

动水作用下岩体裂隙中颗粒运动规律的试验研究

崔 激^{1,2,3}, 裴介渲³, 江志安⁴

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072;

2. 天津大学 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300072;

3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 4. 中国水电基础局有限公司 天津市地基与基础工程企业重点实验室, 天津 301700)

摘 要: 动水作用下岩体裂隙中的颗粒运动是引起渗透破坏的常见原因。针对天然岩石裂隙的随机性与隐蔽性, 采用三维 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数构建随机裂隙通道, 并采用 3D 打印方法获得透明裂隙模型实体, 使用微流体控制仪开展动水作用下颗粒在裂隙中的运动试验, 分析裂隙粗糙程度、颗粒粒径与裂隙开度的比值 (简称粒径隙宽比)、渗流水压力对颗粒在裂隙中起运、运移的影响规律, 进而推断岩体裂隙发生渗透破坏的可能性。研究表明: 颗粒在岩石裂隙中的运动规律与裂隙粗糙程度、水压力、颗粒粒径隙宽比 3 个因素有关。裂隙粗糙程度越大, 或颗粒粒径隙宽比越大, 颗粒越不容易开始运动, 即裂隙发生渗透破坏的可能性越低。同时, 水压力是颗粒运动的主导因素, 颗粒粒径隙宽比对颗粒运动的影响与水压力有关。存在一特定水压力临界值, 未达到该水压力时, 颗粒粒径隙宽比对平均运动速度的影响不明显, 超过该水压力后, 影响程度显著增大, 且该临界水压力值的大小与裂隙粗糙程度有关, 裂隙越粗糙, 临界水压力越大。

关 键 词: 岩体裂隙; 颗粒运动; 动水压力; 分形维数; 室内试验

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2024) 10—2870—09

Experimental study on motion law of particles in rock fissures under dynamic water action

CUI Wei^{1,2,3}, PEI Jie-xuan³, JIANG Zhi-an⁴

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience of China Earthquake Administration, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Ground and Foundation Engineering, Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: Particle movement in rock fissures, influenced by dynamic water action, often leads to infiltration damage. To address the random and hidden nature of natural rock fissures, a fissure channel with a rough joint surface was constructed using a three-dimensional Weierstrass-Mandelbrot fractal function. A transparent and refined fracture channel was obtained using 3D printing technique, and the movement of particles in the fissures under the action of moving water was studied using microfluidic control instruments. The influences of the degree of fissure roughness, the ratio of particle size to fissure width (it is referred to “particle-to-gap size rate” in text), and the seepage pressure on particle initiation and transport were analyzed to deduce the possibility of infiltration damage in rock. The results show that of particle movement in rock fissures is related to three factors: the degree of fissure roughness, the water pressure, and the particle-to-gap size rate. Larger fissure roughness or larger particle-to-gap size rate makes particle movement less likely, reducing the possibility of seepage failure. At the same time, the water pressure is the dominant factor in particle movement, the impact of particle-to-gap size rate on particle movement is related to water pressure. There is a specific water pressure critical value. Below this value, the influence of particle-to-gap size rate on average movement speed is not obvious. Beyond this value, the influence increases significantly. The critical water pressure value is related to the degree of fissure roughness. The rougher the fissure, the higher the critical water pressure.

Keywords: rock fractures; particle movement; dynamic water pressure; fractal dimension; laboratory tests

收稿日期: 2023-12-15

录用日期: 2024-02-01

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52079092)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52079092).

第一作者简介: 崔激, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面研究工作。E-mail: cuiwei@tju.edu.cn

1 引 言

岩石作为常见的水利工程建设基础, 内部通常含有因地质运动等因素形成的发育程度不同的孔隙裂隙, 这些构造为地下水的存储和流动提供了空间。裂隙中地下水通常携带颗粒填充物移动, 其运移规律与岩石裂隙构造密切相关。岩石粗糙裂隙形态的描述包括裂隙的轮廓高度、开度、走向以及裂隙连通情况, 分析颗粒在岩石裂隙中的运动行为, 建立可以表征真实岩石裂隙节理面粗糙形态的物理模型是基本前提。在岩体结构面几何特征的描述中, 分形维数粗糙度^[1]和岩石结构面粗糙度系数 (joint roughness coefficient, 简称 JRC) 法^[2]是常见的描述裂隙粗糙程度的理论。在经典研究的基础上, 谢和平^[3]用 6 种节理的分形量测方法描述岩石节理的形态, 研究结果认为分形维数能够定量刻画节理的粗糙性; 周新等^[4]基于裂隙面分形维数提出三维粗糙裂隙几何结构表征模型, 研究了岩体粗糙裂隙几何特征与其非线性渗流特性的相互关系。因此, 分形被认为是描述裂隙表面起伏的最佳方法。由于真实岩石裂隙尺度狭小、具有隐蔽性, 在有关裂隙的研究中往往很难直接通过观测或监测获得岩石裂隙中真实的流体流态, 学者们希望通过现代技术获得模拟岩石裂隙形态的模型, 因此, 3D 打印技术在岩土工程领域的应用逐渐广泛。肖维民等^[5]针对现有不规则柱状节理岩体物理模型试验中存在的制样困难、效率低等问题提出了基于随机模拟和 3D 打印技术模拟不规则柱状节理岩体试件制备方法, 得到的试件证明该方法在提高效率的同时能够较好地模拟真实柱状节理的力学响应, 具有良好的应用前景。李博等^[6]利用 3D 打印的透明粗糙裂隙研究裂隙中流场分布和流速预压差的关系。3D 打印技术的精细化发展为科研模型的制作提供了便利, 同时为真实岩石裂隙模型的建立提供了重要的技术支持。

水流通过岩石裂缝带走细颗粒引起岩石地基强度发生改变的破坏形式称为渗透破坏, 研究岩体裂隙渗流特性对研究裂隙渗透破坏规律具有重要意义。裂隙中充填物性质对岩体的渗透性具有影响, Liu 等^[7]建立煤裂缝渗流通道结构演化的模拟试验研究系统, 探究填充颗粒对渗流通道的影响, 证明填充物质量的提高使得小开度充填裂隙渗透性降低。数值模拟是探究裂隙渗透性的重要方法, 姚池等^[8]利用 MATLAB 在有限元软件 Comsol 中二次开发建立裂隙岩体的非线性渗流传热数值模型, 验证了裂隙岩体非线性渗流模型的有效性, 并进行了传

热分析; 周宗青等^[9]采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 和离散元法 (discrete element method, 简称 DEM) 耦合的计算方法, 开展了流体黏度对渗透破坏机制影响的定性模拟研究, 分析了流体黏度对平均接触力、流量 (流速)、孔隙率、颗粒运移过程、运移轨迹以及临界水力梯度的影响规律; 甘磊等^[10]通过建立一种新的裂隙粗糙程度表征模型预测裂隙渗流量和稳定时刻渗透率; 田霄等^[11]研究了粗糙裂隙渗流传热的动态过程, 并分析了不同因素影响的裂隙传热规律。然而, 裂隙渗流的研究仅探究了渗流对裂隙本身以及流体渗流特性的影响, 没有考虑裂隙填充物受到的作用, 也未建立裂隙和水流指标与颗粒运动的定性关系。

研究裂隙中颗粒的运动可以参考泥沙颗粒的研究, 泥沙研究多以对颗粒的受力分析为前提^[12], 近年来更有结合高速摄影、图像处理等现代技术辅助探究泥沙运移规律的研究。刘春晶等^[13]开展粗化床面条件下的水槽试验, 证明粗化床面颗粒运动与水流条件是相互影响的; Dodangeh 等^[14]借助 Shields 图研究非均匀流下泥沙起动问题, 证明泥沙在加速流中更易起动。水流带动泥沙颗粒的运动与裂隙中水流裹挟颗粒流动具有相似性, 试验条件相近的情况下, 借鉴泥沙颗粒运动的分析方法研究裂隙中颗粒运动具有可行性。

由于岩石裂隙的复杂性和随机性, 直接通过试验手段对真实形态的裂隙内渗流作用下颗粒运动的相关研究较少。本文基于分形理论, 采用 3D 打印技术建立裂隙模型, 结合图像处理方法进行裂隙内单颗粒运动过程的试验研究, 探讨不同工况下裂隙中颗粒运动规律, 为深入揭示裂隙渗透破坏机制提供参考。

2 岩体分形裂隙模型

2.1 分形维数控制的裂隙粗糙度

针对天然裂隙的隐蔽性和岩石裂隙粗糙轮廓的随机性, 在试验开始之前首先对裂隙粗糙节理面的几何特征进行准确定量。在岩石裂隙粗糙节理面特性的研究中, 分形维数被认为是量化天然岩石节理轮廓粗糙程度的合适参数^[15]。本研究基于 Weierstrass-Mandelbrot (W-M) 分形函数来表征裂隙表面的粗糙程度, 该函数最早可追溯到由 Weierstrass 提出的处处不可导的连续函数:

$$W(t) = (1 - W^2)^{-\frac{1}{2}} \sum_{n'=0}^{\infty} W^{n'} \exp(2\pi i b^{n'} t) \quad (1)$$

式中: n' 为求和项数; b 为大于 1 的实数; $W = b^H$, $H \in (0,1)$, 或 $W = b^{D-2}$, $1 \leq D \leq 2$; $W(t)$ 的实部和虚部分别为 Weierstrass 余弦和正弦函数。

Mandelbrot 将式 (1) 扩展, 得到了另一种表达方式:

$$W(t) = \sum_{n'=-\infty}^{\infty} \frac{(1 - e^{i\gamma^{n'}t})e^{i\psi_{n'}}}{\gamma^{(2-D)n'}} \quad (2)$$

式中: γ 为频率密度因子, $\gamma > 1$, 对于满足正态分布的粗糙表面通常取 $\gamma = 1.5$; $\psi_{n'}$ 为粗糙表面上一个介于 $0 \sim 2\pi$ 之间的随机相位; $1 \leq D \leq 2$ 。经学者验证, 该函数呈现出与真实粗糙裂隙一致的统计学特性^[16]。

将二维 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数表示的二维粗糙轮廓曲线扩展到三维实体的二维粗糙表面的模拟^[17], 其函数表达式可写为

$$z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D-2} \left(\frac{\ln \gamma}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{D_{\max}} \gamma^{(D-3)n} \left\{ \cos \varphi_{m,n} - \cos \left[\frac{2\pi \gamma^n (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}{L} \cdot \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) - \frac{\pi m}{M} \right) + \varphi_{m,n} \right] \right\} \quad (3)$$

其中,

$$n_{\max} = \text{int} \left[\frac{\lg \left(\frac{L}{L_s} \right)}{\lg \gamma} \right] \quad (4)$$

式中: G 为特征尺度参数, 描述粗糙表面轮廓高度; 在三维分形函数中, $2 \leq D \leq 3$; x 和 y 为粗糙表面坐标; z 为随机粗糙表面高度; L 为样本长度; M 用于构造表面的粗糙峰叠加数量; n 为表面上微凸体的频率指数; $n_{\max}$ 为迭代上限; L_s 为截止长度, 描述表面最小分辨率; $\varphi_{m,n}$ 为随机相位; int 为数值函数的一种, 将引用数值向下取整为最接近的整数。

分形函数中, D 代表了分形曲线的自相似性, 其值控制了分形曲线的曲折复杂程度, D 值越大, 粗糙表面的轮廓高度越小, 粗糙频率越大; G 代表了分形曲线的自仿射性, 其值控制了二维粗糙表面的轮廓高度。研究发现, D 是表示粗糙程度的重要参数, 可以同时控制粗糙表面轮廓高度和粗糙频率, 因此本研究通过控制 D 来控制裂隙表面粗糙程度。

2.2 3D 打印裂隙模型

将式 (3)、(4) 编写成 Python 代码, 分形参数取 $D = 2.9$, $G = 0.1$, $M = 10$, $\gamma = 1.5$, $L_s = 0.01$ 代入程序运行, 得到描述裂隙面形状的点云数据, 导入 CATIA 软件中拟合生成不规则面, 复制平移不规则面生成 1.2 mm 宽的裂隙通道, 在通道一端设置半径为 0.7 mm 的注水孔, 于外侧建立合适大小的长方形实体, 通过布尔运算减去裂隙通道和注水口即可得到一个粗糙岩石裂隙的三维模型。

用透明的光敏树脂做材料, 通过 3D 打印技术将三维裂隙模型生成实体。虽然树脂与岩石的实际物理力学性质有所差别, 但由于试验模拟的水流压力较小, 引起的变形也较小, 基本不会对裂隙造成明显变化, 故认为 3D 打印模型可以用于试验。建立的岩石裂隙模型如图 1 所示。

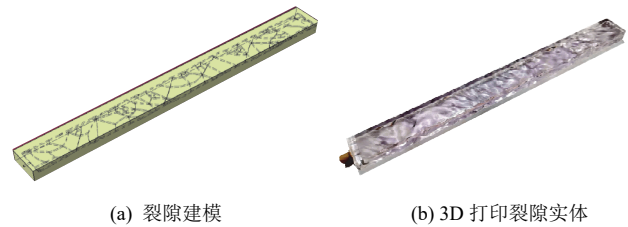


图 1 三维裂隙模型

Fig.1 3D fracture modeling

3 颗粒特征分析

3.1 颗粒形状参数

在水流方向上颗粒投影的面积、轮廓形状影响着颗粒自重、颗粒与裂隙之间的相互作用力以及流体对颗粒的作用力, 因此, 定量描述颗粒形状对研究裂隙内颗粒运动行为是十分必要的。本研究以颗粒的粒径和球度控制颗粒形状, 球度表示颗粒接近球形的程度, Yang 等^[18]认为颗粒材料球度越接近 1, 颗粒整体越接近球形就越规整。用二维图像处理的方法获取颗粒形状参数, 该方法通过获取颗粒三维形状的二维投影对颗粒形状进行分析和重构。本研究通过光学显微镜拍摄单个颗粒图片, 利用图像处理软件 Image J 对图片进行处理, 并直接提取颗粒的形状参数, 提取过程如图 2 所示。

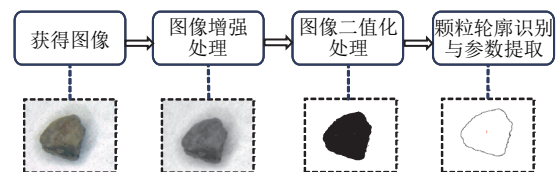


图 2 颗粒形状参数提取过程

Fig.2 Particle shape parameter extraction process

3.2 颗粒受力分析

水流作用下, 裂隙内颗粒受到各种力作用, 单颗粒受力主要包括自重、流体对颗粒的作用力和裂隙面对颗粒的作用力。颗粒受力分析如图 3 所示, 图中 W' 为颗粒的有效重力, F_D 、 F_l 、 F_p 分别为流体对颗粒的曳力、升力和压力梯度力, F_N 和 F_f 分别为裂隙面对颗粒的支持力和摩擦力。

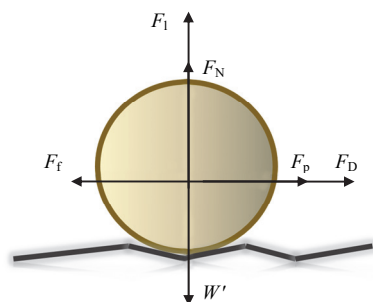


图 3 颗粒受力分析图

Fig.3 Particle force analysis diagram

由于本研究建立的裂隙模型开度小, 裂隙开度方向上水流梯度差较小, 颗粒受到的压力梯度力、升力对颗粒的运动行为无明显影响, 而仅当颗粒静止于裂隙面上时受到其支持力。因此, 这里忽略其他力作用, 只考虑水流对颗粒的曳力、颗粒的有效重力、裂隙面对颗粒的摩擦力作用: ①曳力是由于流场中流体与作用介质之间具有速度差时产生的作用力, 力的方向总是与速度较大的一方的速度方向相同, 大小与颗粒和水流的相对速度大小有关; ②有效重力是指颗粒自重与水流对其的浮力的合力, 大小与颗粒粒径的三次方成正比; ③裂隙面对颗粒的摩擦力是当颗粒与裂隙间存在相对运动或有相对运动趋势, 同时两者相互挤压产生的作用力。

4 单颗粒在裂隙中运动的试验研究

4.1 试验方法及参数设置

本文旨在通过单颗粒裂隙试验, 研究岩石裂隙中颗粒运移规律, 为实际问题中渗透破坏的可能性与破坏机制提供参考。试验装置设置如图 4 所示。

采用正交试验方法, 控制 3 个变量: 由分形维数 D 控制的裂隙面粗糙度, 由 ELVEFLOW 压力控制器控制的恒定水压力, 由筛分和形状参数控制的颗粒粒径。裂隙面粗糙度设置光滑、分形维数 $D=2.9$ 、 $D=2.7$, 恒定水压力 P 设置 3、5、7、9 kPa, 定义一个颗粒粒径 d 与裂隙开度 h 的比值 $a = d/h$, 设置 $a=5/12$ 、 $7/12$ 、 $9/12$ 。试验参数设置见表 1。



图 4 试验装置布置图

Fig.4 Layout of the test setup

表 1 试验参数设置

Table 1 Test parameter setting

分形维数 D	渗流水压力 P/kPa	粒径隙宽比 a
光滑	3	5/12
2.9	5	7/12
2.7	7	9/12
—	9	—

试验开始前, 将裂隙置于白色背景纸上, 通过向裂隙中注入有色液体的方式确定水流在裂隙中扩散段的位置, 确保颗粒从有稳定水流作用处开始运动。试验开始, 将透明裂隙模型内充满水流, 模拟岩石裂隙渗流时的情况, 将单颗球度接近 1 的有色砂粒置于裂隙内。打开空气压缩机, 使气压通过稳压计进入压力控制器, 用电脑软件控制输出端压力大小, 获得恒定压力的水流。试验过程中, 砂粒在透明裂隙模型中随水流移动, 利用手机后置摄像头拍摄颗粒运动过程, 设置图像分辨率为 1 920 像素 $\times$ 1 080 像素、视频帧率 60 帧/s, 保证拍摄的视频清晰, 且帧频富裕。试验结束后, 将视频导入计算机软件中, 按帧拆分成连续图片, 利用 Photoshop 软件将连续图片合并即可见一条完整的颗粒运动轨迹, 利用 GetData 软件从轨迹图中提取需要的颗粒运动参数分析。

4.2 颗粒起动行为

在水流作用下, 静止颗粒的受力平衡被破坏或力矩平衡被破坏, 导致颗粒的静止状态被打破, 这种沉积在裂隙底部的颗粒进入运动状态的过程称为起动。首先观察了渗流水压力较小时砂颗粒起动的

表现,发现当水压力很小时颗粒并不直接开始移动,而是重心发生偏移或原地抖动一下;当水压力增大至一定值时,颗粒开始沿水流方向运动,产生连续、明显的位移。根据已知文献总结,这种原地小幅度的颗粒起动形式称为微动,连续、稳定移动的形式称为强动,且颗粒微动、强动形式与颗粒形状有关^[19]。

4.3 颗粒运动行为分析方法

颗粒运动行为特征直接体现在运动轨迹与运动参数上。利用拍摄的运动过程提取运动轨迹和参数,可以进行颗粒运动行为的分析。

4.3.1 运动轨迹

为了得到清晰的颗粒运动轨迹图像,将裂隙模型置于白色背景上。以颗粒粒径隙宽比 9/12,裂隙分形维数 $D=2.9$,渗流压力 $P=7$ kPa 的情况为例,将颗粒运动过程的视频逐帧拆分,每两帧间隔 33 ms,提取每帧颗粒位置信息绘制成运动轨迹图,将运动轨迹图与裂隙模型贴合,如图 5 所示。

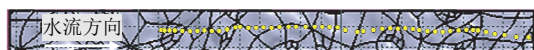


图 5 颗粒运动轨迹与裂隙形态贴合图

Fig.5 Plot of particle trajectories fitted to fracture morphology

由图 5 可见,颗粒运动方向与水流方向一致,但并不是一条直线。对比裂隙面形态可以发现,当裂隙出现起伏,即裂隙面走势发生变化时,颗粒会优先向离自身最近的裂隙面凹陷处移动,且裂隙面起伏变化越密集,轨迹线上颗粒越集中,即裂隙面走势变化越频繁,相同时间内颗粒移动距离越短。可见粗糙裂隙面会改变颗粒运动轨迹,同时影响颗粒移动速度。

4.3.2 颗粒运动参数

(1) 瞬时速度

由于粗糙裂隙开度较小,试验过程无法拍摄到颗粒在竖直方向上的运动情况,且颗粒在竖直方向上的速度分量很小,对颗粒三维瞬时运动速度无明显影响,因此,本研究只考虑颗粒在水平方向上的两个速度分量。由于相邻两帧图像间隔时间很短,颗粒在相邻两帧图像之间的运动距离也很小,因此,认为相邻的 3 帧图像时间内的颗粒速度变化率几乎相等,那么第 i 帧时刻颗粒顺水流方向的瞬时运动速度可表示为 $u_{xi} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t}$, 其中 Δt 为相邻两帧图像的时间间隔;颗粒垂直水流方向上的运动速度为 $u_{yi} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta t}$ 。则颗粒在第 i 帧时刻的瞬时运动

速度为 $u_i = \sqrt{u_{xi}^2 + u_{yi}^2}$ 。

(2) 运动平均速度

取颗粒运动过程中每帧时刻颗粒的瞬时速度的平均值,得到颗粒平均速度为 $u = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} u_i$ 。

(3) 运动加速度

根据颗粒运动的瞬时速度可以得到运动加速度为 $a_{i,i+1} = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta t}$ 。当颗粒加速度持续为负时,颗粒瞬时速度达到极小值。

4.4 颗粒运动机制分析

根据牛顿第二定律,加速度大小反映了物体所受合力的情况,裂隙中颗粒运动方向上的合力由水流曳力和裂隙壁摩擦力组成。单个球形颗粒静止时受到水流作用,此时水流流速与颗粒相对速度最大,颗粒受到的水流曳力最大,颗粒开始做与水流方向一致的加速运动;随颗粒运动速度的增大,水流与颗粒的相对速度逐渐减小,曳力也逐渐减小,颗粒改做加速度减小的加速运动。当颗粒速度增加至大于水流速度时,相对速度方向改变,曳力变为颗粒运动的阻力,颗粒做减速运动。若颗粒不受其他外力作用,则其瞬时速度应以此规律变化,呈小幅度、周期性波动。

实际上,由于水流的不稳定性、裂隙面的走势起伏变化的随机性及颗粒在竖直方向其他外力作用的影响,颗粒运动时与裂隙面发生非完全弹性碰撞^[20],这不仅改变颗粒的运动轨迹,碰撞时产生的摩擦还会阻碍颗粒运动,使颗粒运动速度减小。

图 6 为渗流压力 $P=7$ kPa 时粒径隙宽比 9/12 的颗粒在分形维数 $D=2.9$ 的裂隙中的运动轨迹与瞬时速度对照图。运动全过程中颗粒运动轨迹发生明显突变,且颗粒运动瞬时速度达到极小值的点坐标为 (111.939, 2.381)、(171.901, 0.317)、(192.268, 1.587) 和 (225.182, 0.794) (单位为 mm)。这几处颗粒与裂隙发生碰撞,颗粒受到了较大的裂隙摩擦力。

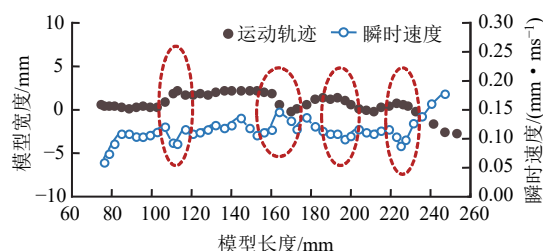


图 6 颗粒运动轨迹与速度对照图

Fig.6 Particle trajectory versus velocity

通过分析颗粒运动瞬时速度、加速度以及运动轨迹, 可以推断颗粒与裂隙壁是否发生碰撞, 进而推断颗粒在裂隙中运动停止的可能性, 即发生渗透破坏的可能程度。

5 裂隙中颗粒运动影响因素分析

过去的研究多集中于对颗粒起动行为的特点进行分析, 得到流体对颗粒起动的影响规律, 而对颗粒运动及其影响因素的分析较为缺失, 本文研究则重点关注试验控制的 3 个变量因素对颗粒起动、运动规律的影响。

5.1 颗粒起动影响因素

裂隙中颗粒起动的直接原因是颗粒在水流的作用下克服阻力开始运动, 使颗粒开始运动的水压力称为临界水压力, 此压力大小与裂隙的粗糙程度和颗粒粒径有关, 以临界水压力值大小为判据可以确定这两种因素对颗粒起动的影响程度, 进而推断实际工程问题中渗透破坏的可能性。

由于试验中需要不断调整压力计的压力大小, 这会影响瞬时裂隙内水流稳定性, 可能导致颗粒出现突跃, 而当水流稳定后又恢复静止状态, 这种情况并不能称为起动。因此, 判定颗粒起动的标准为:

渗流压力改变后, 裂隙内水流稳定时颗粒仍能保持持续性移动。为避免偶然因素的影响, 进行多次试验, 并取 5 次有效结果的平均值作为最终结果。

图 7 为不同粒径隙宽比的颗粒在相同粗糙程度的裂隙中起动的临界水压力对比。由图可见, 当裂隙粗糙程度相同时, 颗粒的粒径隙宽比越大, 起动临界压力也越大。这是因为颗粒粒径增大时, 其质量也增大, 颗粒受到的阻力越大, 越不容易开始运动。

图 8 为不同分形维数裂隙中颗粒起动的临界水压力对比。由图可见, 相同粒径的球形颗粒在粗糙程度越大的裂隙中起动临界压力越大。这是由于裂隙粗糙程度增加会导致相同条件下流过裂隙通道的水流流量减小^[21], 从而使得水流流速减小, 曳力减小, 颗粒更不容易破除摩擦开始运动。

由试验现象分析可知, 颗粒静止、微动和强动的状态变化转折点分别对应了不同裂隙通道内的水力梯度, 由微动变为强动的转折可作为裂隙发生渗透破坏的临界水力坡降, 而静止变为微动的转折则可作为工程中控制渗透破坏的安全裕度, 作为允许水力坡降。允许水力坡降与渗透破坏临界水力坡降的比值在 0.8~0.9 之间。

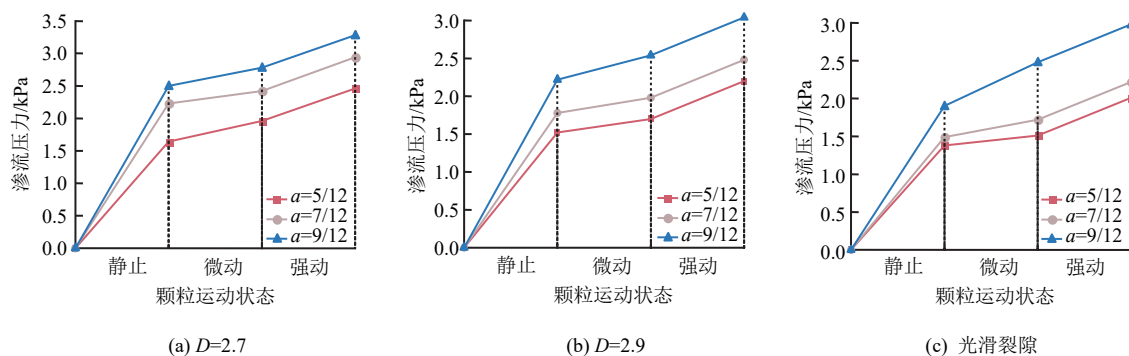


图 7 粒径隙宽比对起动临界压力的影响

Fig.7 Influence of particle-to-gap size rate on starting critical pressure

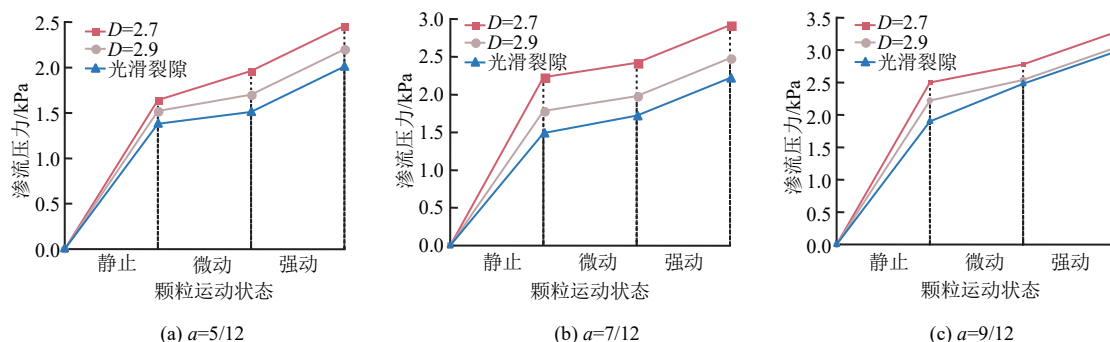


图 8 裂隙粗糙程度影响的起动临界压力

Fig.8 Influence of fracture roughness on starting critical pressure

5.2 颗粒运动行为影响因素

渗流水压力大于颗粒起动临界压力时, 颗粒沿

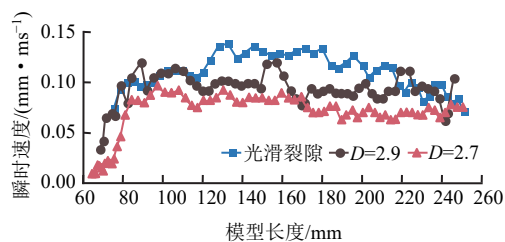
水流方向开始运动, 其运动过程中可能与裂隙面发生碰撞, 进而引起速度的改变。图 9 给出了不同粗

糙程度裂隙和不同粒径隙宽比颗粒在水压力下运动的瞬时速度对比。从图中可以看出, 粒径隙宽比越小或裂隙分形维数越大时, 颗粒运动的瞬时速度越大。这说明, 裂隙粗糙程度增大、颗粒粒径隙宽比增大可导致颗粒运动过程中受到更多阻碍, 也意味着降低了渗透破坏发生的可能性。

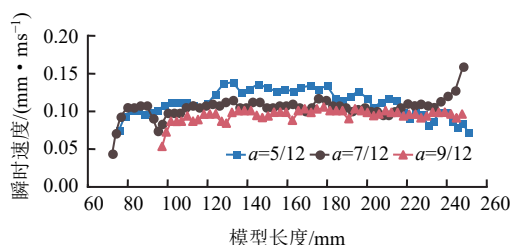
平均速度是颗粒运动过程中每帧时刻瞬时速度的平均值, 反映了颗粒在同等大小水压力作用下运动过程中受到阻碍的情况, 颗粒平均速度越快, 说明其与裂隙面发生碰撞的可能性越少。以平均速度为依据可以判断各因素对颗粒运动的影响程度。

图 10 给出了不同渗流水压力下颗粒粒径隙宽比对颗粒平均速度的影响。从图中可以看出, 颗粒平均速度随水压力增大而增大, 且基本呈随粒径隙宽比增加而降低的趋势; 同时, 从 3 种粗糙程度裂隙都可以看出, 水压力较小时, 颗粒粒径隙宽比对平均运动速度的影响很小, 只有超过某一临界水压力值时, 水压力的影响才逐渐呈现, 临界水压力大小与裂隙起伏程度相关, 起伏越明显, 临界水压力越大, 例如, 试验揭示的分形维数为 2.7 时, 临界水压力约为 9 kPa, 光滑裂隙约为 5 kPa。水流曳力是引起颗粒运动的主要原因, 其与水流动速正相关, 压力越大, 流速越大。在较小流速下, 自重主导颗粒运动, 运动过程中不断与壁面发生碰撞摩擦

而导致速度减小, 因此, 颗粒平均速度较低。随着压力增加, 水流流速增大, 曳力慢慢开始主导颗粒运动, 颗粒运动速度增加, 但由于自重原因, 颗粒仍不可避免与壁面发生摩擦碰撞, 因此, 颗粒粒径隙宽比越大, 碰撞可能性越大, 速度越小。同时, 分形维数越小的裂隙内水流动速越小, 因此, 达到可以主导颗粒运动的曳力需要的渗流水压力越大。



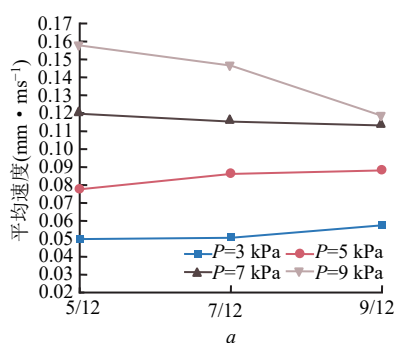
(a) 不同粗糙程度



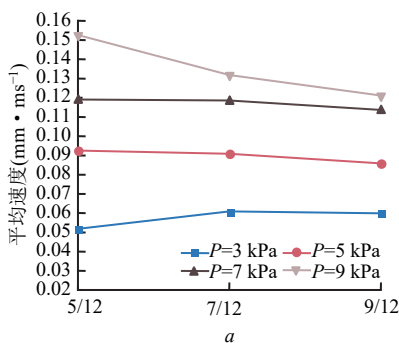
(b) 不同粒径隙宽比

图 9 颗粒瞬时速度变化曲线

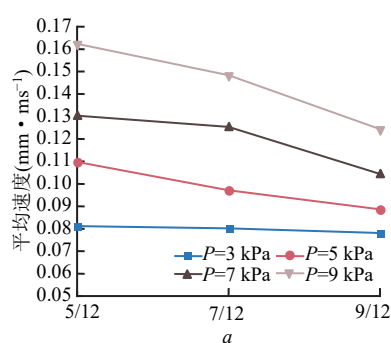
Fig.9 Change curves of particle instantaneous velocity



(a) $D=2.7$



(b) $D=2.9$



(c) 光滑裂隙

图 10 粒径隙宽比对颗粒平均速度的影响

Fig.10 Effect of particle-to-gap size rate on average velocity

图 11 给出了裂隙分形维数为 2.9 时不同粒径隙宽比颗粒加速度时程变化。颗粒粒径隙宽比越大, 平均加速度相对越小, 且加速度值小于 0 的频率明显增多。这符合前文根据平均速度对比总结出的结论, 即颗粒粒径隙宽比增大时, 颗粒与裂隙面发生碰撞的次数增多, 加速度频繁减小至 0 以下, 颗粒平均速度随着粒径隙宽比的增大而减小。

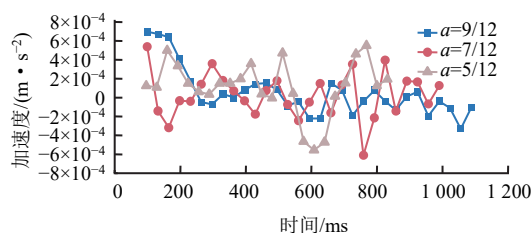


图 11 颗粒加速度时程对比

Fig.11 Comparison of particle acceleration time history

6 结 论

(1) 水压力是引起颗粒运动的直接原因, 颗粒在裂隙中的运动规律与裂隙粗糙程度、渗透水压力大小、颗粒粒径3个因素有关。促使颗粒由静止开始运动的水压力称为起动临界压力, 颗粒粒径隙宽比由小增大, 或裂隙粗糙程度增加时, 颗粒的起动临界压力增大, 颗粒不容易开始运动。同时, 颗粒静止、微动、强动状态转折对应的水力坡降比值在0.8~0.9之间。

(2) 裂隙中颗粒受水流作用运动, 运动方向与水流运动方向一致。当裂隙起伏较大时颗粒与裂隙间更易发生碰撞, 且与裂隙面产生相对摩擦, 进而引起颗粒运动轨迹突变, 运动速度降低, 此时, 裂隙发生渗透破坏的可能性降低。颗粒粒径隙宽比增大时颗粒的运动规律变化同理。

(3) 渗流水压力、裂隙粗糙程度、颗粒粒径隙宽比对颗粒运动的影响中, 渗流水压力占主导作用。试验结果表明, 颗粒粒径隙宽比和裂隙粗糙程度对颗粒运动的影响与渗流水压力有关。存在一临界水压力值, 未达到该水压力时, 颗粒粒径隙宽比对平均运动速度的影响程度较小, 超过该水压力后, 影响程度逐渐呈现, 且临界水压力大小与裂隙粗糙程度相关, 裂隙越粗糙, 临界水压力值越大。本试验揭示的裂隙分形维数 $D=2.7$ 时临界水压力约9 kPa, 光滑裂隙临界水压力约5 kPa。

参 考 文 献

- [1] BROWN S R. Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1987, 34(11): 2811-2825.
- [2] TSE R, CRUDEN D. Estimating joint roughness coefficients[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16(5): 303-307.
- [3] 谢和平. 岩石节理的分形描述[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 18-23.
XIE He-ping. Fractal description of rock joints[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(1): 18-23.
- [4] 周新, 盛建龙, 叶祖洋, 等. 岩体粗糙裂隙几何特征对其 Forchheimer 型渗流特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2075-2083.
ZHOU Xin, SHENG Jian-long, YE Zu-yang, et al. Effects of geometrical feature on Forchheimer-flow behavior through rough-walled rock fractures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(11): 2075-2083.
- [5] 肖维民, 黄巍, 韩俊成, 等. 不规则柱状节理岩体一次成型制备方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 106-111.
XIAO Wei-min, HUANG Wei, HAN Jun-cheng, et al. Experimental study on one-shot moulding method for preparation of irregular columnar jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(Suppl.2): 106-111.
- [6] 李博, 王晔, 邹良超, 等. 岩石裂隙内浆液-水两相流可视化试验与驱替规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1608-1616, 2-3.
LI Bo, WANG Ye, ZOU Liang-chao, et al. Displacement laws of grout-water two-phase flow in a rough-walled rock fracture through visualization tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(9): 1608-1616, 2-3.
- [7] LIU Z, WANG S, YANG H, et al. Study on geometry and seepage evolution mechanism of fracture channels in granular filling coal[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2022, 81(10): 418-434.
- [8] 姚池, 邵玉龙, 杨建华, 等. 非线性渗流对裂隙岩体渗流传热过程的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1050-1058.
YAO Chi, SHAO Yu-long, YANG Jian-hua, et al. Effect of nonlinear seepage on flow and heat transfer process of fractured rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(6): 1050-1058.
- [9] 周宗青, 李利平, 石少帅, 等. 隧道突涌水机制与渗透破坏灾变过程模拟研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3621-3631.
ZHOU Zong-qing, LI Li-ping, SHI Shao-shuai, et al. Study on tunnel water inrush mechanism and simulation of seepage failure process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3621-3631.
- [10] 甘磊, 刘玉, 张宗亮, 等. 岩体裂隙粗糙度表征及其对裂隙渗流特性的影响[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1585-1592.
GAN Lei, LIU Yu, ZHANG Zong-liang, et al. Roughness characterization of rock fracture and its influence on fracture seepage characteristic[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(6): 1585-1592.
- [11] 田霄, 叶祖洋, 罗旺. 岩体裂隙几何结构对其渗流传热特性的影响[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3512-3521.
TIAN Xiao, YE Zu-yang, LUO Wang. Effect of rock geometry on its seepage and heat transfer characteristics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(12): 3512-3521.

- [12] SHIELDS A. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement[R]. California: Soil Conservation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, 1936
- [13] 刘春晶, 曹文洪, 耿旭, 等. 粗化床面非均匀沙推移质运动扩散特性研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 130-137, 147.
LIU Chun-jing, CAO Wen-hong, GENG Xu, et al. Diffusive behavior of non-uniform bedload particles over an armored bed surface[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2021, 19(1): 130-137, 147.
- [14] DODANGEH ESMAEIL, AFZALIMEHR HOSSEIN. Incipient motion of sediment particles in the presence of bed forms under decelerating and accelerating flows[J]. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, 2022, 70(1): 89-102.
- [15] KULATILAKE P, UM J. Requirements for accurate quantifications of self-affine roughness using the roughness-length method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(1): 5-18.
- [16] ZHANG X, XU Y, JACKSON R L. An analysis of generated fractal and measured rough surfaces in regards to their multi-scale structure and fractal dimension[J]. **Tribology International**, 2017, 105: 94-101.
- [17] YAN W, KOMVOPOULOS K. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces[J]. **Journal of Applied Physics**, 1998, 84(7): 3617-3624.
- [18] YANG J, LUO X D. Exploring the relationship between critical state and the particle shape for granular materials[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2015, 84: 196-213.
- [19] WU J, SUN M H, ZHANG L W, et al. Incipient flow velocity of non-uniform sediment particles by considering the additional mass force[J]. **Ocean Engineering**, 2021, 238: 109705.
- [20] 宋良. 裂隙含沙渗流模型与应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
SONG Liang. Research on the model of flow in rock fractures with injected sand and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [21] 崔澈, 邹旭, 李正, 等. 分形岩石裂隙中渗流扩散运动的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3553-3562.
CUI Wei, ZOU Xu, LI Zheng, et al. Experimental study on seepage diffusion movement in fractal rock fractures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3553-3562.

(上接第 2869 页)

《岩土力学》2023 年第 11 期被 EI 收录论文 (27 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
14	花岗岩残积土剪切带上的细观结构损伤规律	黎澄生, 孔令伟, 舒荣军, 等	3203—3212
15	坡底饱和型黄土滑坡离心模拟试验	赵宽耀, 许 强, 高登辉, 等	3213—3223
16	考虑弹塑性卸荷的柱孔和球孔反向扩张解	张家奇, 赵春风, 赵 程, 等	3224—3234
17	砂土应力诱发弹性波速各向异性的试验研究	梁晓敏, 杨朔成, 顾晓强	3235—3240
18	基坑开挖及降水引起下卧隧道变形的解析解	管凌霄, 徐长节, 王雪鹏, 等	3241—3251
19	基于 4D 显微成像的非饱和颗粒土微观力学与渗流试验研究	栾纪元, 王冀鹏	3252—3260
20	深海超软土动剪切模量与阻尼比特性研究	王奕霖, 李 飒, 段贵娟, 等	3261—3271
21	沿缓倾软弱外倾结构面滑动的主动岩石压力计算	陈柏林, 杨文君, 谢 强, 等	3272—3279
22	基于 CPTu 的状态相关边界模型标定研究	汪明元, 孙吉主, 王 勇, 等	3280—3287
23	考虑地层变异和参数空间变异的浅基础承载力可靠度分析	姜琪浩, 王金铜, 侯 波, 等	3288—3298
24	基于多尺度边缘特征的深度学习电阻率反演方法	刘征宇, 庞永昊, 张凤凯, 等	3299—3306
25	三轴剪切条件下胶结型深海能源土应变局部化离散元模拟分析	王思远, 蒋明镜, 李承超, 等	3307—3317
26	软土修正剑桥模型参数反演及其应用研究	虞 洪, 陈晓斌, 易利琴, 等	3318—3326
27	不同形状三维凹陷地形场地对地震动影响比较分析	李小军, 任朋亮, 王玉石, 等	3327—3338