

文章编号: 1672-3031(2020)03-0178-08

不良级配粗粒土渗透变形的数值试验

朱 炳¹, 曹学兴², 李维朝¹, 邓 刚¹, 张延亿¹, 张茵琪¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要: 针对单一粒径粗粒组和细粒组混合而成的不良级配粗粒土, 采用计算流体力学与离散元耦合方法, 考虑孔隙水与固体颗粒的相互作用, 模拟了一定水力比降作用下的渗透变形过程, 研究了细粒的运动规律, 对比分析了初始细粒含量对渗透变形过程的影响。在水力比降作用下, 土样中细颗粒运移会经历两个阶段, 初期渗透压密, 运动速度较低, 之后随着渗透变形发展, 渗流通道和运移通道逐步开敞, 细颗粒运移速度加快。渗透变形发展过程中, 土样出水口和入水口位置细粒含量降低、局部水力比降减小, 而中部细粒含量增大、局部水力比降缓慢增加。当土样中初始细粒含量达到40%时, 土样中部细粒含量会提高, 并逐渐出现明显淤积层。土体渗透变形取决于整个渗径上的渗透稳定性, 土料自身颗粒粒径几何关系确定的内部稳定性不能完全表征土体的渗透稳定性。

关键词: 不良级配; 粗粒土; 渗透变形; 计算流体力学; 离散元; 耦合

中图分类号: TV641

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.03.003

1 研究背景

不良级配粗粒土的渗透变形是影响砂砾石面板堆石坝、砂砾石坝基等防渗安全的重要原因。我国唯一的高土石坝溃决案例, 即沟后混凝土面板砂砾石, 其溃坝过程即与坝体砂砾石的渗透变形存在密切联系^[1]。

近年来, 中国已建成一批高面板砂砾石坝, 如阿尔塔什^[2]、大石峡^[3]等, 此外, 也有不少高土石坝修建在砂砾石等粗粒土覆盖层坝基上, 例如泸定^[4]、瀑布沟^[5]、黄金坪^[6]、长河坝^[7]等, 渗透变形的控制对工程安全意义重大。对国内外土石坝溃决破坏事例的调研^[8-13]发现, 渗透破坏是引起土石坝溃决的两个主要原因之一。粗粒土渗透变形机理、过程及其影响因素的研究, 对于保证工程的建设、运行安全具有重要意义。

不少学者通过室内试验研究了总水力比降数值、土料密实度、颗粒级配等对渗透变形的影响机制^[14-20], 由于实际材料试验中难以监测颗粒运移、局部水力比降等细观现象, 数值试验成为渗透变形研究手段的重要补充, 常见的方法包括流固耦合有限元计算^[21-22]和离散元计算^[23-27]。与基于连续介质理论的有限元分析方法不同, 离散元方法可分析颗粒之间细观相互作用, 对于机理研究更为方便。本文利用离散元软件PFC3D, 并外接CFD流体求解器, 开展了不良级配粗粒料渗透变形过程的离散元(DEM)与计算流体力学(CFD)耦合计算。研究了细颗粒在渗流作用下的运动路径、速度, 对比了初始细粒含量对渗透变形过程的影响, 分析了渗透变形过程中土样内部的局部水力坡降、局部细粒含量等的分布, 研究了土体渗透稳定的变化规律。

收稿日期: 2020-01-11

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0404803); 华能集团项目(HNKJ17-H18); 中国水科院流域水循环模拟与调控国家重点实验室项目(SKL2018ZY09); 中国水科院基本科研业务费专项(GE0145B562017, GE0145B132019)

作者简介: 朱炳(1994-), 硕士生, 主要从事土石坝渗透变形数值模拟等研究。E-mail: zhubing538@163.com

通讯作者: 邓刚(1979-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土材料特性和数值模拟、水利水电工程安全与应急管理技术研究。E-mail: dgang@iwhr.com

2 流固耦合计算方法

CFD-DEM模型中对DEM和CFD模块进行交替迭代计算实现耦合。在实际计算中,DEM模块的计算时间步长一般会小于流体时间步长,本文计算中采用10个DEM模块计算步对应一个流体CFD计算步。

(1)CFD计算。CFD计算采用DEM计算提供的边界条件,如颗粒位置、孔隙率等,利用Navier-Stokes方程求解出孔隙流体的流场分布即各位置水流速度 v 和水力比降 i ,其中水力比降为水头 h 的梯度。

(2)DEM计算。DEM计算中,颗粒运移满足牛顿运动定律:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{f_{int} + f_c}{m} + g \quad (1)$$

式中: u 为颗粒运动速度; t 为时间; f_{int} 为单位体积内流体施加在颗粒表面的作用力; f_c 为作用在颗粒形心的其他作用力(与流体无关); m 为颗粒质量; g 为重力加速度矢量(重点反映水平方向渗流作用的影响,避免自重导致的竖向不均匀,此处 g 设置为零,不考虑颗粒重力)。

流体施加在颗粒表面的作用力,即流体—颗粒相互作用力 f_{int} 由两部分组成:拖曳力 f_d 和流体压力梯度力 f_p 。

由于拖曳力 f_d 作用于颗粒表面切线方向,在一定的分布下,拖曳力可能对颗粒产生旋转力矩。考虑各位置水流方向总体平行,颗粒平动是主要模式,为提高计算效率,本文分析中不考虑颗粒旋转,认为拖曳力合力作用于颗粒形心上。在PFC中拖曳力 f_d 被定义为^[28]:

$$f_d = \left(\frac{1}{2} C_d \rho_f \pi r^2 |u - v| (u - v) \right) n^{-\chi} \quad (2)$$

式中: C_d 为拖曳力系数; ρ_f 为流体的密度; r 为颗粒半径; v 为流体速度; u 为颗粒速度; n 为孔隙率; $n^{-\chi}$ 项是考虑局部孔隙率的经验系数。这个修正项使拖曳力同时适用于高孔隙和低孔隙系统,孔隙率 n 的计算采用多面体法。

流体压力梯度力 f_p 被定义为^[28]:

$$f_p = \frac{4}{3} \pi r^3 (\nabla p - \rho_f g) \quad (3)$$

式中: r 为颗粒半径; ∇p 为压力梯度; ρ_f 为流体的密度; g 为重力加速度矢量。

所以流体—颗粒相互作用力 f_{int} 为:

$$f_{int} = f_d + f_p \quad (4)$$

3 土料和数值模型

3.1 分析采用的土料 本文数值试验选用土料级配参考了铁梦雅^[29]所做缺级粗粒土渗透变形试验,为降低PFC模拟计算耗时,土料简化为由粗、细两种单一粒径粒组按一定比例混合而成,其中,粗粒组粒径 D_c 为1.5 mm,细粒组粒径 D_f 为0.2 mm,土料级配曲线如图1所示。土料粗细粒组粒径比 $D_c/D_f=7.5$ 。根据Terzaghi等建议的反滤准则或内部稳定判断准则^[30-33]($D_c/D_f > 4$),以及Kenney^[34-35]提出的准则($H/F < 1.0$)其中 F 为土体小于某特定粒径 d 对应的质量百分数, H 为粒径 d 和 $4d$ 之间的颗粒质量百分数,土料均属于内部不稳定土,细颗粒可以在渗透作用下被水从粗颗粒孔隙中带出,满足发生渗透变形的几何条件。

3.2 数值模型 数值模型建立分为4个主要步骤:墙体的生成、颗粒的生成、土样压实、流体网格的划分。

(1)墙体的生成。考虑颗粒的尺寸效应，墙体间距应超过最大粒径的5倍，本文共生成6个相互正交的墙体，形成一个深度为高度和宽度两倍的密闭长方体，其宽度和高度均为10 mm，深度为20 mm。

(2)颗粒的生成。生成试样时利用PFC软件自带FISH语言，采用膨胀法快速生成不同孔隙率，不同细粒含量的试样，最终生成试样参数见表1。为了更好观测细颗粒在土样中的迁移过程，本文将粗颗粒进行了固定。

(3)土样压实。颗粒生成后，顶部墙体以不超过0.1 mm/s的速度向下移动，其他墙体保持静止。在数值伺服机制的控制下，当监测到顶部墙体与颗粒集合之间的接触力大于允许值后，固定顶部墙体，然后，删除模型前后的墙体，作为进出水口。模型如图2所示，1-6为在模型中选出、专门追踪运动路径的颗粒。

(4)流体网格的划分。按照等宽度，将流体用网格进行划分，各方向划分的网格数量为 $6\times 12\times 6$ ，如图2所示。网格内的流体单元中，局部孔隙率假定在单元内均匀分布，并设置出水口压力保持为0，通过入水口与出水口的水压力差来给土样施加不同的水头。数值模型采用的具体计算参数见表2。

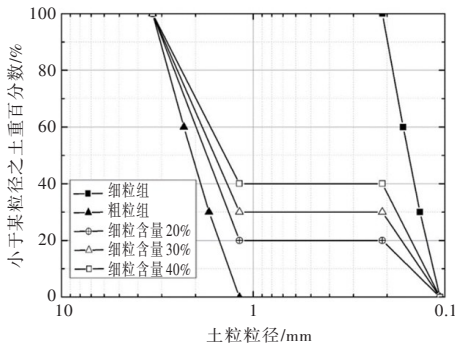


图1 颗粒级配曲线^[29]

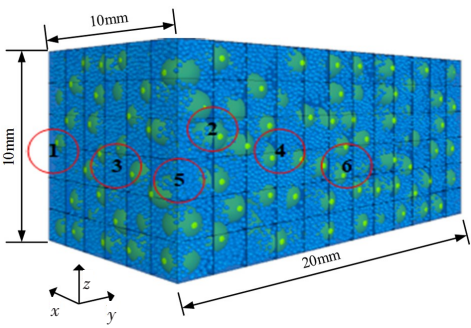


图2 计算模型示意图

表1 试验方案

编号	细粒含量/%	水头差/m	孔隙率	颗粒数
F20-D2	20	2	0.36	58658
F30-D2	30	2	0.36	87644
F40-D2	40	2	0.36	116629
F20-D2(2)	20	200	0.36	58658

表2 数值模型参数

参数	数值	参数	数值
颗粒密度/(kg/m^3)	2.6×10^3	颗粒间切向刚度/(N/m)	1×10^6
流体密度/(kg/m^3)	1×10^3	墙体摩擦系数	0.2
流体黏滞系数/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1×10^{-3}	墙体法向刚度/(N/m)	1×10^7
颗粒摩擦系数	0.2	墙体切向刚度/(N/m)	1×10^7
颗粒间法向刚度/(N/m)	1×10^6	DEM 模块时步/s	2×10^{-8}

4 试验结果及分析

为便于分析，本文将土样沿渗流方向即y轴方向均分为6个部分，从入水口到出水口分别为y1、y2、y3、y4、y5、y6部分，每个部分均包含 $6\times 2\times 6$ 个流体网格。

4.1 渗透变形发展过程分析 以F40-D2试样为例分别观察分析了计算的10万步、100万步、200万步、300万步时，土样内部的颗粒分布与迁移，图3为对应的纵剖面图(沿试样中心线、竖直向下)。

在试验开始阶段，土样中细颗粒分布较为均匀，位移较小；100万步时靠近出水端的细颗粒开始

明显流出,土样中细颗粒分布开始变得不均匀;200万步时有更多细颗粒被带出,部分粗颗粒后(下游侧)出现明显的空隙(见图3(c)中圈1、2部分),而部分粗颗粒前(上游侧)出现局部细颗粒堆积(见图3(c)圈3);300万步时,在土样中部可观察到一条细颗粒分布密集带,使前部细颗粒无法通过并到达土样下游侧,渗透变形发展趋于稳定。

Ke等^[36]对缺级无黏性土的渗透试验发现,细颗粒含量为37%时,细颗粒刚好填满土样中粗颗粒骨架所形成的孔隙,难于发生较大渗透变形。本数值试验中,初始(全局)细颗粒含量为40%,高于以上数值,随着试验进行,土样中部局部细粒含量有所提高,细颗粒较好充填了粗颗粒间的孔隙,导致局部出现“淤堵”现象,在土样中形成了一个相对弱透水带。

上述现象也说明,土料自身内部稳定性不完全确定于粗细粒组的粒径差异,也同时受到细粒含量的影响。实际上,由于细粒随渗透变形过程的运移和细粒含量的空间分布差异及变化,土体各位置的抗渗透变形能力也是动态发展变化的,土样整体的渗透稳定性受整个渗径上的抗渗能力影响,与土体中部分位置的细粒流失是不同的。而土体特定时刻的渗透稳定性,则更多决定于渗径上的“淤堵”段,也即承担比降最高的部分。

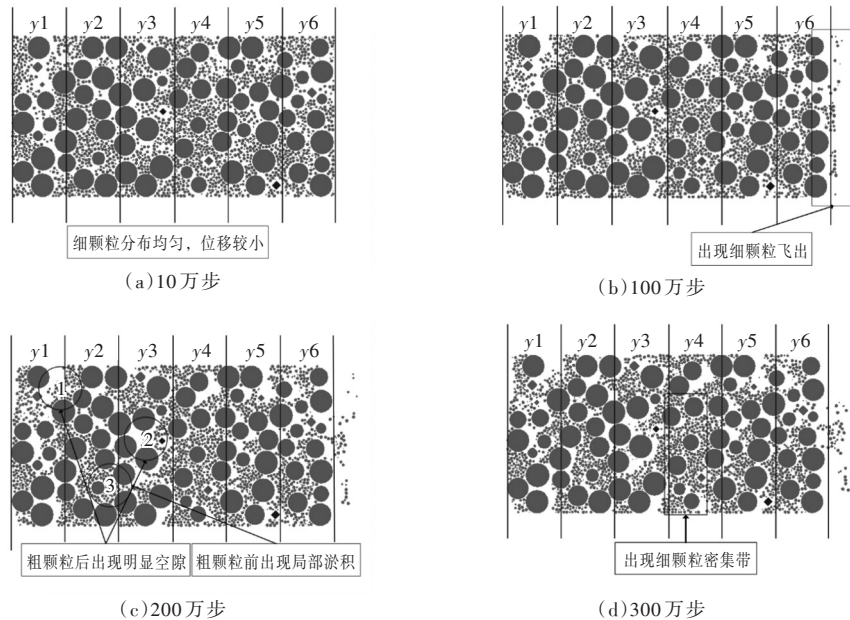


图3 F40-D2土样颗粒分布纵剖图

图4为F40-D2土样各部分水力参数随时间的变化。 y_1 和 y_6 部分土样,在试验开始阶段,细颗粒便在渗流的作用下逐步开始流失,最终在300万步时, y_6 部分细粒流失量达到35%, y_1 部分细粒流失量达到17%。相应的其局部孔隙率,在试验开始后就一直在快速增大,在试验结束时都达到了0.45以上,而其承担的水力比降却呈快速下降趋势。

土样中部 y_2 – y_5 部分局部孔隙率、细粒含量变化量较小, y_3 部分细粒含量甚至有所增加,这与纵剖图中观察到的细颗粒淤堵、密集分布带吻合。但是,由于土样两端承担水力比降下降较多,中间部分承担的水力比降随着试验发展逐步上升。由图4(d)可见,土样中部局部水力比升高、两端局部水力比降低的现象随着时间发展越来越明显。

对比F20-D2、F30-D2和F40-D2三个土样实验结果,F40-D2土样中该现象最明显,可见初始细粒含量越高,中部淤堵现象越容易发生。

铁梦雅^[29]开展的渗透变形试验中也观察到类似的中部局部水力比升高、两端局部水力比降低的现象。与此略有不同的是,本模拟 y_6 部分的细颗粒流失率较铁梦雅^[29]试验高,这可能是由于未在出水口设置多孔板所致。

从连续性上分析,在初始均匀分布的渗透比降作用下,中部和出口端细粒含量应较接近,且均

高于入口端细粒含量,因为入口端无细粒补给,而后续段均有细粒补给。在铁梦雅^[29]进行的室内试验和本数值试验均观察到上述出入口端细粒含量较低现象的原因,可能与多孔板在缺级配土料渗透稳定性上起到的作用异于土体有一定关系。本数值试验中未设置多孔板,出口端细颗粒易于流失;而铁梦雅^[29]进行的室内试验中设置了多孔板,因此,出口端细颗粒流失难度增大,但出口端细粒含量在后期仍低于试验中段。可以猜测,铁梦雅^[29]试验中采用的多孔板,在阻碍渗透变形的能力上仍弱于土料本身,这可能与多孔板的孔径、孔距,以及厚度(或仅采用了一块多孔板)存在关系。

上述分析也说明,如何保护细颗粒,避免其流失,仅采用滤材(或多孔板等)的孔径(常用细粒部分粒径来换算)是不够的,滤材的厚度,也是一个重要因素。

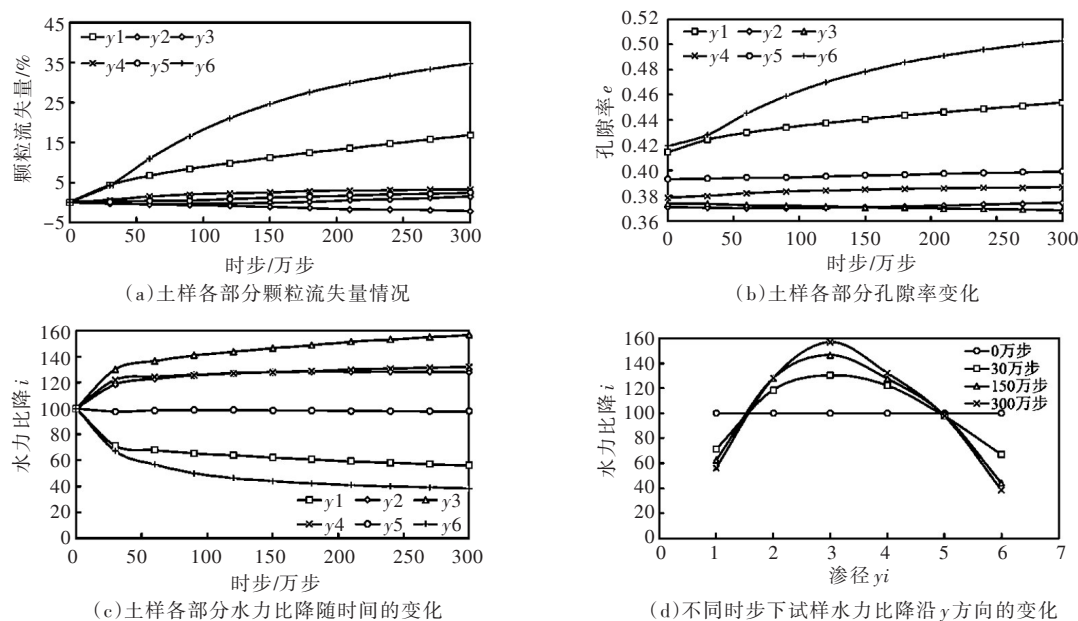


图4 F40-D2土样各部分水力参数随时间的变化

4.2 细颗粒在土样中的迁移 论文对渗透变形过程中细颗粒在土样中的迁移进行了研究。为了加快细颗粒的运动,以全程追踪细颗粒的运移过程,对土样施加了较高的水头差,如表1中F20-D2(2)方案。该方案中,数值试验结束时,除少数堵塞在大颗粒间隙中的细颗粒外,土样中绝大多数细颗粒均流出土体。

选择了特定初始位置的6个细颗粒进行了追踪,其初始位置如图2所示,6个细颗粒都在土样中部的水平平面内(竖向坐标 $Z=5\text{ mm}$),其中Ball 1, Ball 2位于土样左侧,靠近左侧墙体,Ball 3, Ball 4位于土样中部,Ball 5, Ball 6位于土样右侧,靠近右侧墙体。需要注意的是,Ball 1和Ball 2, Ball 3和Ball 4, Ball 5和Ball 6的 X 坐标并不完全相同,它们球心距离左侧墙体的距离大小排序为Ball 1 < Ball 2 < Ball 3 < Ball 4 < Ball 5 < Ball 6。

图5显示了6个颗粒从试验开始到结束的全部运动路径和速度,为更清晰显示粗颗粒及存在局部堵塞的细颗粒的位置,运动路径下叠放了300万步时(不是渗透试验刚开始的时刻,而是渗透变形数值试验已发展一段时间后的时刻)各颗粒所在竖向截面的颗粒分布立面剖视图,路径中的颜色表示运动速度,颜色越靠近红色,表示运动速度越快,越靠近蓝色表示运动速度越慢。

Ball 1、Ball 2、Ball 3、Ball 5总体呈现出起步时速度较慢,后期明显加快的规律。Ball 4由于局部淤堵,运动轨迹很短,Ball 6运动较为均匀。可能的原因是,试验开始阶段,细颗粒的移动主要来自于渗透比降带动下的渗透压密,越压密细颗粒运移速度越慢;之后,随着试验发展和出口端细颗粒的流失,颗粒运移的通道阻力逐步减小,后部细颗粒逐渐流失,土体中形成了稳定的渗流通道和细颗粒运移通道,前部的细颗粒才能顺畅的沿着渗流通道向后运动。

试验过程中还发现,靠近墙体的颗粒,运动较快,远离墙体的颗粒运动较慢,这可能是由于土样靠近墙体的部分局部孔隙率较高,所以产生了边壁优势流效应。

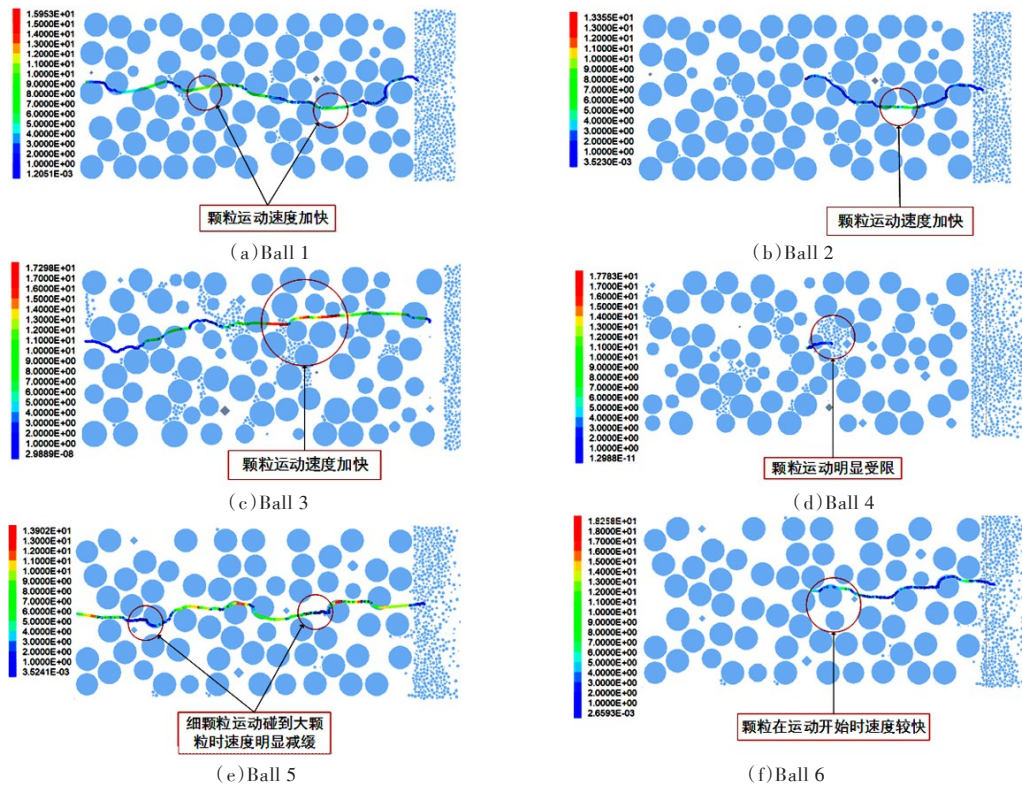


图5 各细颗粒运动轨迹在300万步时颗粒分布立面剖视图中的投影

5 结论

采用离散单元法和计算流体动力学耦合方法,建立了粗、细颗粒组混合而成的不良级配粗粒土渗透变形数值模型,从细观层面探究了渗透变形过程中细颗粒的运移规律。

(1)在一定水力比降作用下,土样中细颗粒运移会经历两个阶段,初期为渗透压密,土样整体运动速度较低,仅在靠近渗流出口部分细粒运动速度相对较快;后期随着渗透变形发展,渗流通道逐步开敞,土样中部和靠近入口处细颗粒运移速度加快。

(2)靠近墙体的颗粒,运动较快,远离墙体的颗粒运动较慢,与靠近墙体部分局部孔隙率较高、存在边壁优势流效应有一定关系。

(3)随着试验的发展,由于细颗粒运移、补充条件的空间差异,土样的局部水力比降逐步呈现出中间高两边低的情况,在密实度相同的情况下,细粒含量越大的土样,这种变化越快越明显。值得注意的是,当土样细粒含量达到40%时,土样中部观察到较为明显的淤积层。

(4)土体渗透变形取决于整个渗径上的渗透稳定性,土料自身颗粒粒径几何关系确定的内部稳定性不能完全确定土体的渗透稳定性,渗流出口的保护条件,在很大程度上也会影响渗透变形过程中土料细颗粒运移的空间分布规律。

参 考 文 献:

- [1] 刘杰,丁留谦,缪良娟,等.沟后面板砂砾石坝溃坝机理和经验教训[J].水利水电技术,1998,29(3): 4-9.
- [2] 汪洋,曲苓.阿尔塔什水利枢纽混凝土面板砂砾石堆石坝设计及主要工程特点[J].水利水电技术,2018, 49(S1): 1-6.
- [3] 陈生水,阎志坤,傅中志,等.特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J].岩土工程学报,2017,39(11):

- 1949–1958.
- [4] 李振学, 李明辉. 泸定水电站深厚覆盖层防渗墙施工技术[J]. 水力发电, 2012, 38(1): 50–53.
 - [5] 林江, 胡万雨, 孟凡理, 等. 瀑布沟大坝心墙拱效应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2031–2035.
 - [6] 魏祥, 李阳, 马鹏奎. 黄金坪水电站大坝防渗墙下基岩帷幕钻灌施工技术研究[J]. 四川水力发电, 2016, 35(2): 68–70, 75.
 - [7] 张丹, 何顺宾, 伍小玉. 长河坝水电站砾石土心墙堆石坝设计[J]. 四川水力发电, 2016, 35(1): 25–28.
 - [8] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 37(5): 1000–1024.
 - [9] ZHONG D, SUN Y, LI M. Dam Break Threshold Value and Risk Probability Assessment for an Earth Dam[J]. Natural Hazards, 2011, 59(1): 129–147.
 - [10] VAUGHAN P R, KLUTH D J, LEONARD M W, et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair[C]//Proc., the 10th International Congress on Large Dams, Q. 36–R. 5. Montreal, Canada 1970, 1: 73–93.
 - [11] 顾淦臣. 国外冰碛土心墙高土石坝的管涌事故: 兼论瀑布沟土石坝心墙料的选择[J]. 水电站设计, 2000, 16(2): 47–52.
 - [12] 刘杰. 八一水库溃坝原因分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004(3): 3–8.
 - [13] SHERARD J L. Sinkholes in dams of coarse, broadly graded soils[C]//Proc., the 13th International Congress on Large Dams, New Delhi 1979, 2: 25–34.
 - [14] 陈生水, 凌华, 米占宽, 等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 26–31.
 - [15] CLARK L A, WYNN T M. Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility: implications for erosion rate predictions[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(1): 95–106.
 - [16] MOFFAT R A, FANNIN R J. A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(4): 273–279.
 - [17] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. Geotechnique, 1994, 44(3): 449–460.
 - [18] 李维朝, 梁铎, 蔡红, 等. 堤坝帷幕灌浆效果评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(3): 214–218.
 - [19] 姚秋玲, 刘昌军, 丁留谦, 等. 堤基管涌微观机理模型试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(1): 1–7.
 - [20] 姚秋玲, 丁留谦, 刘昌军, 等. 堤基管涌破坏特性研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(4): 349–357.
 - [21] 周晓杰, 介玉新, 李广信. 基于渗流和管流耦合的管涌数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3154–3158.
 - [22] EL SHAMY U, AYDIN F. Multiscale modeling of flood-induced piping in river levees[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2008, 134(9): 1385–1398.
 - [23] 张国新. 多孔连续介质渗透压力对变形应力影响的数值模拟方法探讨[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 640–650.
 - [24] DE FRIAS LOPEZ R, SILFWERBRAND J, JELAGIN D, et al. Force transmission and soil fabric of binary granular mixtures[J]. Géotechnique, 2016: 1–6.
 - [25] YU WANG, JUNRUI CHAI, ZENG GUANG XU, et al. Numerical Simulation of the Fluid–Solid Coupling Mechanism of Internal Erosion in Granular Soil[J]. Water, 2020, 12, 137.
 - [26] 张忠云, 柴军瑞. 考虑围压衰减时管涌动态模型研究及数值计算[J]. 水电能源科学, 2008(4): 70–73.
 - [27] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2004, 41(8): 1329–1364.
 - [28] Itasca Consulting Group, Inc. PFC3D, Version 4.0[M]. Minneapolis, Minnesota, 2008.
 - [29] 铁梦雅. 土体渗透变形发展过程及其影响因素的试验研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
 - [30] TERZAGHI K. Soil mechanics: a new chapter in engineering science[J]. Institute of Civil Engineering Journal, 1939, 12(7): 106–141.
 - [31] KEZDI A. Soil physics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1979.

- [32] KOVACS G . Seepage hydraulics[M] . Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981 .
- [33] DEMELLO V F B . Some lessons learnt from dam engineering in Brazil[C]//PROC . 6th Reg . Conf . Afr . Soil Mech . Durban 2 . 1975: 285-304 .
- [34] KENNEY T C, CHAHAL R, CHIU E . Controlling constriction sizes of granular filters[J] . Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(1): 32-43 .
- [35] KENNEY T C, LAU D . Internal stability of granular filters[J] . Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(1): 215-225 .
- [36] KE L, TAKAHASHI A . Experimental Investigations on Suffusion Characteristics and its Mechanical Consequences on Saturated Cohesionless Soil[J] . Soils and Foundations, 2014, 54(4): 713-730 .

Numerical simulation of seepage deformation process in poorly-graded coarse soil

ZHU Bing¹, CAO Xuexing², LI Weichao¹, DENG Gang¹, ZHANG Yanyi¹, ZHANG Yinqi¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038; 2. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd, Kunming 650214)

Abstract: A CFD-DEM coupled method is applied for numerical simulation of seepage deformation process of poorly-graded coarse soil. The migration law of fine particles under the effect of seepage was studied and the influence of the initial fine particle content on the seepage deformation process was compared. The initial stage is seepage compression, and the migration speed of fine particles is relatively low. Then with the development of seepage deformation, the seepage channel gradually opens, and the migration of fine particles is accelerated. With the development of seepage deformation process, the fine particle content and local hydraulic gradient of soil samples near the outlet and inlet part decrease, while the fine particle content of the middle slowly increases. When the initial fine particle content reaches 40%, with the fine particle content in the middle of the soil sample increasing, silting layer gradually appears. The seepage deformation of soil depends on the seepage stability of the whole seepage paths, and the internal stability of soil materials can not completely determine the seepage stability of soil. Under the action of hydraulic gradient, the fine particle migration in soil samples will go through two stages.

Keywords: poorly grain-size distribution; coarse-grained soil; seepage deformation; CFD; DEM; coupling

(责任编辑: 耿庆斋)