

轴压下掺铁尾矿砂和水泥的生土材料 细观损伤演化研究*

张坤^{1,2}, 杨文豪³, 吕雪瑞², 付智勇³, 芦白茹⁴, 杨战社¹

(1. 西安石油大学 土木工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 博士后创新基地/基建处, 陕西 西安 710065;
3. 西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 西安欧亚学院 人居环境学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究铁尾矿砂改性生土基材料在轴压下的损伤演化性能, 采用CT技术, 对不同应力状态下材料内部二值化图像进行分析. 通过阈值分割, 从细观上数值化各应力状态断面图像. 研究材料分形维数、孔隙率和应力-应变(ϵ - σ)曲线演化规律, 并阐明材料从受荷直至破坏的细观机理. 结果表明: 分形维数随受荷增大显著增加, $\sigma=2.38$ MPa时, 分形维数最大. 分形维数的变化趋势可间接表征试件受压时各扫描断面的不规则程度、粗糙度、裂缝与孔隙的发展情况. 材料孔隙率随应力增大明显增加. 以孔隙率为指标的材料损伤因子变化趋势与孔隙率变化规律相同, 可有效反映材料在轴压下的破坏发展规律, 也可作为研究改性生土试件损伤演化的定量参数.

关键词: 计算机断层扫描(CT)技术; 改性生土材料; 分形维数; 孔隙率; 损伤因子

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2024.04.02.0003

中图分类号: TU411.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2024)04-0488-09

引文格式: 张坤, 杨文豪, 吕雪瑞, 付智勇, 芦白茹, 杨战社. 轴压下掺铁尾矿砂和水泥的生土材料细观损伤演化研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2024, 41(4): 488-496.

英文引文格式: ZHANG Kun, YANG Wenhao, LYU Xuerui, FU Zhiyong, LU Bairu, YANG Zhanshe. Study on dynamic mesoscopic damage evolution of raw soil materials mixed with iron tailings sand and cement under axial compression[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2024, 41(4): 488-496.

Study on Dynamic Mesoscopic Damage Evolution of Raw Soil Materials Mixed with Iron Tailings Sand and Cement under Axial Compression

ZHANG Kun^{1,2}, YANG Wenhao³, LYU Xuerui², FU Zhiyong³, LU Bairu⁴, YANG Zhanshe¹

(1. Civil Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 2. Postdoctoral Innovation Base/Construction of Infrastructure Department, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China;
3. Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 4. Human Settlements Civil Engineering College, Xi'an Eurasia University, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: To study the damage evolution performance of iron tailings-modified rammed earth-based materials under dynamic loading, CT technology was used to analyze binary images of the material's interior under different stress states. Cross-sectional images were digitized by threshold segmentation at a microscopic level in each stress state. This research focused on the fractal dimension, porosity, and ϵ - σ curve evolution of the material, elucidating the microscopic mechanisms of materials from loading to failure. The results indicated that the fractal dimension increased significantly with increasing strength of material, reaching its maximum at $\sigma=2.38$ MPa. The irregularity,

* 收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金“纤维增强生土互锁砌块墙体抗震/保温性能一体化提升机理”(52308204); 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目“构型力学理论对生土基材料受力损伤机理研究”(2022JQ-562); 西安市科技计划项目“装配式自嵌固生态组合产业化农房建筑设计理论及应用研究”(2022JHRYFW-0125); 西安石油大学研究生创新与实践项目“轴压下掺铁尾矿砂和水泥的生土材料细观损伤演化研究”(YCS23214279).

作者简介: 张坤(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事混凝土和生土结构基本理论及其应用的研究, E-mail: 491543584@qq.com.

roughness, and development of cracks and pores in the scanned cross-sections during compression could be characterized by the changing trend of the fractal dimension indirectly. The porosity of the composite increased noticeably as the material undergoes failure and stress increases. The change trend of the material damage factor with porosity as index had same rules of the change of porosity, effectively reflecting the development of damage under axial compression and serving as a quantitative parameter for studying the damage evolution of modified rammed earth specimens.

Key words: computed tomography (CT) technique; modified raw soil material; fractal dimension; porosity; damage factor

0 引言

生土材料是指以生土为主要材料的建筑材料,该材料具有很好的保温、隔热、低耗能、绿色环保等特性.传统生土材料存在强度低、耐久性差等缺陷.因此,在保留传统生土材料优点的同时应对其进行改性^[1-2],从而改善生土材料的力学性能.现今,生土改性研究成果丰富,多集中在传统建材和土壤固化方面,但传统建材需要消耗大量土地资源.随着矿石资源的日益贫乏,铁尾矿砂成为了绿色环保的建筑材料,可作为二次资源再次利用.若将铁尾矿砂掺入传统生土材料中,不仅可以优化其力学性能,同时解决了铁尾矿砂利用率低、大面积堆积造成污染的问题,变废为宝^[3-4].然而,材料细观结构是宏观力学性能的重要影响因素,材料孔隙可以有效反映其结构特性.针对掺入铁尾矿砂和水泥的改性生土材料而言,材料内孔隙均匀分布,表现出较好的力学性能,但同时表现出孔隙的非均质性和复杂的几何分布^[5].

近年来,分形理论和孔隙理论是研究材料在轴压下细观损伤和内部形态变化的有效方法.数学家Hausdorff于1919年提出了分形维数的概念^[6-7],但直到1975年,数学家Mandelbrot才陆续提出了分形几何的完整概念^[8],之后分形理论被大量应用在材料细观结构以及损伤演化规律的研究中^[9-10].分形理论与CT技术结合,可以探究材料不同层次下的细观孔隙分布和孔径大小的变化^[11-12].Arasan等^[13]研究了分形维数与沥青混凝土力学性能之间的关系.随着集料分形维数的增加,沥青混凝土的流动性降低,马歇尔稳定度增加,表明分形理论可以描述聚集体的形状.田威等^[14-15]利用CT图像处理技术对试件微观条件下内部破坏扩展进行研究,得到了分形维数与试件内部破坏发展之间的关系,提出可将细观结构分形维数作为研究混凝土细观裂纹扩展的定量参数.魏佳妮^[16]采用铁尾矿砂代替砂石的生土材料进行改性研究,通过CT扫描试验从细观损伤的角度,揭示了改性生土材料受压全过程损伤破坏机理;引入损伤因子,建立了损伤与CT的关系,将损伤进行量化处理.

综上所述,国内外利用CT技术开展试验多集中在矿石和混凝土等材料,掺入铁尾矿砂的生土改性材料孔隙的变化过程及孔隙本身的不规则性有待研究.本文选取掺入铁尾矿砂和水泥的最优改性生土试件为研究对象,进行改性生土试件轴压下CT扫描试验.分别将试件分为XY断面和YZ断面,每组5个扫描断面.从应力的4个阶段得到不同载荷下的CT扫描断面图,基于Image J软件,采用最佳阈值分割计算出不同载荷下XY及YZ断面的分形维数和孔隙率,研究分形维数和孔隙率随试件内部损伤的变化规律.从细观层面分析材料受载荷后的内部损伤情况,揭示改性生土试件损伤因子与应力之间的变化关系,为材料力学性能和本构关系的研究提供参考.

1 CT试验原理与方案

1.1 CT试验原理及装置

CT (Computed Tomography),即电子计算机断层扫描.其利用精确准直的X线束、 γ 射线、超声波等,采用灵敏度极高的探测器一同围绕物体的某一部位进行断面扫描,具有扫描时间短、图像清晰等特点.原理是由射线发射器发出射线、穿透材料,并收集射线衰减后的信息,通过信号数据成像原理,最终输出CT图像^[17].试验设备为西安市儿童医院飞利浦牌医用螺旋CT (MX16),试验参数设置:扫描切层厚度为0.6 mm,空间分辨率大于等于1 200×1 600,检测层有效厚度为100 mm, X-射线管最大电压为120 kV.

通过轴压试验,选取最优改性生土配方试件,记为TS-2.试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体,放入有机玻璃盒中.CT扫描装置及加载装置如图1所示.加载至预定载荷时,固定有机玻璃盖板,进行CT扫描,共包括4级载荷(1.07 MPa、6.13 MPa、7.94 MPa、2.38 MPa),通过抗压试验 ε - σ 曲线统计计算可得材料经受力直至破坏的全过程损伤情况,见1.2节.试件加载板上放置压力传感器,达到预定载荷后停止加载,使试件保持受力状态,再进行CT扫描.不同阶段载荷状况下重复本操作,得到扫描断面图,为试件计算分形维数和孔隙率提供基础图像数据.

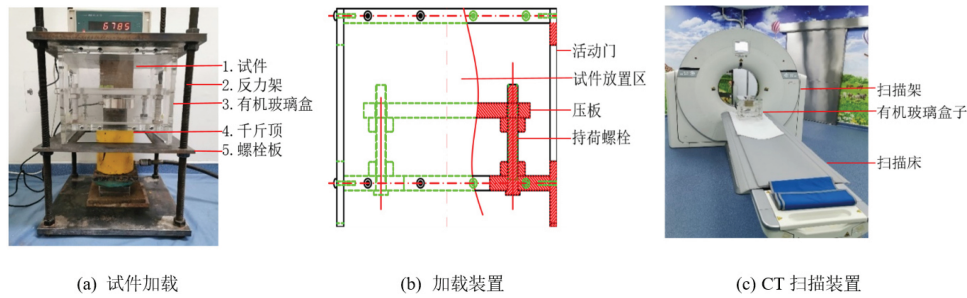


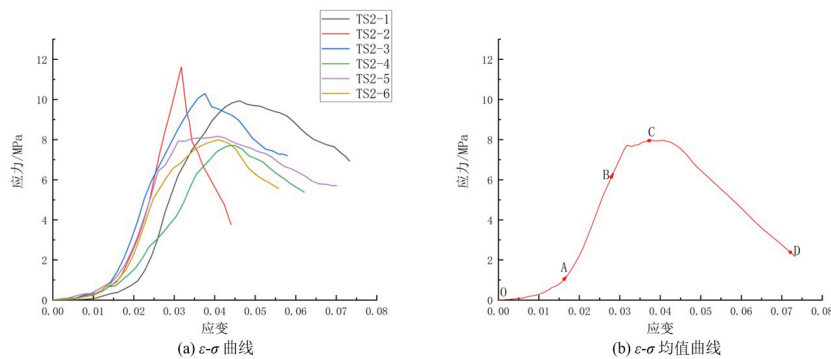
图 1 轴压下CT扫描试验

1.2 CT扫描试验载荷的确定

TS试件共有3种掺料,分别为铁尾矿砂、水泥、生土,由文献[16-18]可知,其掺量占比分别为10%、25%、65%的TS-2组试件抗压强度、离散性最好,故选用TS-2组6个试件进行CT扫描试验.

通过轴压试验得到 ε - σ 曲线如图2(a)所示,拟合 ε - σ 均值曲线如图2(b)所示.分析图2(a),加载至峰值载荷前,随着试件载荷逐渐增加,各组试件应力随应变的增大而增大;峰值载荷后,随着试件载荷逐渐增加,各组试件应力随应变的增大而减小. ε - σ 均值曲线分为4个阶段,如图2(b)所示, OA 段为试件弹性压缩阶段, AB 段近似弹性变形阶段, BC 段为试件的弹塑性变形阶段, CD 段为试件的完全破坏阶段.结合抗压试验过程和数据分析,曲线A点为 OB 段的拐点,试件在 OA 段应力状态下发生弹性变形. B 点为 AC 段的拐点,试件在 AC 段应力状态下开始产生塑性变形. C 点为 BD 段的拐点,是轴压试验中试件所受应力的峰值点, BC 段应力状态下抵抗塑性变形的能力重新提高,变形发展速度较快. D 点为试件完全破坏应力状态下的点, CD 段应力状态下试件产生缩颈现象直至完全丧失承载能力.

综上所述,选用 O 、 A 、 B 、 C 及 D 点为CT扫描载荷,通过 ε - σ 均值曲线得到各级扫描载荷, A 点为1.07 MPa、 B 点为6.13 MPa、 C 点为7.94 MPa、 D 点为2.38 MPa.

图 2 ε - σ 曲线及均值曲线

1.3 CT扫描断面的划分

为研究试件加载过程中材料内部的损伤演化规律,设计试件扫描断面为 XY 断面和 YZ 断面,如图3、图4所示.沿 Z 轴方向距原点90 mm处作为第一个 XY 扫描断面,记为 XY -1,每间隔20 mm取一个 XY 断面,分别记为 XY -2、 XY -3、 XY -4和 XY -5.沿 X 轴方向距原点10 mm处作为第一个 YZ 扫描断面,记为 YZ -1,每间隔20 mm取下一断面,分别记为 YZ -2、 YZ -3、 YZ -4和 YZ -5.

2 轴压下试件分形分析

2.1 分形理论

分形维数与扫描断面粗糙度变化有关,分形维数越高则扫描断面细节越丰富,用此理论也可研究掺入铁尾矿砂和水泥的改性生土试件的损伤演化过程^[19].计算分形维数的主要方法包括盒维数法、双毯(peleg-blanket)覆盖法、Pentland分数布朗随机场模型法(FBR)和差分盒维数法.考虑改性生土试件的构成规则复杂,所以本文采用盒维数来表征试件内部的损伤情况和复杂性,将不同步长立方体网格覆盖试件孔隙结构空间,估算孔隙结构分形维数.设 $F \subset \mathbf{R}^n$ 是一个非空有界集合, $N_\delta(F)$ 表示以边长为 δ 小立方体覆盖集合 F 时所需盒子的最小数

目,计算公式为:

$$D = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\ln(Nr)}{\ln(r)} \quad (1)$$

式中: r 为正方形盒子的大小, Nr 为将试件内部孔隙、裂缝全部覆盖所需盒子的总数.针对试件的CT扫描图像设像素点为 $f(x,y)$,通过Image J软件在 $f(x,y)$ 中找到特征值 T 将图像分割为两个部分,分割后的图像若取 $b_0=0$ 为黑色、取 $b_1=1$ 为白色.

2.2 改性生土试件XY扫描断面分形分析

不同应力状态下,对XY-1~XY-5断面进行阈值分割,如图3所示.白色部分为骨料,黑色部分为裂缝、孔隙、孔洞. $\sigma=1.07$ MPa时,试件边部裂缝不明显,故用红色填充突出显示,此应力下由于试件受压,出现各类孔隙和细小裂缝.其中XY-1、XY-2、XY-5可见部分小孔隙均匀分布于试件内部,试件边部可见大量微小孔隙.XY-3、XY-4中大量孔隙聚集并贯通. $\sigma=6.13$ MPa时,试件因受荷增大,XY-1、XY-2、XY-3中孔隙连通产生细小裂缝,伴随边缘有部分土块剥落.XY-4、XY-5仍有部分孔隙连通形成裂缝. $\sigma=7.94$ MPa时,达到峰值应力,受荷急剧增大,XY断面均呈现裂缝开始贯通且宽度增大的现象,试件角部有部分脱落.试件内部发生挤密作用,部分黑色区域变为白色. $\sigma=2.38$ MPa时,试件已完全破坏,XY-1、XY-2、XY-3裂缝产生部位土块大量剥落,裂缝宽度增加到最大.因XY-4、XY-5处于试件底部,剥落部分被上层剥落土块覆盖,故比上一应力状态扫描断面略微完整.通过以上分析,试件受荷时,XY-3与XY-4破坏程度小于XY-1与XY-5,可得XY断面破坏过程是由外向内的,由于制作过程中试件受压,材料成型后突然卸力,卸荷后试件表面比内部密实度低,导致试件受力过程中XY断面外部破坏程度明显.

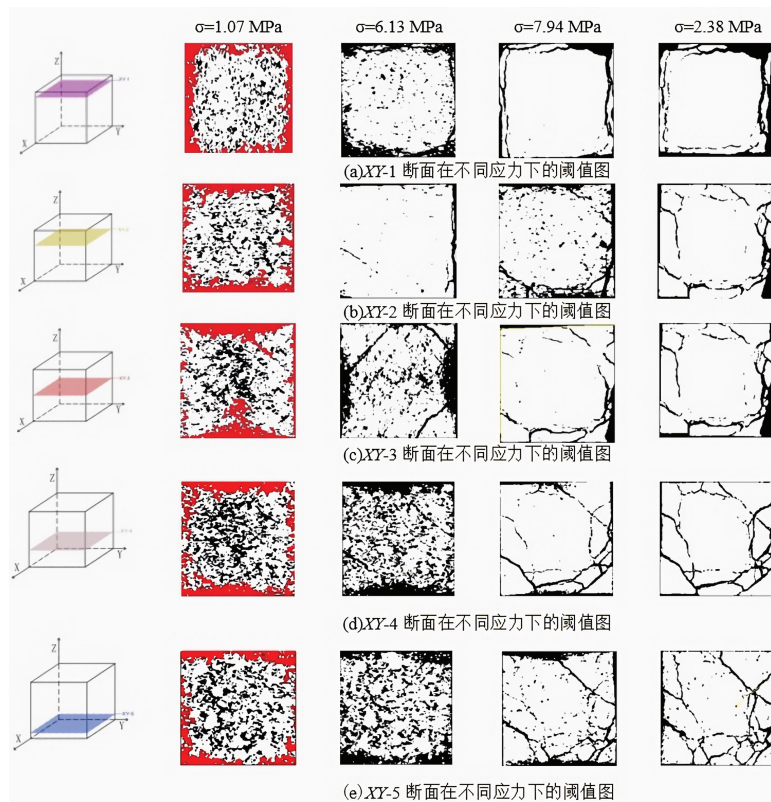


图3 XY断面阈值划分结果

各应力状态下XY断面分形维数如表1所示,各个断面分形维数整体趋势随应力增大而增大.以XY-1断面为例, $\sigma=1.07$ MPa时,分形维数为1.857.试件受力小,内部多孔隙结构,并未因受压产生裂缝,试件无明显损坏,分形维数最小. $\sigma=6.13$ MPa时,分形维数为1.893,比 $\sigma=1.07$ MPa增长了1.9%,试件内部因受力增加萌生大量细小裂缝,发生明显形变,分形维数出现明显增长. $\sigma=7.94$ MPa时,达到峰值应力,分形维数为1.936,比 $\sigma=6.13$ MPa增长了2.3%,受荷急剧增大,裂缝发育迅速,破碎程度剧烈加深,分形维数跳动剧烈. $\sigma=2.38$ MPa时,分形维数为1.942,比 $\sigma=7.94$ MPa增长了0.3%.通过对试件XY断面受压的分形维数全过程分析,表明

试件在 $\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa时破坏程度最大,随后 $\sigma=7.94\sim 2.38$ MPa时,受破坏程度小,试件因受荷仍表现出继续破坏的现象.综上所述,将CT图像处理为阈值图后,其破坏过程与分形维数呈正相关,说明试件阈值图的破坏程度可以有效表征分形维数的大小,分形维数的增长同样可以表明阈值图的破坏程度.

表 1 不同应力状态下XY断面分形维数

应力/MPa	扫描断面编号				
	XY-1	XY-2	XY-3	XY-4	XY-5
1.07	1.857	1.828	1.861	1.839	1.836
6.13	1.893	1.895	1.886	1.899	1.870
7.94	1.936	1.915	1.948	1.940	1.918
2.38	1.942	1.930	1.950	1.951	1.936

对不同应力状态下同一XY断面分形维数进行分析,表征试件整体损伤状态.应力水平小时($\sigma=1.07\sim 6.13$ MPa),因试件提前预压卸力后重新加载至 $\sigma=6.13$ MPa,所以XY-4、XY-5孔洞、裂缝发育缓慢,扫描断面粗糙度小.XY-1~XY-3三者破坏稍大,出现细小裂缝.应力水平大时($\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa),试件快速破坏,大量孔洞、裂缝的产生导致粗糙度变大,试件中部土块大量剥落.试件受荷从峰值应力至完全破坏时($\sigma=7.94\sim 2.38$ MPa),因上一阶段试件已接近完全破坏,所以直到 $\sigma=2.38$ MPa时,孔洞、裂缝发育速度最小.

对相同应力状态下不同XY断面分形维数进行分析,应力水平小时($\sigma=1.07\sim 6.13$ MPa),XY-2与XY-3的受破坏程度大于XY-1,因为XY-2与XY-3没有直接与压板接触,所以横向膨胀时未受压板的摩擦力约束,故受损较大.XY-1与XY-5均与压板接触,导致受荷后产生的裂缝、孔隙少,低于试件其它断面.中间部分受力大,土块剥落. $\sigma=1.07$ MPa时,XY-3断面的分形维数最大,表明此情况下试件中部的孔隙大于其它断面. $\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa时,试件中部土块大量剥落,所以XY-3在此阶段分形维数最大.各扫描断面在不同应力阶段下,孔隙、裂缝的空间分布复杂度同样影响分形维数的变化趋势.

综上所述,试件在XY断面破坏过程中分形维数受到多种因素影响,试件整体呈增维的趋势,所以在破坏过程中XY断面显示出良好的自似性,满足分形特性、符合分形方程,且分形维数可以定量表征试件加压过程中的损伤状态,说明分形维数可以用来表示试件的不规则程度、粗糙度大小、破坏产生的裂缝、孔隙的发育程度和空间分布复杂度.

2.3 改性生土试件YZ扫描断面分形分析

不同应力状态下,对YZ-1~YZ-5断面进行阈值分割,由图4可知,试件在试验过程中内部裂缝、孔隙的变化情况. $\sigma=1.07$ MPa时,YZ-1与YZ-5内部细小孔隙及裂缝较少,破坏程度以YZ-3为轴面基本对称. $\sigma=6.13$ MPa时,YZ断面孔隙均发生挤密作用,孔隙减少. $\sigma=7.94$ MPa时,达到峰值应力,受荷急剧增大,YZ-1~YZ-5主裂缝相继出现,试件少部分剥落,其中YZ-1与YZ-5处于最外层,较其它断面多出1条横向裂缝,受破坏程度最大. $\sigma=2.38$ MPa时,YZ-1裂缝及孔洞半径增大,角部有部分脱落,但其余断面裂缝及孔洞均有减少.由此可知,试件YZ断面与XY断面受载后破坏程度发展趋势基本相同,但破坏方向与XY断面不同.原因是试件受力方向与YZ断面平行,处于近似两头受压的状态,使应力汇聚在扫描断面中心.其次,试件表面比里层密度差,破坏首先发生在试件边缘的中部,随后裂缝逐渐延伸.

各应力状态下YZ断面分形维数如表2所示,峰值载荷前,各断面分形维数随应力增大而增大,与XY断面相同.表明试件受破坏程度越大,无论XY断面或YZ断面,分形维数都呈增维趋势.以YZ-1为例, $\sigma=1.07$ MPa时,分形维数为1.866,受破坏程度小,分形维数最小. $\sigma=6.13$ MPa时,分形维数为1.886,比 $\sigma=1.07$ MPa增长了1.1%. $\sigma=7.94$ MPa时,分形维数为1.918,比 $\sigma=6.13$ MPa增长了1.7%. $\sigma=2.38$ MPa时,分形维数为1.926,比 $\sigma=7.94$ MPa增长了0.4%.通过对试件YZ断面受压的分形维数全过程分析,YZ断面分形维数的增长速度证明了阈值图分析中,YZ断面与XY断面虽受力方向不同,但破坏程度趋势相同的结论.

对不同应力状态下相同YZ断面进行分析,表征试件整体损伤状态.应力水平小时($\sigma=1.07\sim 6.13$ MPa),试件不容易被破坏,扫描断面粗糙度小,裂缝及孔隙主要分布在扫描断面中心部分.应力水平大时($\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa),试件少部分土块剥落,裂缝发育迅速,处于快速破坏阶段.试件受荷从峰值应力至完全破坏时($\sigma=7.94\sim 2.38$ MPa),试件接近完全破坏,直到 $\sigma=2.38$ MPa时,孔隙、裂缝发育迟缓.对相同应力状态下不同YZ断面进

行分析, $\sigma=1.07\sim 6.13$ MPa时, YZ-5作为最外层, 试件被压缩膨胀即受到破坏, 受损最大. YZ-4与YZ-5相距最近, 当YZ-5发生膨胀、土块剥落时, YZ-4成为试件的最外层, 破坏增大但小于YZ-5. 表明试件在YZ断面破坏过程中分形维数整体呈增维趋势. 针对掺入铁尾矿砂与水泥的改性生土材料试件, 通过阈值分割处理得到的阈值图, 可以更直观分析出试件内部的破坏形态和破坏程度. 利用分形维数理论分析同种材料时, 分形维数可寻找材料强度薄弱点和应力集中点.

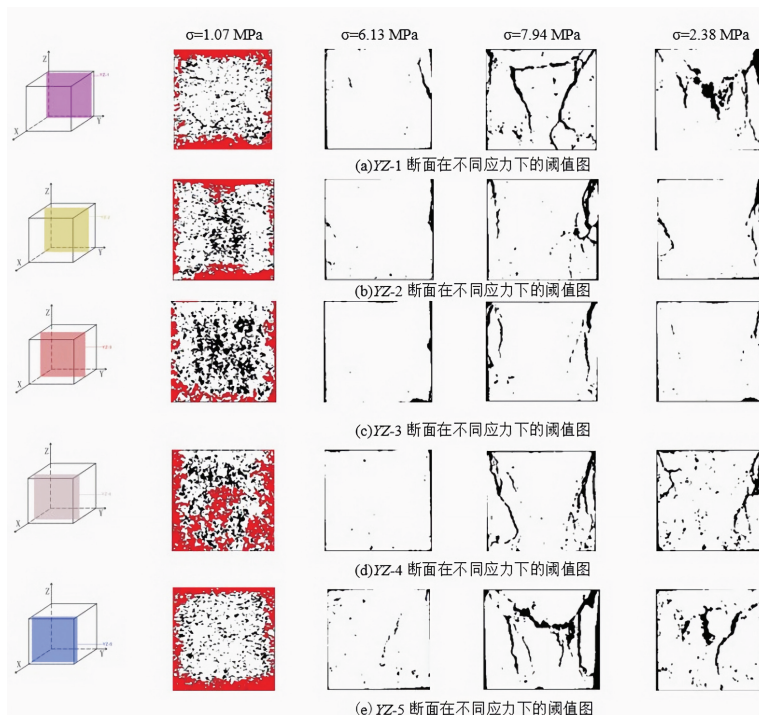


图4 YZ断面阈值划分结果

表2 不同应力状态下YZ断面分形维数

应力/MPa	扫描断面编号				
	YZ-1	YZ-2	YZ-3	YZ-4	YZ-5
1.07	1.866	1.893	1.864	1.817	1.839
6.13	1.886	1.899	1.887	1.868	1.896
7.94	1.918	1.928	1.941	1.921	1.923
2.38	1.926	1.944	1.950	1.942	1.933

3 轴压下试件孔隙率分析

3.1 试件孔隙率分析

孔隙率是指材料内孔隙总体积与该材料总体积的比值. 孔隙率与材料颗粒的形状、结构和排列有关. 通过2.2节阈值图计算得到不同应力状态下XY-1~XY-5断面的孔隙率, 如表3所示. 低应力状态下 ($\sigma=1.07\sim 6.13$ MPa), 试件上部压力较小, 孔隙发育缓慢, 故孔隙率相对较小. 高应力状态下 ($\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa), 随着应力水平的增加, 试件损伤发展迅速, 小孔径发育成为大孔径, 孔与孔之间相互贯通, 导致孔隙率迅速增大. 高应力状态下试件XY-3和XY-4孔隙率超过XY-2, 在应力与试件自重的双重作用下, 破坏程度比试件上部断面严重, 材料颗粒间黏结状态差, 高应力会加速试件自重对自身的破坏.

试件5个断面的孔隙率呈上升趋势. $\sigma=1.07$ MPa时, XY-2孔隙率最大, 为4.080%; XY-1孔隙率最小, 为3.822%. 该应力状态下, 距试件上接触面10 mm的XY-1孔隙率变化小, 而距试件下接触面10 mm的XY-5孔隙率变化大于XY-1, 说明试件受载荷的同时受到材料自重的影响, 导致试件偏下部分孔隙发育更快、损伤更大. $\sigma=6.13$ MPa时, XY-2孔隙率大于直接与压板接触的XY-1. 因为试件整体受压板载荷的过程中, 纵向破坏

与横向膨胀同时产生,与压板直接接触的XY-1,压板与试件之间产生的摩擦力,约束直接接触面XY-1的横向膨胀,XY-2未受到这样的约束力,所以受到破坏后产生的孔隙大于XY-1. $\sigma=7.94$ MPa时,试件受荷达到峰值应力,XY-1孔隙率快速增大,达到5.954%,在5个断面中孔隙率最大,原因是峰值应力前自身受压板约束、破坏程度小,峰值应力时,试件被压缩,材料内部向外膨胀的力大于XY-1和承压板的摩擦力,静摩擦力变为滑动摩擦力,约束力变小后破坏程度明显增大. XY-2孔隙率增长幅度小,为5.688%,原因是峰值应力前此断面已明显破坏,故增长幅度较小. 当 σ 降至2.38 MPa时,5个断面的孔隙率增长速度变慢,此过程试件刚度退化,孔隙得到显现和延伸.

表 3 不同应力状态下XY断面孔隙率

应力/MPa	扫描断面编号				
	XY-1/%	XY-2/%	XY-3/%	XY-4/%	XY-5/%
1.07	3.822	4.080	4.039	3.881	3.842
6.13	4.182	4.368	4.244	4.285	4.161
7.94	5.954	5.688	5.783	5.881	5.856
2.38	7.294	6.968	7.084	7.204	7.173

3.2 基于孔隙率的试件损伤理论

分形维数可以表示材料粗糙度,表征材料损伤状况,但无法像孔隙率一样具体量化其损伤状态,所以引入以孔隙率为参数的损伤分析指标,即在轴压下发生损伤试件的孔隙率,相对无载荷条件下改性生土试件孔隙率的变化,构建损伤评价公式:

$$D_{F-T} = \frac{P(n)}{P_0} - 1 \quad (2)$$

式中: D_{F-T} 为试件不同应力阶段下的损伤度, P_0 为初始应力条件下试件的孔隙率, $P(n)$ 为不同应力阶段下试件的孔隙率, n 为不同的应力阶段.

3.3 基于材料孔隙率的损伤分析

由表4可知,不同载荷下试件XY断面孔隙率的变化趋势. 初始孔隙率为3.08%,代表试件未受载荷时本身的孔隙情况. $\sigma=1.07$ MPa时,试件的孔隙率显著增加,比初始孔隙率增加了28.0%. 应力增加导致试件产生形变,内部黏结被破坏,产生大量孔隙,使得试件的孔隙率变化显著. $\sigma=6.13$ MPa时,孔隙率比初始孔隙率增加了36.1%,比上一个应力状态增加了8.1%.

原因是随着应力的增大,试件的孔隙率伴随破坏增长,但由于试件在进一步破坏中微裂隙延伸、贯穿和加载产生形变,造成土块剥落、覆盖部分孔隙,导致试件整体孔隙率为上升趋势,但增长速度小于上一阶段. $\sigma=7.94$ MPa时,孔隙率增长幅度最大,较上一应力状态增加了37.0%,此时试件所受应力最大,损伤程度明显加剧,试件结构愈发疏松,破坏严重,出现显著的塌落和掉渣现象. 随着继续加载,孔隙率快速增长,比上一应力状态增加了22.5%. 试件因破坏导致材料表面严重剥离,孔隙扩展、连通并贯穿试件. 损伤度变化与孔隙率相同,呈现持续增长的趋势.

4 结论

1) 随试件受荷增大,XY各扫描断面孔隙连通、裂缝增宽,试件外部破坏程度明显. 应力水平大时,分形维数涨幅大, $\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa时,分形维数增长2.3%,试件裂缝、孔隙发育程度最快. 应力水平小时,压板与试件接触面产生横向约束力,减小膨胀破坏,导致分形维数偏小. 分形维数可定量表征试件受压破坏损伤状态.

2) 试件受荷破坏时,YZ断面与XY断面不同,首先在边缘的中部破坏,随后裂缝逐渐延伸. 应力水平大时,分形维数增长最快, $\sigma=6.13\sim 7.94$ MPa时,分形维数增长1.7%,与XY断面分形维数反映的试件损伤变化规律相同. 应力水平小时,土块未膨胀脱落,不同应力状态下YZ-5比YZ-4断面破坏程度大,分形维数相差1.2%~1.5%. 分形维数可寻找材料强度薄弱点和应力集中点.

表 4 XY断面的平均孔隙率和损伤变化

应力/MPa	孔隙率/%	孔隙变化率/%	损伤因子
0	3.08	/	/
1.07	3.93	+28.0	0.28
6.13	4.25	+8.1	0.38
7.94	5.83	+37.0	0.89
2.38	7.14	+22.5	1.32

3) 各扫描断面的孔隙率在 $\sigma=7.94$ MPa时变化明显,增长幅度最大.损伤因子演化趋势与孔隙率变化规律相同,有效反映了材料在轴压下的破坏发展规律.试件最大损伤因子出现在 $\sigma=2.38$ MPa时,为1.32.此研究为改性生土材料损伤本构关系的建立提供了参考.

参考文献:

- [1] 崔丽云. 低活性铁尾矿对砂浆性能的调控机理[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
CUI L Y. Regulation mechanism of low activity iron tailings on properties of mortar[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [2] SIDDIQUA S, BIGDELI A. Utilization of $MgCl_2$ solution to control collapse potential of soil[J]. *Transportation Geotechnics*, 2022, 33: 100731.
- [3] ONAKUNLE O, OMOLE D O, OGBIYE A S. Stabilization of lateritic soil from Agbara Nigeria with ceramic waste dust[J]. *Cogent Engineering*, 2019, 6: 1710087.
- [4] 谢书衡. 铁尾矿砂及微粉对水泥基材料性能影响及机理研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
XIE S H. Effect of iron tailing ore and fine powder on properties of cement-based materials and its mechanism[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022. (in Chinese)
- [5] 张子涵, 魏文, 张杰, 等. 基于CT扫描红层砂岩孔隙多标度分形维数的确定方法[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 254-263.
ZHANG Z H, WEI W, ZHANG J, et al. Determining method of multiscale fractal dimension of red bed sandstone pores based on CT scanning[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 254-263. (in Chinese)
- [6] LI J L, TAN S J, YANG C, et al. Analysis of damage characteristics for skarn subjected to freeze-thaw cycles based on fractal theory[J]. *Fractal and Fractional*, 2023, 7(5): 354.
- [7] MWEMA F M, JEN T C, KASPAR P. Fractal theory in thin films: Literature review and bibliometric evidence on applications and trends[J]. *Fractal and Fractional*, 2022, 6(9): 489.
- [8] DOBRESCU G, PAPA F, STATE R, et al. Characterization of bimetallic nanoparticles by fractal analysis[J]. *Powder Technology*, 2018, 338: 905-914.
- [9] 王帅, 许莹, 张艳博, 等. 基于CT扫描的砂岩主次裂纹扩展特征及影响因素研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(4): 702-711.
WANG S, XU Y, ZHANG Y B, et al. Characteristics and influencing factors for propagation of primary and secondary cracks in sandstone based on CT scan[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(4): 702-711. (in Chinese)
- [10] 丁文博. 基于分形维数的冻融混凝土孔结构及微裂纹扩展研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
DING W B. Research on pore structure and microcrack propagation of freezing-thawing concrete based on fractal dimension[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [11] CARPINTERI A, CHIAIA B, CORNETTI P. A fractal theory for the mechanics of elastic materials[J]. *Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2004, A365(1/2): 235-240.
- [12] LIU P, CHEN Y, SHA F, et al. Study on micro structure and composition distribution of concrete surface zone based on fractal theory and XCT technology[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263: 120209.
- [13] ARASAN S, YENER E, HATTATOGLU F, et al. The relationship between the fractal dimension and mechanical properties of asphalt concrete[J]. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2010, 1(2): 165-170.
- [14] 田威. 混凝土损伤演化的CT研究及其在细观数值模拟中的应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
TIAN W. CT study on the concrete-damage evolution and its application in numerical stimulation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [15] 田威, 党发宁, 陈厚群. 基于CT图像处理技术的混凝土细观破裂分形分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(3): 424-431.
TIAN W, DANG F N, CHEN H Q. Fractal analysis on meso-fracture of concrete based on the technique of CT image processing[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(3): 424-431. (in Chinese)
- [16] 魏佳妮. 铁尾矿砂、水泥改性生土材料抗压性能及CT细观损伤试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
WEI J N. Experimental study on compressive properties and CT meso-damage of raw soil material modified by iron tailing and cement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [17] 张慧梅, 袁超, 慕娜娜, 等. 冻融岩石CT图像处理及细观特征分析[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(2): 219-226.
ZHANG H M, YUAN C, MU N N, et al. CT image processing and mesoscopic characteristics analysis of freeze-thaw rock[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(2): 219-226. (in Chinese)

- [18] 张坤, 卫杨杨, 邵鑫辉, 等. CT技术下掺煤矸石和电石渣的生土材料损伤演化及孔隙研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12182-12192.
ZHANG K, WEI Y Y, SHAO X H, et al. Damage evolution and pore space of raw soil materials mixed with coal gangue and calcium carbide slag under CT technique[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12182-12192. (in Chinese)
- [19] 梁昕宇, 党发宁, 田威, 等. 基于CT图像的混凝土损伤演化分形特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(4): 382-387.
LIANG X Y, DANG F N, TIAN W, et al. A study of fractal characteristics of concrete damage evolution under CT test condition[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(4): 382-387. (in Chinese)

责任编辑: 张自强

(上接第 487 页)

- [34] 张卫红. 银川市颗粒物污染特征分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 36-39.
ZHANG W H. Analysis of characteristics of Yinchuan particulate matter pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S2): 36-39. (in Chinese)
- [35] 胡元洁, 蒋楠. 沙尘天气对西安市环境空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 53-60.
HU Y J, JIANG N. Influence of dust storm on atmospheric environment quality in Xi'an, China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(6): 53-60. (in Chinese)
- [36] 中华人民共和国生态环境部办公厅. 关于印发《受沙尘天气过程影响城市空气质量评价补充规定》的通知(环办监测〔2016〕120号)[EB/OL]. (2017-01-04)[2023-04-06]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201701/t20170106_394054.htm.
General Office of the Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the supplementary provisions for the assessment of urban air quality affected by dust storm weather processes (Environmental Monitoring Office〔2016〕No. 120)[EB/OL]. (2017-01-04)[2023-04-06]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201701/t20170106_394054.htm. (in Chinese)
- [37] 郭勇涛, 辛金元, 李旭, 等. 沙尘对兰州市大气环境质量的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 977-982.
GUO Y T, XIN J Y, LI X, et al. Characteristics of dust events and their influence on air quality of Lanzhou, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(4): 977-982. (in Chinese)
- [38] 孙韧, 陈冠益, 董海燕. 天津市春季颗粒物污染特征及典型沙尘过程分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(6): 8-14.
SUN R, CHEN G Y, DONG H Y. Pollution characteristics of particulate matters and a dust storm episode in the spring of Tianjin[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(6): 8-14. (in Chinese)
- [39] 陈静, 申剑, 徐晓力, 等. 郑州市空气颗粒物污染特征分析[J]. 环保科技, 2016, 22(6): 43-47.
CHEN J, SHEN J, XU X L, et al. An analysis of pollution characteristics for atmospheric particulates in Zhengzhou[J]. Environmental Protection and Technology, 2016, 22(6): 43-47. (in Chinese)
- [40] 黄毅, 刘春琼, 谢志辉, 等. 基于后向轨迹模型的成都市典型灰霾期间PM_{2.5}演化的自组织分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 313-319.
HUANG Y, LIU C Q, XIE Z H, et al. A self-organized analysis model for PM_{2.5} evolution investigation during a typical haze period in Chengdu based on the backward trajectories[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 313-319. (in Chinese)
- [41] DIMITRIOU K, KASSOMENOS P. A study on the reconstitution of daily PM₁₀ and PM_{2.5} levels in Paris with a multivariate linear regression model[J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 648-654.
- [42] 姚青, 赵普生, 韩素芹, 等. 天津城区PM_{2.5}中碳组分污染特征分析[J]. 环境化学, 2014, 33(3): 404-410.
YAO Q, ZHAO P S, HAN S Q, et al. Pollution character of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} in Tianjin city[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(3): 404-410. (in Chinese)

责任编辑: 张自强