

上覆粗粒土层对堤基管涌破坏的细观机制研究

黄海均¹, 毛海涛^{1,2}, 严新军¹, 侍克斌¹, 黄风¹

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056002)

摘要: 为了系统研究上覆粗粒土层对堤基管涌破坏的微观机制,采用 PFC3D 并结合“休止角标定法”对模型进行标定,快速、准确地建立了材料宏观参数与颗粒细观参数间联系,有效地模拟了粗粒土渗透变形的发展过程,获得了渗透变形的微观参数和运移规律。结果表明:上覆粗粒土层中细料含量为 10%、20% 时,在水压力作用下细颗粒在骨架颗粒间运动并发生流失,表现为管涌型破坏,且上覆粗粒土层中细料含量越少,细砂层越易破坏;当细料含量为 30% 时,管涌口附近土体发生流土型破坏,而后上覆粗粒土骨架颗粒与细砂层颗粒同步流失并逐步向上游发展,表现为管涌型破坏,整体颗粒流失呈现为过渡性渗透破坏;上覆粗粒土层为管涌型土时,上覆粗粒土骨架颗粒在水头压力作用下会发生快速沉降,上覆粗粒土层为过渡性土时,上覆粗粒土层初始没有发生下沉,在上覆土层发生流土破坏后,才逐渐开始下沉,且上覆粗粒土的沉降量随着上覆粗粒土骨架颗粒中细料含量的减少而增加。本研究在方法上可为三维颗粒流数值模拟中细观参数的标定提供一定参考,并揭示了上覆土层细颗粒含量对渗透变形的影响及颗粒微观运移规律。

关键词: 上覆粗粒土层; 管涌破坏; 颗粒流; 细料含量; 微观机制; 堤基

中图分类号:TV139.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)02-0147-08

Study on the meso-mechanism of piping damage to embankment foundation from overlying coarse grained soil layers

HUANG Haijun¹, MAO Haitao^{1,2}, YAN Xinjun¹, SHI Kebin¹, HUANG Feng¹

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056002, China)

Abstract: In order to systematically study the meso-mechanism of piping failure of embankment foundation caused by overlying coarse-grained soil layers, the PFC3D and angle of repose calibration method were used to calibrate the model. The relationship between macro-parameters of materials and meso-parameters of particles was established quickly and accurately. The development process of seepage deformation of coarse-grained soil was simulated effectively, and the meso-parameters and migration rules of seepage deformation were obtained. We found that when the fine material content in the overlying coarse-grained soil layer was 10% and 20%, the fine particles moved among the framework particles and lost under the action of water pressure, which was manifested as piping failure. The less the fine material content in the overlying coarse-grained soil layer, the more easily the fine sand layer is destroyed. When the fine material content was 30%, the flow-soil failure occurred near the piping mouth, and then the large particles of coarse-grained soil in the upper part and the fine particles of the fine sand layer lost synchronously and gradually developed upstream, resulting in piping failure, and the whole particle loss process presented transitional seepage failure. When the overlying coarse-grained soil layer was piping soil, the large particles of the upper coarse-grained soil had a rapid settlement under the action of head pressure. When the overlying coarse-grained soil layers were transitional soils, the initial subsidence of the overlying coarse-grained soil layers did not occur, and the subsidence of the overlying coarse-grained soil layers began gradually after the flow-soil failure occurred, and the

收稿日期:2019-08-27; 修回日期:2019-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51309262);重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjAX0673);重庆市教委2011 协同创新子课题(061500911)

作者简介:黄海均(1994-),男,重庆奉节人,硕士研究生,主要从事水岩耦合机理的研究工作。

通讯作者:严新军(1976-),男,新疆奇台人,硕士,副教授,硕士生导师,主要从事水利工程学科的教学与科研工作。

subsidence of the overlying coarse-grained soil increased with the decrease of the fine material content in the framework particles of the overlying coarse-grained soil. This study provides a reference for the calibration of meso-parameters in the numerical simulation of three-dimensional particle flow, and reveals the influence of the fine particle content in the overlying soil layer on seepage deformation and the migration law of particles.

Key words: overlying coarse-grained soil layers; piping failure; particle flow; fine material content; micro-mechanism; embankment foundation

1 研究背景

堤防失事因堤基发生管涌破坏而造成的约占 1/3 以上,管涌具有明显的溯源性,由渗流出口逐渐向上游扩延而形成渗流通道,作为渗流出口处的堤基上覆土层,其物理力学属性对管涌的发生至关重要,值得深入研究^[1]。

在管涌发生的条件机理研究方面,刘杰^[2]、沙金焯^[3]通过对土体颗粒进行受力分析,得到了许多发生管涌破坏的临界压力表达式;陈建生等^[4]利用有机玻璃砂槽开展双层堤基渗透破坏试验,详细讨论了双层堤基破坏时对上覆黏土层渗透破坏过程的影响;贾恺等^[5]利用自行研制的试验装置对双层堤基管涌通道扩展机制进行试验,结果表明,双层堤基管涌通道的扩展取决于通道内的冲刷水流、侧壁渗透力和砂粒条件等因素;倪小东等^[6]从细观角度揭示了非稳定流作用下管涌的发展过程及破坏规律;Ellmeijer 等^[7]和 Van Beek 等^[8]给出了单一砂层堤基上临界水头的理论解答;Shamy 等^[9]运用颗粒流方法,对水位上涨时堤基发生管涌破坏导致大坝出现较大位移的过程进行了模拟;Richards 等^[10]采用自行设计的真三轴渗透破坏试验设备,对管涌破坏发展过程中的影响因素进行了研究。不难发现,目前国内外对此类堤基管涌的研究多是从管涌破坏方向出发,且重点在于研究堤基管涌通道发展机理和确定管涌破坏临界条件的方向上,未充分考虑管涌发生时,上覆土层和其他土层之间颗粒运移的关系,尤其是从细观层面仍需要做大量的研究工作。因此,本研究将实际多元结构堤基进行简化,针对上覆粗粒土中不同细料含量情况,通过准确标定细观参数,采用离散元模拟堤基渗透变形发展过程并分析颗粒流失量等参数的变化规律,以期为进一步认识上覆土层对渗透破坏过程的影响提供参考。

2 颗粒流程序计算原理

2.1 固-液相方程

在固液两相体系中,一般认为流体是不可压缩的,PFC3D 中用连续性方程和平均 Navier -

Stokes^[11]方程来描述的流体运动:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -(\nabla \cdot n\vec{v}_f) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(n)}{\partial t} = -(\nabla \cdot (n\vec{v}_f)) \cdot \vec{v}_f - \frac{n}{\rho_f} \vec{v}_f \cdot \nabla p - \frac{n}{\rho_f} \nabla \cdot \tau + ng + \frac{\vec{f}_{int}}{\rho_f} \quad (2)$$

式中: n 为颗粒孔隙率; t 为时间,s; ∇ 为拉普拉斯算子, $\nabla = \{\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z\}^T$; $\vec{v}_f$ 为流体速度,m/s; g 为重力加速度,m/s²; ρ_f 为流体密度,kg/m³; ∇p 为压力梯度,Pa/m; τ 为黏性应力张量,Pa; $\vec{f}_{int}$ 为颗粒与流体间作用力,N。

对于固体颗粒,在 PFC3D 中通过牛顿第二定律来实现模拟颗粒的运动,颗粒运动方程为:

$$m_p \dot{v}_p = m_p f_g + \sum_c f_c + f_d \quad (3)$$

$$I_p \dot{w}_p = \sum_c (r_c \cdot f_c) \quad (4)$$

式中: m_p 、 I_p 分别为颗粒的质量和惯性力矩; $\dot{v}_p$ 、 $\dot{w}_p$ 分别为颗粒平移和转动速度; f_c 为颗粒间的相互作用力,N; f_g 为重力加速度,m/s²; f_d 为颗粒在流体作用下受到力,N,包含拖曳力及浮力; r_c 为颗粒间接触处的半径矢量。

2.2 流固耦合方程及过程

固体颗粒在单个流体网格内的流动情况见图 1。

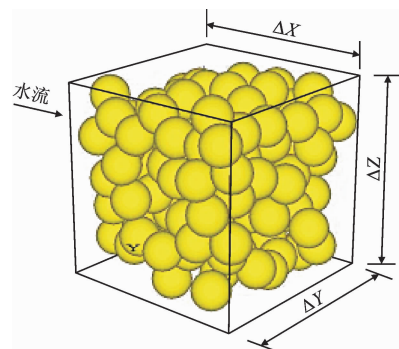


图 1 流体单元渗流示意图

流体单元网格体积为 $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$,假定流体单元网格内包含 n_p 个颗粒,则流体单元网格内的孔隙率为:

$$n = 1 - \frac{1}{\Delta V} \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{n_p} d_{pi}^3 \tag{5}$$

式中： d_{pi} ($i = 1, 2, \cdots, n_p$) 为颗粒粒径。

考虑流体单元网格内土体颗粒的受力平衡条件,可得单个固体颗粒受到的作用力为:

$$f_{di_j} = - \left(\frac{f_{int_j}}{1 - n} + \nabla p_j \right) \frac{\pi}{6} d_{pi}^3 \tag{6}$$

式中： f_{di_j} 为单个颗粒所受作用力分量； ∇p_j 为流体压力梯度分量。

对于稳定无分叉流:

$$\vec{f}_{int_j} = n \nabla p_j \tag{7}$$

将公式(7)代入公式(6),可得单个固体颗粒受到作用力的一般表达式:

$$f_{di_j} = - \left[\nabla p_j / (1 - n) \right] \cdot \frac{\pi}{6} d_{pi}^3 \tag{8}$$

当雷诺数为 1 ~ 10 的层流时,German(1937) 将水力半径理论公式带入 Darcy 公式得压力梯度方程为:

$$\nabla p_j = 180 \frac{u_f}{\rho_f g} \left[\frac{(1 - n)^2}{n^3 \bar{d}_p^2} \right] \bar{v}_j \tag{9}$$

式中： $\bar{d}_p$ 为颗粒的平均粒径； u_f 为黏滞系数； $\bar{v}_j$ 为平均流速分量。

对于雷诺数大于 10 的紊流,Ergun^[12] (1952) 基于水力半径理论提出了 Ergun 公式:

$$\nabla p_j = 150 \frac{u_f (1 - n)^2}{n^2 \bar{d}_p^2} \bar{v}_j + 1.75 \frac{(1 - n) \rho_f \bar{v}_j}{n^2 \bar{d}_p} \bar{v}_j \tag{10}$$

在颗粒程序 PFC3D 中,颗粒与流体相互作用为一个动态循环平衡过程,其计算迭代过程如图 2 所示。

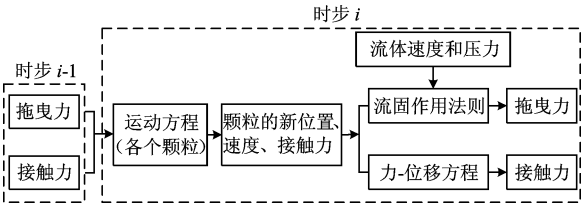


图 2 PFC3D 流固耦合计算迭代过程

3 数值模型建立

3.1 数值模型工况

为探究上覆粗粒土中细料含量不同时对堤基渗透破坏过程的影响,将上覆粗粒土中细料含量分别设置为 10%、20%、30%。不同数值试样的具体参数见表 1。

表 1 不同数值试样的具体参数

细料含量/ %	比重	干密度/ (g · cm ⁻³)	孔隙率
10	2.65	1.643	0.38
20	2.68	1.849	0.31
30	2.72	2.067	0.24

3.2 细观参数标定及模型生成

3.2.1 细观参数标定 本研究利用 PFC3D 来模拟渗流破坏,在 PFC3D 中,颗粒运动规律主要取决于细观参数摩擦系数^[13],因此在数值模拟之前,必须对颗粒的摩擦系数进行标定。研究表明,在散粒体材料中,材料的休止角是其摩擦特性的综合体现^[14],因此本文采用“休止角标定法”来对颗粒的细观摩擦系数进行标定。首先在室内试验测得细砾和中细砂的宏观休止角分别为 43°21'、34°31',然后采用休止角细观模拟试验(见图 3),通过不断调整颗粒细观摩擦系数来获取颗粒的细观休止角,将得到的细观休止角与宏观休止角进行对比,直到两者接近或相等为止,最终得到粗砾和中细砂的摩擦系数为 1.24 与 0.76。模型具体细观参数如表 2 所示。

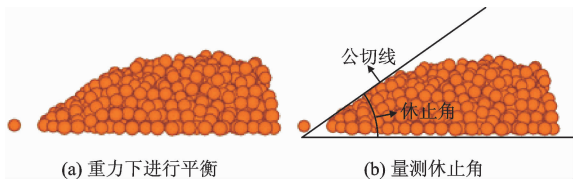


图 3 颗粒休止角细观模拟试验

表 2 模型具体细观参数

参数	细砂层	粗粒土层		墙体	流体
		骨架颗粒	填充颗粒		
颗粒粒径/mm	0.4	2	0.4		
法/切向刚度(N · m ⁻¹)	1 × 10 ⁷	1 × 10 ⁷	1 × 10 ⁷	1 × 10 ⁷	
摩擦系数	0.76	1.24	0.76	0.76	
流体密度/(kg · m ⁻³)					1 × 10 ³
黏滞系数/(Pa · s)					1.01 × 10 ⁻³

3.2.2 模型生成 PFC3D 在模拟工况时,旨在探索水力作用下固体颗粒的细观运移规律,不能也没有必要按照实际工程情况来建立庞大模型,否则将生成数量巨大的颗粒,导致计算无法完成。管涌的发生除了满足水力条件外,还需要满足几何条件,即填充颗粒能够在骨架颗粒孔隙中运动,骨架颗粒与填充颗粒平均粒径之比应大于 5^[14-15],因此本文数值模型中骨架颗粒与填充颗粒的粒径分别取为 2 和 0.4 mm。应注意的是,该颗粒粒径处理方法在试验精度上可能会造成一定的误差,但对研究渗透变形中颗粒迁移的过程是可行的。同时,为降低颗粒模型中总的自由度,运用土工离心机试验中的相似性原理^[16],建立长×宽×高为 24 mm×12 mm×12 mm 的颗粒流模型如图 4 所示。其中上覆粗粒土层厚 5 mm,中间细砂层厚 1.4 mm,下部粗粒土层厚 5 mm,此外,为防止上覆土层与模型上部墙体发生接触冲刷,除管涌口外,在墙体上部边界生成颗粒粒径为 0.3 mm 规则排列的固定颗粒边界,边界不会对渗透过程和计算结果产生影响。

参照表 1 及表 2 中模型细观参数,利用 PFC3D 中 fish 语言编写函数生成相应土层颗粒,各土层之间赋予线性接触模型,采用半径扩大法^[17]生成土颗粒,先将颗粒粒径缩小,再将颗粒粒径放大到指定的孔隙率,而后对土颗粒施加重力并进行循环计算,直至土颗粒间不平衡力较小或消除为止,以确保土层达到稳定状态。

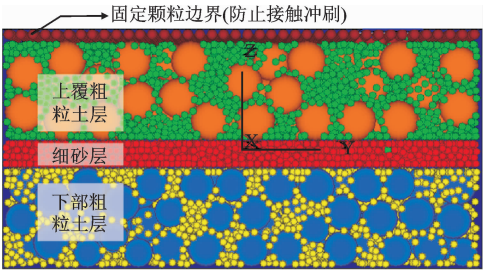


图 4 多层堤基颗粒流模型

3.3 流体网格划分及监测单元设置

PFC3D 中运用固定粗糙网格法^[18] (fixed coarse-grid fluid scheme) 对流体进行处理,因此,需将流体区域划分为若干流体单元网格,且应确保所划分的流体网格中均包含一定数量的颗粒。故考虑将整个模型沿长、宽、高方向分别划分为 8、4、4 份,单个流体单元网格尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm。再进行流体计算之前,需对边界条件进行设定,模型左侧设定为施加水头边界,水头压力大小为 200 kPa,上部、底部及侧壁均设定为刚性不透水非滑移边界,此外,将模型上部 X = 6 mm, Y = 19.5 mm, Z = 12 mm 处设置为零压力流体出口,出口长宽为 3 mm×3 mm,数值模型及流体单元网格模型详见图 5。应注意的是,在左侧边界施加水头之前,为避免流域内形成紊乱的流场,应首先将颗粒固定,然后施加水头,直至流场趋于稳定,此后释放颗粒,让固体颗粒与流体进行相互作用。

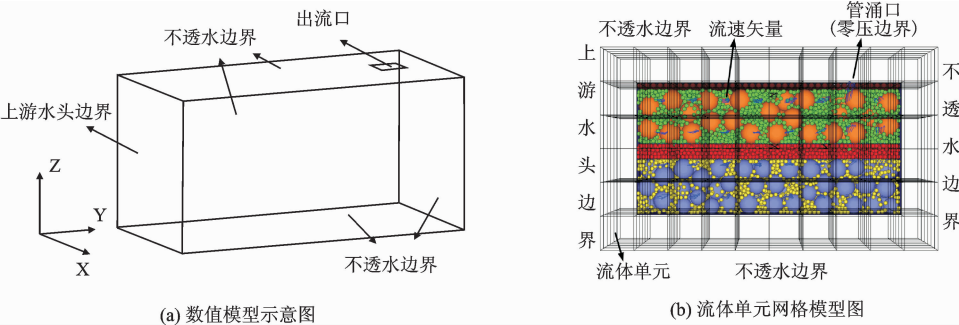


图 5 颗粒流模型计算边界及流体单元

在模型开始计算之前,为清晰记录各土层不同部位颗粒流失的情况,分别在各土层设置以下监测区域,上覆粗粒土层及细砂层从压力上游端至下游端分别编号为 S1、S2、S3、S4 及 Z1、Z2、Z3、Z4 详见图 6 所示,由于细砂层对下部粗粒土层起阻挡作用,导致下部粗粒土层颗粒很难发生流失,因此不对下部粗粒土层中颗粒流失进行监测。

S1	上覆粗粒土层		S4
	S2	S3	
Z1	Z2	Z3	Z4
下部粗粒土层			

图 6 模型各土层监测区域划分

4 结果分析

4.1 上覆层细料含量 10% 渗透破坏过程

4.1.1 细料含量 10% 时细颗粒迁移过程 上覆层细料含量为 10% 时该堤基细颗粒迁移过程如图 7 所示。

从图 7 可以看出,因 10% 细料含量较少,上覆粗粒土层骨架颗粒间存在较大孔隙,在初始水头压力作用下,上覆粗粒土层中的细颗粒从上游端逐渐向管涌口运移,上覆粗粒土层中的细颗粒在管涌口陆续流失,但并未出现骨架颗粒被顶出及细砂层颗粒侵入上覆粗粒土层中的现象,且在细砂层 Z3、Z4 区有部分细颗粒已侵入上覆粗粒土层中(见图 7(a))。

在计算时间步达到 30×10^4 步时,上覆粗粒土

层骨架颗粒中细颗粒持续从上游端向管涌口处移动,导致在上游水头 S1 区出现较大孔隙,在细颗粒移动过程中,有部分细颗粒因遇到较小孔隙而被阻挡形成阻塞区,此时,细砂层颗粒持续进入上覆粗粒土层中,因 S1 区有较大孔隙出现,Z1 区细砂层已有部分颗粒进入上覆粗粒土层中(见图 7(b))。随着计算时间步达到 50×10^4 步时,上覆粗粒土骨架颗粒中细颗粒不断从上游端向管涌口处移动,细砂层中颗粒进入上覆粗粒土层中含量进一步增加,有部分颗粒已进入上覆粗粒土层中部,以至于细砂层出现较大变形(见图 7(c))。

4.1.2 细料含量 10% 时不同区域颗粒流失量 上覆粗粒土层中细料含量为 10% 时,堤基上覆粗粒土层和细砂层不同区域细颗粒流失量随计算时步的变化曲线如图 8 所示。

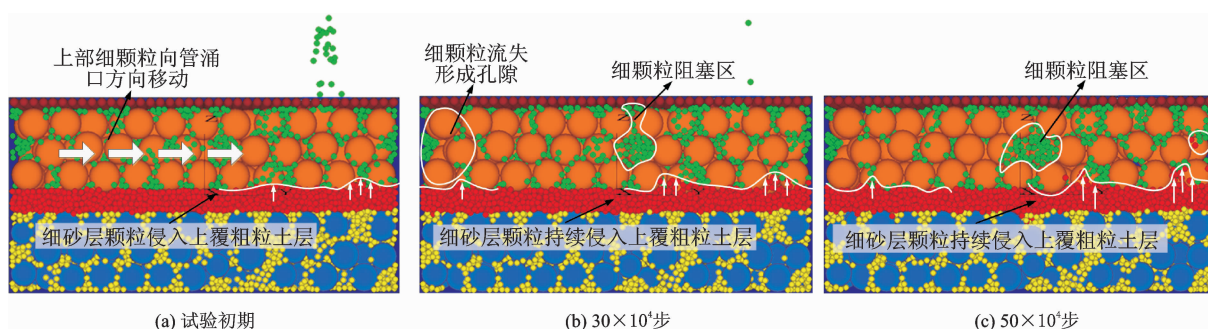


图 7 细料含量为 10% 时数值试样模拟中颗粒迁移过程

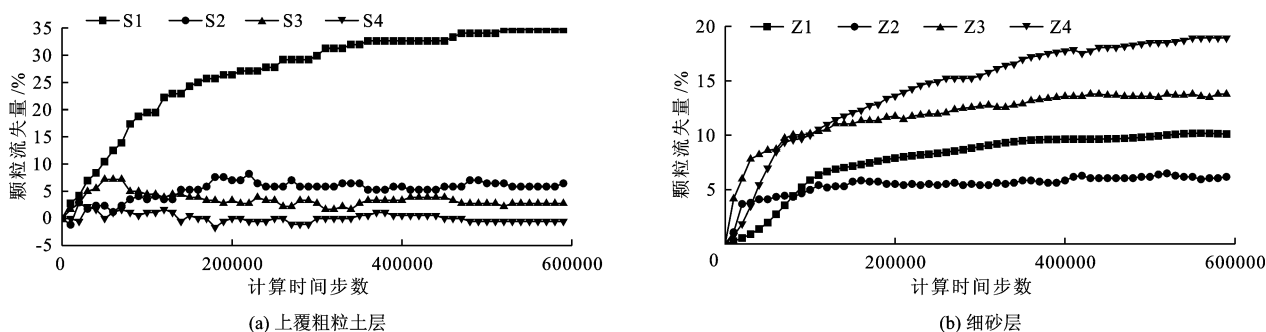


图 8 细料含量为 10% 时各土层监测区域细颗粒流失量情况

由图 8(a) 可知,在数值试验过程中,上覆粗粒土层上游端 S1 区细颗粒流失量最大,约 35% 左右,导致 S1 区骨架颗粒间有较大孔隙形成,其余区域细颗粒流失量较少。在试验初期,上覆粗粒土层不同区域细颗粒随计算时间步增加均存在流失。随着计算时间步的增加,上游端 S1 区细颗粒持续流失,流失量不断增大,细颗粒不断从上游端流向管涌口处,同时,由于细砂层颗粒陆续进入上覆粗粒土层中,导致上覆粗粒土层其余区域颗粒流失量几乎不变,甚

至 S3 区颗粒流失量存在先增加后减少的趋势,这是因为细颗粒在 S3 区有阻塞区的形成。从图 8(b) 可以看出,细砂层不同区域均有一定数量颗粒流失,其中,在管涌口下方 Z4 区颗粒流失量最大将近 20%,因上游端 S1 区出现较大孔隙,使得 Z1 区颗粒流失量高于 Z2 区。

4.2 上覆层细料含量 20% 渗透破坏过程

4.2.1 细料含量 20% 时细颗粒迁移过程 图 9 为上覆层细料含量 20% 时数值试验堤基细颗粒迁移

过程图。细料含量 20% 时数值试验细颗粒流失现象与细料含量 10% 时流失现象大体类似。不同的是,由于上覆粗粒土层中细颗粒含量为 20% 时相对于 10% 时细料含量有所增加,导致上覆粗粒土层骨架颗粒之间孔隙减少,以至在试验初期,管涌口下方细砂层几乎没有颗粒侵入上覆粗粒土层中。

4.2.2 细料含量 20% 时不同区域颗粒流失量 图 10 为上覆粗粒土层中细料含量 20% 时,堤基上覆粗

粒土层和细砂层不同区域细颗粒流失量随计算时步的变化曲线。与上覆粗粒土层中细料含量为 10% 细颗粒流失量曲线对比可发现,细料含量 20% 与 10% 的颗粒流失曲线基本类似。存在差异是,由于 20% 的细料含量对比 10% 的细料含量较多,上覆粗粒土层颗粒间接触相对更加紧致, S1 区细颗粒流失量相对较少,约为 16% 左右,且细砂层颗粒流失量也有所减少,大致为 12% 左右。

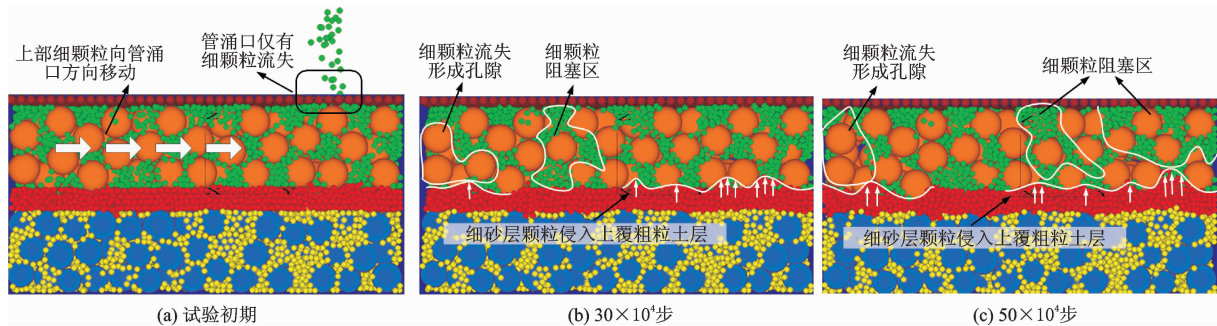


图 9 细料含量为 20% 时数值试样模拟中颗粒迁移过程

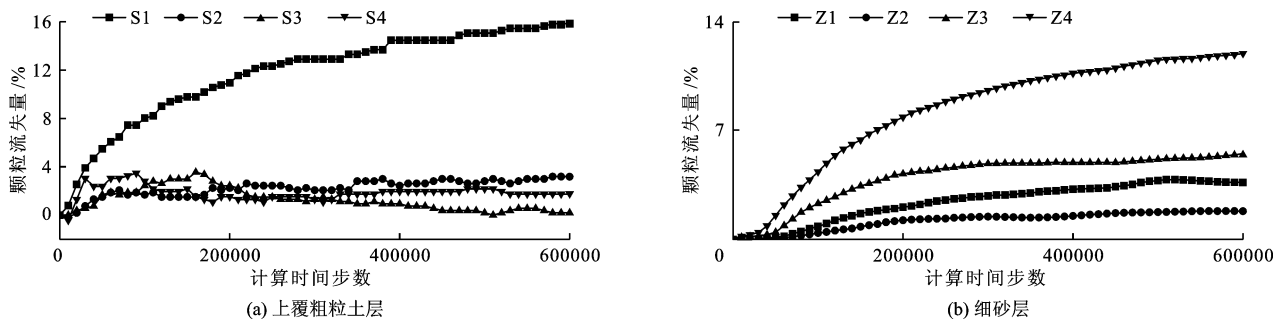


图 10 细料含量为 20% 时不同区域细颗粒流失量情况

通过对比细料含量为 10%、20% 的颗粒流失曲线及迁移现象分析可知,在渗透力作用下,上覆粗粒土层中细颗粒在骨架颗粒孔隙间移动而后被带出土体外,从而逐渐形成稳定的管用通道,属于典型的管涌破坏。

4.3 上覆层细料含量 30% 渗透破坏过程

4.3.1 细料含量 30% 时细颗粒迁移过程 上覆层细料含量为 30% 时该堤基细颗粒迁移过程如图 11 所示。

从图 11(a) 可看出,在数值施加水头压力初期,上覆粗粒土层仅在管涌口 S4 区域处存在细颗粒流失,且由于土样较为密实,管涌口处出现骨架颗粒被顶出的现象,说明此时发生了土体整体推移的流土破坏。流土现象发生后,渗流破坏口形成,管涌口细颗粒加速流失。如图 11(b) 所示,随着计算时间步增加至 30×10^4 步, S3 及 S2 区细颗粒也逐渐出现少量流失,同时细砂层 Z4 区部分细颗粒已侵入上覆粗

粒土层中。当时间步进一步增加至 50×10^4 步过程中,管涌口处有大量绿色细颗粒夹杂着少许中间细砂层颗粒(红色颗粒)喷涌而出,细砂层出现较大范围的变形,且细砂层有明显被向上“顶托”的现象存在,见图 11(c)。这是因为细砂层渗透系数较小,在堤基中起到阻隔作用,下部粗粒土层中从而存在较大水量,以致细砂层被顶托。

4.3.2 细料含量 30% 时不同区域颗粒流失量 上覆粗粒土层中细料含量为 30% 时,堤基上覆粗粒土层和细砂层不同区域细颗粒流失量随计算时步的变化曲线如图 12 所示。

由图 12(a) 可知,在数值试验计算过程中,上覆粗粒土层管涌口 S4 区细颗粒流失量最大达 30% 左右,其余区域颗粒流失量相对较少。在数值试验初期,仅有曲线 S4 随时间步的增加而增加,而其余曲线无明显变化,表明此时仅在管涌口处存在细颗粒流失。当计算时间步增加至 30×10^4 步时,曲线 S3

开始随着计算时间步的增加而增加,S3区的细颗粒出现流失;当计算时间步增加至 50×10^4 步时,S4及S3区细颗粒持续流失,且曲线S1开始随着计算时间步的增加而增加,S1区细颗粒已开始流失,上游端S1区出现孔隙,这是由于上覆粗粒土层中骨架

颗粒被顶出,导致骨架颗粒间孔隙增大所致。

从图12(b)可以看出,细砂层管涌口下方的Z4区颗粒流失量最大,约为15%左右,其余区域颗粒流失量较少,这与上覆粗粒土层中细颗粒流失的规律基本类似。

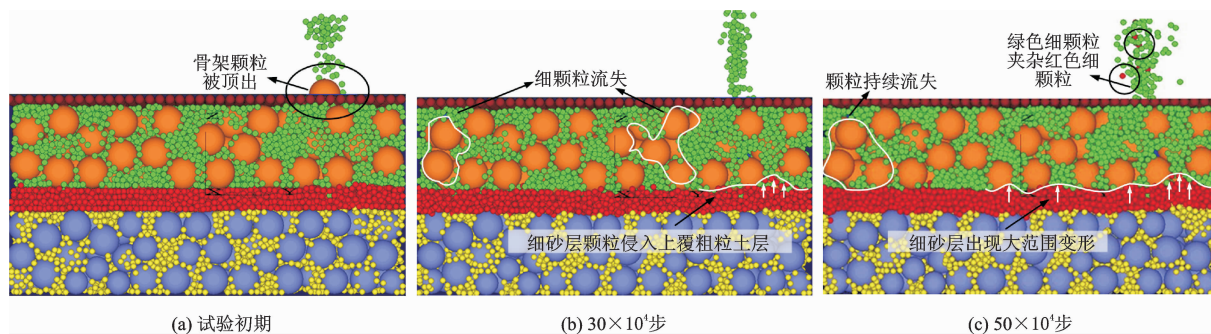


图11 细料含量为30%时数值试样模拟中颗粒迁移过程

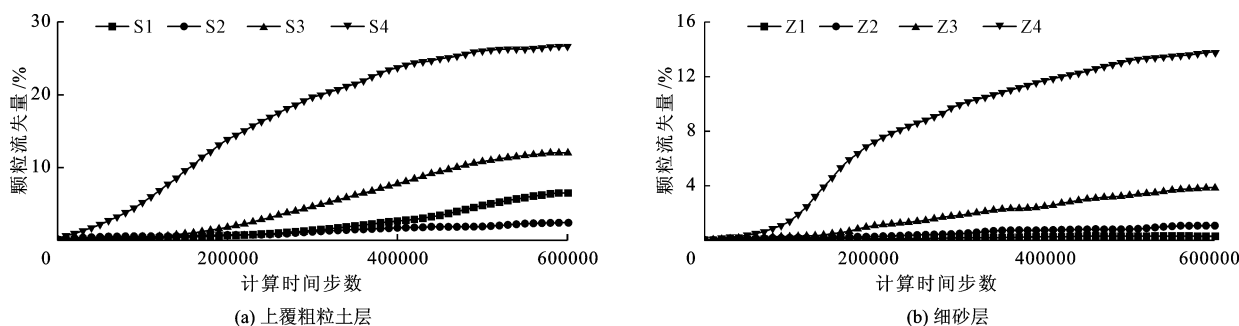


图12 细料含量为30%时不同区域细颗粒流失量情况

通过对细料含量为30%的颗粒流失曲线及迁移现象分析可知,在管涌口局部土体发生了整体流失,表现为流土型破坏;随后上覆粗粒土层与细砂层细颗粒逐渐流失并同步向上游发展,表现为管涌型破坏;堤基渗透变形综合表现为介于流土和管涌的过渡状态。

4.4 上覆粗粒土层下沉量

不同细料含量下上覆粗粒土层下沉量随计算时间步的变化曲线如图13所示,下沉量定义为上覆粗粒土层颗粒垂直向下运动距离总和。

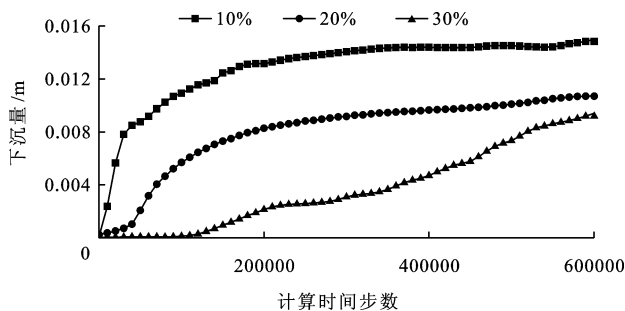


图13 不同细料含量的上覆粗粒土层下沉量随计算时间步变化曲线

从图13可以看出,上覆粗粒土骨架颗粒的下沉量随着上覆粗粒土骨架颗粒中细料含量的减少而增加。同时,对比三者曲线起始端可以发现,10%细料含量下沉量与20%细料含量下沉量的曲线比较相似,因上覆粗粒土层有一定孔隙,在施加初始水头压力过后,细砂层颗粒进入上覆粗粒土骨架颗粒中,导致上覆粗粒土层快速发生下沉。当细料含量为30%时,由于上覆粗粒土骨架颗粒较为密实,在初始阶段,上覆粗粒土骨架颗粒并未发生下沉,随着计算时间步的增加,下沉量才开始急剧增加,说明当上覆粗粒土层发生管涌破坏时,上覆粗粒土骨架颗粒在水头压力作用下会发生快速的沉降,当上覆粗粒土层发生流土时,上部砂砾层初始并未沉降,而后才开始逐渐沉降。

4.5 细料含量对渗透变形类型的影响

4.5.1 渗透变形判别与验证 国内外在土体的渗透变形判别上已有许多经验公式,可从土体细料含量、不均匀系数和土体孔隙直径等方面来进行判断。根据本研究特点主要从细料含量上进行判定,代表性的公式为刘杰^[2]提出的在对缺乏中间粒径砂砾

料的研究中将土体中实际的细料含量 P 与最优细料含量 P_{op} 进行对比,得出渗透破坏的理论判别标准:

$$\begin{cases} P < 0.9P_{op} & \text{管涌破坏} \\ P > 1.1P_{op} & \text{流土破坏} \\ P = (0.9 \sim 1.1)P_{op} & \text{过渡状态} \end{cases} \quad (11)$$

最优细料含量 P_{op} 为:

$$P_{op} = \frac{0.30 + 3n^2 - n}{1 - n} \quad (12)$$

式中: n 为混合土料单元孔隙率。

从工程实际出发,刘杰^[2]将公式(11)改写为:

$$\begin{cases} P < 25\% & \text{管涌破坏} \\ P > 35\% & \text{流土破坏} \\ P = 25\% \sim 35\% & \text{过渡状态} \end{cases} \quad (13)$$

根据本文上述分析,不难发现将不同细料含量下堤基的渗透破坏形式与公式(13)对比可发现两者基本相吻合,说明本研究在数值模拟上是正确的,是可以表征实际问题的。

4.5.2 上覆层细料含量对颗粒移动的影响 土体颗粒在水的作用下运移需要满足水力条件和几何条件。细颗粒含量越低几何条件(孔隙通道)越容易满足。细料含量为 10%、20% 时颗粒迁移现象大体类似,因细料含量较少,骨架颗粒间存在较大孔隙,在水压力的作用下细颗粒在骨架颗粒间运动并发生流失,表现为管涌型破坏。此时颗粒移动的细观特性为:上覆粗粒土层中细料含量越少,则细砂层细颗粒侵入上覆粗粒土骨架颗粒中时间越早,且侵入细料含量越大,表明当上覆粗粒土层为间断级配管涌土时,上覆粗粒土层中的细料含量越少,细砂层越易受到破坏。

当细料含量为 30% 时,为过渡性状态,流土和管涌变形伴随发生。此类变形颗粒运移的细观特点表现在,上覆粗粒土骨架颗粒与细砂层细颗粒流失几乎是同步的,且由于下部粗粒土骨架颗粒中垂向水压力的存在,使细砂层在 Z4 区出现流失及“顶托”现象,在施加上游水头压力初期,中间细砂层颗粒并未发生流失。在这种情况下,上覆粗粒土层一旦发生破坏,随着管涌通道的贯通,将会形成较大的渗透破坏。

5 结 论

本文在 PFC3D 细观参数标定时,采用“休止角标定法”,准确、快速地建立了材料宏-细观参数间的联系,能有效地模拟粗粒土渗透变形的发展过程,

获得了渗透变形的细观参数和运移特点,可为三维颗粒流数值模拟中细观参数的标定提供一定参考,并得到以下结论:

(1) 上覆粗粒土层中细料含量为 10%、20% 时,在水压力作用下细颗粒在骨架颗粒间运动并发生流失,表现为管涌型破坏,且上覆粗粒土层中细料含量越少,细砂层越易破坏。

(2) 当细料含量为 30% 时,首先管涌口附近土体发生流土型破坏,而后上覆粗粒土骨架颗粒与细砂层颗粒同步流失并逐步向上游发展,表现为管涌型破坏,整体颗粒流失呈现为过渡性渗透破坏。

(3) 上覆粗粒土层为管涌型土时,上覆粗粒土骨架颗粒在水头压力作用下会发生快速的沉降,当上覆粗粒土层为非过渡性土时,上覆粗粒土层初始没有沉降,而后才开始逐渐沉降,且上覆粗粒土骨架颗粒的沉降量随着上覆粗粒土骨架颗粒中细料含量的减少而增加。

参考文献:

- [1] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 沙金焯. 多孔介质中的管涌研究[J]. 水利水运科学研究, 1981, 3(3): 89-93.
- [4] 陈建生, 何文政, 王霜, 等. 双层堤基管涌破坏过程中上覆层渗透破坏发生发展的试验与分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1777-1783.
- [5] 贾恺, 曹洪, 李兴华. 双层堤基管涌通道扩展机制和计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2368-2376.
- [6] 倪小东, 赵帅龙, 王媛. 非稳定流作用下管涌发生发展的细观数值模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(9): 3154-3161.
- [7] SELLMEIJER H, LOPEZ DE LA CRUZ J, VAN BEEK V M, et al. Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and Ijkdijk experiments [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2011, 15(8): 1139-1154.
- [8] VAN BEEK V M, BEZUIJEN A, SELLMEIJER J B, et al. Initiation of backward erosion piping in uniform sands [J]. Géotechnique, 2014, 64(12): 927-941.
- [9] SHAMY U E, AYDIN F. Multiscale modeling of flood-induced piping in river levees [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(9): 1385-1398.

(下转第 160 页)

参考文献:

- [1] 杨胜发,高凯春.山区河流水沙运动规律及航道整治技术研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 向琪芪,李亚东,魏凯,等.桥梁基础冲刷研究综述[J].西南交通大学学报,2019,54(2):235-248.
- [3] 孙东坡,杨慧丽,张晓松,等.桥墩冲刷坑的三维流场测量与数值模拟[J].水科学进展,2007,18(5):711-716.
- [4] 梁发云,王琛,黄茂松,等.沉井基础局部冲刷形态的体型影响效应与动态演化[J].中国公路学报,2016,29(9):59-67.
- [5] 齐梅兰,杨熠琳,邹艳荣.底坎对减缓采沙河床桥墩冲刷的效果及机理研究[J].中国铁道科学,2017,38(4):33-39.
- [6] EBRAHIMI M, KRIPAKARAN P, PRODANOVIĆ D M, et al. Experimental study on scour at a sharp-nose bridge pier with debris blockage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(12): 04018071.
- [7] WILLIAMS P, BOLISSETTI T, BALACHANDAR R. Blockage correction for pier scour experiments[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 45(5): 413-417.
- [8] 张新燕,吕宏兴,沈波.圆柱桥墩局部冲刷机理试验研究[J].水利水运工程学报,2012(2):34-41.
- [9] HONG Y M, KAN Y C, ZENG J R, et al. Multiphysics coupling model for computing pier scour upon simulation and experiment[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(1): 04017068.
- [10] 熊文,汪吉豪,叶见曙.结构形式对桥墩局部冲刷三维性态发展的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(1):155-161.
- [11] KIM H S, NABI M, KIMURA I, et al. Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders[J]. Advances in Water Resources, 2014, 70: 131-147.
- [12] 宁健,李国栋,马森.丁坝绕流场及局部冲刷三维数值模拟研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2017,32(1):46-53.
- [13] XIONG Wen, CAI C S, KONG B, et al. CFD simulations and analyses for bridge-scour development using a dynamic-mesh updating technique[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2016, 30(1): 04014121.
- [14] 黄杰,梁东方,张景新.水下结构物周围泥沙冲刷的通用计算模型[J].水动力学研究与进展(A辑),2017(5):615-622.
- [15] XIONG Wen, TANG Pingbo, KONG B, et al. Computational simulation of live-bed bridge scour considering suspended sediment loads[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(5): 04017040.
- [16] COLEMAN S E. Clearwater local scour at complex piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(4): 330-334.
- [17] MASTBERGEN D R, VAN DEN BERG J H. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons[J]. Sedimentology, 2003, 50(4): 625-637.
- [18] SOULSBY R. Dynamics of marine sands: A manual for practical applications[M]. Thomas Telford, 1997(9): 256.
- [19] 魏文礼,陈晓朋,李强,等.丁坝群对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):146-152.
- [20] 高原,王文娥,张维乐.西法城际铁路眉县跨渭河特大桥壅水分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):167-171.

(上接第154页)

- [10] RICHARDS K S, REDDY K R. True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(1): 83-95.
- [11] 蒋中明,袁涛,刘德谦,等.粗粒土渗透变形特性的细观数值试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(4):752-758+706.
- [12] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [13] 孙其诚,王光谦.颗粒流动力学及其离散模型评述[J].力学进展,2008,38(1):87-100.
- [14] 王龙,陆晓平,薄以霆.颗粒形状及级配对粗颗粒土休止角的影响[J].水利水运工程学报,2017(6):79-84.
- [15] 宿辉,杨家琦,胡宝文,等.颗粒离散元岩石模型的颗粒尺寸效应研究[J].岩土力学,2018,39(12):4642-4650.
- [16] 史旦达,王飞.饱和砂土自由场地地震液化的离散元模拟[J].上海海事大学学报,2017,38(3):96-102.
- [17] 张凤德,杨云超,荣冠,等.某多层结构堤基土体渗透变形机理模拟研究[J].水电能源科学,2018,36(2):80-84.
- [18] 李晓庆,齐阳,唐新军,等.两种典型级配基土-滤层渗滤系统的颗粒流模拟[J].长江科学院院报,2017,34(4):92-97.