原理图
Fig. 4 Design figure of a portable test device fitting the conventional medical CT scanner

1.4 需解决的关键问题

便携式材料试验机,由于需要与医用 CT 配套工作,因此有特殊要求:(1)压力室腔体材料必须选用

高强度、低 X 射线吸收系数的材料,以降低对压力室内混凝土扫描形成 CT 图像的干扰;(2)必须重量小,体积小,使作动器连同压力室腔体一起能够被 CT 机的病床推入扫描空间;(3)因作动器出力受加载设备尺寸和重量限制,从而决定了被试混凝土试件的尺寸和强度。经过计算,对于普通 C20 混凝土,规格:高度 120mm,直径 60 mm,一级配,可以进行动态拉、压破坏试验;二级配,规格:高度 300mm,直径 150 mm,可以进行动态拉破坏试验。(4)考虑到材料试验机便携式要求,油箱体积的大小会影响到加载频率,经研究确定采用 1Hz~5Hz,据此决定油箱的体积。

2 研制过程中几个关键问题的解决

2.1 出力与混凝土级配

加载设备的出力设计与试件大小有关。以标准的二级配混凝土圆柱体试件为例,规格为 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$,普通 C20 混凝土在单轴静压作用下破坏荷载为 600kN~800kN。如果出力按 800kN 设计,加载设备的主机重量将超过 1 吨,由于 CT 机的病床需将主机送入扫描空间,病床将无法承受主机的重量。考虑工程中水工混凝土的抗压强度安全富裕度较高,因而更多关注的是混凝土的抗拉强度,而混凝土抗拉强度仅为其抗压强度的 $1/8 \sim 1/10$ 。因此将加载设备的出力按 100 kN 设计,预期能将标准的二级配混凝土圆柱体试件直接拉断,并可对一级配混凝土圆柱体试件 $\Phi 60\text{mm} \times 120\text{mm}$ 进行拉、压破坏试验。

针对两种规格的圆柱体试件,设计了对应的两套油缸连杆和试件固定板,用来固定尺寸不同的两种混凝土试件。

2.2 频率

加载设备的频率与油箱大小有关,并且应与 CT 机的扫描速度相匹配。理想的频率应尽可能高,以模拟各种频率的地震荷载。最高加载频率数为 5Hz 时,油箱尺寸为 $40\text{cm} \times 50\text{cm} \times 60\text{cm}$,装满油时重量达 200kg。如果频率再提高,重量会增大,将导致在医院 CT 室来回搬运和操作非常困难。

另一方面,目前常规医用 CT 的扫描速度一般为扫描一层需 0.5s,高速 CT(即电子束 CT,EBT)扫描速度一般为扫描一层需 0.11s。以最高加载频率为 5Hz 加载时,即使高速 CT 扫描速度也跟不上加载步调,实时扫描将难以实现。

现在采用的扫描方式是动态加载过程中需要扫描时,停止加载,但不卸载,保持荷载不变,实现了准实时扫描。

2.3 试验控制和加载波形

加载控制可用应力及位移控制。力的波型有直线型、冲击型、三角波、正弦波等,每种加载方式可在指定的相位角停止加载,加载波形需过 0 点,即拉、压力可以往复转换。精度的控制范围:力、位移的测量精度达到 $\leq 0.5\%$ 。力、位移可以实现自动数据采集。

2.4 围压

针对混凝土材料在地震荷载作用下实际上总是处于三轴应力状态的情况,设计了围压系统。可以模拟两种应力状态:(1)轴向动压,侧向稳定静压;(2)轴向动拉,侧向稳定静压。

采用分期设置围压的设计方案,准备二期安装围压系统。

2.5 动态拉伸

该仪器的一个重要特点是可以对混凝土试件进行动态试验和拉伸试验,动态拉伸的原理与常规的材料试验机相同,即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。

2.6 试件粘结

在直接拉伸试验中,试件的安装是决定试验成败的关键因素。固定板与试件之间采用工业胶的方式进行粘结。为了保证对混凝土试件拉伸试验的实现,必须加强粘结效果。在固定板粘结一端设置凹槽,增加试件的侧向粘结效果。固定板与法兰通过螺丝连接。两端法兰分别与油缸连杆、力传感器连杆固定连接。

2.7 同轴度和夹具

在粘结试件时,油缸端连杆和力传感器连杆在压力腔体外与固定板连接,必须保证其同轴度。否则,在试件装入压力腔体过程中由于压力腔体上下盖的圆孔是严格对中的,必然会因调整油缸和力传感器连杆的同轴度,造成试件与固定板之间产生弯矩,导致试件在加载之前已被破坏。

为此,专门研制了粘结大小圆柱体试件的两套专用夹具,用来保证粘结试件时油缸端连杆和力传感器连杆的同轴度。

2.8 控制和显示系统

采用德国 DEC 原装控制器,加载分为荷载控制和位移控制两种,可任意转换。可实时显示系统连接力传感器和位移传感器测量值,实时显示荷载时间曲线、位移时间曲线、荷载位移曲线,方便对加载过程、CT 扫描时机的控制。

3 加载设备全貌

根据设计目标,在研制过程中陆续解决了上述关键问题,成功实现了与医用 CT 配套的混凝土材料动态加载试验仪。整套仪器包括作动器(上 CT 床部分,重量 65kg),油箱(40cm×50cm×60cm),控制器,配电箱,笔记本电脑,连接高压油软管 2 根。手推车 2 台,分别放置作动器和油箱,见图 5。图 6 表示压力腔内混凝土样品 CONC13 图像扫描位置(每根白线表示 1 个扫描层位),说明每一幅 CT 图像的成像位置。



图5 新加载设备在动力加载过程中
(伴随 CT 实时扫描)

Fig. 5 Dynamic loading status of the
new loading device (with a real-time CT scan)

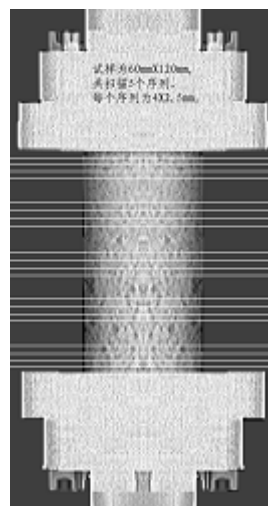


图6 混凝土样品 CONC13 扫描位置
(每根白线表示 1 个扫描层位)

Fig. 6 The sample scan location
(each white line represent a scan location)

4 新的混凝土 CT 试验系统调试结果

图 7、图 8 分别是动态变幅正弦波加载曲线,表明加载设备达到了设计要求。在这两幅图中因需将全部加载过程显示,采用的比例尺小,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,实际上停止加载用于 CT 扫描的时间远低于图中间隔,一般仅为数十秒。

采用本文便携式材料试验机,与医用 CT 配套,分别对一级配混凝土圆柱体试件进行动态单轴压缩、静态单轴压缩对比试验,获得了裂纹扩展过程的系列 CT 图像。图 6 表示混凝土样品 CONC13 图像扫描位置(每根白线表示 1 个扫描层位)。图 9 是采用本文新研制的便携式材料试验机与医用 CT 配套形成混凝土试验系统后得到的混凝土随应力变化的系列 CT 图像,可以清晰地观察到 CONC13-1-2

断面左上方裂纹起裂、扩展、贯通的全过程。样品规格为一级配混凝土,圆柱体试件 $\Phi 60\text{mm} \times 120\text{mm}$ 。可以看出,图像清晰,裂纹演化过程清楚。图 10 表明在动态压力作用下裂纹的爆发性出现过程。

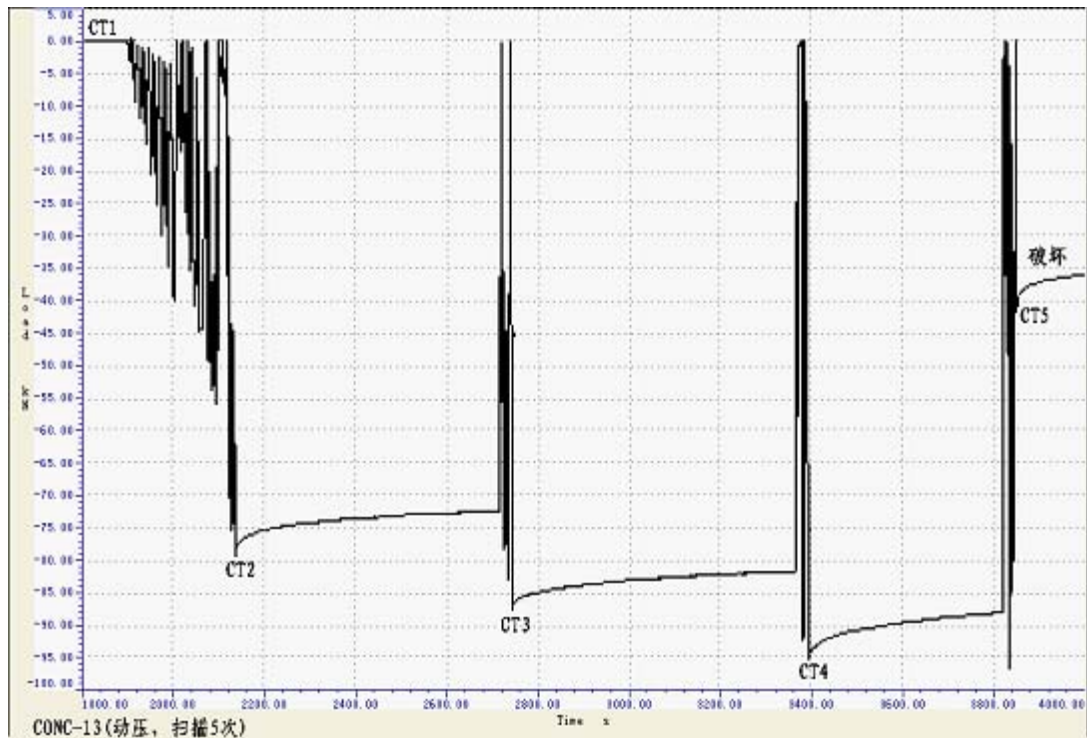


图 7 混凝土样品 CONC-13 动压荷载时间曲线

Fig. 7 The load and time curve of concrete sample CONC-13 under dynamic pressure condition

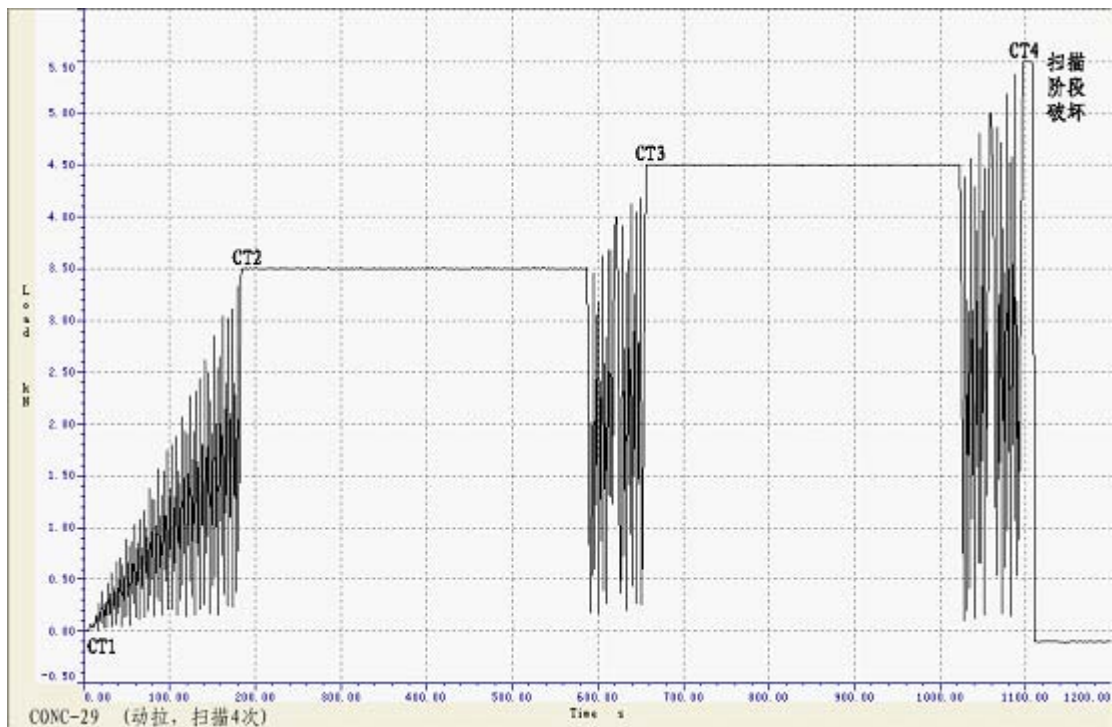


图 8 混凝土样品 CONC-29 动拉荷载时间曲线

Fig. 8 The load and time curve of concrete sample CONC-29 under dynamic tension condition

选取图 11 Conc 13-2-2 断面特定统计区域图进行 CT 数分析。图 12 断面特定统计区域平均 CT 数随应力变化曲线表明,在特定的统计区域 1、2、3、4 所包含的裂纹区域,在最后一次扫描(试件此时已破

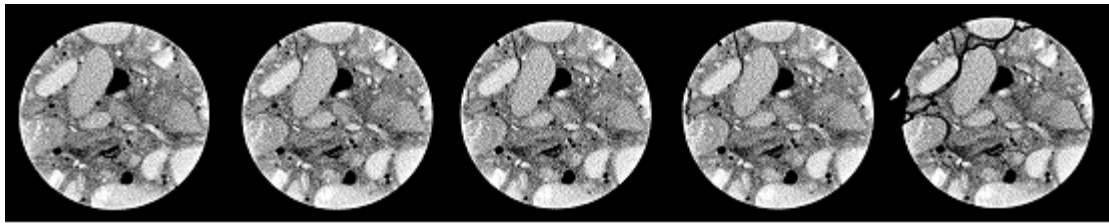


图 9 混凝土样品 CONC13-1-2 断面随动压应力变化的 CT 图像

Fig. 9 The CT images of concrete sample CONC13-1-2 section under dynamic pressure condition

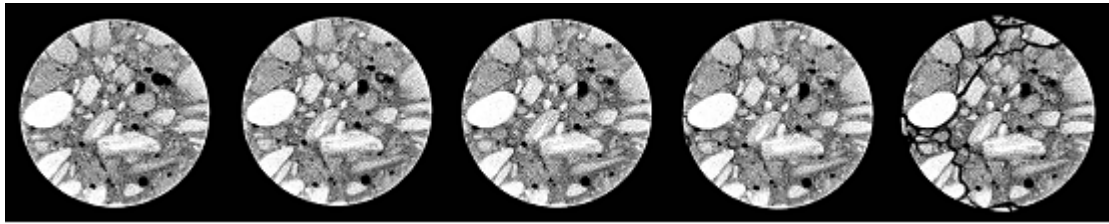


图 10 CONC13-2-2 断面随应力变化的 CT 图像

Fig. 10 The CT images of concrete sample CONC13-2-2 section under dynamic pressure condition

坏)前,其平均 CT 数变化规律与大统计区域是相同的,属于统计均匀的渐变演化阶段性。破坏后,各特定区域的平均 CT 数都突然降低,表明该裂纹的生成具有突发性。

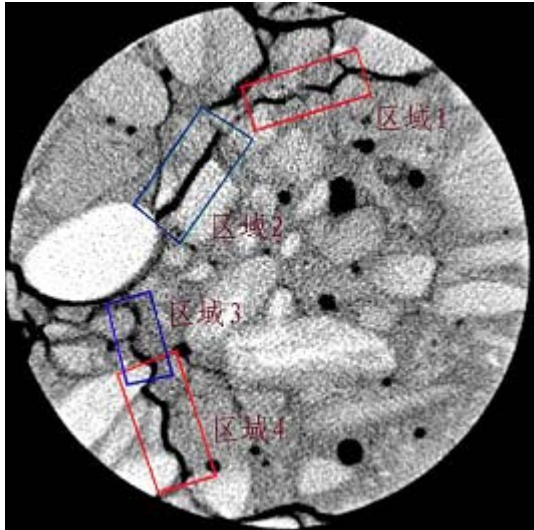


图 11 Conc 13-2-2 断面裂纹统计区域图

Fig. 11 Crack statistics region of

Conc 13-2-2 section

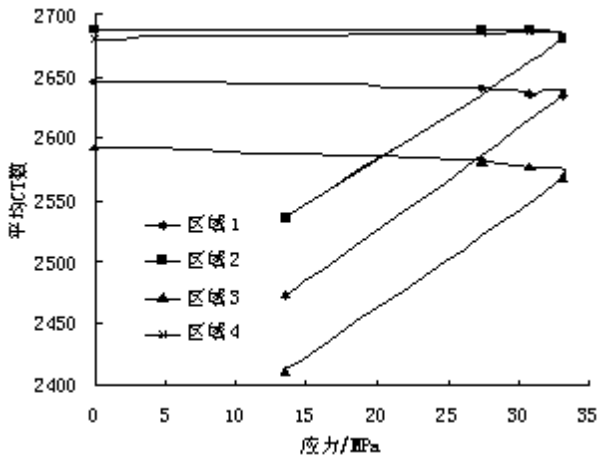


图 12 Conc 13-2-2 断面统计的 CT 数随应力变化曲线

Fig. 12 Curve between CT values and stress in statistics region of Conc 13-2-2 section

CONC13 的 CT 图像中裂纹有两种类型,在断面 CONC13-1-2 首次加载后左上部就开裂,一直扩展、扩张到试件破坏阶段,演化时间长。断面骨料对裂纹有抑制作用,裂纹遇到骨料时,停止扩展或改变方向。这种裂纹的演化规律与前述的静载条件下裂纹相类似。另外一种类型是在最后一个扫描扫描阶段(即 CT-5,此时试件已破坏)前突然出现的贯通性裂纹,在断面 2-2 表现明显。其特点是裂纹相对平直,切穿骨料现象增多,出现具有突发性,需要更多的能量。这在一定程度上可以解释混凝土在动力作用下强度可以提高的现象。

以上说明,便携式动态材料试验机加载功能得到了实现,并且与医用 CT 联动形成混凝土试验系统,获得动载条件下包含细观裂纹演化过程的混凝土 CT 图像。

本混凝土 CT 试验系统存在的问题是:(1)扫描时必须停止加载,会出现一定程度的裂纹流变现象。

改进的方法是尽量缩短扫描时间,同时采用应变控制方式减小这种效应。(2)拉伸试验时由于粘结面太小,经常出现脱胶现象,在动力加载情况下更为严重,改进方法是增加固定板帽头长度,增强粘结力,试验研究选择更合适的胶的类型,以提高直接拉伸试验的成功率。

5 结 论

本文介绍了与医用 CT 配套的便携式动态材料试验机的研制背景和研制过程,给出了该混凝土 CT 试验系统的调试结果,表明动态压缩、拉伸功能得到实现。动态压缩条件下的 CT 扫描结果表明,CT 图像清晰,混凝土在动力压缩条件下出现突发性的裂纹是其动态强度提高的原因之一。

进一步的工作是熟悉仪器工作性能,改进不足,提高试验技术水平,加大试验数量,变化试验条件,从而获得多种荷载条件、不同品种混凝土的细观破坏 CT 图像。

参考文献:

- [1] Raynaud S, Fabre D, Mazerolle F, et al. 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] Oral Buyukozturk. Imaging of concrete structures, NDT&E[J]. International, 1998,31(4):233—243.
- [3] 杨更社,谢定义,张长庆,等. 岩石损伤特性的 CT 识别[J]. 岩石力学与工程学报, 1996,15(1):48—54 (YANG Geng-she, XIE Ding-yi, ZHANG Chang-qing, et al. CT identification of rock damage properties[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996,15(1):48—54 (in Chinese))
- [4] 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-bin, et al. A real-in-time CT triaxial testing study of mesodamage evolution law of coal[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,18(5):497—502 (in Chinese))
- [5] John S Lawer, Denis T Keane, Surendra P Shah. Measuring three-dimensional damage in concrete under compression[J]. ACI Materials Journal, 2001,98(6):465—475

Manufacture of Portable Material Test Device Forming a Complete Set with Medical X-Ray CT and its Application in Concrete Damage Study

DING Wei-hua¹, CHEN Hou-qun², DANG Fa-ning¹, LIU Yun-he¹, Wu Li-yan¹, Wang Xiao-rou³

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 3. Chaoyang test instrument limited company in Changchun, Changchun 130062, China)

Abstract: Dynamic characteristics and damage mechanism of concrete material can be explained by its internal meso-crack evolution process. X-ray computerized tomography (CT) technique is an effective tool to detect the initiation, propagation and continuous accumulation of internal meso-cracks, that leads finally to macro cracks. Portable material test device forming a complete set with medical X-ray CT scanner is a key loading equipment in concrete CT test. This paper generally introduces the manufacturing process of the portable material test device. Some key techniques to implement dynamic loading are discussed including how to meet the portable demand, how to display loading wave and loading controlling, specimen installing and cohering techniques. According to test results, the portable test device has achieved the design demand. Cracks break out in concrete under a dynamic compression condition is one of the reasons causing concrete dynamic strength's increase.

Keywords: concrete; detection using CT; a portable test device; dynamic loading