

DOI: 10.11779/CJGE201804020

# 粗粒土渗透变形特性的细观数值试验研究

蒋中明<sup>1,2</sup>, 袁 涛<sup>3</sup>, 刘德谦<sup>1</sup>, 李小凡<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;  
3. 湖南平江抽水蓄能有限公司, 湖南 平江 410400)

**摘要:** 为深入探究渗透变形对粗粒土渗透特性的影响, 基于室内粗粒土渗透变形物理试验成果分析, 利用颗粒流软件PFC3D对粗粒土的渗透性演化全过程进行细观数值仿真试验。数值试验研究成果表明: 随着试验水头升高, 试件中的细小颗粒从渗流“上游区”向“下游区”逐渐迁移、汇聚, 形成渗透挤密区; 渗透挤密现象的产生导致试件整体渗透系数减小; 随着试验水头持续升高, 渗透挤密区中的细颗粒在不断增加的渗透力作用下随水流被陆续带出, 渗透系数逐渐增大。颗粒迁移导致原有孔隙增大, 土骨架结构发生变化, 进而导致粗粒土渗透性越来越大, 最终形成渗透变形现象。细观数值试验方法可以较好地再现粗粒土的渗透变形过程。

**关键词:** 粗粒土; 细观数值试验; 渗透变形; 渗透性演化

中图分类号: TU 443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0752-08

作者简介: 蒋中明(1969-), 男, 博士后, 教授, 主要从事岩土工程及水工结构工程方面研究工作。E-mail: zzmmjiang@163.com。

## Mesoscopic numerical tests on seepage failure characteristics of coarse grained soils

JIANG Zhong-ming<sup>1,2</sup>, YUAN Tao<sup>3</sup>, LIU De-qian<sup>1</sup>, LI Xiao-fan<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China; 3. Hunan Pingjiang Pumped Storage Co., Ltd., Pingjiang 410400, China)

**Abstract:** To deeply explore the influences of seepage failure on permeability feature of coarse grained soils, based on the analysis of indoor experiment results of seepage failure tests on coarse grained soil samples, the software named PFC<sup>3D</sup> is employed to simulate the whole process of seepage failure with similar test situation. The research results show that the fine particles in the samples migrate from “upstream” to “downstream” location with the increment of water head. The fine particles are gathered at the downstream location of the seepage path in the test samples and the compaction area is formed due to seepage. The phenomenon of seepage compaction induces the decrease of permeability of the test samples. Under the action of the increasing water head, the fine particles in the compaction area migrate out of the samples with seepage water. The coefficient of permeability also increases gradually. The porosity of the test samples becomes large due to the loss of the fine particles. The skeleton structure of the soil test samples is also changed. This is the reason for the increase of permeability of the coarse grained soils due to seepage. When a larger mount of the particles are brought out of the soil samples, the phenomenon of seepage failure is then formed. It is also indicated that the mesoscopic numerical test method can recreate the process of seepage failure reasonably.

**Key words:** coarse grain soil; mesoscopic numerical test; seepage failure; seepage evolution

## 0 引言

粗粒土以较小的压缩性以及较高的抗剪强度和承载力, 在土石坝筑坝材料和道路工程中被广泛应用。但由于其黏结性和抗渗性较弱, 土颗粒容易在渗流的作用下而流失, 形成渐进性的渗透变形现象<sup>[1]</sup>。在这个复杂的水土相互作用过程中, 由于细颗粒流失而造成

土体细观结构和力学特性的改变, 增大土体的孔隙率和渗透系数, 降低土体的抗剪强度和稳定性<sup>[2-4]</sup>。如果不及时采取相应的防范措施, 极易发生地基渗透变形,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778070); 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金项目(2013001)

收稿日期: 2016-12-28

造成工程失事等灾害。

为了研究粗粒土渗透变形规律, 利用物理试验研究土体渗透变形特性是当前国内外科研人员的主流方法, 并由此得出许多重要的结论。Tomlinson等<sup>[5]</sup>、Chang等<sup>[6]</sup>通过室内渗透试验研究了应力状态对无黏性砂土渗透变形的影响。罗玉龙等<sup>[7]</sup>利用新型接触剪切渗透仪尝试性地研究了应力状态对粗粒土抗渗强度的影响。目前, 土体渗透变形过程的物理试验基本停留在对试件表面现象变化的观察与分析层面, 试件内部结构的变化只能利用CT扫描追踪, 难以对单个颗粒或某一横断面的参数变化进行记录, 且试验难度大, 试验结果也倾向于对渗透规律的宏观认知, 对试件渗透变化的细观过程认识难度大。

目前, 越来越多的科研人员采用数值模拟方法来探索渗透变形的细观机理。周健等<sup>[8]</sup>利用PFC<sup>2D</sup>模拟不同水压作用下渗流引起的砂土特性变化全过程, 并证明了该数值理论在模拟复杂的水土作用过程是可行的。吴凤元等<sup>[9]</sup>利用PFC<sup>3D</sup>对不同颗粒摩擦系数下的无黏性颗粒进行渗流变形的数值模拟, 结果表明无黏性土的渗流临界梯度随颗粒摩擦系数增大而增大。

本文在已完成的物理试验基础上, 基于PFC<sup>3D</sup>的流固耦合理论, 采用CFD计算技术, 对渗透变形试验物理过程进行细观数值模拟, 开展粗粒土渗透变形细观过程数值试验研究, 为粗粒土地基渗透变形的细观机理研究提供有效的参考手段。

## 1 细观数值分析基本原理

粗粒土颗粒在渗透力的作用下产生运动趋势, 当作用在土体颗粒上的渗透力大于颗粒之间摩擦力时, 且颗粒附近存在可供迁移的空间时, 该颗粒将发生移动, 位置随之改变。基于细观力学的PFC<sup>3D</sup>软件可以较好地反映土颗粒在渗透力作用下的迁移机制。

在PFC<sup>3D</sup>中, 固体骨架(颗粒)在渗透力的作用下发生变形或移动。渗透力作为体积力施加在固体颗粒上。为求得作用在颗粒上的体积力, PFC<sup>3D</sup>首先需要计算渗流场, 进而求渗透力计算所需的水力梯度(压力梯度)。PFC<sup>3D</sup>在求解渗流场时, 将流体和固体均当作不可压缩介质, 流体质量守恒方程(连续方程)采用如下形式进行描述,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -(\nabla \cdot n \mathbf{u}) \quad , \quad (1)$$

式中,  $n$  为孔隙率,  $t$  为时间,  $\mathbf{u}$  为流体速度矢量,  $\nabla$  为梯度算子。

渗流本质是流体在孔隙介质中发生运动。PFC<sup>3D</sup>中描述流体运动的运动方程( Navier-Stokes方程)<sup>[10]</sup>形式如下,

$$\frac{\partial(n \mathbf{u})}{\partial t} = -(\nabla \cdot n \mathbf{u} \mathbf{u}) - \frac{n}{\rho_f} \nabla p - \frac{n}{\rho_f} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + n \mathbf{g} + \frac{\mathbf{f}_{\text{int}}}{\rho_f} \quad , \quad (2)$$

式中,  $p$  是流体压力,  $\mathbf{u}$  为流体绝对流速矢量,  $\boldsymbol{\tau}$  为黏滞应力张量,  $\rho_f$  为流体密度,  $\mathbf{g}$  是重力加速度矢量,  $\mathbf{f}_{\text{int}}$  为单位体积内颗粒与流体的相互作用力。

如图1所示, 流体单元体积  $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ , 假定流体单元中含有  $n_p$  个球颗粒, 则流体单元内的孔隙率为

$$n = 1 - \frac{1}{\Delta V} \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{n_p} d_{p_i}^3 \quad , \quad (3)$$

式中,  $d_{p_i}$  为第  $i$  个颗粒的直径。

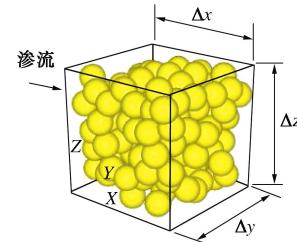


图1 渗流示意图

Fig. 1 Sketch of seepage flow

单个土颗粒受到作用力的一般表达式为

$$\mathbf{f}_{d_{ij}} = -\left(\frac{f_{\text{int}_j}}{1-n} + \nabla p_j\right) \frac{\pi}{6} d_{p_i}^3 \quad . \quad (4)$$

对于稳定无分叉流, 假设颗粒流体之间的相互作用力只来自于压力梯度, 有

$$f_{\text{int}_j} = n \nabla p_j \quad . \quad (5)$$

假定渗流只沿着  $x$  轴方向发生, 考虑流体单元中所有土颗粒在渗流方向上的力学平衡时, 固体颗粒受到的作用力总和为

$$f_{d_{\text{sum}}} = \sum_{i=1}^{n_p} f_{d_{ix}} = -\left(\frac{f_{\text{int}_x}}{1-n} + \frac{dp}{dx}\right) \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{n_p} d_{p_i}^3 \quad . \quad (6)$$

当雷诺数为  $1 \sim 10$  的层流<sup>[11]</sup>时, 其压力梯度方程为

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu_f \rho_f}{\kappa} u_{x0} \quad , \quad (7)$$

式中,  $\mu_f$  和  $\rho_f$  分别为流体的黏滞系数和密度,  $u_{x0}$  为  $x$  方向的渗透流速,  $\kappa$  为渗透率。渗透率  $\kappa$  可由孔隙率  $n$  和土体平均粒径  $\bar{d}_p$  给出, 表达式如下<sup>[12]</sup>,

$$\kappa = c \frac{\bar{d}_p^{-2} n^3}{(1-n)^2} \quad , \quad (8)$$

式中,  $c$  为常数, 其值为  $0.003 \sim 0.055$ 。

对于雷诺数大于  $10$  的紊流, 水力梯度采用下式进行计算<sup>[13]</sup>:

$$\frac{dp}{dx} = -\left(150 \frac{(1-n)^2}{n^3 \bar{d}_p^{-2}} \mu_f \rho_f u_{x0} + 1.75 \frac{(1-n)}{n^3 \bar{d}_p} \rho_f u_{x0}^2\right) \quad , \quad (9)$$

式中,  $u_{x0}$  为孔隙介质流体渗透流速, 与流体实际速

度关系为  $u_x = u_{x0}/n$ 。

孔隙介质中流体的真实渗透流速实际上是固体骨架(颗粒)移动速度与流体速度之差, 即颗粒与流体之间相对速度  $u_{rx} = v_x - u_x$  ( $v_x$  为土颗粒在  $x$  方向的平均速度)。由于PFC<sup>3D</sup>中可以分别计算颗粒速度和流体速度, 故可将相对速度替换式(9)中的渗透流速, 从而得到压力梯度表达式如下<sup>[14]</sup>:

$$\frac{dp}{dx} = \left( 150 \frac{(1-n)^2}{n^2 d_p^2} \mu_f \rho_f + 1.75 \frac{(1-n)}{n^3 d_p} \rho_f |v_x - u_x| \right) (v_x - u_x), \quad (10)$$

式中,  $\bar{v}_x$  为颗粒在  $x$  方向的平均速度。

当局部区域出现  $n \geq 0.8$  的情况时, 压力梯度采用如下计算式<sup>[15]</sup>:

$$\nabla p_j = \frac{3}{4} \rho_f C_D \frac{(1-n)n^{-2.7}}{d_p} |v_j - u_j| (v_j - u_j), \quad (11)$$

式中,  $j = 1, 2, 3$ , 分别代表  $x, y, z$  3 个坐标轴。

式(11)中的系数  $C_D$  可由雷诺数计算, 即

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{24}{R_e} (1 + 0.15 R_e^{0.687}) & (R_e \leq 1000), \\ C_D &= 0.44 & (R_e > 1000). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

雷诺数的计算公式为

$$R_e = \frac{n |v_j - u_j| d_p}{\mu_f} \quad (13)$$

在PFC<sup>3D</sup>中, 流体网格目前只能采用正六面体, 如图2所示, 当对圆柱体计算模型进行分析时, 边界上的孔隙率会产生不同程度的误差。因此, 需要对边界网格的孔隙率进行修正, 其修正公式为

$$n_m = 1 - (1 - n)/R, \quad (14)$$

式中,  $n_m$  为修正后的孔隙率,  $R$  为系数, 对应图2中的  $a, b, c$  位置, 其取值分别为 0.975, 0.725 和 0.125。

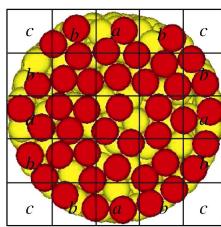


图 2 孔隙率分区修正示意图

Fig. 2 Sketch of porosity partition adjustment

## 2 物理试验简介与结果分析

### 2.1 物理模型简介

本试验是模拟渗透性演化的物理试验。图3为物理试验系统示意图。整套试验系统由垂直渗透仪、供水系统和测量系统组成。渗透仪采用透明的有机玻璃筒;

供水系统由水泵、供水管路、测压管路及压力调节阀门等组成; 测量系统包括测压管、流量计和百分表。将中、下测压管之间的部位视作上游I区, 中、上测压管之间的部位视作下游II区(图4)。

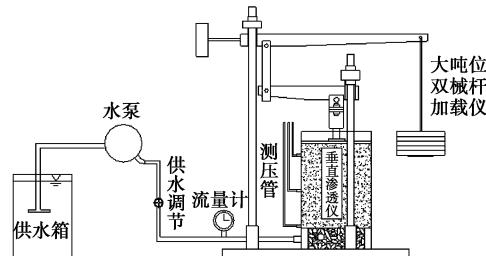


图 3 物理试验系统示意图

Fig. 3 Sketch of physical model

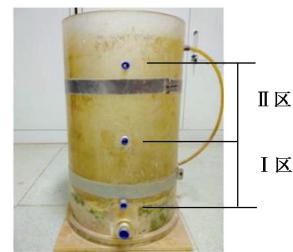


图 4 渗透仪分区示意图

Fig. 4 Sketch of permeameter partition

一般情况下, 工程上把  $C_u < 5$  的土看作是均匀土, 为了让试样更容易发生渗透变形现象, 为此配置土样时最好是不均匀土。按图5所示的颗粒级配曲线配制试样, 分层装料、夯实; 进行渗透试验, 记录试验过程中的数据和现象; 分析试验数据, 得出渗透变形规律。该级配试样  $d_{60}$  为 17 mm,  $d_{30}$  为 1.43 mm,  $d_{10}$  为 0.23 mm, 因此该级配不均匀系数为 73.91, 曲率系数为 0.52。

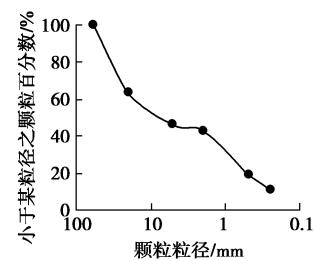


图 5 颗粒级配曲线

Fig. 5 Grading curves of particle

### 2.2 物理试验现象与结果简析

渗透试验初始阶段, 有机玻璃筒内水面清澈。缓缓增大水头, 试件表面局部有细砂缓缓从透水板圆孔中逸出, 水面呈现短暂浑浊后很快又重新恢复清澈; 继续增大水头, 透水板上局部透水孔出现冒水翻砂,

如图6。当供水水头逐级增高到一定水头高度后, 试件表面出现大面积涌砂, 随后出现沉降变形, 此时试件已经发生渗透破坏。试验过程中, 渗透力对颗粒骨架的顶托作用导致试样整体缓缓抬升, 使得透水板向上移动。百分表示数也随着水头逐级增加而缓缓增大。



图6 渗透破坏现象

Fig. 6 Seepage failure

图7, 8分别为物理试验过程中, 孔隙率和渗透系数的变化过程曲线图。通过百分表测得每一级抬升变形量 $\Delta H_i$ , 利用 $e_i = e_0 - (\Delta H_i / H_0)(1 + e_0)$ 求得每抬升一次稳定后的孔隙比 $e_i$ 。在通过 $n_i = e_i / (1 + e_i)$ 换算成相应的孔隙率。其中,  $e_0$ 为初始孔隙比, 通过 $e_0 = [d_s(1+w)\rho_w]/\rho - 1$ 求得;  $d_s$ 为土粒相对密度, 取2.67;  $\rho_w$ 为水密度, 值为 $1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho$ 为土颗粒平均密度, 经过计算为 $1898.527 \text{ kg/m}^3$ ;  $w$ 为含水率, 配样时给定为0.015。 $H_0$ 为试样初始高度31.2 cm。同时, 根据3个部位测压管的水头, 分别计算上、下半部分以及整体试样的水力梯度, 然后通过达西定律 $K = q/(A_i)$ 求得相应部分的渗透系数。

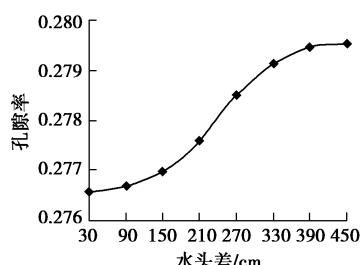


图7 物理试验孔隙率变化过程曲线

Fig. 7 Variation process of porosity in physical tests

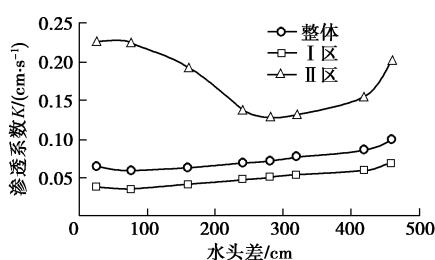


图8 物理试验渗透系数变化过程曲线

Fig. 8 Variation process of coefficient of permeability in physical tests

如图7所示, 试件整体的孔隙率随水头持续增大。这是因为试验过程中, 细颗粒持续流失, 导致孔隙不断增大。图8中, 初始状态下上游I区渗透系数较下游II区小。其可能原因是试件制作时采用上下分层装填夯实法, 致使下部试件较上部更密实, 导致试件上、下半部分初始渗透系数存在差异性。

在试验过程中, 整体渗透系数前期略有减小过程, 后期缓缓增大。下游II区渗透系数前期减小, 后期又增大。而上游I区在整个过程中渗透系数都在增大。产生这种现象的原因: 试验前期细颗粒大量迁移到试件的上半部分, 导致II区出现具有渗透挤密现象(图10), 导致下游II区变得更密实, 后期水头增大, 将渗透挤密区冲破, 颗粒大量流失, 孔隙增大, 渗透系数也增大, 由于细颗粒含量多, 渗透挤密效应地明显, 试件整体渗透系数也略有降低, 而上游I区在整个过程中颗粒不断地流失, 使得该区孔隙一直在增大, 渗透系数也一直增大。

图9为物理试验中3部分水力梯度与供水水头的变化过程曲线。可以看出上半部分的水力梯度小于下半部分, 整体的水力梯度介于两者之间。

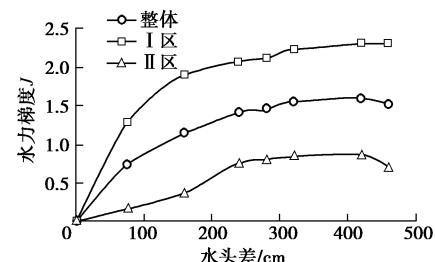


图9 水力梯度变化过程线

Fig. 9 Variation process of hydraulic gradient

### 3 渗透变形数值试验过程

#### 3.1 数值模型建立与边界条件赋值

为了全面认识粗粒土的渗透变形特性, 建立如图11所示渗透变形细观数值计算模型。数值试件为直径5 cm、高度11 cm的圆柱体。

不均匀系数用于反映颗粒的均匀程度。但由于物理试验级配 $d_{60}$ 与 $d_{10}$ 颗粒粒径相差极大, 其不均匀系数较高, 如果数值试验中, 配置与物理试验试件相同不均匀系数的试样, PFC<sup>3D</sup>程序生成的颗粒过多, 计算工作量太大。因此, 数值模型采用与物理试验试件的级配曲线形态相同的曲率系数0.52, 以及不均匀系数取5.5作为数值计算模型生成的控制参数。计算模型生成球颗粒总数为1793个, 其中最大粒径为12 mm, 最小粒径为2 mm。该级配试样 $d_{60}$ 为11.3 mm,  $d_{30}$ 为3.6 mm,  $d_{10}$ 为2.2 mm。



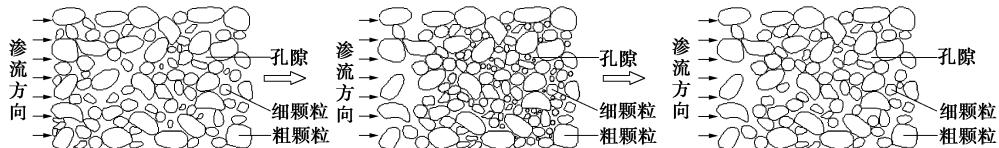
图 10 渗透挤密示意图<sup>[3]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of seepage extrusion

表 1 数值模型相关参数

Table 1 Related parameters of numerical model

球体				流体				墙体(底、线)				墙体(侧)			
密度	法向刚度	切向刚度	摩擦系数	初始孔隙率	密度	黏滞系数	法向刚度	切向刚度	摩擦系数	法向刚度	切向刚度	摩擦系数	法向刚度	切向刚度	摩擦系数
2650	$1.5 \times 10^7$	$2.5 \times 10^6$	0.5	0.38	1000	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^9$	$2.5 \times 10^8$	0.3	$1 \times 10^8$	$2.5 \times 10^7$	0.3			

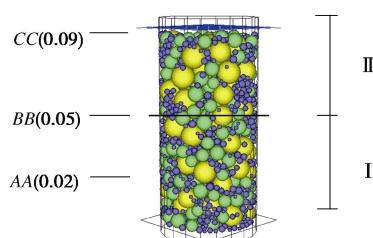


图 11 数值试件示意图

Fig. 11 Sketch of numerical sample

生成试件时采用半径放大法,先将颗粒半径以一定比例缩小后放入容器中,再按原比例放大以得到给定初始孔隙率的完整试件。表1为该固体颗粒模型的相关参数。模型顶面是由线墙组成的滤网状结构,目的是防止粗颗粒逃逸,给细颗粒留有出路。

PFC<sup>3D</sup>流体计算网格与颗粒受力分析模型相互独立,因此,数值试验需要生成流体计算网格。整个模型共生成了250个( $5 \times 5 \times 10$ )流体单元,每个单元尺寸为 $0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m} \times 0.01 \text{ m}$ 。

进行流体计算之前,先进行边界条件的设定。设置顶面( $z=0.1 \text{ m}$ )压力边界恒为0 kPa,底面( $z=0$ )压力边界由1 kPa逐级增大至4 kPa,每次增大0.1 kPa(待测压管压力稳定后方可增大),使得上下边界形成压力差,水流由底部向上缓缓流动形成渗流。设置侧圆柱面为滑动边界(边界流速不为0)。

沿渗流方向将流体单元分成两个区域(图11),也分别视作渗流路径的上游I区和下游II区。监测两部分和试件整体的体孔隙率及渗透系数的变化情况。同时为了验证该方法的有效性,在AA剖面( $z=0.02 \text{ m}$ )、BB剖面( $z=0.05 \text{ m}$ )、CC剖面( $z=0.09 \text{ m}$ )位置处分别放置测量圆监测该剖面的面孔隙率变化情况,测量圆的半径等于圆柱体半径。

### 3.2 试验过程与结果分析

#### (1) 试件饱和

由于PFC<sup>3D</sup>软件中流体模块的局限性,试件只能

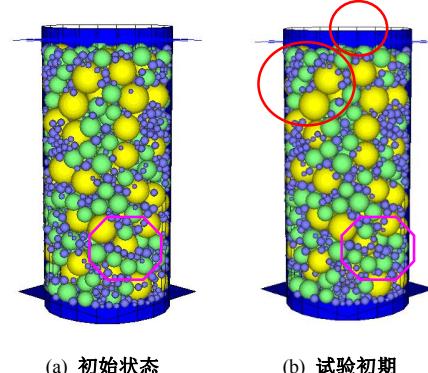
直接由饱和阶段开始进行,而压力边界施加的瞬时性,会让局部压力突然变得非常大,致使颗粒立刻被冲破,而导致数值试验失真。因此数值试验的饱和过程需要利用fish语言先将所有颗粒固定,然后直接进行流固耦合计算,待试件中压力稳定后,方可解除颗粒固定状态,进行渗透试验。

#### (2) 数值试验颗粒迁移过程现象分析

图12为数值试验过程中记录的各阶段试验现象。数值试验压力水头小时,颗粒处于相对稳定状态,缓缓增大压力水头,底部出现细颗粒小幅度运动现象,如图12(a)、(b)所示。

随着试验水头的进一步增大,更多的细颗粒在渗透力作用下开始向上移动(如图12(b)、(c)),试件顶面处出现细粒跳动现象,同时,部分细颗粒在试件渗透顶板下积聚;数值试验过程中,利用编写的fish代码对超出试样筒顶部边界线的细颗粒进行删除,以免在试件顶面处出现大面积颗粒散乱堆积的现象。对删除的颗粒进行记录并作为颗粒流失统计量。在试件内部部分颗粒发生迁移后,骨架结构局部发生变化,孔隙空间增加。

继续增大水头,试件中越来越多的细颗粒在渗透力的作用下从内部被水流带出试件,发生更大范围的颗粒流失。试件骨架结构变得更加“疏松”(图12(d)),同时,试件颗粒骨架出现重构。



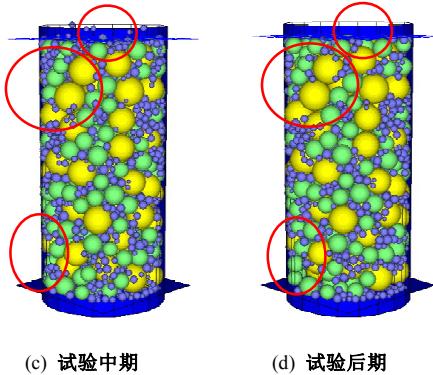


图 12 数值试验渗透变形现象

Fig. 12 Seepage failure behavior in numerical tests

### (3) 渗透性演化特性分析

图13为上下游及整体部分的水力梯度与压力水头的变化关系曲线。由图13可知, 数值试验中试件在渗流路径的不同部位水力梯度同样存在差异, 与物理试验得到的现象和规律相同: 即 I 区的水力梯度大于整体, 而 II 区水力梯度较整体偏小。

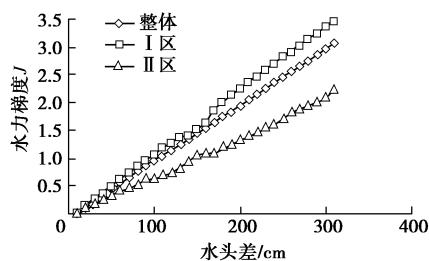


图 13 水力梯度变化过程线

Fig. 13 Variation process of hydraulic gradient

图14(a)为数值试验过程中不同部位的体孔隙率变化过程曲线, 孔隙率由式(3)、(14)联合求得。由图可知, 试验初期, I 区孔隙率要小于 II 区孔隙率, 这说明在重力作用下平衡后, 试件下半部分要较上半部分更密实, 这与物理试验是相符的。试验前期, 上游 I 区孔隙率增大明显, 下游 II 区孔隙率显著减小。试验中期, 上游 I 区孔隙率增大趋势出现了明显滞缓的情况, 甚至略有降低, 而下游 II 区孔隙率由减小趋势变成增大趋势。试验后期, I 区和 II 区孔隙率经过较小波动后呈缓缓增大趋势。整个过程中, 整体孔隙率一直表现为缓缓增大。

图14(b)为测量圆监测位置的面孔隙率变化曲线。可以看出试件底部AA剖面面孔隙率存在增大过程, 说明试验中位于该截面处存在大量细颗粒流失现象, 导致孔隙增大明显。位于试件上部CC剖面处面孔隙率存在减小过程, 说明试验中试件其它部位的细颗粒在渗透力作用下迁移填充到该截面处, 导致孔隙减小。而位于试件中部BB剖面处的面孔隙率出现较小的波动, 说明该

截面上存在细颗粒的流失和补充现象, 总体上该位置处的孔隙率变化较小。测量圆监测得出的数据说明, 试验中发生了颗粒在不同截面中穿梭的现象。

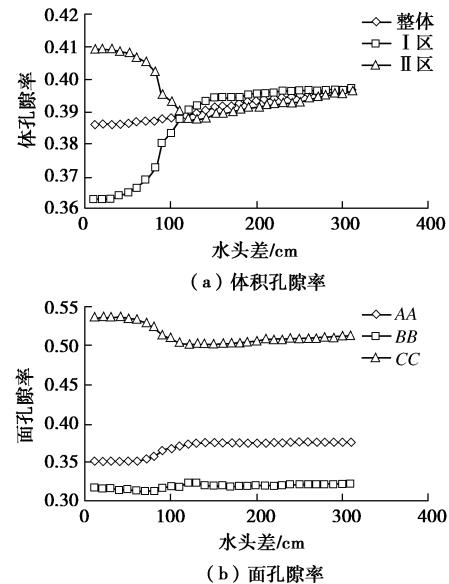


图 14 孔隙率变化曲线

Fig. 14 Variation process of porosity in numerical tests

图15为数值试验渗透系数变化过程曲线, 通过式(8)中得出渗透率, 再通过渗透率与渗透系数的关系式  $K = \kappa \gamma / \mu$ , 转换成渗透系数。

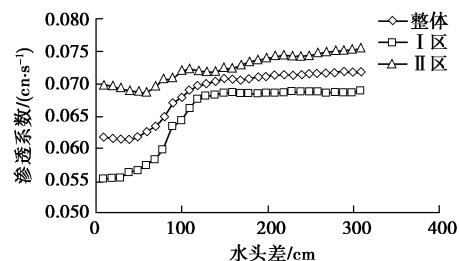


图 15 数值试验渗透系数变化曲线

Fig. 15 Variation process of coefficient of permeability in numerical tests

由图15可知, 试验前期, 上游 I 区渗透系数呈增大趋势, 且数值增大明显, 而下游 II 区呈先减小后有增大趋势。这是因为初期 I 区细颗粒向 II 区迁移, 导致 I 区孔隙增大, 渗透系数增大。迁移的细颗粒大量填充到 II 区, 使得 II 区发生渗透挤密效应, 渗透系数减小; 试验中期, 试件不同部位出现细颗粒迁移流失和填充现象; 试件细观颗粒组成在渗透力和重力共同作用下, 孔隙结构出现了重构, 使得 I 区孔隙增大趋势放缓, 渗透系数增大趋势也明显降低。下游 II 区随着水头增大, 渗透挤密区被冲破, 导致颗粒流失量增

大, 孔隙增大, 渗透系数也随之增大; 试验后期, 粗细颗粒组重构后, 结构趋于稳定, 渗透系数变化较小。试件整体渗透系数在前期变化较小, 中后期变化过程与 I 区相似。这说明整体渗透系数前期同样受到了渗透挤密效应影响, 渗透系数也略有降低。渗透挤密区逐渐被冲破后, 渗透系数增大明显, 后期结构重组稳定后, 变化较小。

图 16 (a)、(b)、(c) 为 3 个颗粒在渗透变形过程中的迁移路径图。图中坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示记录点的空间位置。图中不同点的位置代表同一颗粒在不同时刻所处的位置。由图可知, 颗粒在试件内部迁移路径是不规则的, 具有随机性。

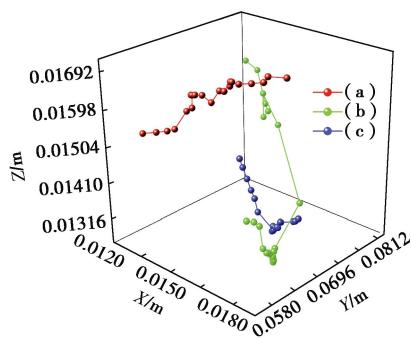


图 16 颗粒迁移路径图

Fig. 16 Particle migration paths

### 3.3 讨 论

通过对对比物理试验与数值试验现象和结果, 不难发现, 粗粒土孔隙率和渗透系数的变化过程存在较高的相似性。在数值试验的前中期, 整体孔隙率的逐渐增大, 上游 I 区和整体渗透系数的一直增大, 下游 II 区渗透系数的先减小后增大, 这些参数的变化过程与物理试验结果基本一致。这说明在数值模型中分区得到的孔隙率和渗透系数变化情况, 可以较好地再现物理试验中颗粒迁移形成渗透性演化以及颗粒重组形成渗透挤密区等细观现象, 细观数值分析方法可以作为渗透变形机理的有效研究手段。

物理试验与数值试验同时解释了粗粒土在非稳态渗流过程中出现渗透挤密现象, 这种现象对全面深入研究粗粒土坝基或堤基的渗透安全性具有重要的现实意义。对于渗透挤密效应的影响还需要进行全面深入研究。

目前数值试验所得出的规律虽与物理试验结果相互得到验证, 但是由于数值软件计算效率的缺陷, 未能对物理试验颗粒级配实值模拟。试验过程无法做到

高度还原, 都是本试验的不足之处, 也是接下来需要不断探索提升的方向。

## 4 结 论

利用离散元软件 PFC<sup>3D</sup>对粗粒土的渗透性演化物理过程进行数值模拟, 结果表明该方法对渗流作用下细观颗粒运动模拟效果良好。颗粒迁移造成土颗粒结构变化形成渗透变形, 对粗粒土孔隙率以及渗透系数等参数都有不同程度的影响。研究结果如下:

(1) 通过流体模块分区记录孔隙率与渗透系数的变化过程, 清楚地表达了颗粒在渗流过程中的迁移趋势, 且数值模拟结果与物理试验结果高度吻合, 说明该方法在模拟粗粒土渗透变形过程中具有实际意义。

(2) 数值试验过程中较好地再现了细颗粒在渗透力的作用下离开骨架形成渗透变形过程, 迁移过程中又汇聚在密集区形成渗透挤密区等细观机理。

### 参 考 文 献:

- [1] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (LIU Jie. Theory and engineering experience of seepage controlling for rock and soil dam[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 46–50. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Theoretical analysis on piping development of levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 46–50. (in Chinese))
- [3] 蒋中明, 王为, 冯树荣, 等. 粗粒土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1498–1505. (JIANG Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, et al. Experimental study on the relevance between stress state seepage failure of sandy-gravel soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12): 1498–1505. (in Chinese))
- [4] 蒋中明, 王为, 冯树荣, 等. 应力状态下含黏粗粒土渗透变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 98–104. (JIANG Zhong-ming, WANG Wei, FENG Shu-rong, et al. Experimental study on influence of stress state on seepage failure characteristics of coarse grained soil with cohesive particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 98–104. (in Chinese))

(下转第 706 页)