



## 基于CT扫描的渗流作用下碎石土孔隙结构变化规律研究

黄达, 高溢康, 黄文波

**Research on pore structural change of gravel soil under seepage erosion based on CT scanning**

HUANG Da, GAO Yikang, and HUANG Wenbo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302035>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156–156

#### 滑带土蠕变过程及微观结构演化分析

Creep process and the microstructural evolution of sliding –zone soil

周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 祝艳波, 宋飞 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 115–121

#### 冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing–thawing cycles

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 96–105

#### 基于四参数随机生长法重构土体的格子玻尔兹曼细观渗流研究

Lattice Boltzmann meso–seepage research of reconstructed soil based on the quartet structure generation set

蔡沛辰, 阚云, 蒋振梁, 杨鹏飞 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 33–42

#### 土工格栅与碎石土混合料界面作用的大型直剪试验研究

Large–scale direct shear test on the interface between geogrid and gravel–soil mixture

王家全, 祁航翔, 黄世斌, 唐毅 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 81–90

#### 基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩风化特征分析

Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes based on SEM images and micro–scale flow model

汪军, 徐金明, 龚明权, 王亚磊 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 122–130



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302035](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302035)

黄达, 高溢康, 黄文波. 基于 CT 扫描的渗流作用下碎石土孔隙结构变化规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 123-131.  
HUANG Da, GAO Yikang, HUANG Wenbo. Research on pore structural change of gravel soil under seepage erosion based on CT scanning[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 123-131.

## 基于 CT 扫描的渗流作用下碎石土孔隙结构变化规律研究

黄达<sup>1,2</sup>, 高溢康<sup>1</sup>, 黄文波<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300400;

2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 碎石土作为滑坡堆积层的主要组成物质, 受动水因素影响, 在渗流作用下内部渗透压力的变化导致土颗粒流失, 造成细观结构和力学性质随之发生改变, 从而影响滑坡整体稳定性。目前, 渗流作用下不同渗透压力状态的孔隙结构变化规律研究较少。通过自主设计的渗流装置对碎石土试样开展室内渗流侵蚀试验, 并利用 CT 扫描技术获取试样渗流侵蚀过程的内部孔隙图像数据。通过孔隙识别和参数提取, 得到了不同渗流时刻试样内部孔隙率、等效直径等细观参数。构建孔隙网络模型, 分析了渗流作用下连通孔隙的孔喉半径、喉道长度和配位数的变化规律。结果表明: 水力梯度的逐步升高会改变碎石土内部孔隙分布, 土颗粒的流失造成孔隙率增大, 孔隙数量先增加后减少, 孔隙体积增加; 渗流作用下孔隙发生扩张和连通, 孔隙之间连通性增强, 平均孔喉半径和配位数均随着水力梯度的升高而增加。研究结果可以为碎石土滑坡的预防与治理提供一定的理论支撑。

**关键词:** 碎石土; 渗流侵蚀; CT 扫描; 孔隙微观结构; 滑坡

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0123-09

## Research on pore structural change of gravel soil under seepage erosion based on CT scanning

HUANG Da<sup>1,2</sup>, GAO Yikang<sup>1</sup>, HUANG Wenbo<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054)

**Abstract:** As the main component of the landslide accumulation layer, gravel soil is affected by hydrodynamic factors; the change of internal seepage pressure leads to the loss of soil particles, resulting in the change of meso structure and mechanical properties, and thus affecting the overall stability of the landslide. To analyze the evolution of the internal pore microstructure of the crushed soil during the seepage process, the indoor seepage erosion test was carried out on the crushed soil specimen by the self-designed seepage device, using CT scanning to obtain internal pore image data of the seepage erosion process of crushed stone soil samples. Through the identification of porosity and parameter extraction, the changes of mesoscopic parameters such as internal porosity

收稿日期: 2023-02-16; 修订日期: 2023-05-18

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972297); 河北省自然科学基金项目(D2021202002)

第一作者: 黄达(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学等方面的科研与教学工作。E-mail: [dahuang@hebut.edu.cn](mailto:dahuang@hebut.edu.cn)

通讯作者: 黄文波(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程渗透破坏和滑坡机理等研究。E-mail: [huangwenbo12345@163.com](mailto:huangwenbo12345@163.com)

and equivalent diameter of the specimen during the seepage process were analyzed. A pore network model was constructed to analyze the variation of pore radius, throat length, and coordination number of connected pores under different seepage conditions. The results show that the gradual increase of the hydraulic gradient will change the pore distribution in the internal soil. The soil particle erosion leads to the porosity increasing, the pore quantity increasing first and then decreasing, and the total pore volume increasing. Seepage will promote the pore expansion and penetration, and enhance the pore connectivity. The average pore throat radius and average coordination number increase with the hydraulic gradient increasing. This study can provide theoretical significance for the prevention and treatment of gravel soil landslides.

**Keywords:** gravel soil; seepage erosion; CT; pore microstructure; landslide

《岩土工程勘察规范》(GH 50021—2001)<sup>[1]</sup>中将粒径大于2 mm的颗粒质量超过总质量50%的土定义为碎石土。由于其自身结构的非均匀性、松散性和不连续性,在降雨入渗、库水位升降等动水因素的条件下,堆积体中土颗粒极易在渗透力作用下穿过碎石颗粒之间的骨架空隙发生渗流侵蚀,造成细颗粒从坡体上部和坡面向坡脚迁移。统计结果显示<sup>[2]</sup>,造成边坡失稳的原因中,90%都与水的入渗相关。渗流引起的土体内部侵蚀被认为是导致土体结构破坏和失稳的主要原因之一<sup>[3]</sup>。

渗流侵蚀是在流体渗流力作用下土体内部细颗粒在土体孔隙通道或粗颗粒间隙内发生运移的一种选择性侵蚀过程<sup>[4]</sup>,土体几何条件与水力条件共同影响着其渗透性。渗流侵蚀发生后,土颗粒在土体骨架空隙中不断移动,可能会造成某些孔隙堵塞或扩展,如果关键孔隙堵塞,较大的连通孔隙区域可能会断开<sup>[5]</sup>。由于碎石土中碎石颗粒的形状或土颗粒与石块之间的不连续性接触,土体中会存在大量的孔隙和裂隙,在渗流作用下这些孔隙发育较快,进而导致土体变形甚至破坏,因此孔隙的发展与演变对土体渗透性能有较大的影响<sup>[6]</sup>。土颗粒与水力条件的相互作用导致孔隙结构发生改变<sup>[7]</sup>,进而增大了土体的渗透性,降低了土体的抗剪和抗变形能力,促使整体失稳并造成一系列灾害<sup>[8]</sup>,如降雨、库水位升降引发的土体滑坡<sup>[9~11]</sup>。因此,研究碎石土在渗流作用下的细观特征演化,对进一步明确水驱动下此类地质灾害的作用机理具有重要意义。

影响土体渗透性的孔隙结构特征包括孔隙的数量、大小及连通性等<sup>[12]</sup>,作为最容易计算获得的孔隙率并不能很好地反应孔隙的结构特征,实际孔隙结构特征也很难进行直接测量。常见的用于检测孔隙特征的方法包括计算机断层扫描(computed tomography, CT)、核磁共振(nuclear magnetic resonance spectroscopy,

NMR)和扫描电子显微镜(search engine marketing, SEM)等,其中CT扫描是一种无损扫描技术,可以在不破坏原始土体结构的前提下,提取内部孔隙参数<sup>[13]</sup>。通过对CT图像的处理,能够清楚地观察到土样原始结构及其孔隙特征,同时能够展示孔隙在试样内部的三维分布情况。

近年来,工业CT扫描已经广泛应用于有关岩石<sup>[14~15]</sup>与多孔材料透水性研究<sup>[16~17]</sup>,在有关土体孔隙结构研究中,董辉等<sup>[18]</sup>通过最小累计差值的阈值分割方法,提取了堆积碎石土的碎石和孔隙参数,结果表明孔隙面积比率对渗透系数有较大的影响,并获得了渗透系数拟合函数。陈勋等<sup>[19]</sup>通过CT扫描,研究了渗流前后风化壳淋积型稀土矿孔隙结构的变化。Fonseca等<sup>[20]</sup>使用高分辨率微计算机断层扫描技术,在颗粒尺度上检查了大量具有不同程度内部稳定性的真实砂样,证实了配位数与内部稳定性之间的相关性。Wei等<sup>[21]</sup>基于三维微观结构分析了黄土湿陷过程中孔隙的微观结构演化,并对黄土湿陷机理进行了解释。An等<sup>[22]</sup>通过对不同干湿循环次数的花岗岩残积土进行CT扫描,建立了三维孔隙结构模型,动态的展示了干湿循环过程中孔隙的演化过程。已有学者利用CT技术获取土体内部孔隙和碎石形貌,分析了土体初始状态或破坏状态下的不同参数。本文通过CT技术研究土体在渗流作用下内部孔隙的演化过程及空间变化特征。

受限于试验设备的影响,以往的研究一般只能获取初始状态和结束状态的孔隙结构特征,无法得到渗流作用下不同渗透压力状态下的孔隙结构变化规律,本文通过自制的渗流侵蚀装置,运用CT技术,对碎石土试样在逐渐升高水力梯度状态下进行CT扫描,借助CT图像处理与孔隙提取,分析研究了渗流过程中孔隙率、三维等效直径等参数的变化规律,建立了孔隙网络模型,分析了渗流过程中孔隙连通性与渗流通道的变化特征。

## 1 渗流侵蚀试验及CT扫描

### 1.1 渗流侵蚀试验装置

为了研究碎石土在渗流侵蚀过程中的内部孔隙变化,设计了刚性壁渗流侵蚀试验装置,如图1所示。其中,圆柱形空桶为试样装填区域,在其底部放置与圆桶直径大小相等、厚度为5 mm的3D打印多孔板,开孔直径为4 mm。在与之接触的底座下设计有45°的光滑漏斗斜壁,能够让遭侵蚀的土颗粒及土颗粒团通过。其上部放置若干层玻璃球以均匀扩散水压。通过孔隙水压力传感器监测试验过程中土样内部孔隙水压力的变化情况。侵蚀的土颗粒最终汇集到土颗粒收集装置中。出水口处放置水收集装置,在其下方是一台电子秤,用于实时计算流速变化。在不同装置之间均采用8 mm内径的橡胶软管,用快接接口连接,并附带开关,在不干扰试样内部结构变化的情况下,可以快速方便地更换土颗粒收集装置。

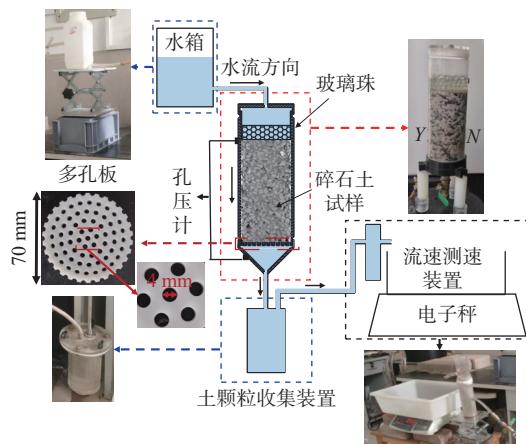


图1 渗流侵蚀试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the seepage erosion test device

### 1.2 试样制备与试验步骤

本文试验中选用的碎石土由砾石和砂土混合重塑组成,砂土为石英砂,粒径范围为0.15~2.00 mm,认为是能够被侵蚀的细颗粒<sup>[23]</sup>;砾石为玄武岩,为土体骨架的粗颗粒,粒径范围为2.00~10.00 mm。室内试验测得的基本物理指标如表1所示。通过对一些易发生管涌侵蚀的颗粒组成进行统计分析<sup>[24~27]</sup>,确定本文中的颗粒级配如图2所示。

将烘干后的粗细颗粒按照级配曲线配置,再添加质量分数为6%的去离子水均匀拌和以减少颗粒离析,土样分5层装入圆筒,按照干密度计算求得每层质量,通过击实试验使每层均达到3 cm的厚度,每层

表1 碎石土的基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of gravels soil

参数	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	天然含水率/%	不均匀系数	曲率系数
指标值	1.83	2.72	1.40	38.38	21.82

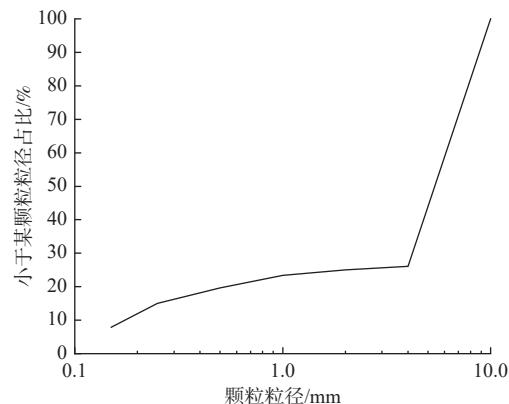


图2 颗粒级配

Fig. 2 Particle size distribution

击实完毕后对上表面进行刮毛,保证土样的均匀性与整体性。最终的试样直径为70 mm,高度为150 mm,用橡胶软管连接整个试验装置。采用缓慢增高水头的方法饱和试样,待试样完全被水浸没之后,静置24.0 h使试样充分饱和。

试验开始,以恒定水力梯度施加向下水流。各级水力梯度试验结束后,暂停试验,关闭入水口及出水口的快接开关,静置0.5 h,之后将试样进行CT扫描,扫描结束后继续进行下一组水力梯度的渗流试验。试样饱和状态下即水力梯度为0时进行的扫描为Scan1,水力梯度为0.76时进行的扫描为Scan2,水力梯度为1.19时进行的扫描为Scan3,水力梯度为1.60时进行的扫描为Scan4。试验过程中CT扫描的4个阶段,通过预试验中土体渗透系数随水力梯度的变化而确定。

通过CT扫描得到的清晰图像可以发现在CT扫描过程中试样内部颗粒处于稳定状态。当升高水头后,试样两端的孔隙水压力传感器计算得到的水力梯度变化较小或基本不发生变化时,停止试验。

### 1.3 CT扫描与图像处理

试验所用CT扫描设备为YXLON FF35 CT扫描仪,经过调试,扫描电压为200 kV,扫描电流为190  $\mu$ A,扫描分辨率为0.053 mm,能够保证试样在扫描过程中的稳定性及后续CT图像中孔隙结构和土体结构的准确性,4次扫描CT设备扫描参数相同。试验过程中,在CT扫描装置的底盘处进行定点标记,以保证4次扫描的位置基本相同。

进行孔隙结构提取之前,先对图像进行预处理,主要包括图像裁剪和滤波降噪等。将原始CT数据导入Avizo软件中,首先对4组数据进行方位校正,之后裁剪出一个圆柱形区域,消除亚克力筒壁以及试样上下非土样区域的干扰,最终得到直径为1300像素、高度为2690像素的圆柱体三维灰度数据,此时CT数据中只包含碎石土试样。由于CT仪器运行和环境噪声的影响,得到的CT图像上存在噪点,降低了图片的质量。因此,要对连续CT切片进行滤波处理,选择中值滤波,将每一点处的灰度值设为该点某邻域处的所有像素点灰度值的中值,是经典的平滑噪声方法。

文中通过Avizo软件自带的局部Factorization算法得到的阈值完成孔隙分割。它是按照图像的灰度特性,通过选择合适的灰度阈值( $T$ )将灰度图像分为前景和背景2部分,当选择的灰度阈值使得背景和前景之间的类间方差越大,说明构成图像的2部分的差别越大,此时的灰度值( $t$ )是最佳阈值。通过对4次扫描得到的CT数据进行一致化处理,保证了后续处理得到的前后孔隙数据具有对比性。

CT数据处理的流程如图3所示,分割后的图像中仅存在孔隙。对分割的孔隙进行定量化分析,计算了孔隙率、等效直径等参数,构建了连通孔隙的孔隙网络模型,分析了渗流侵蚀对孔喉长度、孔喉等效半径和配位数的影响。

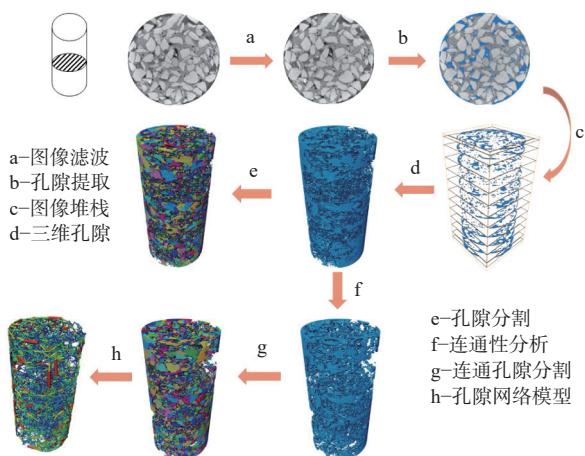


图3 图像处理流程  
Fig. 3 Image processing

## 2 试验结果

### 2.1 宏观水力参数

试样渗透系数与流速随水力梯度的变化关系见图4。当水力梯度在0.75以下时,土体内部渗透系数

随水力梯度的增加而逐渐减小,在这一过程中,试样内部基本没有颗粒流失,此阶段土体内部能够保持稳定的状态,将此阶段定义为稳定渗流阶段。当水力梯度在0.75~1.35时,试样内部在各阶段均出现明显的颗粒流失,打破了试样内部的稳定状态<sup>[23]</sup>,此阶段的流速增长迅速,土体内部渗透系数随之增加,将此阶段定义为渗流侵蚀发展阶段。当水力梯度在1.35~1.60时,随着水力梯度的升高,流速的持续增大导致细颗粒持续流失,试样内部渗流侵蚀通道进一步扩大,导致其内部的压力差逐渐降低,需要通过不断升高入水口高度维持试样内部的水力梯度,当水力梯度达到1.60后,继续升高入水口高度,试样内部压力差基本不发生变化,将此阶段定义为土体的侵蚀破坏阶段。

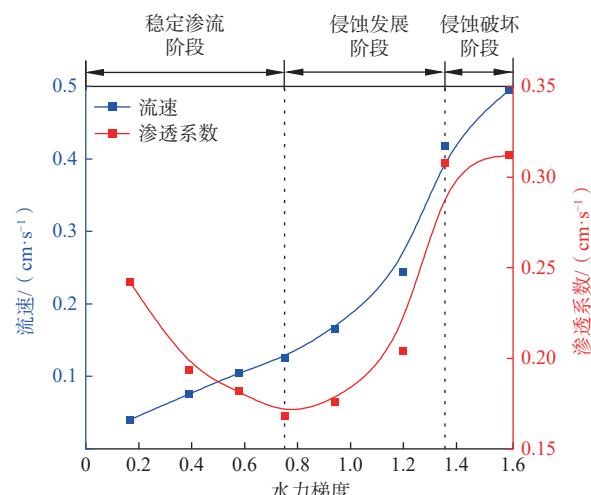


图4 渗透系数、流速与水力梯度的关系  
Fig. 4 Relationship between permeability coefficient, flow velocity, and hydraulic gradient

### 2.2 细观孔隙结构参数

土体力学性质受内部孔隙率影响较大<sup>[28]</sup>。本文主要通过面孔隙率和体孔隙率探究渗流侵蚀对孔隙率的影响。面孔隙率( $n$ )为某高度处切片孔隙的面积值( $A_V$ )与切片总的面积值( $A_T$ )之比,体孔隙率( $N$ )为孔隙体积( $V_V$ )与试样总体积( $V_T$ )之比,连通的孔隙体积( $V_C$ )与孔隙总体积( $V_P$ )之比为连通率( $n_e$ ):

$$n = A_V / A_T \quad (1)$$

$$N = V_V / V_T \quad (2)$$

$$n_e = V_C / V_P \quad (3)$$

4次CT扫描识别出的孔隙数据计算结果如表2所示,试样不同高度处的孔隙率分布如图5所示。

表2 CT图像处理识别的孔隙体积及孔隙率计算结果

Table 2 Computational pore volume and porosity identified by CT image processing specimens

扫描阶段	Scan1	Scan2	Scan3	Scan4
孔隙总体积/mm <sup>3</sup>	77 004	82 520	99 662	120 479
连通孔隙体积/mm <sup>3</sup>	66 776	72 544	89 489	113 214
体孔隙率/%	13.8	14.8	17.3	21.4
连通率/%	86.7	87.9	89.8	94.0

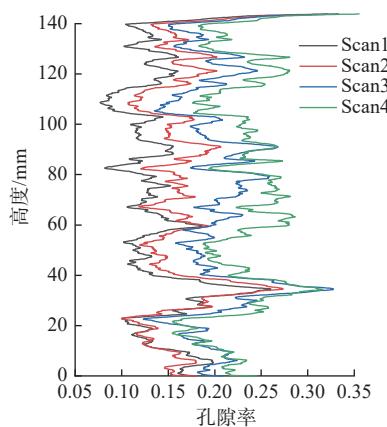


图5 试样不同高度处的孔隙率分布

Fig. 5 Porosity distribution at different heights of the sample

等效直径是确定土体渗透系数的最重要参数之一。与孔隙体积相同的球体直径为等效直径( $d$ ):

$$d = \sqrt[3]{6V_{3D}/\pi} \quad (4)$$

式中:  $V_{3D}$ ——单个孔隙的体积/mm<sup>3</sup>。

通过CT扫描识别出的最小孔隙等效直径为0.05 mm, 最大孔隙等效直径为9.45 mm, 计算4次扫描的平均孔径分别为0.57, 0.58, 0.63, 0.74 mm。如图6

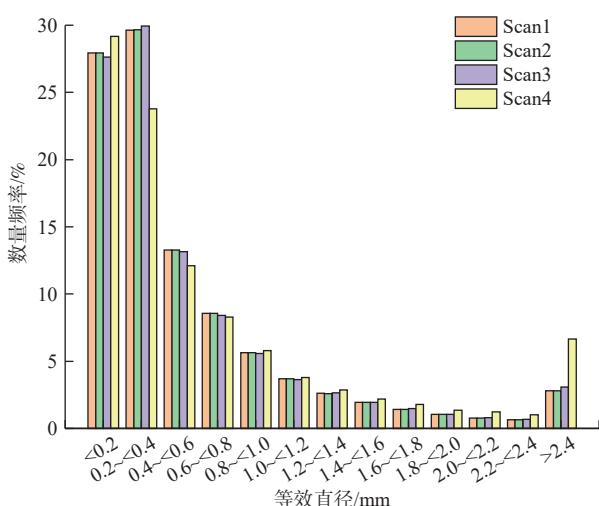


图6 孔隙等效直径频率分布图

Fig. 6 Frequency distribution of equivalent pore diameter

所示, 4次扫描试样孔径主要分布在0.00~1.00 mm, 其各自数量频率占比分别为85.04%、85.06%、84.67%和79.14%, 不同等效直径孔隙体积分数如表3所示。

表3 孔隙等效直径体积分数

Table 3 Statistical volume fraction of equivalent pore diameter

等效直径/mm	<0.8	0.8~<1.6	1.6~2.4	>2.4
Scan1	2.76	10.79	14.88	71.57
Scan2	2.42	9.56	13.61	74.40
Scan3	2.01	9.08	13.43	75.48
Scan4	0.98	4.43	8.05	86.54

### 2.3 孔隙网络模型的建立

孔隙网络模型是空间维度和二维图像的有机结合, 具有和土体孔隙空间等价的真实拓扑结构, 可实现对土体内部复杂孔隙空间的定量化描述<sup>[29]</sup>, 也可以模拟水相流动, 直观了解孔隙内部的渗流规律。孔隙网络模型又被称为球棍模型, 由孔隙和喉道2个基本单元组成。如图7所示, 圆球表示孔隙, 棍表示喉道, 球和棍的大小表示孔隙和喉道的大小。

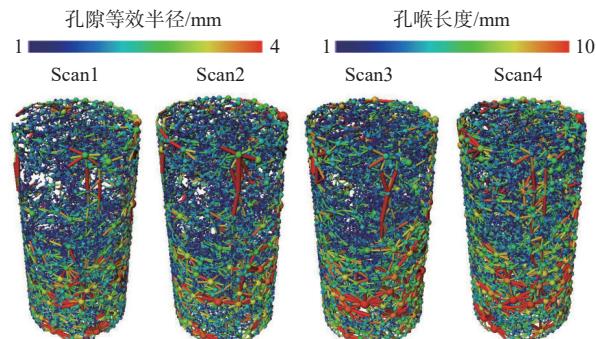


图7 孔隙网络模型

Fig. 7 Pore network model

## 3 分析和讨论

### 3.1 孔隙率与孔隙分布变化特征

如图5所示, 0 mm处为试样底部, 孔隙率大小沿试样高度存在波峰和波谷, 这是因为土样制备是采用分层制备的方法。4次扫描的孔隙率在上表面附近较高, 在试件的中部相对较低, 这是因为试件表面具有大量的开放孔隙, 在饱和过程中, 部分土颗粒与水面接触时会在孔隙处发生沉积, 并且由于最上层土颗粒没有补充来源, 导致上层孔隙率上升。Scan1和Scan2的孔隙率变化趋势及大小基本相同, Scan1面孔隙率为7.7%~26.0%, 体孔隙率为13.7%, Scan2面孔隙率为9.9%~24.0%, 体孔隙率为14.7%, 如表2所示, Scan1

和 Scan2 的总孔隙体积分别为 77 004, 82 520 mm<sup>3</sup>, 增幅为 7.1%, 说明在水力梯度较低的情况下, 试样内部孔隙大小变化很小<sup>[8]</sup>, 土体内部中仅在试样上半部分发生轻微的颗粒流失; Scan3 与 Scan4 中试样孔隙率开始变大, 孔隙率沿着 Scan2 中原有的波动趋势进一步增大, Scan3 与 Scan4 孔隙率分别为 17.3%、21.4%, 增幅为 23.7%。

在 4 次渗流侵蚀过程中, 碎石并未发生明显位移, 相较于试样初始状态, 其孔隙结构发生了显著的变化(图 8)。在 Scan1 和 Scan2 中, 孔隙的尺寸变化很小, 孔隙的形态和位置基本保持不变。在 Scan3 和 Scan4 中可以发现, 孔隙主要集中在碎石骨架周围。渗流结束后, 与初始状态相比, 在试样不同高度处, 土体的侵蚀程度大小不一。由 4 次扫描结果可知, 试样各截面处孔隙率最大增幅为 139.2%, 最小增幅为 7.5%, 说明在渗流侵蚀过程中, 试样不同高度处的孔隙演化具有较大的不均匀性。

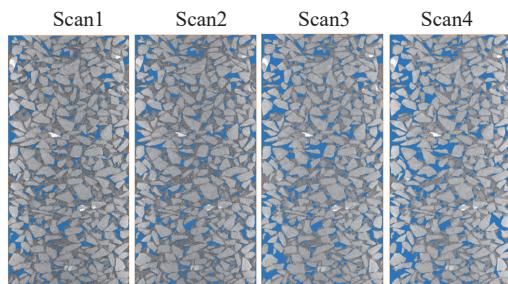


图 8 不同水力梯度下碎石土垂直截面孔隙分布图

Fig. 8 Vertical section pore distribution of gravelly soil under different hydraulic gradients

### 3.2 孔隙大小变化特征

如图 6 所示, 在渗流过程中孔隙数量贡献率主要为直径 1.0 mm 以下的孔隙, 并在前期水力梯度较小的情况下, 试样内部孔隙大小变化不大, 这与上述 Scan1 与 Scan2 的孔隙率变化基本相同; 随着水力梯度的增加, 在 Scan3 和 Scan4 中 0.8 mm 以下的孔隙频率相较于最初的 2 次扫描均有不同程度的减小, 大于 1.0 mm 的孔隙频率逐渐递增。如表 4 所示, 等效直径小于 2.4 mm 的孔隙体积随着水力梯度的增大而减小, 等效直径大于 2.4 mm 的孔隙刚好相反。在渗流侵蚀过程中, 直径 2.4 mm 以下的孔隙数量占据主要地位, 而等效直径在 2.4 mm 以上的孔隙数量占比较小但体积占比较大。

根据宏观水力参数变化的 3 个不同阶段(图 4), 将文中 Scan1—Scan2、Scan2—Scan3 与 Scan3—Scan4 分别定义为渗流前期、中期与后期。在渗流前期, 各

表 4 孔隙网络模型定量参数分析

Table 4 Quantitative parameter analysis of pore network model

扫描阶段	Scan1	Scan2	Scan3	Scan4
连通孔隙数量	10 596	10 320	13 371	8 443
孔喉数量	15 505	15 538	15 622	15 682
平均配位数	2.96	3.03	3.67	3.71
平均孔喉长度/mm	3.33	3.38	3.62	4.06
平均孔喉半径/mm	0.41	0.42	0.44	0.60

级孔隙数量波动不大, 并且孔隙体积变化平稳, 在此阶段下, 试样随着水力梯度的升高, 细颗粒也基本没有发生较为明显的侵蚀。渗流中期, 孔隙体积增加 20.8%, 其中孔径大于 2.0 mm 的孔隙体积增加了 22.3%, 渗透系数增加 21.3%, 说明孔隙的增加会使土体渗透性增强。渗流后期, 总的孔隙数量减小 4.0%, 体积变化增加 38.6%, 孔径小于 0.8 mm 的孔隙占比继续减小, 孔径在大于 0.8 mm 以上的孔隙占比增加, 说明细颗粒的流失扩展了流体的渗流通道, 总的孔隙体积增加, 其中大于 2.0 mm 的孔隙体积增加 33.3%, 使得较多的细颗粒(直径小于 2.0 mm)更容易被侵蚀而从较大的孔隙通道中迁移, 导致土体内部所能承担的压力降低。

### 3.3 连通孔隙网络变化特征

#### 3.3.1 渗流侵蚀对孔喉长度的影响

孔喉是连接孔隙与孔隙之间比较狭窄的通道, 孔喉的大小对渗透率有很大影响。如图 9(a)所示, 4 次扫描孔喉长度均呈单峰分布, 主要分布在 2.00~5.00 mm 之间, 分别占比为 82.1%、81.7%、83.4% 与 71.9%, Scan1、Scan2、Scan3 的峰值点在 3.00 mm 处, Scan4 的峰值点在 4.00 mm 处, 大于 4.00 mm 的孔喉长度数量频率明显大于前 3 次扫描。如表 4 所示, 平均孔喉长度分别为 3.33, 3.42, 3.38, 4.06 mm, Scan2、Scan3、Scan4 中平均孔喉长度分别增加了 1.5%、7.1% 与 12.2%。孔喉数量分别为 15 505, 15 538, 15 622, 15 682, 孔喉长度和孔喉数量随着水力梯度的增加而增加。

#### 3.3.2 渗流侵蚀对孔喉半径的影响

孔喉半径是影响渗透系数的重要因素之一<sup>[29]</sup>, 如图 9(b)所示, 4 次扫描孔喉等效半径分布规律总体相似, 随着孔喉等效半径的增大, 与之相对应孔隙数量均呈现出先增大后减小的趋势。等效半径小于 0.20 mm 的喉道数分别占喉道总数的 29.75%、28.80%、32.62%、23.79%, 等效半径小于 1.30 mm 的喉道数分别占喉道总数的 95.52%、94.95%、95.76%、91.21%, 表明试样的喉道等效半径主要分布在小于 1.30 mm 的范围内。4

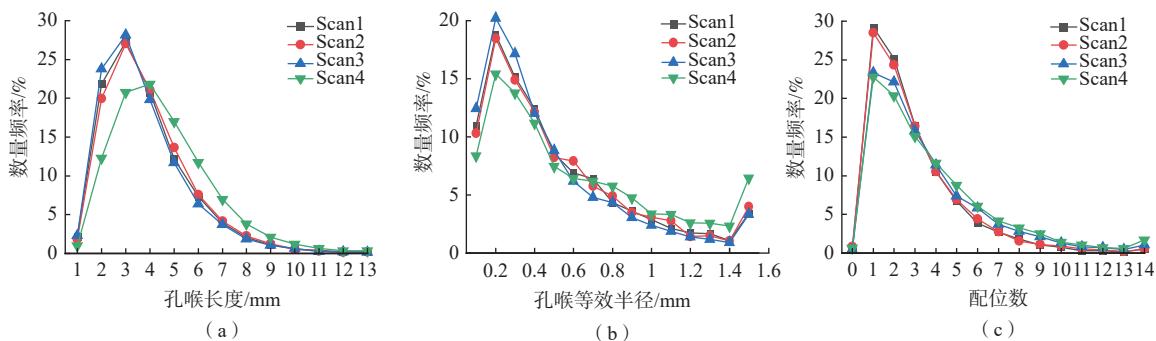


图 9 孔隙网络模型参数频率分布图

Fig. 9 Frequency distribution of pore network model parameters

次扫描孔喉平均半径分别为 0.41, 0.42, 0.44, 0.60 mm (表 4), 说明渗流侵蚀使得土体内部的渗流通道扩张, 孔喉平均等效半径随之增加, 连通性增强, 孔隙之间的连通通道尺寸增大。

### 3.3.3 渗流侵蚀对孔隙配位数的影响

土体中存在着大量孔隙, 其中只有相互连通的孔隙才有导水作用, 因此评估土体的渗透性能需要研究其孔隙的连通性。孔隙空间的连通性对土壤的水力性质起着重要作用。配位数是表征土体连通性的微观参数。配位数表示一个单独的孔隙所连接孔喉的个数, 孔隙配位数为 0 的孔隙可视为孤立孔隙, 对水的流动贡献不大, 因此关注点主要放在配位数大于 0 的孔隙, 这是主要的渗透途径。

如图 9(c)所示, 4 次扫描配位数低于 7 的孔隙数量分别占总孔隙数量的 92.39%、91.96%、86.30% 与 85.41%。由表 2 可知, Scan1 和 Scan2 的连通率相差不大; Scan3 和 Scan4 相较于前 2 次扫描有明显的提高; 如图 9(c)所示, Scan1、Scan2 中配位数变化趋势及数量频率变化趋势基本相同; Scan3 和 Scan4 相较于前 2 次扫描配位数 5 以下的频率减小, 配位数大于 5 的孔隙频率增加, 高配位数的孔隙频率增加代表孔隙之间有更好的连通性。由表 4 可知, 渗流前期、中期与后期孔隙平均配位数分别增加 2.4%、21.1% 与 1.1%。上述结果表明, 渗流侵蚀过程中, 配位数较小的孔隙数量频率减少, 配位数较大的孔隙数量频率增加, 试样的连通性增强。

### 3.4 渗流侵蚀作用下细观结构与宏观响应的联系

碎石土渗流侵蚀过程中细观结构的变化能够反映宏观性质。如图 4 所示, 在渗流稳定阶段, 碎石土渗透系数随水力梯度的增加而逐渐减小, 同样在渗流前期, 如图 5 所示, 试样高度 8 cm 左右处, 在渗流前期孔隙率出现了降低, 孔隙在此处发生了堵塞, 可能是

此阶段下渗透系数下降的原因。

各阶段遭侵蚀的土体质量与 CT 扫描识别出的孔隙体积变化量如表 5 所示, 3 个阶段下识别出的孔隙体积变化与实际的土颗粒流失质量变化趋势大致相同, 说明细颗粒的流失是导致土体内部粒间孔隙扩展与连通的主要原因。

表 5 不同阶段下孔隙体积增加量与土颗粒流失量

Table 5 The increase in pore volume and soil particle loss at different stages

扫描场景	孔隙体积 /mm <sup>3</sup>	孔隙体积变化 /mm <sup>3</sup>	土颗粒流失/g	土颗粒流失变化/g
Scan1	77 004	0	0	0
Scan2	82 520	5 516	13.4	13.4
Scan3	99 662	17 142	44.3	30.9
Scan4	120 479	20 817	78.5	34.2

注: 孔隙体积变化与土颗粒流失变化中, 其值均为后一次扫描时得到的数值与前一次扫描时得到的数值之差。

由渗流前、中、后期孔隙数量频率与体积变化可知, 碎石土在渗流作用下孔隙演化具有一定的规律, 主要表现为孔隙的堵塞、扩展与连通。一方面, 土颗粒在某些位置处的堆积, 导致此处孔隙闭合而发生堵塞; 另一方面, 随着土颗粒在碎石骨架孔隙之间迁移, 导致孔隙发生扩展与连通<sup>[30]</sup>。在侵蚀前后试样内部的孔隙分布中能够观察到这种现象, 如图 10 所示。

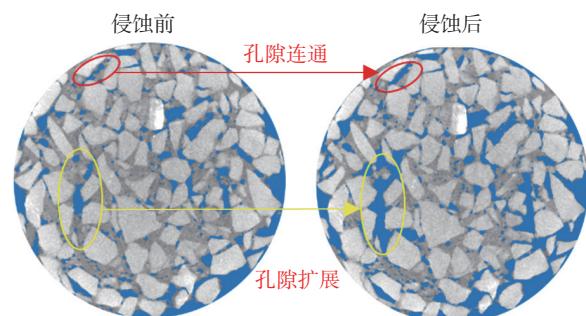


图 10 渗流侵蚀过程中的孔隙变化

Fig. 10 Pore changes during the seepage erosion process

## 4 结论

(1) 碎石土在渗流侵蚀过程中, 土体内部孔隙率的增大, 导致其渗透性增大, 试样不同高度处的孔隙演化具有较大的不均匀性。

(2) 碎石土在渗流侵蚀过程中, 土体内部细颗粒的流失, 使得土颗粒之间的孔隙发生扩展与连通, 较小的孔隙数量减少, 较大的孔隙体积增加。

(3) 孔隙网络模型能够较为直观地表现渗流过程中孔隙和喉道的发展, 渗流侵蚀过程中连通性增强使得平均孔喉长度、孔喉等效半径与孔隙配位数增加, 其各自的频率分布均随着参数值的增大呈现先增大后减小的趋势。

## 参考文献 (References) :

- [1] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [2] 齐永正, 杨子明, 刘玮民, 等. 水位升降与水下冲刷作用下边坡破坏试验研究 [J]. 人民黄河, 2022, 44(2): 51–54. [QI Yongzheng, YANG Ziming, LIU Weimin, et al. Experimental study on slope failure under the action of water level fluctuations and underwater scours [J]. Yellow River, 2022, 44(2): 51–54. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 戴邵衡, 张升, 童晨曦, 等. 循环荷载下染色标定砂土内部侵蚀试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 423–432. [DAI Shaoheng, ZHANG Sheng, TONG Chenxi, et al. Experimental study on internal erosion of dyed sands under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 423–432. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 沈辉, 罗先启, 毕金锋. 土石混合体渗透侵蚀特性数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1497–1502. [SHEN Hui, LUO Xianqi, BI Jinfeng. Numerical simulation of internal erosion characteristics of block in matrix soil aggregate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1497–1502. (in Chinese with English abstract)]
- [5] BIANCHI F, WITTEL F K, THIELMANN M, et al. Tomographic study of internal erosion of particle flows in porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 2018, 122(1): 169–184.
- [6] DONG Hui, HUANG Runqiu, GAO Qianfeng. Rainfall infiltration performance and its relation to mesoscopic structural properties of a gravelly soil slope [J]. *Engineering Geology*, 2017, 230: 1–10.
- [7] 李伟一, 钱建固, 尹振宇, 等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元耦合模拟 [J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3191–3201. [LI Weiyi, QIAN Jiangu, YIN Zhenyu, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3191–3201. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 冯上鑫, 柴军瑞, 许增光, 等. 基于核磁共振技术研究渗流作用下土石混体细观结构的变化 [J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2886–2894. [FENG Shangxin, CHAI Junrui, XU Zengguang, et al. Mesostructural change of soil-rock mixtures based on NMR technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2886–2894. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孟生勇, 江兴元, 杨义, 等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 104–112. [MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 104–112. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征 [J]. 中国地质, 2022, 49(2): 355–368. [YANG Zihua, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan [J]. Geology in China, 2022, 49(2): 355–368. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 黄达, 匡希彬, 罗世林. 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 127–135. [HUANG Da, KUANG Xibin, LUO Shilin. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 127–135. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 彭家奕, 张家发, 沈振中, 等. 颗粒形状对粗粒土孔隙特征和渗透性的影响 [J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 592–600. [PENG Jiayi, ZHANG Jiafa, SHEN Zhenzhong, et al. Effect of grain shape on pore characteristics and permeability of coarse-grained soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 592–600. (in Chinese with English abstract)]
- [13] NI Xiaoming, MIAO Jie, LV Runsheng, et al. Quantitative 3D spatial characterization and flow simulation of coal macropores based on  $\mu$ CT technology [J]. *Fuel*, 2017, 200: 199–207.
- [14] 杨瑨, 侯贺晟, 符伟, 等. 松科二井深层沙河子组泥岩三维显微 CT 成像及对深部油气预测的启示 [J]. 地

- 质通报, 2020, 39(7): 1006 – 1014. [ YANG Jin, HOU Hesheng, FU Wei, et al. 3D microscopic CT imaging and significance of SK-2 deep mudstone of Shahezi Group[J]. Geological Bulletin of China, 2020, 39(7): 1006 – 1014. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 李易霖, 张云峰, 丛琳, 等. X-CT 扫描成像技术在致密砂岩微观孔隙结构表征中的应用——以大安油田扶余油层为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(2): 379 – 387. [ LI Yilin, ZHANG Yunfeng, CONG Lin, et al. Application of X-CT scanning technique in the characterization of micro pore structure of tight sandstone reservoir: An example from Fuyu oil layer in Daan oilfield[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(2): 379 – 387. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] ZHANG Jiong, MA G D, MING R P, et al. Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 468 – 478.
- [17] WEN F S, FAN H F, ZHAI S T, et al. Pore characteristics analysis and numerical seepage simulation of antifreeze permeable concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255: 119310.
- [18] 董辉, 罗潇, 李智飞. 堆积碎石土细观孔隙空间特征对其渗透特性的定量影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1367 – 1375. [ DONG Hui, LUO Xiao, LI Zhifei. Quantitative influence of mesoporosity space features of aggregate gravel soil on its permeability characteristics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1367 – 1375. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 陈勋, 尹升华, 严荣富, 等. 渗流作用下风化壳淋积型稀土矿细观孔隙结构演化特征 [J]. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1283 – 1294. [ CHEN Xun, YIN Shenghua, YAN Rongfu, et al. Evolution characteristics of mesoscopic pore structure of weathered crust elutiondeposited rare earth ore under solution seepage[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(10): 1283 – 1294. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] FONSECA J, SIM W W, SHIRE T, et al. Microstructural analysis of sands with varying degrees of internal stability[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(5): 405 – 411.
- [21] WEI Yani, FAN Wen, YU Bo, et al. Characterization and evolution of three-dimensional microstructure of Malan loess[J]. *Catena*, 2020, 192: 104585.
- [22] AN Ran, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei, et al. Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(3): 851 – 860.
- [23] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1133 – 1140. [ LIANG Yue, DAI Lei, WEI Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1133 – 1140. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 张刚. 管涌现象细观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007. [ ZHANG Gang. Researches on meso-scale mechanism of piping failure by means of model test and PFC numerical simulation[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 谢定松, 蔡红, 魏迎奇, 等. 应力状态下覆盖层不良级配砂砾石料渗透稳定特性试验研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(增刊2): 446 – 450. [ XIE Dingsong, CAI Hong, WEI Yingqi, et al. Experimental study on the seepage stability characteristics of poor gravel overburden under stress [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(Sup 2): 446 – 450. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. [ LIU Jie. The stability and control of seepage of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992. (in Chinese) ]
- [27] 王韦, 沈景中. 砂土渗透变形(管涌)的研究 [M]. 南京: 南京水利科学研究院, 1964. [ WANG Wei, SHEN Jingzhong. Research on seepage deformation of sand and gravel soil (piping)[M]. Nanjing: Nanjing Institute of Water Conservancy, 1964. (in Chinese) ]
- [28] 徐国建, 沈扬, 刘汉龙. 孔隙率、级配参数对粉土双轴压缩性状影响的颗粒流分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3321 – 3328. [ XU Guojian, SHEN Yang, LIU Hanlong. Analysis of particle flow for impacts of granular parameters and porosity on silt's properties under biaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3321 – 3328. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 尹升华, 陈勋, 刘超, 等. 矿石颗粒级配对堆浸体系三维孔隙结构的影响 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 972 – 979. [ YIN Shenghua, CHEN Xun, LIU Chao, et al. Effects of ore size distribution on the pore structure characteristics of packed ore beds[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(8): 972 – 979. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] LIN Ke, TAKAHASHI A. Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(4): 713 – 730.