

# 基于 CT - 连续加荷水泥乳化沥青混凝土 细观损伤规律研究

闫小虎<sup>a,b</sup>, 杨华全<sup>a,b</sup>, 石妍<sup>a,b</sup>, 李明霞<sup>a,b</sup>

(长江科学院 a. 国家大坝安全工程技术研究中心; b. 水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心, 武汉 430010)

**摘要:**利用 CT 技术对水泥乳化沥青混凝土的细观损伤过程进行实时扫描观测,获得了混凝土试件在连续加荷下的 CT 图像。通过采用直观分析法、CT 数分析法、CT 数与损伤变量关系 3 种方法分析表明,水泥乳化沥青混凝土的破坏过程可分为压密、扩容、裂纹扩展、破坏 4 个阶段,同时混凝土在受压过程中具有韧性,在极限荷载之前各断面处于压密和微扩容的强化阶段,极限荷载之后混凝土从损伤到破坏发展比较平稳。

**关键词:**水泥乳化沥青混凝土; CT 试验; CT 图像; CT 数; 损伤变量

中图分类号: TU528.42

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2013)03-0075-04

## 1 研究背景

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、胶凝材料及两者粘结带组成的三相材料。混凝土的破坏实际上是裂纹的萌生、扩展和贯通裂纹演化过程<sup>[1]</sup>。混凝土细观结构的分析有试验观察、数值模拟和理论分析 3 种途径,而试验方法是基础。目前研究混凝土材料细观裂纹扩展及破坏过程的试验方法有声发射、扫描电子显微镜等。扫描电子显微镜可以观测到混凝土表面的结构,如裂纹特征,但仅能观测到试样表面变化,很难观测到混凝土内部细观裂纹演化过程。声发射运用了加载过程中介质内部应力波传播现象,尽管可以探测到混凝土内部裂纹的实时演化过程,但目前采用的设备采样率过低,即使对低频动态加载时的观测要求也常难以满足,且其结果与材料内部裂纹扩展参数很难建立定量关系<sup>[2-3]</sup>。

计算机 CT(Computerized Tomography)技术作为一种无损检测技术,可以定量、无损伤和动态量测材料在受力过程中内部裂纹演化过程<sup>[4-5]</sup>,为研究混凝土细观裂纹扩展及破坏过程提供了一条新的途径,可以作为建立混凝土裂纹模型、检验数值模拟的基础,并解释混凝土材料的宏观力学特性。然而,当前主要运用 CT 技术研究脆性大、抗压强度高、弹性模量高的普通混凝土,不能连续捕捉到裂纹的发展

破坏过程<sup>[1-3,6]</sup>。本文利用 CT 试验,采用实时加荷扫描水泥乳化沥青混凝土试件,运用不同的图像处理方法研究了具有一定韧性混凝土破坏全过程的损伤裂纹演变规律,将有助于解释水泥乳化沥青混凝土的宏观力学特性。

## 2 水泥乳化沥青混凝土 CT 试验过程及结果

### 2.1 试验条件及过程

混凝土试验对象为  $\phi 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  的一级配混凝土圆柱试件,养护时间 28 d。水胶比为 0.45,青胶比为 0.4,黏土掺量为 20%,粉煤灰掺量为 15%,骨料为粒径 5~20 mm 砂岩,砂为大理岩人工砂,其中水胶比、青胶比、黏土掺量、粉煤灰掺量分别为水、乳化沥青、黏土、粉煤灰与胶凝材料的质量比。

加载设备在水利部岩土力学与工程重点实验室的 Siemens Sensation 40 CT 试验机上进行,未加围压,扫描混凝土试件全断面,每次扫描时,最小扫描间距 0.7 mm。采用连续加荷,加载完后直接进行 CT 扫描,直到试件破坏为止。

### 2.2 试验结果

CT 试验提供的试验结果是包含 CT 数和灰度值的数字图像,图像 CT 重建是 256 阶灰度图像,图像重建矩阵大小为  $640 \times 640$ ,图像分辨尺寸 0.15 mm,图像每个像素点以 12 位 CT 数存储,每个像素可以显示

4 096 个阶位。每次荷载扫描下,共获得 393 张 CT 图像。混凝土试件断面选取见图 1,每个断面间距 25 mm,共 7 个断面。

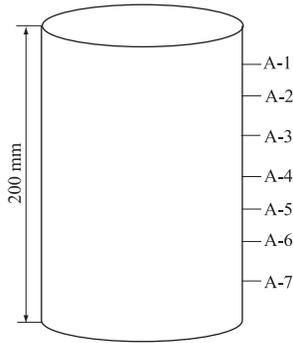


图 1 混凝土试件断面选取示意图

Fig. 1 Selection of the concrete specimen's cross sections

### 3 水泥乳化沥青混凝土 CT 图像试验结果分析

#### 3.1 图像直观分析法

由于 CT 扫描图片较多,选取荷载  $\sigma = 3.18, 5.15, 5.44, 5.30$  MPa (其中 5.30 MPa 是由于试件破坏后发生了卸载) 进行混凝土各断面分层扫描 (见图 2)。混凝土组成中硬化水泥砂浆的阈值为 2 000 ~ 2 200, 骨料的 CT 阈值为 2 200 ~ 3 071, 空气的 CT 数为 -1 000, 界面过渡区的 CT 阈值为 1 000 ~ 1 600, 因此很容易就可以从混凝土 CT 图像中分辨出混凝土的各相组成。空气密度最小、图中亮度最低的黑点或区域即为孔洞和裂纹发生区域。骨料密度最大, 从图中可清晰看到断面中骨料的空间分布位置以及骨料形状, 但无法从图中直接确定骨料的区域边界。砂浆密度次之, 在 CT 图中表现为亮度降低呈灰色。

从图 2 中混凝土各断面扫描灰度 CT 图像可以看出:

(1) 水泥乳化沥青混凝土试件受压破坏过

程中, 下断面细观裂纹明显, 其形成、发展比较迅速, 破坏严重, 上部断面细观裂纹不明显。这与普通混凝土在受压破坏时产生从上到下贯穿裂缝不同, 一方面是因为水泥乳化沥青混凝土抗压强度低, 下部受到试件自重和施加荷载共同作用, 在上部未达到破坏荷载前下部已经破坏; 另一方面是因为水泥乳化沥青混凝土具有一定韧性, 在荷载作用下, 混凝土下部的纵向变形比上部大, 而普通混凝土抗压强度高, 脆性大, 试件在荷载作用下整体变形均匀。

(2) 水泥乳化沥青混凝土各断面在达到极限荷载 5.44 MPa 前, 混凝土部分断面出现细微分散性裂纹, 没有形成贯穿性裂纹, 是由于水泥乳化沥青混凝土具有一定的塑性和自我修复能力, 混凝土各断面处于压密和微扩容相互交替的过程。当混凝土达到极限荷载后, 胶凝材料与骨料界面分离, 混凝土出现裂缝; 继续加载, 混凝土承压荷载降低, 裂缝明显扩展, 混凝土破坏。而普通混凝土试件随着受压荷载增加, 裂纹逐渐增大, 是从小到大演变成裂缝, 直至混凝土达到极限荷载, 突然形成贯穿性的裂缝, 试件破坏。

(3) 混凝土是典型的非均质脆性材料, 在荷载作用下, 当应力超过混凝土时极限强度混凝土就会开裂。普通混凝土与水泥乳化沥青混凝土在受压开裂时的薄弱区都是界面过渡区和孔洞附近。从图 2

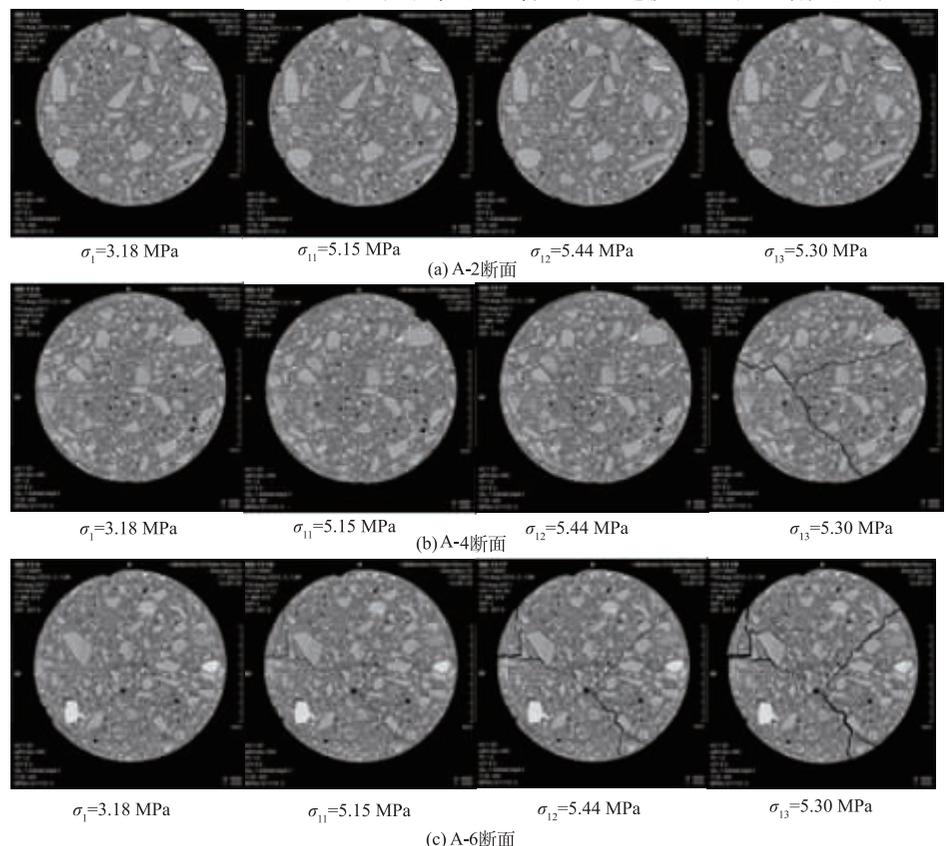


图 2 不同应力作用下混凝土各断面扫描灰度 CT 图像 (28 d)

Fig. 2 Grey CT images of concrete's cross sections under various stresses (28 d)

中 A-2 断面和 A-4 断面可以看出水泥乳化沥青混凝土具有更多的孔洞:一是因为在试样制备过程中难以保证完全振捣密实;二是因为试件中掺入乳化沥青、引气剂引入部分空气的缘故;三是乳化沥青中的水分参与水泥后期水化后形成孔洞。因此,更多的孔隙对混凝土强度、抗冻及抗渗性有一定的影响。

### 3.2 CT 数分析法

由于混凝土 CT 重建图像是将原始的 12 字节 CT 图像转化成 8 字节灰度 CT 图像<sup>[7]</sup>,降低了 CT 图像的分辨率,并且人眼分辨能力有限,根据 CT 灰度直观图只能定性描述混凝土结构在承荷过程中内部结构特征的变化过程和裂纹的演变过程,很难准确确定裂纹的产生、发展和裂纹具体形状。为此,通过比较不同应力水平下各断面 CT 图像上 CT 数的变化,可以定量描述混凝土各断面承荷时结构破坏变化情况。选取混凝土试件在连续加载下各断面计算 CT 数平均值,得到试件各断面 CT 平均数,见表 1,横截面面积为 66.50 cm<sup>2</sup>,绘制曲线见图 3。

表 1 混凝土试件各断面的 CT 平均数

Table 1 Mean CT numbers of concrete's cross sections

荷载编号	应力 /MPa	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
1	3.18	1 562	1 547	1 515	1 531	1 523	1 526	1 537
3	3.55	1 564	1 545	1 514	1 532	1 522	1 524	1 536
5	3.85	1 561	1 548	1 513	1 531	1 523	1 526	1 538
7	4.41	1 560	1 546	1 513	1 531	1 522	1 522	1 535
11	5.15	1 559	1 549	1 514	1 527	1 517	1 511	1 530
12	5.44	1 559	1 547	1 509	1 522	1 506	1 498	1 519
13	5.30	1 555	1 539	1 501	1 503	1 482	1 470	1 500

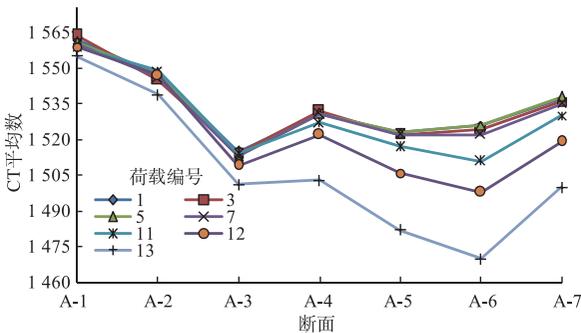


图 3 连续加荷下混凝土各断面 CT 平均数比较

Fig.3 Comparison of mean CT numbers of each cross section under continuous loading

表 1 和图 3 显示,水泥乳化沥青混凝土承荷前各断面 CT 平均数不同,A-1 与 A-2 断面 CT 平均数大于其他断面,这与扫描直观图 A-4 与 A-6 断面孔洞较多相符。这是因为乳化沥青加入后,在搅拌过程中引入了大量气泡,而混凝土在成型振捣中,

上部气泡很容易溢出,下部气泡就保留在试模中,导致混凝土不密实,试件各断面 CT 平均数不同。由于水泥乳化沥青混凝土中,水泥与乳化沥青共同作为胶结料,砂石骨料构建骨架,形成了强度结构体系。而乳化沥青的添加,部分包裹砂石骨料,改变了混凝土界面结构,导致乳化沥青混凝土抗压强度低,但降低了弹性模量,提高了混凝土的塑性。同时混凝土受到试件自重和施加荷载共同作用,试件整体变形不均匀,下部的纵向变形比上部大,在上部未达到破坏荷载前下部已经破坏。所以混凝土达到极限破坏荷载 5.44 MPa 时,上部 3 个断面 CT 平均数基本没变化,下部 4 个断面不同程度的下降。混凝土达到极限破坏荷载后,各断面 CT 平均数对比初始状态对应值均有不同程度降低,而前 3 个断面变化很小,后面断面变化幅度比较大。文献[1]对同一混凝土试件不同断面在连续应力水平下的 CT 平均数分析可知,混凝土损伤演化全过程可分为压密、扩容、CT 尺度裂纹扩展、试件破坏 4 个过程。通过试验分析,水泥乳化沥青混凝土损伤演化过程与普通混凝土相似,但普通混凝土在损伤破坏过程中,由于抗压强度高,弹性模量大,混凝土损伤急剧扩展发生脆性破坏,压密、扩容阶段变化小,很难通过 CT 扫描观测到,只能通过 CT 平均数观测到混凝土 CT 尺度裂纹扩展和试件破坏过程,尚不能完全观测到混凝土损伤产生、发展及破坏全过程。从图 3 中可以看到水泥乳化沥青混凝土承荷后前 3 个断面没有破坏,后面 4 个断面破坏严重,这与混凝土的强度低、具有塑性有关。前 3 个断面在不同荷载作用下,CT 平均数变化比较小,说明混凝土一直处于压密与微扩容的交替状态。试件后面 4 个断面显示了混凝土损伤演化的 4 个过程:混凝土随着荷载增加,各断面压密,密度增大,CT 平均数略有增加;在荷载达到 5.15 MPa 时,各断面 CT 数开始小幅降低,此阶段是混凝土损伤起始阶段;之后达到极限荷载 5.44 MPa 时,微裂纹开始萌生并稳定扩展,损伤加速发展,试件裂纹快速发展,CT 平均数显著下降,试件体积出现膨胀,密度迅速减小;试件承压荷载 5.30 MPa 时,下部断面已经被破坏。

### 3.3 CT 数与损伤变量关系

为了能对混凝土细观扫描图像上附带的 CT 平均数信息进行检出和统计分析,周尚志与党发宁等人提出了 CT 数与损伤变量的关系如式(1)所示<sup>[2]</sup>,能够较好地反映混凝土损伤局部变化现象。

$$D = 1 - \frac{H_{mi}}{H_{mo}} \quad (1)$$

式中:  $D$  为损伤变量;  $m$  为某断面;  $H_{m0}$  为混凝土初始状态的全局域 CT 数平均值;  $H_{mi}$  为某应力阶段的全局域 CT 平均值。对每个加载阶段各断面上 CT 数信息合起来统计所得 CT 数平均值, 代入式(1) 计算得到损伤变量值见表 4。损伤变量结果与应力关系曲线如图 4 所示。

表 2 连续荷载下各断面损伤变量试验结果

Table 2 Test results of damage variable of each cross section under continuous loading

荷载编号	应力/kPa	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
1	3 184	0	0	0	0	0	0	0
2	3 494	0.001	-0.001	0.001	0.005	-0.004	0.002	0.009
3	3 550	-0.001	0.001	0.001	-0.001	0.001	0.001	0.001
4	3 632	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	-0.001
5	3 848	0.001	-0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001
6	4 112	0.001	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
7	4 415	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.006	0.003
8	4 554	0.003	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
9	4 690	0.003	-0.001	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
10	4 904	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.006	0.003
11	5 146	0.002	-0.001	0.001	0.003	0.004	0.010	0.005
12	5 442	0.002	0.000	0.004	0.006	0.011	0.018	0.012
13	5 304	0.002	0.005	0.009	0.018	0.027	0.037	0.024

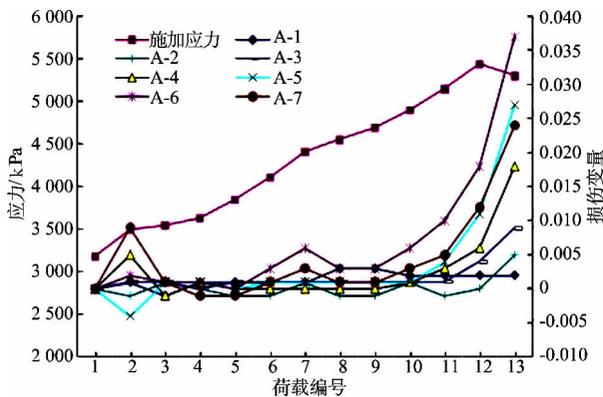


图 4 各断面损伤变量及应力关系曲线

Fig. 4 Relationship between damage variable and stress of each scanned section

从图 4 可以观察到, 各断面损伤变量曲线变化比较平缓而且变化幅度比较小。在荷载 5.14 MPa 之前, 混凝土各断面基本上没有太大损伤产生, 而且处于不断的压密和微扩容的强化阶段。加载断面 A-2 比较明显, 这是根据损伤变量的定义根据混凝土密度特性的 CT 平均数造成的。在该应力之后, 各断面损伤变量变化比较平缓, 断面 A-1 至 A-3 变化比较小, A-4 以后几个断面变化比较大, 说明混凝土从损伤到破坏是一个逐渐发展的过程, 与文献[2]中普通混凝土损伤变量和应力关系对比, 曲线有一个近乎垂直的急剧上升, 混凝土损伤急剧扩展发生脆性破坏, 更进

一步说明水泥乳化沥青混凝土具有一定的塑性。这与直观图像分析的结论相对应。

## 4 结 语

利用 CT 技术对水泥乳化沥青混凝土的细观破裂过程进行实时扫描观测, 获得了混凝土试件在连续荷载下 CT 图像, 并提取出图像上 CT 平均数加以整理。通过对图像和 CT 平均数进行分析表明: 混凝土试件损伤破坏过程中, 各断面 CT 平均数变化不同, 上部变化比较小, 下部变化比较大。混凝土的破坏过程可分为压密、扩容、裂纹扩展及破坏 4 个阶段, 同时水泥乳化沥青混凝土在受压过程中具有塑性, 在极限荷载之前各断面处于压密和微扩容的强化阶段, 极限荷载之后混凝土从损伤到破坏发展比较平稳。为此, 可以通过对水泥乳化沥青混凝土进一步试验研究, 能够研发出高抗渗性、高韧性的水工建筑材料, 可以解决水工混凝土防渗抗裂的重大技术难题, 延长水工结构寿命, 具有较高的工程应用价值和广阔的市场前景。

## 参考文献:

- [1] 田 威, 党发宁, 梁昕宇, 等. 混凝土细观破裂过程的 CT 图像分析[J]. 武汉大学学报, 2008, 41(2): 69 - 74. (TIAN Wei, DANG Fa-ning, LIANG Xin-yu, et al. CT Image Analysis of Meso-fracture Process of Concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(2): 69 - 74. (in Chinese))
- [2] 周尚志, 党发宁, 陈厚群, 等. 基于单轴压缩 CT 实验的混凝土破损细观机理研究[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(4): 355 - 360. (ZHOU Shang-zhi, DANG Fa-ning, CHEN Hou-qun, et al. Breakage Meso-mechanism of Concrete Based on CT Test under Uniaxial Compression [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4): 355 - 360. (in Chinese))
- [3] 尹小涛, 葛修润, 党发宁. 基于 CT 试验的混凝土破损机理生态学研究[J]. 混凝土, 2006, 202(8): 21 - 24. (YIN Xiao-tao, GE Xiu-run, DANG Fa-ning. Damage and Fracture Mechanism of Concrete by Ecological Method Based on CT Test[J]. Concrete, 2006, 202(8): 21 - 24. (in Chinese))
- [4] 王志祥, 刘方文. 声波 CT 无损检测技术在混凝土质检中的应用[J]. 中国三峡建设, 2002, (7): 18 - 19. (WEN Zhi-xiang, LIU Fang-wen. Concrete Quality Inspected by Acoustic Nondestructive CT [J]. Three Gorges Construction, 2002, (7): 18 - 19. (in Chinese))
- [5] 王五平, 宋人心, 傅 翔, 等. 用超声波 CT 探测混凝土内部缺陷 [J]. 水利水运工程学报, 2003, (2): 56 - 60. (WANG Wu-ping, SONG Ren-xin, FU Xiang, et al. Detection of Concrete Interior Defects with Ultrasonic CT [J]. Hydroscience and Engineering, 2003, (2): 56 - 60. (in Chinese))