文章编号：1001-4888(2017)04-0452-11

基于 CT 扫描的环氧树脂基混凝土裂缝观测与冲击损伤演化研究*

张楠丽[1]，刘逸平[1]，蒋震宇[1]，石孟泽[2]，马东鹏[1]，刘泽佳[1]，汤立群[1]
（1. 华南理工大学土木与交通学院，广东广州 510640；2. 福州百盛精细化学品有限公司，福建福州 350102）

摘要： 环氧树脂基混凝土是一种新型路面铺装材料。本文估算了道路使用过程发生“跳车”现象时货车车轮对路面产生的冲击荷载，根据计算结果，利用落锤冲击试验机对含有不同程度初始损伤的环氧树脂基混凝土试件进行多次冲击试验，研究其冲击疲劳现象。为了准确描述环氧树脂基混凝土的初始损伤，采用 CT(计算机断层)扫描技术重构了试件的立体图像，对其中的内部裂缝进行了统计，建立了初始损伤裂缝体积占试件体积的百分比与基于材料弹性模量衰减的损伤变量之间的关系。通过追踪经受一定次数冲击后试件的弹性模量，分析了不同程度初始损伤下环氧树脂基混凝土的冲击损伤随冲击次数的变化规律；结合多次冲击荷载下环氧树脂基混凝土弹性模量的衰减，研究了初始损伤对环氧树脂基混凝土冲击疲劳过程中损伤演化规律的影响。

关键词： 环氧树脂基混凝土；CT 扫描；落锤冲击；裂缝探测；损伤演化
中图分类号： O346.5 **文献标识码：** A DOI：10.7520/1001-4888-17-031

0 引言

环氧树脂基混凝土(Epoxy Polymer Concrete，EPC)具有养护时间短、抗压和抗拉性能好、化学介质抵抗力强等特点，可用于铺装材料、机械机床和轨道枕木，具有广阔的市场应用前景[1,2]。迄今为止，国际上对环氧树脂基混凝土研制方面的探讨多集中于树脂的改性、骨料配比和固化条件等，对环氧树脂基混凝土材料力学性质的研究则局限于准静态力学性能。Mani 等[3]利用硅烷耦合剂对环氧树脂进行改性后，制备的环氧树脂基混凝土的压缩强度提升了约 36%。Vipulanandan 等[4]发现添加硅烷耦合剂可以使环氧树脂基混凝土的压缩强度获得明显提高。Haidar 等[5]结合弯曲和压缩试验以及电镜观察混凝土空隙率等多种试验手段，对不同胶石比环氧树脂基混凝土的准静态力学性能进行了较为全面的评估。多个研究小组开展的环氧树脂基混凝土抗弯、抗压和抗劈裂强度的对比表明，12%～15%为最优的胶石比范围[5-8]。国内对环氧树脂基混凝土研究起步较晚，成果也比较少[9,10]。李宇峙团队先后对自制环氧树脂基混凝土的抗压强度和弹性模量[11]以及温度收缩性能[12]开展了研究。Lei 和 Cao[13]尝试使用微波对环氧树脂基混凝土进行固化，并评估了制备样品的温度敏感性、防水性等路面铺装性能指标。程经纬等[14]对环氧树脂基混凝土的弹性模量和抗弯拉强度进行了探索，发现该材料养护 3 天后的抗弯拉强度即可达到 15MPa。

CT 扫描技术具有无损检测和高分辨率的特点，可以观测到混凝土内部的裂缝，已成为当前研究混

* 收稿日期：2017-02-21；修回日期：2017-03-15
基金项目：国家自然科学基金(11272124，11472109)；广东省交通运输厅科技项目(科技-2012-02-033，科技-2013-02-095)资助
通讯作者：刘逸平(1974—)，男，博士，教授，博导。主要从事实验力学、先进混凝土材料的研究。Email：tcypliu@scut.edu.cn

凝土内部损伤的有效方法。本文采用高分辨率显微工业 CT(Micro-CT)扫描技术(如图 1 所示),Micro-CT 的基本结构包括三个部分:X 射线源、载物台和高分辨率探测器。由 X 射线源连续产生锥形的 X 射线束,试件固定于载物台上在 X 射线中进行旋转,部分光子被吸收,X 射线强度因而衰减,未被吸收的 X 射线光子穿透样品后,被检测器接收[15]。锥束 CT 具有扫描速度快(旋转一周可重建上千层图像)、X 射线利用率高、重建图像轴向分辨率和水平分辨率一致等优点,并且由于其高分辨率的特点,可以按任意方向重组切片[16],被广泛应用于医学和工业领域。

国内学者田威、党发宁等[17;18]采用便携式 CT 实时动态加载设备对混凝土进行了静态压缩试验,在加载到破坏的过程中扫描了 10 次,最后将 CT 数与损伤变量关联,以 CT 数的变化为基础建立了混凝土损伤演化方程和损伤本构关系。然而,对于 CT 扫描所得的数据,目前学者仅通过试件某些断面的 CT 数的大小变化、CT 图灰度的变化等来分析研究混凝土的损伤,对裂缝的观测也仅限于某些断面上的情况[19],未见对混凝土内部裂缝的三维形态进行分析。

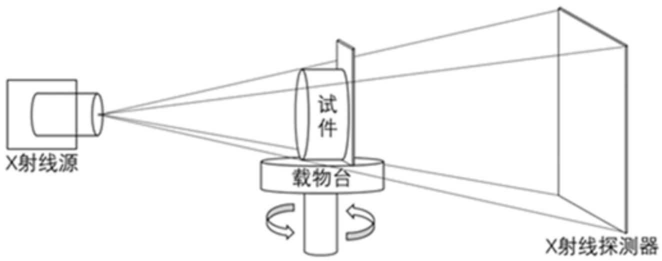


图 1　Micro-CT 成像原理

Fig. 1　Micro-CT imaging principle

近年来,随着我国高等级公路建设的飞速发展,每年通车的高等级公路中都有成千上万座桥梁建成。营运中桥梁与公路的搭接处往往存在不均匀沉降与搭板断裂,最终导致桥头“跳车”现象越来越严重[20]。而混凝土路面铺装层在公路运营中由于温度应力、超重车荷载等因素,内部会萌生裂缝,导致不同程度的损伤,含损伤的混凝土在承受“跳车”荷载作用时,其内部损伤将进一步发展。因此,研究不同程度初始损伤情况下,环氧树脂基混凝土承受多次冲击荷载作用后的力学行为及其损伤演化具有重要意义。

本文估算了发生“跳车”现象时货车车轮对地面产生的冲击荷载,进而用落锤试验机对含有不同程度初始损伤的环氧树脂基混凝土进行多次冲击试验。为了准确描述冲击损伤的演化规律,用弹性模量的衰减定义损伤变量,并采用 CT 扫描技术对环氧树脂基混凝土的内部裂缝进行观测,重构了试件的体图像,建立了裂缝体积比(裂缝体积占试件体积的百分比)与损伤变量之间的关系。结合多次冲击荷载下环氧树脂基混凝土内部裂缝的观察和统计,分析了不同初始损伤下环氧树脂基混凝土的内部损伤随冲击次数的变化规律。

1　落锤冲击试验

1.1　“跳车”荷载的估算

由于实际情况中货车构造复杂、自由度较多,为了简化计算,一般将货车简化成两自由度的 1/4 车辆模型和四自由度的 1/2 车辆模型。为了得到“跳车”时车轮对地面的冲击荷载,可采用两自由度的1/4 车辆模型,该模型只考虑车辆轮胎和悬挂的影响,模型由减震悬架下部质量 m_1、上部质量 m_2、悬架和轮胎的弹性元件 k_1、k_2 及阻尼器 c_1、c_2 组成,如图 2 所示,其中(a)为无阻尼的简化模型,(b)为含阻尼的简化模型。弹簧未变形时 m_1、m_2 的初始位置为 x_1、x_2 的坐标原点。

无阻尼简化系统的运动方程可以表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \tag{1}$$

含阻尼的简化系统的运动方程可以表示为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \tag{2}$$

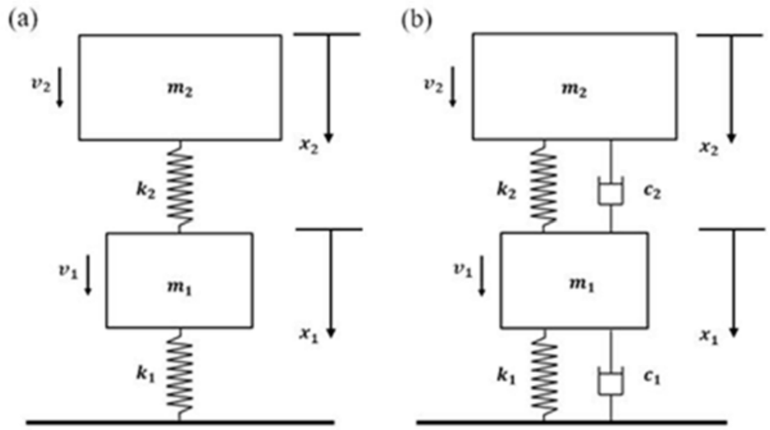


图2 1/4货车简化模型示意图 (a)无阻尼简化模型;(b) 含阻尼简化模型

Fig. 2 Schematic diagram of simplified model of 1/4 freight car (a)simplified model without damping; (b)simplified model with damping

式中,$\mathbf{M}$为系统的质量矩阵;$\mathbf{C}$为系统的阻尼矩阵;$\mathbf{K}$为系统的刚度矩阵;$\mathbf{X}$为系统的广义坐标;$\mathbf{F}$为系统承受的外载荷。其中:

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{K}=\begin{bmatrix} k_1-k_2 & k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{X}=[x_1 \quad x_2]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$$\mathbf{F}=[m_1 g \quad m_2 g]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中,m_1为簧下质量;m_2为簧上质量;k_1为轮胎的刚度;k_2为悬架弹性元件的刚度;c_1为轮胎阻尼;c_2为悬架阻尼器的阻尼;x_1为m_1的位移;x_2为m_2的位移。

取时间增量Δt,则下一时刻的速度$\dot{\mathbf{X}}_{i+1}$、位移$\mathbf{X}_{i+1}$可表示为:

$$\dot{\mathbf{X}}_{i+1}=\dot{\mathbf{X}}_i+\ddot{\mathbf{X}}_i\Delta t \tag{8}$$

$$\mathbf{X}_{i+1}=\mathbf{X}_i+\dot{\mathbf{X}}_i\Delta t \tag{9}$$

式中,$\dot{\mathbf{X}}_{i+1}=[v_{1i+1} \quad v_{2i+1}]^{\mathrm{T}}$,$\ddot{\mathbf{X}}_{i+1}=[a_{1i+1} \quad a_{2i+1}]^{\mathrm{T}}$,$i=1,2,3,\cdots$。$v_1$为$m_1$的速度;$v_2$为$m_2$的速度;$\Delta t$为时间增量。

由式(1)、式(2)、式(8)和式(9)可得出簧下质量m_1的最大位移$x_{1\max}$,此时无阻尼模型中路面受到的最大冲击荷载为:

$$F_{\max}=k_1 x_{1\max} \tag{10}$$

含阻尼模型中路面受到的最大冲击荷载为:

$$F_{\max}=k_{1\max}+c_1 v'_1 \tag{11}$$

式中,v'_1为$x_1=x_{1\max}$时m_1的速度。

取时间增量0.001s,考虑常见货车及混凝土路面结构[21],取簧上质量$m_2=7500$kg,簧下质量$m_1=440$kg,$k_2=1$MN/m,$k_1=1.2$MN/m,$c_2=12$kN·s/m,$c_1=1.5$kN·s/m。

我国《公路养护技术规范(JTGH10—2009)》规定,水泥混凝土路面错台高度达到12mm视为严重损害,因此取"跳车"高度为12mm,则货车在12mm自由落体接触地面时,冲击速度为0.485m/s,计算时取模型的初速度为该速度。

两种模型在3s内的v_1、v_2、x_1、x_2随时间变化的曲线如图3所示,可以看出,无阻尼模型的v_1、v_2、x_1、x_2随时间周期性变化;含阻尼模型的v_1、v_2随时间增大而趋向于0;x_1、x_2随时间增大而趋向一个

固定值。

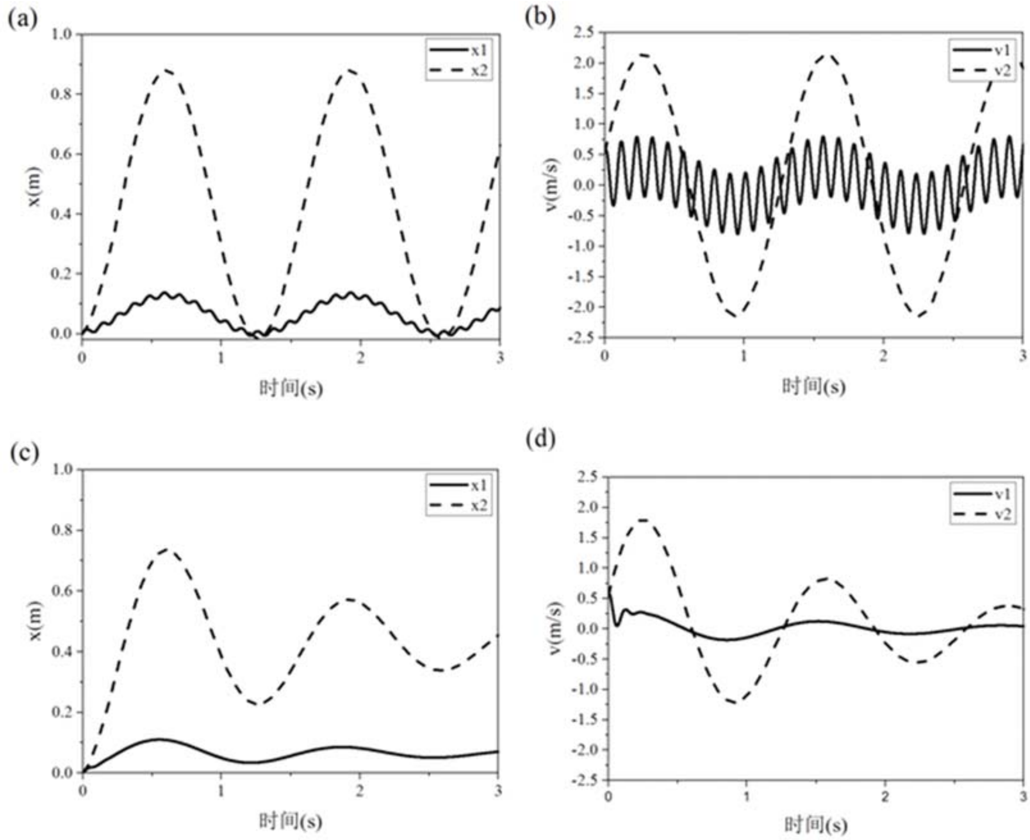


图 3　(a)无阻尼模型 x_1、x_2 随时间变化的曲线；(b)无阻尼模型 v_1、v_2 随时间变化的曲线；(c)含阻尼模型 x_1、x_2 随时间变化的曲线；(d)含阻尼模型 v_1、v_2 随时间变化的曲线

Fig. 3　(a)Curves of x_1 and x_2 with time in the simplified model without damping; (b)Curves of v_1 and v_2 with time in the simplified model without damping; (c) Curves of x_1 and x_2 with time in the simplified model with damping; (d)Curves of v_1 and v_2 with time in the simplified model with damping

由式(10)和式(11)计算可得，无阻尼模型中车轮对路面的最大冲击荷载为 163.71kN，含阻尼模型中车轮对路面的最大冲击荷载为 121.98kN。考虑 3 倍超载现象，即 3 倍簧上质量时，无阻尼模型中车轮对路面的最大冲击荷载为 457.13kN，含阻尼模型中车轮对地面最大冲击荷载为 385.33kN。

规范《GBT2977－2008 载重汽车轮胎规格、尺寸、气压与负荷》[22]规定了各类轮胎的负荷指数，文献[23]根据规范中轮胎行驶速度与负荷变化的关系，确定了各类货车轮胎接地时的横向宽度。其中，三轴和四轴大货车单个轮胎接地横向宽度为 0.3m，纵向宽度统一取 0.2m，则单个货车轮胎的接地面积为 0.06m^2。用 3 倍簧上质量模拟货车的超载现象，则无阻尼模型中路面承受的最大冲击压应力为 7.96MPa，含阻尼模型中路面承受的最大冲击压应力为 7.31MPa。

1.2　试验方案

按照特定程序制作直径 70mm、高度 35mm 的环氧树脂基混凝土圆柱体试件，胶石比（质量比）为 13％，如图 4 所示。采用北京康科瑞 NM-4A 非金属超声波检测分析仪(如图 5(a)所示)测量无损试件的弹性模量，并对无损试件进行 CT 扫描，扫描试验在广州中科恺盛医疗科技有限公司的 ZKKS-MCT-Sharp-I 显微 CT(如图 5(b)所示)上进行。为制作含不同初始损伤的试件，对无损试件进行准静态预压，压缩试验在济南试金集团有限公司生产的电液伺服万能试验机 WAW-500C(如图 5(c)所示)上进行，当加载到试件抗压强度的 85％后卸载，再次测量试件的弹性模量，如此进行多次循环加载，直至弹性模量衰减至某一特定值。在进行落锤冲击试验前，对含初始损伤试件再进行一次 CT 扫描，冲击试验在美国 INSTRON Dynatup 9250HV 落锤冲击试验机(如图 5(d)所示)上进行。根据前述简化模型的

计算结果,模拟货车超载时路面承受最大冲击压应力为 7.96MPa,则试件需承受的最大冲击荷载约为 30.61kN,图 6 为当落锤质量为 9.03kg 时最大冲击荷载与冲击速度的关系,当冲击速度为 2m/s 时环氧树脂基混凝土试件承受的最大冲击荷载在 30～40kN 之间。因此,落锤冲击试验选取落锤质量为 9.03kg,冲击速度为 2m/s。以此试验参数对试件进行多次落锤冲击,直至试件破坏,并在每次冲击结束后,测量试件的弹性模量。

图 4　环氧树脂基混凝土试件

Fig. 4　EPCspecimen

图 5　试验装置:(a) NM-4A 非金属超声波检测分析仪;(b) ZKKS-MCT-Sharp-I 扫描仪;(c) WAW-500C 万能试验机;(d) INSTRON Dynatup 9250HV 落锤冲击试验机

Fig. 5　Test device: (a)NM-4A nonmetal ultrasonic detector; (b)ZKKS-MCT-Sharp-I scanner; (c)WAW-500C testing machine; (d)INSTRON Dynatup 9250HV drop hammer impact testing machine

初始损伤用弹性模量的衰减定义:

$$D_0 = 1 - \frac{E_i}{E_0} \tag{12}$$

式中,D_0 为初始损伤;E_0 为无损试件的弹性模量;E_i 为准静态压缩后试件的弹性模量。本研究中制作了初始损伤分别为 0.314、0.373、0.528、0.581 的环氧树脂基混凝土试件。

2　试验结果与分析

2.1　含初始损伤试件内部裂缝的三维重构

每个试件在制作初始损伤前后都进行了 CT 扫描。以初始损伤为 0.528 的试件为例，初始试件 CT 扫描得到的截面如图 7(a)所示，准静态压缩循环加载至初始损伤后，试件的 CT 扫描截面如图 7(b)所示，可以比较清晰地看到裂缝的分布，大部分裂缝分布在靠近边缘的地方。参考文献[24]中的方法，将 CT 图像进行分区，如图 8(a)所示，再分别对图像进行阈值分割，如图 8(b)所示，最后将分区阈值分割后的图像合并，如图 8(c)所示，对比直接进行阈值分割的图 8(d)，这种环状分区阈值分割的方法可以避免大部分噪声对裂缝分析的影响。对 CT 图像阈值分割后，图中除背景外的黑色部分为试件的裂缝，同时图像中存在一些较小的裂缝与黑点，考虑到这应是空间某些裂缝在该截面的表现，在裂缝体积统计中亦计算在内。

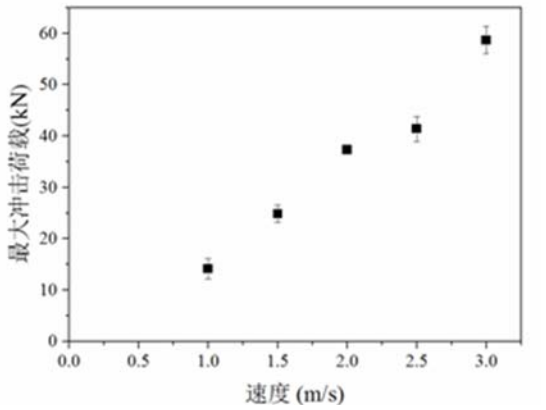


图 6　最大冲击荷载与冲击速度的关系

Fig. 6　Relationship between maximum impact load and impact velocity

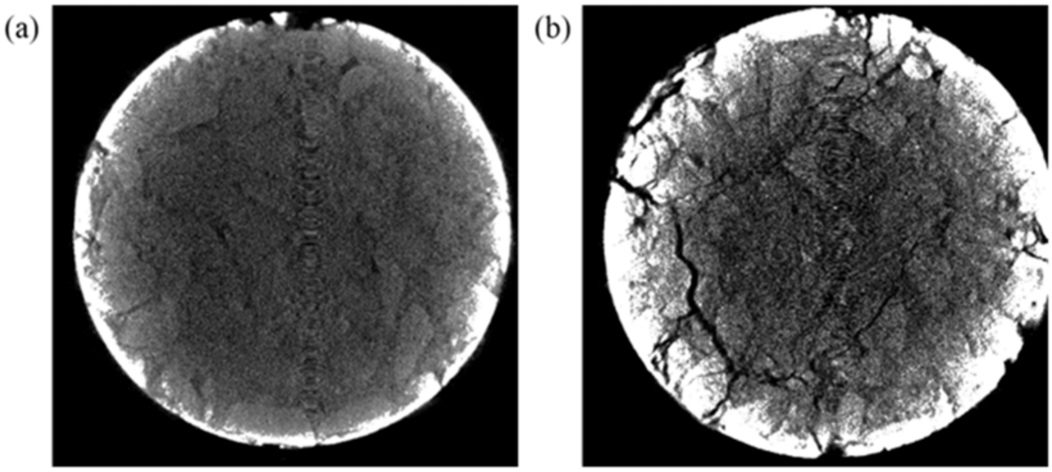


图 7　(a)制作初始损伤前试件的 CT 扫描截面图；(b)初始损伤 0.528 制作完成后试件的 CT 扫描截面图

Fig. 7　(a) The circular section of the CT scan before damage formation; (b) The circular section of the CT scan after the initial damage formation of 0.528

对环氧树脂基混凝土试件进行 Micro-CT 扫描，扫描分辨率为 20μm，每旋转 0.5°成像一次。扫描结束后经过 Mimics 软件重建，每隔 100μm 导出一张平行于加载面的 CT 图像，共得到 350～370 幅连续 CT 图像。对这些图像进行环状分区阈值分割，导入至 Avizo 软件，即可重构试件内部裂缝三维模型(图 9)，并计算出三维模型的像素值，统计出试件内部裂缝所占试件总体积的百分比。

图 10 显示了试件内部裂缝体积比与初始损伤之间的关系。可以看出，当损伤达到 0.5 以上时，裂缝的体积比急剧上升，说明损伤达到 0.5 以上时试件极容易破坏，内部的裂缝快速扩展增大，损伤加剧演化，导致试件的承载力急剧下降。

2.2　破坏形态与冲击损伤分析

在进行含初始损伤环氧树脂基混凝土试件的冲击试验前，首先对无损试件进行了多达 800 次的落锤冲击试验，发现试件完好无损，弹性模量也没有显著的衰减，证明了环氧树脂基混凝土耐冲击性能的优越性。而初始损伤为 0.314、0.373、0.528、0.581 的环氧树脂基混凝土试件在多次落锤冲击荷载作用下发生破坏，如图 11 所示。初始损伤为 0.314 的试件，在落锤冲击 84 次后断裂，质量损失 16.0%；

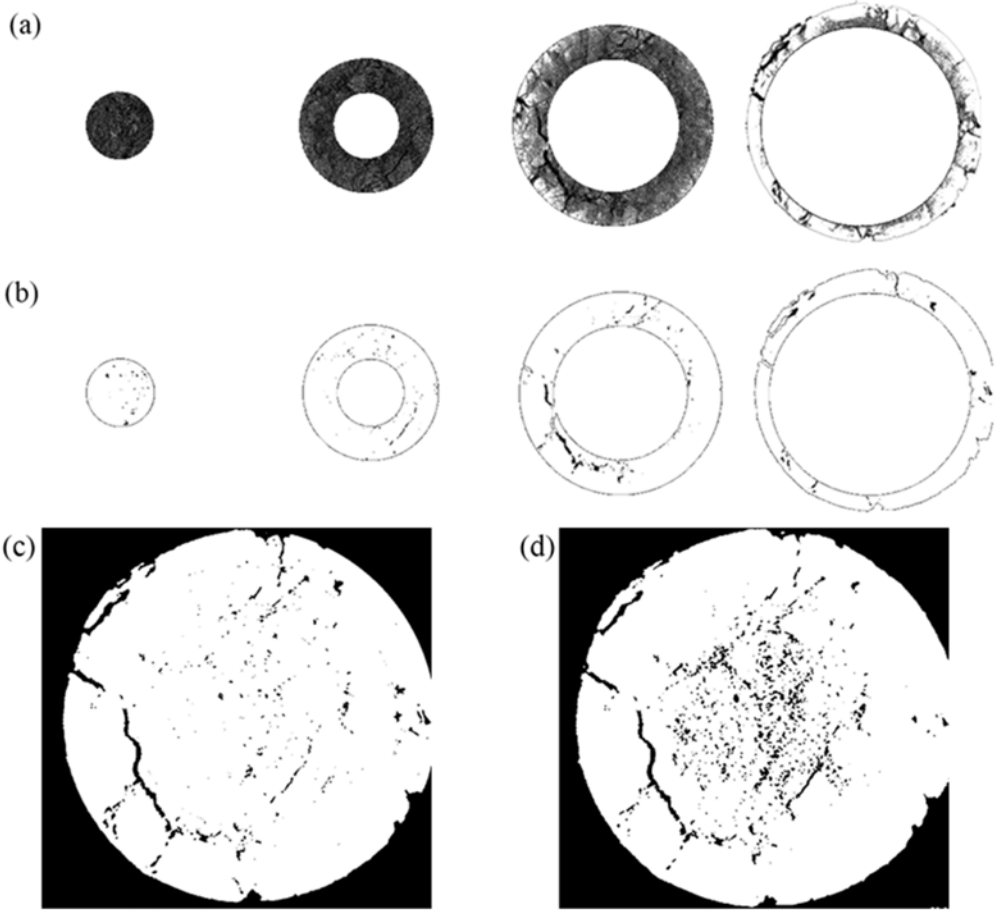


图 8　(a)将 CT 图像进行环状分区;(b)分别对分区的图像进行阈值分割;
(c)分区阈值分割后合并的图像;(d)直接阈值分割的 CT 图像

Fig. 8　(a)The CT image which is divided into circular regions; (b)The image which is segmented by thresholding;
(c)The merged image with segmented regions; (d)The CT image of the direct threshold segmentation

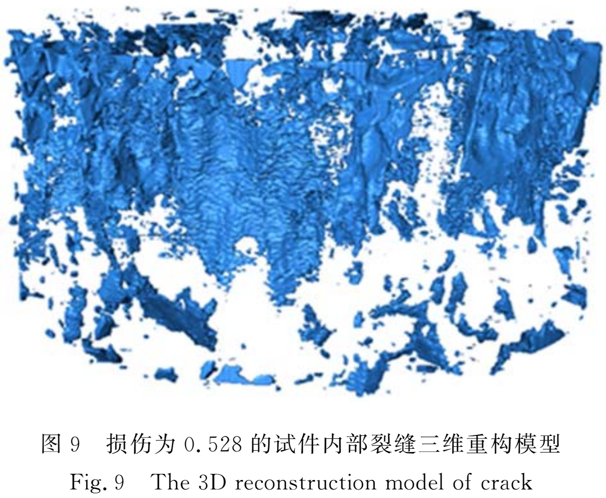


图 9　损伤为 0.528 的试件内部裂缝三维重构模型

Fig. 9　The 3D reconstruction model of crack
with the initial damage 0.528

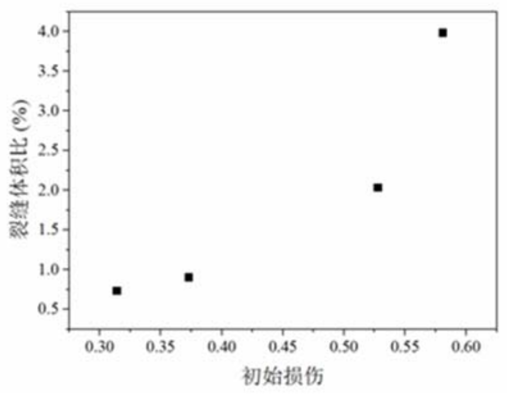


图 10　裂缝体积比—初始损伤关系图

Fig. 10　Relationship between damage
volume ratio andinitial crack

初始损伤为 0.373 的试件,在落锤冲击 68 次后碎裂,质量损失 15.6%;初始损伤 0.528 的试件在 10 次冲击后碎裂,质量损失 16.1%;初始损伤 0.581 的试件在 2 次冲击后碎裂,质量损失 26.9%。试件破坏主要体现在靠近边缘的部位剥落,而且随着初始损伤的增大,剥落的碎块增多,再次冲击时承载面积减

小，加剧了裂缝的扩展，加速了试件的破坏。图 12、图 13 分别为试件破坏时的冲击次数、最大冲击荷载与初始损伤的关系，从图中可以看出，随着初始损伤的增大，试件达到破坏时的冲击次数急剧减小，从初始损伤 0.314 时的 84 次减少为初始损伤 0.581 时的 2 次；在多次冲击加载中的最大冲击荷载也不断减小，从初始损伤 0.314 时的 38.41kN 减少为初始损伤 0.581 时的 21.53kN。

图 11　不同初始损伤试件在多次冲击荷载下的破坏形态

Fig. 11　Failure modes of specimens with different initial damage under repeated impact loading

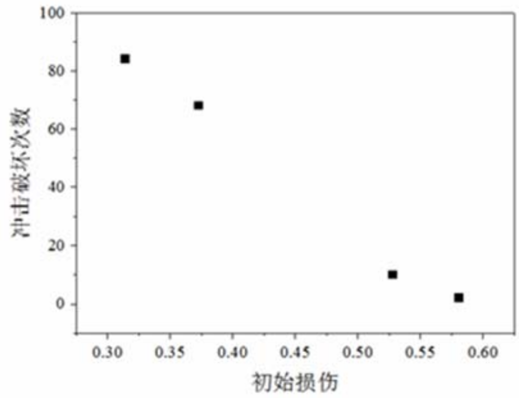


图 12　冲击破坏次数－初始损伤关系图

Fig. 12　Relationship between the number of impact failure and initial damage

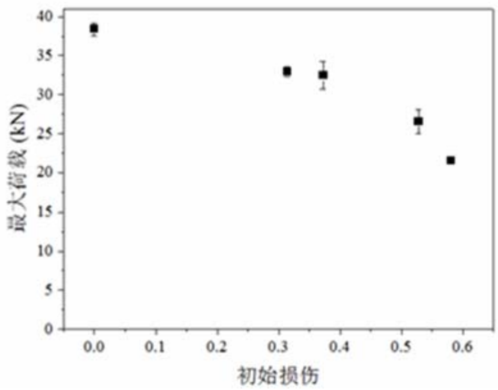
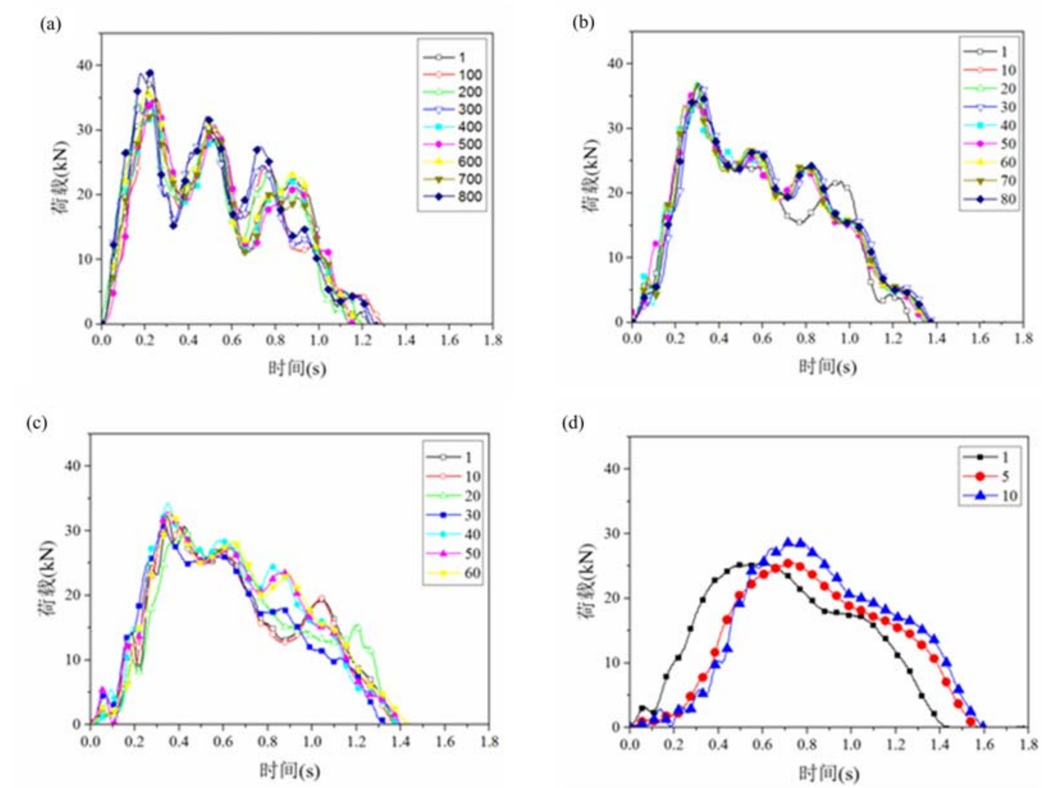


图 13　最大冲击荷载－初始损伤关系图

Fig. 13　Relationship between maximum impact load and initial damage

图 14 为无损试件和含初始损伤试件的冲击力时程曲线，图 14(a)所示为无损试件前 800 次落锤冲击的冲击力时程曲线，每完成 100 次冲击的冲击力时程曲线几乎重合，而且经过 800 次落锤冲击后试件表观上没有破损，弹性模量亦无明显的衰减，试件承受的最大冲击荷载稳定在 38～40kN。从图 14(b)到(e)可以看出，随着初始损伤的增大，试件内部的裂缝越多，冲击力时程曲线趋向于平缓，冲击过程完成的时间越长，最大冲击荷载越小，表现出一种“软化”的效应。

图 15 为不同初始损伤试件的损伤－冲击次数图，对于无损试件，即初始损伤为 0 时，在多次冲击下，试件几乎没有损伤，当试件内部存在初始损伤后，随着冲击次数的增加，试件的损伤不断增大，而且初始损伤越大，损伤的扩展越快，初始损伤为 0.581 和 0.528 的试件，在承受 2 次和 10 次冲击后就发生了破坏。



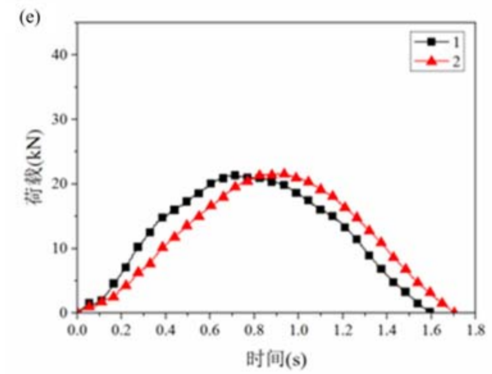


图 14　冲击力时程曲线:(a)无损试件;(b)初始损伤 0.314 的试件;(c)初始损伤 0.373 的试件;(d)初始损伤 0.528 的试件;(e)初始损伤 0.581 的试件

Fig. 14　Time history curve of impact force: (a)undamaged specimen; (b)specimen with initial damage 0.314; (c)specimen with initial damage 0.373; (d)specimen with initial damage 0.528; (e)specimen with initial damage 0.581

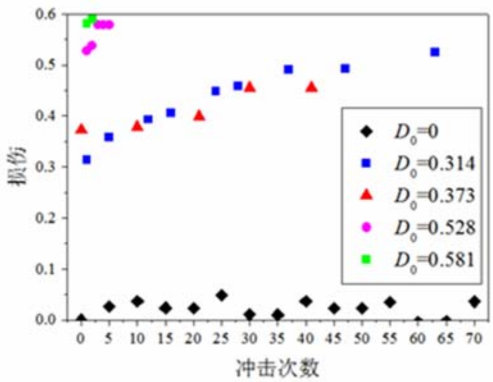


图 15　损伤－冲击次数关系图

Fig. 15　Relationship between damage and number of repeated impact

3　结论

(1) 货车“跳车”现象对路面造成的冲击荷载可用两自由度的1/4车辆简化模型进行模拟,计算结果可用于落锤冲击试验方案的设计,并且考虑阻尼与否对简化模型的计算结果有影响。

(2) 采用三维CT扫描及裂缝3D重构技术能有效地跟踪环氧树脂基混凝土内部裂缝的扩展,弹性模量的衰减可很好地反映试件内部的损伤,试件内部损伤与裂缝体积比之间存在着非线性的关系,损伤0.528的裂缝体积比是损伤0.373的2倍以上,损伤0.581的裂缝体积比大约是损伤0.528的2倍。

(3) 环氧树脂基混凝土在无损状态下能承受800次以上的落锤冲击而不出现任何破损,体现出材料良好的抗冲击性能。当初始损伤在0.3～0.4之间时,随着冲击次数的增加,损伤发展缓慢,试件依然能承受50次以上的冲击;当初始损伤在0.5以上时,试件只能承受10次以内的冲击加载。

(4) 对于环氧树脂基混凝土，其临界损伤约为 0.6，当试件内部损伤达到该临界值后，试件内部的裂缝体积比急剧增大，试件在冲击荷载下裂缝加剧扩展，材料发生破坏。

参考文献：

[1] Fowler D W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century[J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21: 449－452.

[2] Bedi R, Chandra R, Singh S P. Mechanical properties of polymer concrete[J]. Journal of Composites, 2013, 2013:1－12.

[3] Mani P, Gupta A K, Krishnamoorthy S. Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987, 7(3):157－163.

[4] Vipulanandan C, Dharmarajan N, Ching E. Mechanical behaviour of polymer concrete systems[J]. Materials and Structures, 1988, 21(4):268－277.

[5] Haidar M, Ghorbel E, Toutanji H. Optimization of the formulation of micro-polymer concretes[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4):1632－1644.

[6] Abdel-Fattah H, El-Hawary M M. Flexural behavior of polymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13:253－262.

[7] Barbuta M, Lepadatu D. Mechanical characteristics investigation of polymer concrete using mixture design of experiments and response surface method[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(12):2242－2249.

[8] Elalaoui O, Ghorbel E, Mignot V, et al. Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250°C[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):415－424.

[9] 金玉杰，肖力光. 环氧树脂混凝土现状与分析[J]. 吉林建筑工程学院学报，2009，26(4):9－13 (JIN Yujie, XIAO Liguang. Current research situation and analysis of epoxy resin concrete[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering, 2009, 26(4):9－13 (in Chinese))

[10] 金玉杰，肖力光. 环氧树脂混凝土研究现状及其应用[J]. 吉林建筑工程学院学报，2011，28(1):37－40 (JIN Yujie, XIAO Liguang. Current research situation and application of epoxy resin concrete[J]. Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering, 2011, 28(1):37－40 (in Chinese))

[11] 李宇峙，李家庆，李星星，等. 环氧树脂混凝土抗压强度和弹性模量的试验研究[J]. 公路，2007(9):168－172 (LI Yuzhi, LI Jiaqing, LI Xingxing, et al. Experimental study on compressive strength and elastic modulus of epoxy polymer concrete[J]. Highway, 2007(9):168－172 (in Chinese))

[12] 刘克非，李宇峙，彭兴旺. 环氧树脂混凝土温度收缩性能的试验研究[J]. 中外公路，2008，28(1):174－177 (LIU Kefei, LI Yuzhi, PENG Xingwang. Experimental study on temperature shrinkage of epoxy polymer concrete [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(1):174－177(in Chinese))

[13] Lei Y, Cao X. Preparation of epoxy-resin concrete using microwave curing method and its pavement performance evaluation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(8):1－7.

[14] 程经纬，汤立群，蒋震宇，等. 钢桥面铺装材料目标性能研究和环氧树脂基混凝土研制[J]. 公路，2016(10):18－23 (CHENG Jingwei, TANG Liqun, JIANG Zhenyu, et al. Study on the target performance of steel bridge deck pavement material and development of epoxy polymer concrete[J]. Highway, 2016(10): 18－23 (in Chinese))

[15] 张蒙. 基于 Micro-CT 骨分析软件的设计开发[D]. 西安电子科技大学，2012 (ZHANG Meng. Development of bone analysis software based on Micro-CT system[D]. Xinan University, 2012(in Chinese))

[16] 郭吉强. 锥束工业 CT 截断投影数据重建和轮廓特征重建算法研究[D]. 重庆大学，2011 (GUO Jiqiang. Investigation of truncated projection data and contour characteristicre construction algorithms of cone-beam industrial CT[D]. Chongqing University, 2011 (in Chinese))

[17] 田威，党发宁，陈厚群. 单轴压缩条件下混凝土细观损伤演化机理的 CT 试验研究[J]. 实验力学，2011，26(1): 54－60 (TIAN Wei, DANG Faning, CHEN Houqun. Experimental study of concrete meso-damage evolution mechanism based on uniaxial compression CT method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(1):54－60 (in Chinese))

[18] 田威，党发宁，梁昕宇，等. 混凝土单轴压缩下细观损伤特性的 CT 研究[J]. 实验力学，2009，24(3):184－190

(TIAN Wei, DANG Faning, LIANG Xinyu, et al. CT real-time observation of meso-damage process for concrete material under uniaxial compression[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(3):184—190 (in Chinese))

[19] 郝景宏，姜袁，梅世强，等. 基于X射线CT的混凝土内部裂纹识别研究[J]. 混凝土，2010(10)：44—47 (HAO Jinghong, JIANG Yuan, MEI Shiqiang, et al. Identification of crack in concrete based on X ray CT[J]. Concrete, 2010(10): 44—47 (in Chinese))

[20] 冯忠居，方贻立，龚坚城，等. 高等级公路桥头跳车的危害及其机理的分析[J]. 西安公路交通大学学报，1999, 19(4):33—35 (FENG Zhongju, FANG Yili, GONG Jiancheng, et al. Analysis of the harm and mechanism of bridge vehicle bumping of high-class highway[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1999, 19(4):33—35 (in Chinese))

[21] 周玉民，谈至明，田波. 车-路耦合作用力特性及混凝土路面动态响应[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2012, 40(6):854—860 (ZHOU Yumin, TAN Zhiming, TIAN Bo. Vehicle-road coupling force characteristics and dynamic responses of concrete pavements[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6):854—860 (in Chinese))

[22] GBT 2977—2008. 载重汽车论坛规格、尺寸、气压与负荷[S]，2008 (GB/T 2977—2008. Specifications, dimensions, air pressure and load of truck tyres[S], 2008 (in Chinese))

[23] 赵会雨. 轮载作用下液体橡胶基混凝土在钢桥面铺装中的受力特征及损伤分析[D]. 华南理工大学，2011 (ZHAO Huiyu. The stress properties and damage analysis of liquid rubber based concrete in deck pavement of steel bridge under wheel loading[D]. South China University of Technology, 2011(in Chinese))

[24] 李智，刘佳辉. 基于分区OTSU法的沥青混合料图像分割技术[J]. 武汉理工大学学报，2011(6)：50—53 (LI Zhi, LIU Jiawei. Segmentation of asphalt mixtures using X-ray computed tomography images based on ring block and OTSU method[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011(6):50—53 (in Chinese))

On the Crack Observation and Impact Damage Evolution of Epoxy Polymer Matrix Concrete Based on CT Scanning

ZHANG Nan-li[1], LIU Yi-ping[1], JIANG Zhen-yu[1],
SHI Meng-ze[2], MA Dong-peng[1], LIU Ze-jia[1], TANG Li-qun[1]

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;
2. Fuzhou Baisheng Fine Chemicals Co., Ltd, Fuzhou 350102, Fujian, China)

Abstract: Epoxy polymer matrix concrete is a new pavement material. In this paper, the impact load of freight car wheels on road surface due to "vehicle jumping" phenomenon was estimated during road use process. Based on calculation results, impact experiment of epoxy resin matrix concrete specimens with different initial damages was carried out based on drop hammer impact testing machine, to study its impact fatigue behavior. In order to accurately describe the initial damage of epoxy resin matrix concrete, stereo image of specimen was reconstructed by CT (Computerized tomography) scanning technique. The internal cracks were counted. Then, the relation between the percentage of initial damage cracks volume to whole specimen volume and the damage variables, which is based on the attenuation of material's elastic modulus, was established. By tracking the modulus of elasticity of specimens after a certain number of shocks, the impact damage variation mode of epoxy resin matrix concrete with different degrees of initial damage and subjected to certain impact times was analyzed. Combining the attenuation of elastic modulus of epoxy resin matrix concrete after multi times impact loading, the influence of initial damage on the damage evolution of epoxy resin matrix concrete during impact fatigue process was investigated.

Keywords: epoxy polymer matrix concrete; CT scan; drop hammer impact; crack detection; damage evolution