

基于 CT 图像的水泥稳定碎石环形分区损伤研究

吕悦晶¹, 魏彩霞¹, 张蕾², 汤文¹

(1. 武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065; 2. 交通运输部公路科学研究院)

摘要:借助工业 CT 对两种典型结构的水泥稳定碎石混合料损伤发展规律展开研究, 对其 CT 图像进行了环形分区分析, 建立基于 R_d 指标的损伤变量, 分析不同结构类型之间的损伤发展差异。研究表明:① 断面 R_d 值的变化与微裂纹的产生、扩展、贯通等演化过程相关;② 加载初期, N1 结构外环区损伤速率最小, N4 结构内环区损伤速率最小; N1 结构内环区和中环区在试件上部损伤程度更大, 外环区在试件下部损伤程度更大; N4 结构内环区和外环区在试件上部损伤程度更大, 中环区在试件下部损伤程度更大;③ 基于 R_d 指标建立的损伤度与荷载呈二次增大关系, 加载初期损伤较小, 后期损伤加速发展, 与水泥稳定碎石实际宏观损伤规律吻合较好。

关键词:水泥稳定碎石; 轴压; 损伤; 环形分区; CT 图像

水泥稳定碎石是中国使用广泛的高等级公路基层材料, 开裂是其典型破坏。材料的破坏是细观结构的演化和宏观裂缝发展的过程, 学者们认为通过对细观结构进行研究能发现力学性能劣化的机理。

随着科学技术的进步, CT 检测技术被用于材料细观结构损伤方面的研究, 目前对水泥稳定碎石的损伤多基于宏观尺度, 只有少量的文献通过图像技术研究其细观结构。赵中强用 CT 图像对水泥稳定碎石结构内部孔隙分布情况进行了研究; 毛灵涛采用 CT 图像观测水泥稳定碎石损伤过程中裂缝变化, 结果显示: 试件破坏时, 裂缝不仅在砂浆中沿骨料边缘扩展, 还会穿过骨料扩展, 裂缝扩展主方向与加载方向平行; 张蕾通过 CT 图像损伤像素数量来分析水泥稳定碎石损伤规律, 结论比较抽象, 而且只能得到裂纹有明显发展路径的骨架密实型结构水泥稳定碎石的损伤规律, 无法描述骨架空隙结构水泥稳定碎石的损伤规律; 李芬采用 CT 图像分形维数描述损伤, 但图像相差较大时, 分形维数变化很小, 容易造成误差; 易成将分形维数与测量尺度结合创建一个新参数 R_d 表征物体表面粗糙度; 朱红光采用分形 R_d 指标定义了损伤变量, 结果表明其定义的损伤度较好地符合轴压过程中准脆性材料损伤的发展演化规律。

为描述水泥稳定碎石混合料各区域损伤规律以及

不同结构类型之间的损伤发展差异, 该文对两种典型结构的水泥稳定碎石 CT 图像进行环形分区分析, 将试件断面分为内环区、中环区、外环区 3 个区域, 采用 R_d 指标表征损伤分布情况, 基于 R_d 指标建立损伤度, 分析水泥稳定碎石损伤变化规律。

1 室内试验

1.1 试件设计

集料采用石灰岩, 水泥选用 325[#] 普通硅酸盐水泥, 按照幂函数间断级配方法设计骨架空隙型水泥稳定碎石材料级配, 根据击实试验和抗压强度试验结果确定最佳含水量和水泥剂量, 其结果见表 1, N1 和 N4 分别为骨架空隙型结构和骨架密实型结构。根据级配参数采用静压成型的方法成型圆柱形试件, 尺寸为 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 在标准条件养生 7 d 后强度满足要求的条件下, 钻取 $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的芯样。

1.2 加载与 CT 扫描试验

为获得真实的试件损伤, 采用交通运输部公路科学研究院自主研发的工业 CT 扫描机同步加载试验装置, 实现逐级加载和扫描同步进行。加载方式为位移控制模式 (1 mm/min 加载速率), 达到设定荷载级位后, 保持变形对试件进行 CT 扫描后卸载。荷载级位

收稿日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (编号: 2016YFB0303103); 武汉科技大学智能信息处理与实时工业系统湖北省重点实验室开放基金青年项目 (编号: znxx2018QN02)

作者简介: 吕悦晶, 女, 博士, 副教授, E-mail: lvyuejing@126.com

表 1 级配组成

试件 编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											水泥剂 量/%	最佳含水 率/%
	26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075		
N1	100	81.0	63.8	50.9	30.0	20.7	14.4	10.3	7.3	5.4	4.0	7.0	5.2
N4	100	85.1	71.6	61.4	45.0	30.3	20.5	13.9	9.3	6.1	4.0	8.0	5.2

的选择以材料的单轴抗压强度为基础,N1 采用 20、40、60 kN,N4 采用 20、40、60、80 kN。每个断面图像大小为 1 024×1 024。此次试验加载—扫描关系示意图见图 1。

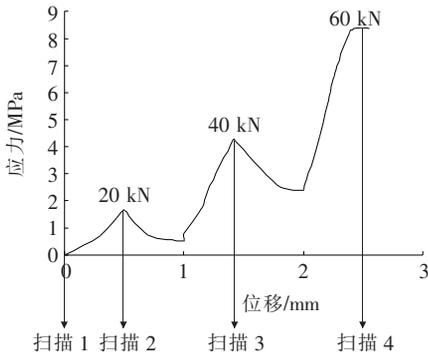


图 1 加载—扫描关系示意图

2 分维参数 R_d 与图像处理

2.1 R_d 指标

分形指物体具有的以非整数维形式充填空间的形态特征,具有分形特征的粗糙表面随着观察尺度的降低将不断呈现出新的粗糙细节,这种表面可以用一个无量纲的维数即分形维数表示。当测度 r (即观测尺度)小于某一临界值 r_0 ,分形维数达到稳定,测度的值很小,其测量出的细节对表面力学性能已没有显著的影响。当 r 大于 r_0 时,得到的相应分形维数会随 r 的取值而变化,为不稳定分形维数 D_n 。 R_d 指标是将不稳定分形维数 D_n 与相应的测度 r 结合起来考虑的新参数。其计算公式如下:

$$R_d = 10^k AB \tag{1}$$

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m] \tag{2}$$

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_m]^T \tag{3}$$

式中: $a_i = r_i/R$ (其中, R 为测量范围尺寸,即为断面外轮廓尺寸, r_i 为第 i 步测度); $b_i = \Delta D_{ni} = D_{ni} - D_T$ (其中, D_T 为测量图形的拓扑维数, D_{ni} 为用第 i 个测度 r_i 测量下计算得到的不稳定分形维数 D_n); 10^k 为放大系数, k 为大于 0 的正整数,该文中取 $k=2$ 。

在计算不稳定分形维数 D_n 时采用盒维数法,其

计算公式如下:

$$D_n = \frac{\lg(N/N_0)}{\lg(r/r_0)} \tag{4}$$

式中: r 为不断缩小的测度,该文中 r 取值为 512,256,128,⋯,1(pixel); r_0 为初始的测度; N 为测度 r 时对应的盒子个数; N_0 为测度 r_0 时对应的盒子数。

2.2 图像处理

为更准确地得到骨架空隙型水泥稳定碎石损伤发展规律,该文章将扫描的试件断面 CT 图像分为 3 个面积相等的区域,从试件中心向外延伸分别为内环区、中环区和外环区,如图 2 所示。

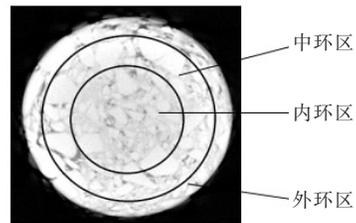


图 2 试件分区示意图

对分区后的图像进行预处理,运用 Matlab 读取处理后图像的灰度直方图,确定分割阈值,采用自定义阈值分割法将图像转化为二值图,整个过程如图 3 所示。根据式(1)~(4)求解分区二值图的 R_d 值。

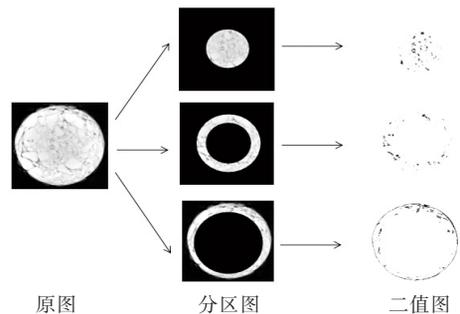


图 3 图像处理过程

3 结果分析

3.1 断面 R_d 变化规律

整个试件在每一个荷载级位下的断面 CT 图像共

有1 024张,编号从上至下为0~1 023。为获得试件不同位置损伤的发展规律,选取各层位中典型断面进行分析。为保证断面具有层位代表性,尽量选择靠近层位中间位置的断面,为均衡断面的物理位置,相邻层位的选取断面保证间距一致。若上层和下层选取的断面比较靠近中层,计算结果可能不能体现环形分区在

不同层位之间的差异。通过比较断面CT图像质量以及均衡断面的物理位置,该文选取第200断面代表试件扫描上层、第500断面代表试件扫描中层、第800断面代表试件扫描下层。 R_d 值计算结果见表2,表中1区、2区、3区分别指内环区、中环区、外环区,合计为整个断面图的 R_d 值,即3个区的 R_d 值的和。

表2 N1、N4各区域 R_d 计算结果

项目	扫描 次序	第200断面				第500断面				第800断面			
		1区	2区	3区	合计	1区	2区	3区	合计	1区	2区	3区	合计
N1	1	122.1	123.9	171.0	417.0	122.6	124.5	171.1	418.2	122.7	123.4	170.7	416.8
	2	121.7	122.2	170.6	414.5	122.9	124.7	171.0	418.6	122.6	123.1	170.4	416.1
	3	121.7	124.1	176.8	422.6	123.1	125.4	176.4	425.1	122.6	123.7	172.5	418.8
	4	122.0	123.8	171.6	417.4	123.0	124.9	172.5	420.4	122.7	124.1	171.5	418.3
N4	1	116.4	120.3	171.7	408.4	117.9	120.6	170.4	408.9	117.6	121.4	170.5	409.5
	2	115.6	120.9	171.1	407.6	118.2	120.5	171.0	409.7	117.7	120.0	171.2	408.9
	3	118.3	121.1	171.9	411.3	118.7	120.8	171.3	410.8	118.1	120.7	171.7	410.5
	4	116.3	122.8	172.4	411.4	119.2	120.9	172.0	412.1	118.5	121.5	171.1	411.1
	5	117.2	121.2	172.1	410.5	118.8	120.9	171.3	411.0	118.8	121.4	170.6	410.8

从表2可以看出:荷载从0增大到20 kN时,500断面 R_d 值有缓慢增长,说明在初始荷载作用下,试件中层薄弱的位置开始慢慢产生微小裂纹,而在200断面和800断面 R_d 值有减小,这是因为断面靠近约束端,荷载的压缩闭合作用强于微裂纹的扩展作用;荷载从20 kN到40 kN时,3个断面 R_d 值快速增加,说明随着荷载的进一步增加,材料内部微裂纹活动剧烈,微裂纹扩展并逐渐贯通;后期荷载继续增大,断面 R_d 值减少,这是因为材料已形成主裂纹,大部分位置微裂纹演化趋于停止,整体上微裂纹活动减缓。

3.2 断面分区损伤规律

由于损伤具有累积效应,采用后一步与相邻前一步加载图像的 R_d 值差值的方法,定义断面第 j 幅图像的损伤度为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^j [(R_d)_i - (R_d)_{i-1}]}{\sum_{i=1}^4 [(R_d)_i - (R_d)_{i-1}]} \quad (j=1,2,3,4) \quad (5)$$

式中:初始状态 $D=0$ 表示试件无损伤, $D=1$ 表示试件发生破坏。

3.2.1 N1分区损伤规律

根据计算公式求解N1断面各区损伤度,所得损伤度 D 随荷载变化折线图见图4。图中 $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ 分别表示1区、2区、3区的损伤度。图5显示:3个断面的损伤规律基本一致,即:在加载初期,内环区损伤较迅速,中环区次之,外环区损伤比较缓慢;荷载持续作用下,外环区损伤速率急速增大,直至发生破坏。

沿试件垂直方向,各区损伤度 D 随荷载变化折线

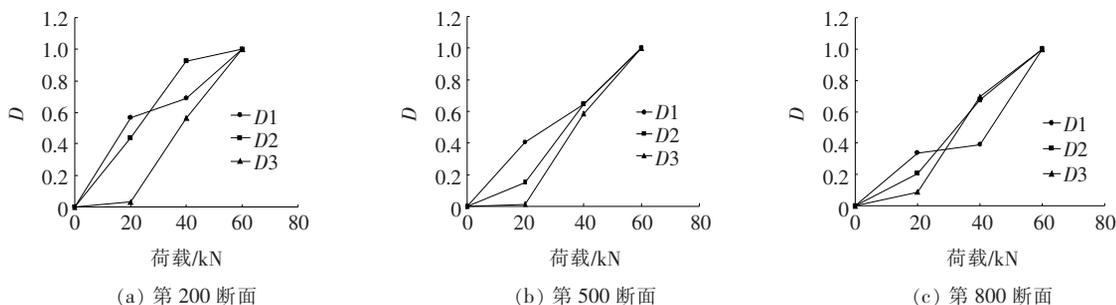


图4 N1断面损伤度变化规律

图如图 5 所示。图 5 显示:随着荷载作用,断面 200 的内环区和中环区的损伤程度高于其他断面,而断面 800 的外环区损伤程度高于其他断面。这说明:在荷载作用下,内环区和中环区在试件上部损伤程度更大,外环区在试件下部损伤程度更大。

3.2.2 N4 分区损伤规律

根据计算公式求解 N4 断面各区损伤度,所得损伤度 D 随荷载变化折线图如图 6 所示。图 6 显示:在

加载初期,内环区损伤发展最为缓慢,荷载持续作用下,内环区损伤速率持续增加,直至试件破坏。

沿试件垂直方向,各区损伤度 D 随荷载变化折线图如图 7 所示。图 7 显示:随着荷载作用,断面 200 的内环区和外环区的损伤程度高于其他断面,而断面 800 的中环区损伤程度高于其他断面。这说明:在荷载作用下,内环区和外环区在试件上部损伤程度更大,中环区在试件下部损伤程度更大。

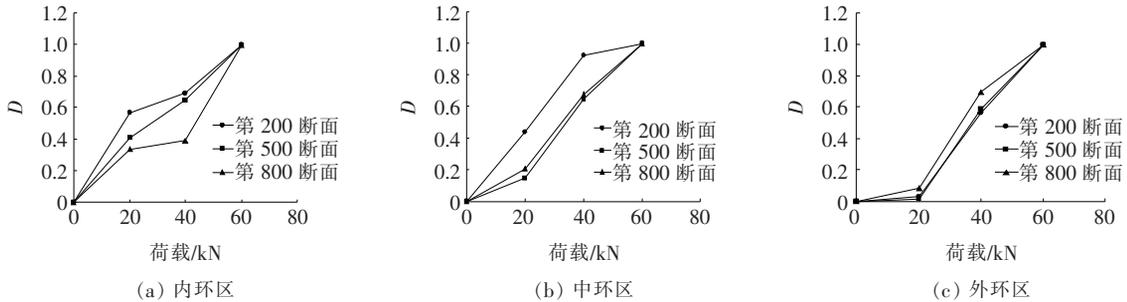


图 5 N1 区域损伤度变化规律

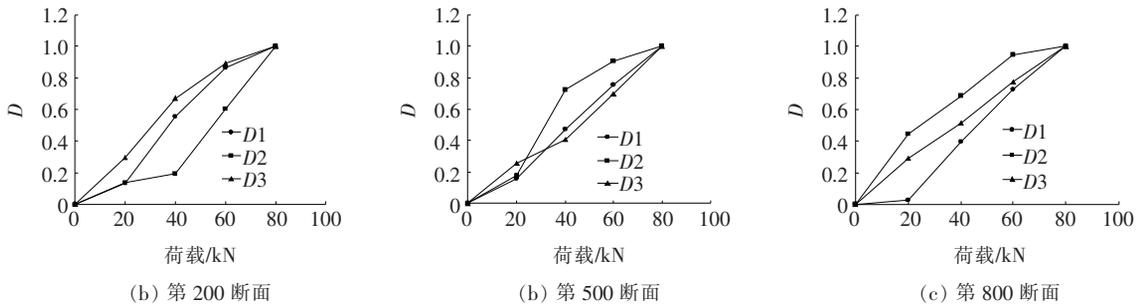


图 6 N4 断面损伤度变化规律

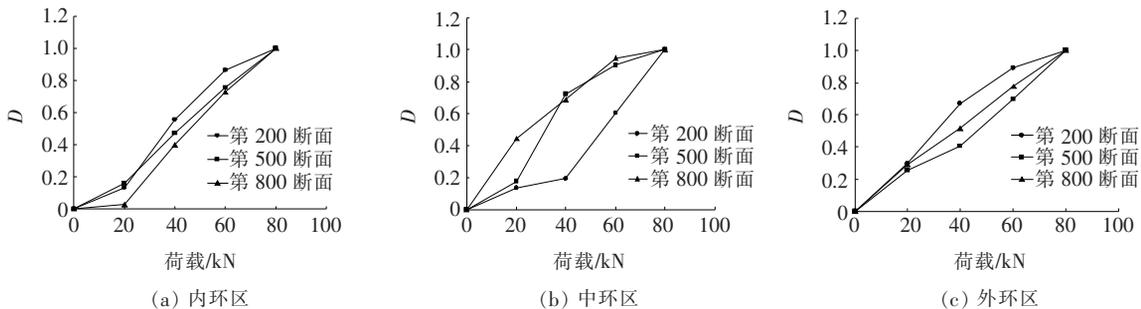


图 7 N4 区域损伤度变化规律

4 结论

该文通过 CT 扫描获取水泥稳定碎石材料在轴压荷载下细观结构变化特征,对水泥稳定碎石材料 CT 图像分区研究,基于 R_d 指标建立损伤度描述分区位

置的损伤规律,得到如下结论:

(1) 整个断面 R_d 值在加载初期有缓慢的变化(中部增加,两端因靠近约束而减小),加载中期,断面 R_d 值急速增大,加载后期,断面 R_d 值减小,这是微裂纹产生、发展、贯通形成主裂纹的演化过程导致的。

(2) 对断面而言,在加载初期,N1 结构外环区损

伤速率最小,N4结构内环区损伤速率最小。对试件而言,在荷载作用下,N1结构内环区和中环区在试件上部损伤程度更大,外环区在试件下部损伤程度更大;N4结构内环区和外环区在试件上部损伤程度更大,中环区在试件下部损伤程度更大。

(3) 基于 R_d 指标建立的损伤度与荷载呈二次增大关系,加载初期损伤较小,后期损伤加速发展,与水泥稳定碎石实际宏观损伤规律吻合较好。

参考文献:

- [1] 王利民,韩巍巍,陈婷,等. 准脆性材料损伤破坏的细宏观连接分析[J]. 固体力学学报,2015(36).
- [2] 白卫峰. 混凝土损伤机理及饱和混凝土力学性能研究[D]. 大连理工大学博士学位论文,2008.
- [3] 杜修力,金浏. 混凝土静态力学性能的细观力学方法评述[J]. 力学进展,2011(4).
- [4] Buyukozturk O. Imaging of Concrete Structures [J]. NDT8LEInternational,1998,31(4):233-243.
- [5] Shashidhar N. X-Ray Tomography of Asphalt Concrete [J]. Transportation Research Board,1999,13(2):123-128.
- [6] Kawakata H,Cho A,Kiyama T,et al. Three Dimensional Observations of Faulting Process in Westerly Granite Under Uniaxial and Triaxial Conditions by X-Ray CT Scan[J]. Tectonophysics,1999,313:293-305.
- [7] Masad E,Muhunthan B,Shashidhar N,et al. Quantifying Laboratory Compaction Effects on the Internal Structure of Asphalt Concrete[J]. Transportation Research Record,1999,1681:179-185.
- [8] 杨更社,谢定义,张长庆. 岩石损伤扩展力学特性的CT分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999(3).
- [9] Kose S,Guler M,Bahia H,et al. Distribution of Strains within Hot-Mix Asphalt Binders: Applying Imaging and Finite-Element Techniques[J]. Transportation Research Record:Journal of Transportation Research Board,2000,1728:21-27.
- [10] Lawer J S,Keane D,Shah SP. Measuring Three-Dimensional Damage in Concrete under Compression[J]. ACI Materials Journal,2001,98(6):465-475.
- [11] Stock S R,Naik N K,Wilkinson A P,et al. X-Ray Microtomography(MicroCT) of the Progression of Sulfate Attack of Cement Paste[J]. Cement and Concrete Research,2002,32(10):1673-1675.
- [12] Masad E,Tashman L,Somedavan N,et al. Micromechanics-Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2002,14(5):374-383.
- [13] Wang L B,Frost J D,Mohammad L,et al. Three-Dimensional Aggregate Evaluation Using X-Ray Tomography Imaging [C]. Transportation Research Board, Washington,D. C.,2002.
- [14] CHOTARD T J,BONCOEUR MARTEL M P,SMITH A, et al. Application of X-Ray Computed Tomography to Characterise the Early Hydration of Calcium Aluminate Cement[J]. Cement & Concrete Composites,2003,25(1):145-152.
- [15] Masad E,Button J. Implications of Experimental Measurements and Analyses of the Internal Structure of Hot-Mix Asphalt [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2004,1891:210-220.
- [16] 孙雅珍,李凯翔,丁传超,等. 稳定碎石土底基层材料力学参数试验研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [17] 高磊,贾致荣,袁中玉,等. 水泥稳定碎石铣刨粗集料路用性能评价[J]. 中外公路,2019(5).
- [18] 任建喜,惠兴田. 裂隙岩石单轴压缩损伤扩展细观机理CT分析初探[J]. 岩土力学,2005(增刊).
- [19] 赵中强. 不同试件成型方法的水泥稳定碎石混合料宏观微观结构性能[J]. 施工技术,2018(23).
- [20] 毛灵涛,李磊,连秀云,等. 路面底基层材料单轴加载细观破裂过程的ICT观测[J]. 公路,2014(1).
- [21] 张蕾,惠新,陈龙,等. 基于图像技术的水泥稳定级配碎石加载损伤特征研究[J]. 公路交通科技,2017(6).
- [22] 李芬,李之达,龚军安. 基于CT图像分维估算的沥青混凝土损伤演化研究[J]. 湘潭大学学报,2006(2).
- [23] 易成,张亮,陈忠辉,等. 一种新的描述粗糙表面形貌尺度分维参数 R_d 的研究[J]. 中国矿业大学学报,2007(1).
- [24] 朱红光,易成,单海霞,等. 基于CT图像分析的准脆性材料轴压损伤研究[J]. 中国矿业大学学报,2011(5).
- [25] 王金安,谢和平. 剪切过程中岩石节理粗糙度分形演化及力学特征[J]. 岩土工程学报,1997(4).
- [26] 周宏伟,谢和平,Kwasniewski M A. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学报,2000(6).