

DOI: 10.11779/CJGE202106003

隧道突泥破坏的耦合格子 Boltzmann-离散元法模拟

金 磊¹, 曾亚武², 程 涛¹, 李晶晶¹

(1. 湖北理工学院土木建筑工程学院, 湖北 黄石 435003; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 为了探究隧道突泥灾害的灾变机制, 开发了耦合格子 Boltzmann-离散元法 (LBM-DEM) 数值计算平台并对隧道突泥破坏的演化过程进行了模拟, 分析了致灾介质颗粒黏结强度、水压力及突泥口尺寸等因素对隧道突泥破坏特征的影响。结果表明: 基于 LBM-DEM 模拟能再现隧道突泥破坏“启动、加速、缓慢和稳定”等连续 4 个阶段的演化过程; 无黏结的致灾介质突泥破坏形态近似为直线, 有一定黏结强度的致灾介质突泥破坏形态总体呈圆弧或抛物线状, 突泥破坏区扩展范围和稳定后的突泥量随着颗粒间黏结强度的增大而逐渐减小; 水压力越大, 突泥灾害发生后突泥量增长越快, 最终的突泥量也越大, 且颗粒间黏结强度较大时水压力的这种影响越显著; 当致灾介质颗粒间无黏结时, 不同突泥口尺寸的模型在稳定后突泥量和破坏区范围基本相同, 而当颗粒间形成一定强度的黏结后, 突泥口尺寸越大, 突泥灾害发生后突泥量增长越快, 稳定后的突泥量也越多; 隧道突泥破坏是致灾岩土介质、水压和开挖三者综合作用的结果。

关键词: 隧道工程; 突泥; 格子 Boltzmann 方法 (LBM); 离散元法 (DEM); 颗粒-流体耦合

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)06-1000-10

作者简介: 金 磊(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土细观流-固耦合等方面的研究。E-mail: whujinlei@whu.edu.cn。

Numerical simulation of mud inrush of tunnels with coupled LBM-DEM

JIN Lei¹, ZENG Ya-wu², CHENG Tao¹, LI Jing-jing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. School of Civil Engineering,

Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To better understand the catastrophic mechanism of mud inrush disasters of tunnels, a numerical computing platform based on the coupled lattice Boltzmann method-discrete element method (LBM-DEM) is developed and used to simulate the evolution process of mud inrush of tunnels. According to the simulated results, the effects of particle bonding strengths of disaster-causing media, groundwater pressures and sizes of mud inrush holes on the characteristics of mud inrush of tunnels are analyzed. The results show that coupled LBM-DEM simulation can well reproduce the evolution process of four successive stages of mud inrush of tunnels: "starting, accelerating, decelerating and stabilizing". The failure form of unbonded disaster-causing media after mud inrush is approximately straight, whereas the failure form of disaster-causing media with certain bond strength is generally arc or parabolic. The expanded range of failure zone and mud inrush mass both decrease with the increase of the inter-particle bond strength of disaster-causing media. The higher the water pressure is, the faster the mud inrush mass increases after the occurrence of mud inrush disasters, and the more the final mud inrush mass is, which is more remarkable when the inter-particle bond is much stronger. When there is no bond between particles of the disaster-causing media, the models with different sizes of mud inrush holes have basically the same failure zone and mud inrush mass after stabilization. However, when a certain strength of bond is formed between particles, the mud inrush mass increases faster and the final mud inrush mass is more with the increase of the sizes of mud inrush holes. The mud inrush disasters are the result of the combined action of disaster-causing geo-materials, groundwater pressure and tunnel excavation.

Key words: tunnel engineering; mud inrush; lattice Boltzmann method; discrete element method; particle-fluid coupling

0 引 言

随着“西部大开发”战略的实施和“一带一路”建设的推进, 中国隧道工程建设方兴未艾, 并已在西

基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2019CFB199); 国家自然科学基金项目 (41272342, 12002121); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目 (T201823)

收稿日期: 2020-09-25

南、西北等地质条件复杂地区快速发展。隧道施工穿越断层破碎带、岩溶及全风化岩层等不良地质区域时极易诱发突水突泥,并可进一步造成工期延误、人员伤亡和环境破坏等问题。突水突泥灾害控制和治理已成为制约隧道及地下工程建设发展的关键科学技术问题^[1-2]。与隧道突涌水相比,隧道突泥方面的研究起步较晚,目前大多数成果都是针对某一具体工程实例进行成因分析并给出灾害治理措施的一些建议等。因此,有必要对隧道突泥开展有针对性的系统研究。

近年来,为数不多的课题组开始尝试通过室内物理模型试验^[3-7]探究隧道突泥的灾变机制,获得了许多重要的结论,有效地指导了隧道突泥灾害的科学防治。但常规的物理模型试验难以洞悉模型内部岩土颗粒位移场和流场等细节的变化,全可视化的模型试验对试验材料、试验设备和试验方法等也都有较高的要求。

隧道突水突泥灾害演化是渗流-侵蚀强耦合过程,本质上属于颗粒-流体耦合动力学问题,计算机数值模拟是研究此类问题的重要手段。张家奇等^[6]和王媛等^[8]基于商业离散元软件 PFC 中耦合流体动力学-离散单元法(CFD-DEM)模块模拟了隧道突水突泥的演化过程并初步揭示了突泥灾害发生的机理。耦合 CFD-DEM 中的流体计算基于宏观连续介质假设并采用经验或半经验的渗流模型(如达西定律)进行求解,且采用的是粗糙网格和局部平均的方案,难以开展更为精细的孔隙尺度的模拟^[9-10]。

将基于介观的格子 Boltzmann 方法(LBM)与离散单元法相结合形成的耦合 LBM-DEM 能有效克服上述耦合 CFD-DEM 的不足,更适合从孔隙尺度模拟复杂的颗粒-流体系统^[11-13]。近年来, Wang 等^[14]、Galindo-torres 等^[15]、Wang 等^[16]采用耦合 LBM-DEM 成功地模拟了接触侵蚀和水力劈裂等复杂岩土流-固耦合问题。为此,拟采用 LBM 模拟岩土介质中的渗流,采用 DEM 模拟岩土颗粒的相互作用与运动,并采用浸入运动边界法(IMB)处理移动的固体颗粒与流体之间的相互作用,基于耦合 LBM-DEM 对隧道突泥的破坏过程开展孔隙尺度的模拟,探究致灾介质颗粒黏结强度、水压力和突泥口尺寸等因素对隧道突泥破坏特征的影响及其内在机制。

1 数值算法

1.1 格子 Boltzmann 方法(LBM)

在 LBM 中,流体的计算域由边长为 h (格子步长)的立方格子所划分,在每个节点上定义一个粒子分布函数 $f_\alpha(\mathbf{r}, t)$ 表示在 \mathbf{r} 位置处 t 时刻以 \mathbf{e}_α 速度运动的流体粒子的数目。在离散的每个时间步 Δt 内,流体粒

子以离散的速度 \mathbf{e}_α 运动到相邻的节点上,紧接着在该节点处与其它的粒子发生碰撞,碰撞后粒子的分布函数将更新,该过程称为迁移与碰撞,可用公式分别表示为

$$f_\alpha(\mathbf{r} + \mathbf{e}_\alpha \Delta t, t + \Delta t) = f_\alpha(\mathbf{r}, t) \quad , \quad (1)$$

$$f_\alpha(\mathbf{r}, t) = \Omega(f_\alpha(\mathbf{r}, t)) \quad , \quad (2)$$

式中, Ω 为碰撞算子,它规定了流体粒子的碰撞行为。通过迁移与碰撞的不断循环,流体粒子逐步趋向平衡态分布 f_α^{eq} 。

采用最为常用的碰撞算子即单松弛时间 BGK 碰撞模型^[17],可表示为

$$\Omega(f_\alpha(\mathbf{r}, t)) = f_\alpha(\mathbf{r}, t) - \frac{\Delta t}{\tau} (f_\alpha(\mathbf{r}, t) - f_\alpha^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)) \quad , \quad (3)$$

式中, $f_\alpha^{\text{eq}}(\mathbf{r}, t)$ 为局部平衡态分布函数, τ 为无量纲弛豫时间。

采用的离散速度模型为常用的 D2Q9 模型^[18],其平衡态分布函数、离散速度及相关计算参数由下式确定:

$$\mathbf{e}_\alpha = \begin{cases} (0, 0) & (\alpha=0) \\ c \left\{ \cos \left[(\alpha-1) \frac{\pi}{2} \right], \sin \left[(\alpha-1) \frac{\pi}{2} \right] \right\} & (\alpha=1, 2, 3, 4) \\ \sqrt{2}c \left\{ \cos \left[(2\alpha-1) \frac{\pi}{4} \right], \sin \left[(2\alpha-1) \frac{\pi}{4} \right] \right\} & (\alpha=5, 6, 7, 8) \end{cases} \quad (4)$$

$$f_\alpha^{\text{eq}} = \rho \omega_\alpha \left[1 + \frac{\mathbf{e}_\alpha \mathbf{u}}{c_s^2} + \frac{(\mathbf{e}_\alpha \mathbf{u})^2}{2c_s^4} - \frac{\mathbf{u}^2}{2c_s^2} \right] \quad , \quad (5)$$

$$c = h / \Delta t \quad , \quad (6)$$

$$c_s^2 = c^2 / 3 \quad , \quad (7)$$

$$\omega_\alpha = \begin{cases} 4/9 & (\alpha=0) \\ 1/9 & (\alpha=1, 2, 3, 4) \\ 1/36 & (\alpha=5, 6, 7, 8) \end{cases} \quad , \quad (8)$$

式中, c 为格子速度, c_s 为格子声速, ω_α 为权系数, ρ 为流体密度, \mathbf{u} 为宏观速度。

根据质量和动量守恒定律,模型的宏观密度 ρ , 速度 \mathbf{u} 和压力 p 分别定义为

$$\rho = \sum_{\alpha=0}^8 f_\alpha \quad , \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=0}^8 f_\alpha \mathbf{e}_\alpha \quad , \quad (10)$$

$$p = \rho c_s^2 \quad . \quad (11)$$

流体的运动黏滞系数 ν 与无量纲弛豫时间 τ 及格子参数间关系为

$$\nu = c_s^2 \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \Delta t \quad . \quad (12)$$

在 LBM 中,对于流体的边界如压力边界和速度

边界等需要做特殊处理。另外,为计算方便一般都把物理量做无量纲处理,即采用格子单位。边界处理与单位转换的具体方法可参见文献[11]。

采用 LBM 计算低黏度的流体如空气和水时常出现数值不稳定,将工程中常用的大涡模拟(LES)引入 LBM 中可有效解决该问题,具体可参见文献[11]。

1.2 浸入运动边界法(IMB)

隧道突泥破坏是渗流-颗粒的强耦合过程,其模拟的关键是要处理好流体-固体的相互作用。模拟流-固相互作用就是要满足无滑移条件,即要求流-固边界上具有相同的速度。对于静止的固体颗粒,无滑移条件可由标准反弹准则^[11]施加。对于移动的固体颗粒,目前主要方法包括改进的反弹准则、浸入边界法和浸入运动边界法等。经多位学者的计算对比表明 IMB 具有较高的精度、较好的稳定性和较快的计算速度^[19-20],故采用 IMB 处理流体流动与移动的固体颗粒之间的相互作用。

在 IMB 中,需要先将移动的固体颗粒用流体节点进行离散并分别标记为固体内部节点、固体边界节点和流体边界节点。针对这些节点,在 LBM 的碰撞算子 Ω 中要引入 1 个附加碰撞项 Ω_α^S 来表征固体颗粒对流体的作用^[21],其公式为

$$\Omega = -\frac{\Delta t}{\tau}(1-B)[f_\alpha(\mathbf{r},t) - f_\alpha^{eq}(\mathbf{r},t)] + B\Omega_\alpha^S, \quad (13)$$

$$\Omega_\alpha^S = [f_{-\alpha}(\mathbf{r},t) - f_{-\alpha}^{eq}(\rho,\mathbf{u})] - [f_\alpha(\mathbf{r},t) - f_\alpha^{eq}(\rho,\mathbf{u}_s)], \quad (14)$$

式中, B 为附加碰撞项的权函数, $-\alpha$ 为方向 α 的反方向, \mathbf{u} 与 \mathbf{u}_s 分别为节点 \mathbf{r} 处流体和固体的速度。 B 值由节点固含率 ε (节点处控制单元被固体覆盖的体积分) 计算得到,

$$B = \frac{\varepsilon(\tau/\Delta t - 0.5)}{(1-\varepsilon) + (\tau/\Delta t - 0.5)}. \quad (15)$$

另一方面,流体对移动的固体颗粒的作用由流体流动施加在颗粒上的力和力矩表征,可分别由下式计算:

$$\mathbf{F}_f = ch \sum_{k=1}^n (B_k \sum_{\alpha=0}^8 \Omega_\alpha^S \mathbf{e}_\alpha), \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_f = ch \sum_{k=1}^n \left[(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_p) \times (B_k \sum_{\alpha=0}^8 \Omega_\alpha^S \mathbf{e}_\alpha) \right], \quad (17)$$

式中, n 为该固体颗粒所标记节点的数量, $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_p)$ 为从颗粒中心指向第 k 个节点的位置向量。

1.3 离散单元法(DEM)

采用基于软球模型的 DEM^[22]模拟固体颗粒之间的相互作用,即允许相接触的两个颗粒间有少量重叠。采用线弹性的黏结接触模型计算颗粒间的相互作用力(力-位移法则)。颗粒间的法向力与法向变形可以通过颗粒间的法向弹簧来模拟,公式为

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n & (X_n < X_b, \text{黏结完整}) \\ K_n X_n & (X_n < 0, \text{黏结断裂}) \\ 0 & (X_n > 0, \text{黏结断裂}) \end{cases}. \quad (18)$$

式中 F_n 为法向力的大小; K_n 为法向刚度; X_n 为法向相对位移(拉为正); X_b 为断裂位移。初始时,颗粒与其相邻颗粒相互黏结,可受拉力或压力作用。当两颗粒之间的 X_n 超过 X_b 时黏结断裂,颗粒间拉力消失,此后只可存在压力作用。

通过切向弹簧来模拟颗粒间的切向力和切向变形的关系,

$$F_s = K_s X_s. \quad (19)$$

式中 F_s 为切向力的大小; K_s 为切向刚度; X_s 为切向相对位移。弹簧在切向上也存在破坏准则,可采用莫尔-库仑准则,其最大剪切力为

$$F_{s,\max} = F_{s0} - \mu F_n. \quad (20)$$

式中 F_{s0} 为颗粒间的初始抗剪力; μ 为颗粒间的摩擦系数。在莫尔-库仑准则里,颗粒间最大抗剪力由初始抗剪力 F_{s0} 和颗粒间摩擦力两部分组成, F_{s0} 类似于岩土体中的黏聚力,摩擦力与法向压力成正比。当切向力超过最大剪切力时,切向黏结断裂,此后颗粒间只存在滑动摩擦力 $-\mu F_n$ 。

在 DEM 中,通过引入法向弹簧与切向弹簧来等效真实世界中岩土颗粒间存在的黏结接触,当法向弹簧断裂时,黏结断裂,此时切向弹簧也应断开,反之亦然。

在计算出颗粒间法向力和切向力后,总的接触力与力矩分别为

$$\mathbf{F}_c = \mathbf{F}_c^n + \mathbf{F}_c^s = F_n \mathbf{n} + F_s \mathbf{s}. \quad (21)$$

$$\mathbf{T}_c = \mathbf{R} \times \mathbf{F}_c^s. \quad (22)$$

式中 \mathbf{F}_c 为颗粒间接触力; \mathbf{F}_c^n 与 \mathbf{F}_c^s 分别为法向与切向接触力矢量; \mathbf{n} 与 \mathbf{s} 为接触的法向和切向单位向量; \mathbf{T}_c 为接触力产生的力矩; \mathbf{R} 表示从颗粒中心指向接触点的位置向量。

在颗粒-流体耦合过程中,固体颗粒可能受到的力包括流体动力、接触力、流体浮力以及重力等,在这些力的作用下颗粒的运动遵循牛顿定律(运动法则),方程为

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}_f + \sum_i \mathbf{F}_{ci} + \mathbf{F}_b, \quad (23)$$

$$\mathbf{I}\ddot{\theta} = \sum_i \mathbf{T}_{ci} + \mathbf{T}_f. \quad (24)$$

式中 m , \mathbf{I} 分别为颗粒的质量和惯性矩; \mathbf{a} 与 $\ddot{\theta}$ 分别为颗粒的线加速度和角加速度; \mathbf{F}_{ci} , \mathbf{T}_{ci} 分别为第 i 个接触产生的接触力和力矩; \mathbf{F}_b 表示其它作用力如重力和浮力等。颗粒的运动方程采用显式中心有限差分法求解,以获得每个时刻颗粒的速度和位置。

1.4 LBM-DEM 数值计算平台及其验证

基于 1.1 节~1.3 节所述数值算法的基本理论, 运用 Fortran 语言开发了耦合 LBM-DEM 数值计算平台, 其中 LBM 模拟流体流动、DEM 模拟固体颗粒间的相互作用与运动、IMB 模拟移动的固体颗粒与流体之间的相互作用, 耦合算法的计算流程如图 1 所示。需要说明的是, LBM 与 DEM 均采用显式时步循环算法且有各自的时间步长, 一般 DEM 的时间步长 Δt_D 比 LBM 的时间步长 Δt 要小, 因此可将 DEM 的时间步长适当缩短使得 $\Delta t / \Delta t_D$ 为整数, 进而可将 DEM 循环作为 LBM 的子循环以达到耦合计算时间的统一。

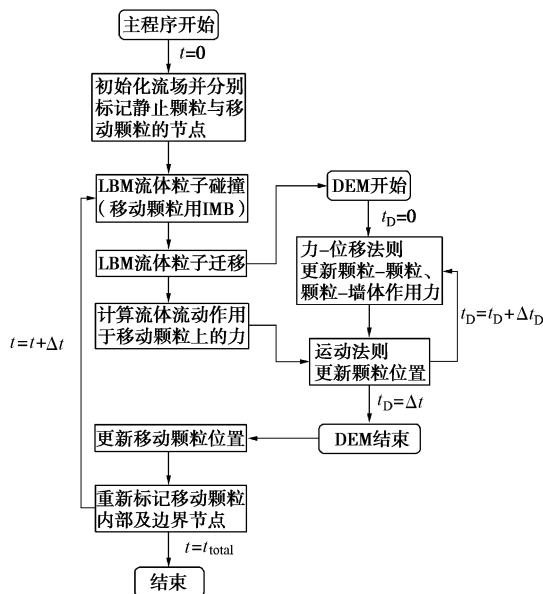


图 1 耦合 LBM-DEM 计算流程

Fig. 1 Flow chart of coupled LBM-DEM

距离较近的两个圆形颗粒在黏性流体中受重力作用自由下落的过程主要包括了追击 (Drafting)、接触 (Kissing) 和翻转 (Tumbling) (简称 DKT), 由于其丰富的颗粒运动信息和流场信息, 被很多学者用来验证提出的耦合算法。Feng 等^[23]将基于补偿法的浸入边界法引入 LBM 中以模拟流体-颗粒的相互作用, 并模拟了 DKT 过程。Niu 等^[24]进一步提出了基于动量交换的浸入边界法, 也通过模拟 DKT 过程进行了验证。

基于上述所开发的耦合 LBM-DEM 模拟了 DKT 过程。模型中竖直通道宽 2 cm、高 8 cm, 格子步长 0.01 cm。模型中流体的密度与运动黏度分别为 1000 kg/m³ 和 1.0×10⁻⁶ m²/s, 弛豫时间为 0.65, 四周为不透水边界并由标准反弹准则进行处理。颗粒 1 (P1) 与颗粒 2 (P2) 的半径均为 0.1 cm, 位置坐标分别为 (0.999 cm, 7.2 cm)、(1 cm, 6.8 cm), 密度为 1010 kg/m³, 接触法向刚度为 1.0×10⁴ N/m, 不考虑接触的切向作用。模型中两个颗粒在下降过程中不同时刻的

位置及相应流场 (格子单位) 如图 2 所示。

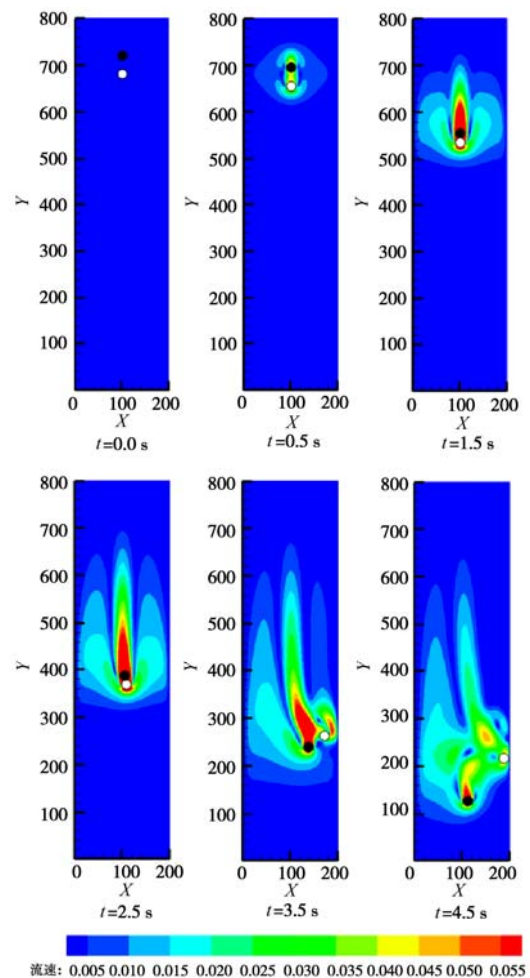


图 2 DKT 算例不同时刻的颗粒位置与流场

Fig. 2 Position of particle and contours of fluid velocity at different instants for DKT case

由图 2 可见, 一开始由于受到尾流的影响, 颗粒 1 的速度大于颗粒 2, 从而会追击颗粒 2, 两者在约 1.5 s 时相接触。由于两个颗粒初始时在水平方向有微小的偏移, 在约 2.5 s 时颗粒 1 开始逐渐翻过颗粒 2, 这就是典型的 DKT 过程。

将两颗粒水平向和竖向位置坐标的变化绘于图 3 并与 Feng 等^[23]和 Niu 等^[24]的模拟结果进行对比。可以看到, 在两个颗粒接触前模拟的结果吻合较好, 颗粒翻转后模拟结果出现一定的偏差, 这是因为翻转是一个非线性不稳定的过程且对模拟方法比较敏感。总体来看, 基于耦合 LBM-DEM 的模拟结果较好地再现了 DKT 过程, 这也证明了该算法能较准确地模拟颗粒-流体耦合问题。

2 隧道突泥的数值模拟

借鉴文献[6]中物理模型试验的研究思路, 即不考虑开挖扰动对突泥孕灾一启动过程的影响, 直接针对

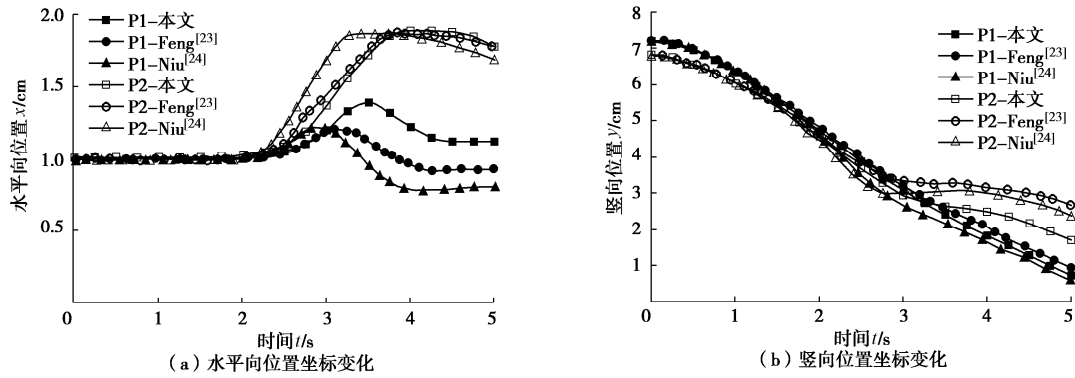


图3 DKT过程中两颗粒的位置变化

Fig. 3 Variation of horizontal and vertical positions of particles during DKT process

突泥灾害的发生过程开展数值模拟。

图4所示为建立的数值模型，模型长700 mm、高300 mm，左、右及底边界由直径4 mm的圆形颗粒（黑色颗粒）两两相切连接所组成，这些边界颗粒在后续计算过程中保持固定并由标准反弹准则处理。在边界范围内，经自重沉积、平衡、黏结等过程生成了模拟地层的颗粒集合体，这些颗粒的粒径在6~8 mm，在竖向上分成等厚度的5层并分别进行了染色。模型上边界为水流入口且为压力边界，通过设置一定的密度值来模拟地层中的水压（式(11)）并由非平衡反弹法^[25]处理。在左边界上离底部60 mm向上设置一定尺寸的缺口（删除该范围内的边界颗粒）来模拟开挖的突泥口。需要说明的是，为了提高耦合LBM-DEM模拟的计算效率，数值模型中颗粒粒径大于实际工程中一般突泥体的颗粒粒径。

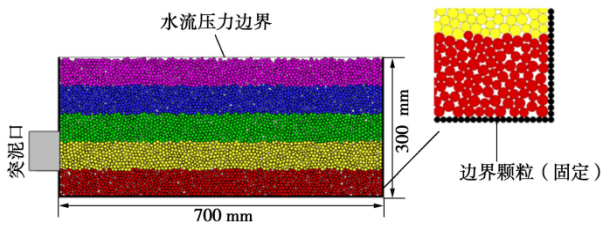


图4 隧道突泥的数值模型

Fig. 4 Numerical model for mud inrush of tunnels

前人研究成果表明隧道突泥破坏发生的基本条件为物质结构组成、地下水和隧道开挖断面等3个方面，为此数值模拟中考虑的变量分别是致灾介质颗粒间黏结强度、入口水压力和突泥口尺寸。颗粒间黏结强度分别取0, 7, 14 N，入口水压力分别取2, 3, 4 kPa，突泥口尺寸分别取60, 80, 100 mm。采用均匀试验方法，共计27组试验，各组试验按“B黏结值-P水压值-O突泥口尺寸值”进行编号，如B7-P3-O80表示模型的颗粒间黏结强度为7 N、入口水压力为3 kPa、突泥口尺寸为80 mm。这里的颗粒间黏结强度指的是1.3节中所述的初始抗剪力 F_{s0} ，且法向黏结的强度

($K_n X_b$)也取为相同值。数值模拟所需的其它计算参数如表1所示。

表1 隧道突泥的LBM-DEM模拟参数

Table 1 LBM-DEM simulation parameters for mud inrush of tunnel

固体参数	取值	流体参数	取值
颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2650	流体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1000
法向刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	1×10^7	运动黏度/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	1×10^{-6}
切向刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	5×10^6	弛豫时间	0.5001
摩擦系数	0.5	格子步长/m	0.001

在将DEM与LBM耦合进行岩土-渗流体系的二维模拟时，孔隙水的流动路径可能会被相接触的圆盘颗粒完全堵塞，Boutt等^[12]提出可将颗粒半径减小到一定程度（称为有效半径，一般为原半径的80%~85%）来实现流体流动，但颗粒之间相互作用不受此影响。本文隧道突泥破坏模拟时有效半径取为原颗粒半径的80%。

生成边界颗粒和致灾介质颗粒后，在设定的黏结强度、入口水压力和突泥口尺寸条件下，采用耦合LBM-DEM计算突泥破坏的演化过程，当颗粒和流场都稳定后计算停止。模拟过程中每计算50000个时步记录1次当时的颗粒分布、颗粒间黏结分布、流速、水压及突泥量等数据，据此可分析模型突泥破坏的演化过程和破坏特征。利用“突出颗粒体积比”来反映突泥演化过程中突泥量随时间的变化，其定义为从突泥口逸出的颗粒体积之和与初始模型中致灾介质颗粒总体积的比值。

3 模拟结果分析

3.1 隧道突泥破坏特征及颗粒间黏结强度的影响

本节以入口水压力为2 kPa、突泥口尺寸为80 mm条件下不同颗粒间黏结强度模型的模拟结果为例分析隧道突泥的破坏特征及颗粒间黏结强度的影响。

图5所示为不同颗粒间黏结强度的隧道模型在突泥灾害发生后突泥量的时变演化曲线。由图5可见，

突泥量随时间的增长基本可分为启动、加速、缓慢和稳定 4 个阶段, 这与张家奇等^[6]的模型试验结果是一致的。图 6, 7 分别示出了 B0-P2-O80 模型与 B14-P2-O80 模型在这 4 个阶段的颗粒分布与流场 (格子单位)。

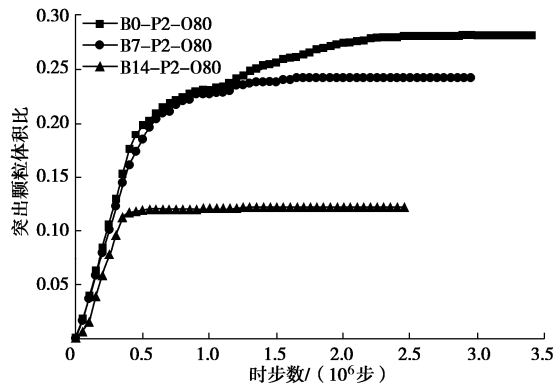


图 5 不同黏结强度下的突泥量时变曲线

Fig. 5 Time-varying curves of mud inrush mass of models with different inter-particle bond strengths

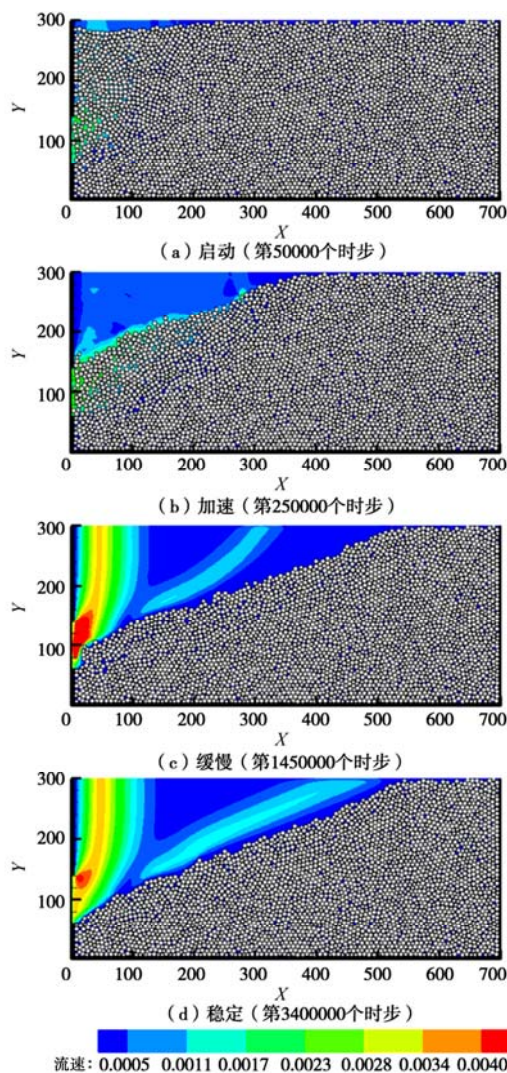


图 6 B0-P2-O80 模型突泥不同时刻的颗粒分布与流场

Fig. 6 Distribution of particles and contours of fluid velocity at different instants during mud inrush for B0-P2-O80 model

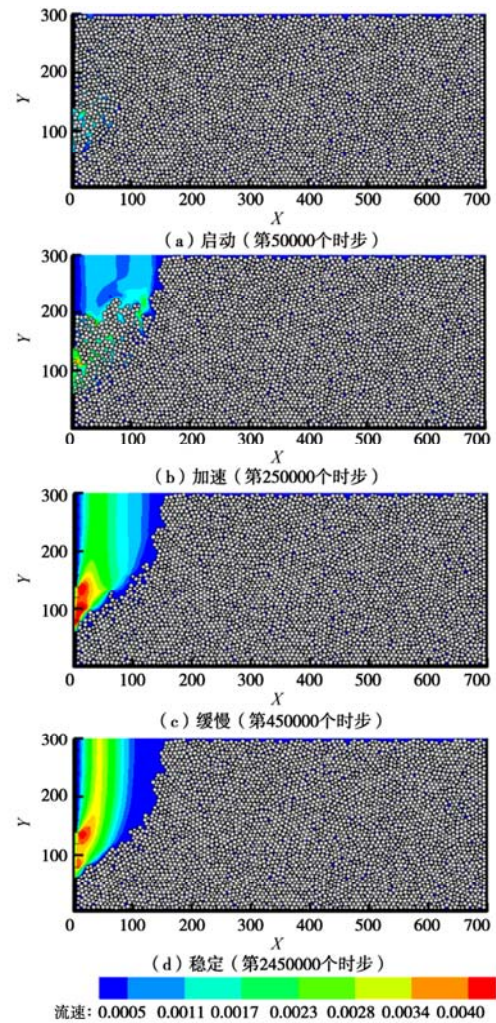


图 7 B14-P2-O80 模型突泥不同时刻的颗粒分布与流场

Fig. 7 Distribution of particle and contours of fluid velocity at different instants during mud inrush for B14-P2-O80 model

由图 5~7 可见, 启动阶段时间短暂, 表现为突泥量时变曲线稍向上凹, B14-P2-O80 模型中表现较明显, 表明颗粒间黏结强度较大时突泥灾害启动较慢。在这一阶段, 由于突泥口形成, 紧靠突泥口的颗粒在重力、颗粒间挤压力和渗流力的共同作用下开始向突泥口外涌出, 颗粒涌出后孔隙增大又造成该处流速增大, 进而带动更多颗粒涌出。

加速阶段的突泥量时变曲线相对陡直, 随颗粒间黏结强度增大, 加速阶段时间变短且增加速率稍小。在这一阶段, 由于突泥口附近颗粒逐渐涌出, 上部颗粒因失去有效支撑向下塌陷并逐渐形成向突泥口倾斜的临空面, 进而形成较宽的过水通道, 在水流冲刷下大量颗粒沿临空面向突泥口方向运移, 故该阶段突泥量持续快速增长。

缓慢阶段的突泥量时变曲线开始向下凹并逐渐变缓, 且随颗粒间黏结强度增大缓慢阶段持续时间变短。在这一阶段, 临空面已基本发展到突泥口下边缘, 绝

大部分水流靠近左边界流动并通过突泥口流出，临空面上颗粒受到的水流作用减弱，突泥量增长趋缓并最终保持不变，此时颗粒和流场都已稳定，即进入稳定阶段。颗粒间黏结强度越小，稳定后的最终突泥量越大。

图 8 示出了 3 种黏结强度下模型突泥稳定后的破坏形态，由图可知：无黏结的致灾介质(如 B0-P2-O80)突泥破坏形态近似为直线，类似于无黏性土边坡的破坏形式；有一定黏结强度的致灾介质(如 B14-P2-O80)突泥破坏形态近似为圆弧或抛物线状，类似于黏性土边坡的圆弧滑动破坏；随颗粒间黏结强度增大，突泥破坏区(临空面与左边界之间无颗粒区域)扩展范围逐渐减小。

从图 8 还可以看出，无黏结的 B0-P2-O80 模型突泥稳定后临空面后一定范围内的染色颗粒相互错动、掺杂，有黏结的 B7-P2-O80、B14-P2-O80 模型突泥稳定后临空面后一定范围内颗粒间黏结已断裂，这说明突泥灾害除了可直接导致部分致灾介质涌出形成破坏区外，还可对临空面后方未突出介质造成不同程度的扰动，形成一定范围的扰动区，这与张家奇^[6]等模型试验结果也是一致的。

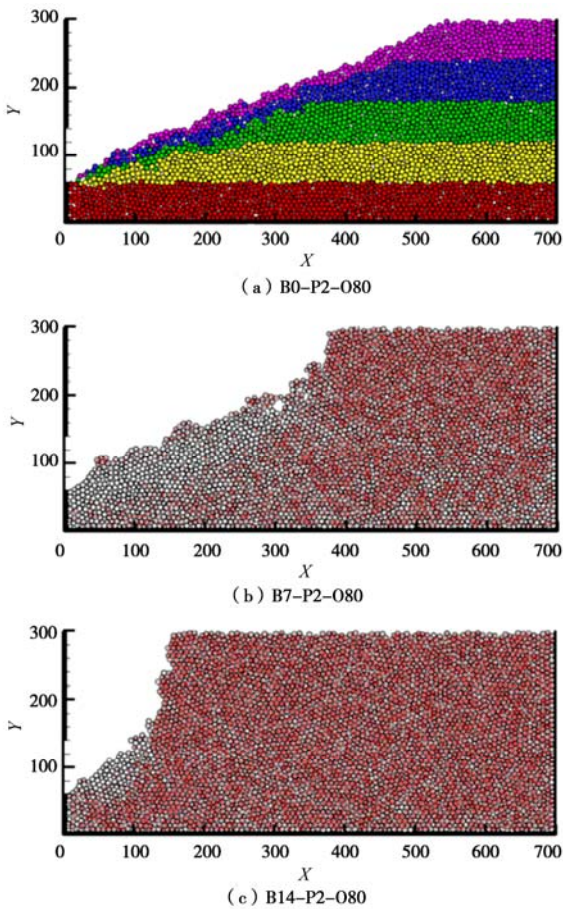


图 8 不同黏结强度下模型最终的破坏形态

Fig. 8 Final failure modes of models with different inter-particle bond strengths

3.2 水压力的影响

本节以突泥口尺寸为 60 mm 条件下不同水压力时的模拟结果为例分析水压力对隧道突泥破坏特征的影响。

图 9 所示为不同入口水压力下模型突泥量的时变曲线。由图 9 可见，当其它条件不变时，随着入口水压力的增加，突泥灾害发生后突泥量增长越快，最终的突泥量也越大，且颗粒间黏结强度较大时水压力的这种影响越显著。

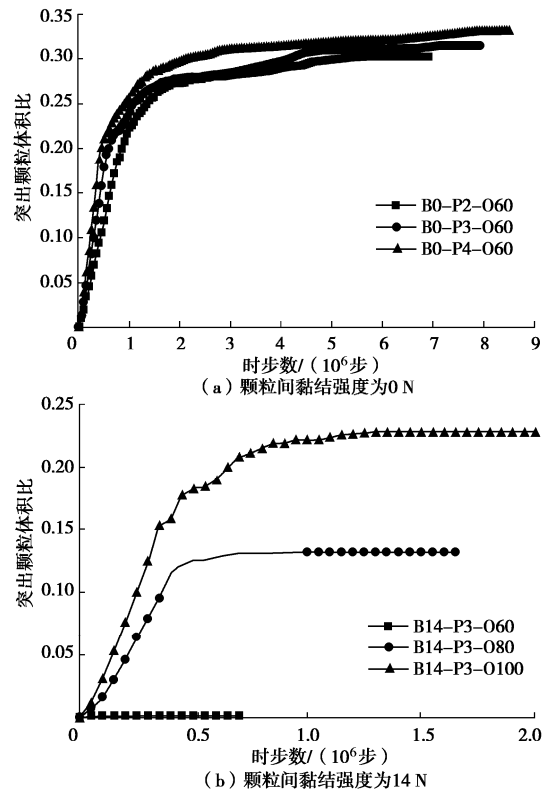


图 9 不同入口水压力下的突泥量时变曲线

Fig. 9 Time-varying curves of mud intrush mass of models with different inlet water pressures

图 10 示出了黏结强度为 14 N 且突泥口尺寸为 60 mm 时不同水压力下模型突泥稳定后的破坏形态。可以看到，水压力为 2 kPa 时模型中只有突泥口附近少数颗粒涌出，随后便形成了稳定的土拱，破坏区并未向上扩展。当水压力增加到 3, 4 kPa 时，破坏区均向上扩展至模型表面，且 4 kPa 时破坏区在水平方向(沿隧道轴线方向)扩展的宽度更大，因此其突泥量也更多。

值得注意的是，针对 B14-P2-O60 模型因土拱而无法形成贯通的破坏区，除了将水压力增加到 3 kPa (B14-P3-O60)，将黏结强度减小到 7 N (B7-P2-O60) 或将突泥口尺寸增大到 80 mm (B14-P2-O80) 也均可形成贯通的破坏区。因此，隧道突泥破坏是致灾岩土介质、水压和开挖三者综合作用的结果，只有当三者

的组合达到一定条件时隧道才有可能发生突泥灾害。

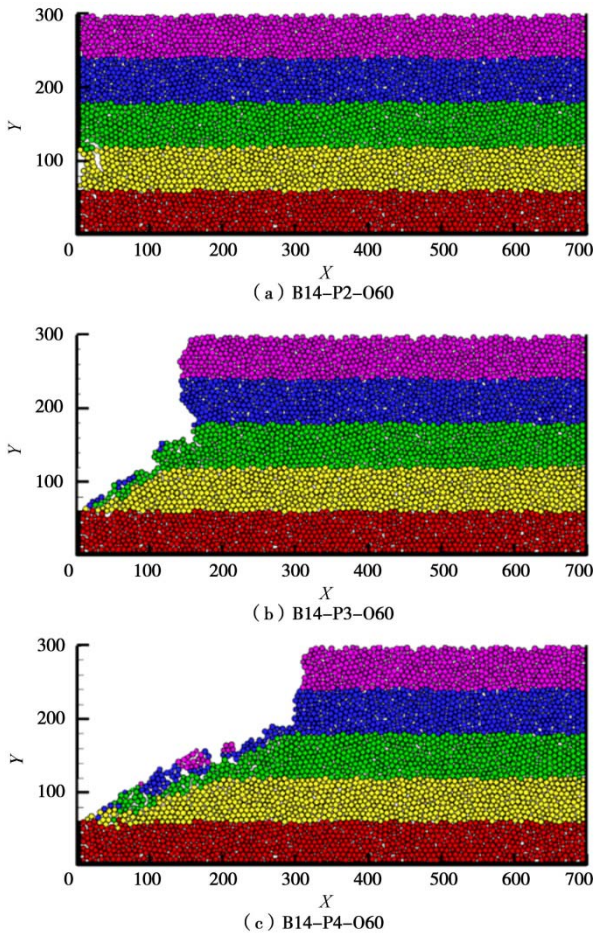


图 10 不同入口水压力下模型最终的破坏形态

Fig. 10 Final failure modes of models with different inlet water pressures

3.3 突泥口尺寸的影响

本节以入口水压力为 3 kPa 条件下不同突泥口尺寸时的模拟结果为例分析突泥口尺寸对隧道突泥破坏特征的影响。图 11 所示为不同突泥口尺寸下模型突泥量的时变曲线。

由图 11 (a) 可见, 当致灾介质颗粒间无黏结时, 突泥口尺寸越大, 突泥灾害发生后突泥量增长越快, 但稳定后最终的突泥量基本相等, 观察最终的破坏形态发现其破坏区范围也大体相同。究其原因, 这里突泥口尺寸增加是通过将其下边缘固定 (离模型底部 60 mm)、上边缘向上抬高来实现的, 由 3.1 节可知无黏结致灾介质突泥破坏后的形态近似为一直线且通过突泥口下边缘, 参考管道破损漏砂的研究成果^[26-27]可知一定水压下无黏性砂土稳定的坡角与自然休止角有一定量关系, 因此不同突泥口尺寸下突泥稳定后临空面的坡脚和坡度在理论上都是相同的, 故模拟的最终突泥量和破坏区范围都基本相同。

由图 11 (b) 可见, 当致灾介质颗粒间形成一定

强度的黏结后, 突泥口尺寸越大, 突泥灾害发生后突泥量增长越快, 稳定后的突泥量也越多。究其原因, 颗粒间形成一定强度的黏结后, 致灾介质整体性较强, 突泥口尺寸越大造成其附近涌出的颗粒越多, 上部塌陷的范围更大, 破坏区扩展范围也更宽, 故突泥量增多。

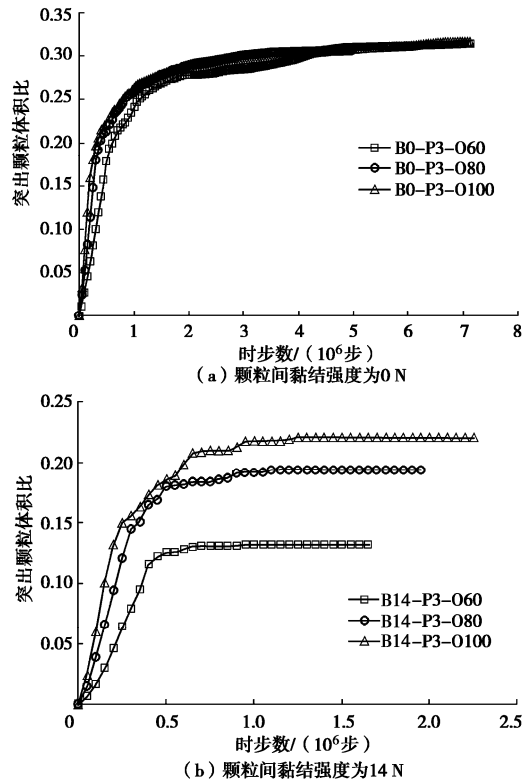


图 11 不同突泥口尺寸下的突泥量时变曲线

Fig. 11 Time-varying curves of mud inrush mass of models with different sizes of mud inrush hole

4 结 论

(1) 隧道突泥破坏本质上是流-固耦合过程, 基于耦合 LBM-DEM 模拟再现了隧道突泥破坏“启动、加速、缓慢和稳定”等连续 4 个阶段的演化过程。

(2) 致灾介质颗粒间的黏结强度对突泥破坏特征有显著的影响, 无黏结的致灾介质突泥破坏形态近似为直线, 而有一定黏结的致灾介质突泥破坏形态近似为圆弧或抛物线状, 随着颗粒间黏结强度增大, 突泥破坏区扩展范围逐渐减小, 稳定后的突泥量也逐渐减少。

(3) 当其它条件不变时, 随着水流入口水压力的增加, 突泥灾害发生后突泥量增长越快, 最终的突泥量也越大, 且颗粒间黏结强度较大时水压力的这种影响越显著。

(4) 当致灾介质的颗粒间无黏结时, 不同突泥口尺寸的模型在稳定后突泥量和破坏区范围基本相同;

而当颗粒间形成一定强度的黏结后,突泥口尺寸越大,突泥灾害发生后突泥量增长越快,稳定后的突泥量也越多。

(5) 隧道突泥破坏是致灾岩土介质、水压和开挖三者综合作用的结果,只有当三者的组合达到一定条件时隧道才有可能发生突泥灾害。

致谢: 本文在 LBM-DEM 耦合计算程序的开发和测试过程中得到了美国 Los Alamos 国家实验室 Wang Min 博士的悉心指导, 在此致以衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(10): 1945 - 1956. (QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(10): 1945 - 1956. (in Chinese))
- [2] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判别、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(5): 1043 - 1069. (LI Shu-cai, XU Zhen-hao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(5): 1043 - 1069. (in Chinese))
- [3] 张志强, 阚呈, 孙飞, 等. 碎屑流地层隧道发生灾变的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(12): 2451 - 2457. (ZHANG Zhi-qiang, KAN Cheng, SUN Fei, et al. Experimental study of catastrophic behavior for tunnel in debris flow strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(12): 2451 - 2457. (in Chinese))
- [4] 张庆松, 王德明, 李术才, 等. 断层破碎带突水突泥模型试验系统研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 417 - 426. (ZHANG Qing-song, WANG De-ming, LI Shu-cai, et al. Development and application of model test system for inrush of water and mud of tunnel in fault rupture zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 417 - 426. (in Chinese))
- [5] LIU J Q, CHEN W Z, LIU T G et al. Effects of initial porosity and water pressure on seepage-erosion properties of water inrush in completely weathered granite[J]. Geofluids, 2018: 1 - 11.
- [6] 张家奇, 李术才, 张庆松, 等. 基于透明土的隧道突泥破坏特征试验研究[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(10): 177 - 189. (ZHANG Jia-qi, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Experimental research on destruction characteristics of tunnel mud inrush using transparent soils[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(10): 177 - 189. (in Chinese))
- [7] 张庆艳, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 断层破碎带突水突泥演化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(6): 1911 - 1923. (ZHANG Qing-yan, CHEN Wei-zhong, YUAN Jing-qiang, et al. Experimental study on evolution characteristics of water and mud inrush in fault fractured zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(6): 1911 - 1923. (in Chinese))
- [8] 王媛, 陆宇光, 倪小东, 等. 深埋隧洞开挖过程中突水与突泥的机理研究[J]. 水利学报, 2011, **42**(5): 595 - 601. (WANG Yuan, LU Yu-guang, NI Xiao-dong, et al. Study on mechanism of water burst and mud burst in deep tunnel excavation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **42**(5): 595 - 601. (in Chinese))
- [9] ZHAO J D, SHAN T. Coupled CFD-DEM simulation of fluid-particle interaction in geomechanics[J]. Powder Technology, 2013, **239**(17): 248 - 258.
- [10] 蒋明镜, 张望城. 一种考虑流体状态方程的土体 CFD-DEM 耦合数值方法[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(5): 793 - 801. (JIANG Ming-jing, ZHANG Wang-cheng. Coupled CFD-DEM method for soils incorporating equation of state for liquid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 793 - 801. (in Chinese))
- [11] FENG Y T, HAN K, OWEN D R J. Coupled lattice Boltzmann method and discrete element modelling of particle transport in turbulent fluid flows: computational issues[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, **72**(9): 1111 - 1134.
- [12] BOUTT D F, COOK B K, MCPHERSON B J O L, et al. Direct simulation of fluid-solid mechanics in porous media using the discrete element and lattice-Boltzmann methods[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**: B10209.
- [13] WANG M, FENG Y T, OWEN D R J, et al. A novel algorithm of immersed moving boundary scheme for fluid-particle interactions in DEM-LBM[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, **346**: 109 - 125.
- [14] WANG M, FENG Y T, PANDE G N, et al. A coupled 3-dimensional bonded discrete element and lattice Boltzmann method for fluid-solid coupling in cohesive geomaterials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, **42**: 1405 - 1424.

- [15] GALINDO-TORRES S A, SCHEUERMANN A, MUHLHAUS H B, et al. A micro-mechanical approach for the study of contact erosion[J]. *Acta Geotechnica*, 2015, **10**: 357 - 368.
- [16] WANG M, FENG Y T, WANG C. Numerical investigation of initiation and propagation of hydraulic fracture using the coupled bonded particle-lattice Boltzmann method[J]. *Computers & Structures*, 2017, **181**: 32 - 40.
- [17] BHATNAGAR P L, GROSS E P, KROOK M K. A model for collision processes in gases: I small amplitude processes in charged and neutral one-component systems[J]. *Physical Review*, 1954, **94**(3): 511 - 525.
- [18] QIAN Y H, D'HUMIÈRES D, LALLEMAND P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation[J]. *Europhysics Letters*, 1992, **17**(6): 479 - 484.
- [19] WANG M, FENG Y T, WANG C Y. Coupled bonded particle and lattice Boltzmann method for modelling fluid-solid interaction[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2016, **40**(10): 1383 - 1401.
- [20] WU J, SCHOLTÈS L, TINET A J, et al. A comparative study of three classes of boundary treatment schemes for coupled LBM/DEM simulations[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods*, Springer Proceedings in Physics, 2017: 551 - 560.
- [21] NOBLE D R, TORCZYNSKI J R. A lattice-Boltzmann method for partially saturated computational cells[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 1998, **9**(8): 1189 - 1201.
- [22] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(1): 47 - 65.
- [23] FENG Z G, MICHAELIDES E E. The immersed boundary-lattice Boltzmann method for solving fluid-particles interaction problems[J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, **195**: 602 - 628.
- [24] NIU X D, SHU C, CHEW Y T, et al. A momentum exchange-based immersed boundary-lattice Boltzmann method for simulating incompressible viscous flows[J]. *Physics Letters A*, 2006, **354**: 173 - 182.
- [25] ZOU Q, HE X. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model[J]. *Physics of Fluids*, 1997, **9**: 1591 - 1598.
- [26] TANG Y, ZHU D Z, CHAN D H. Experimental study on submerged sand erosion through a slot on a defective pipe[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **143**(9): 04017026.1 - 04017026.14.
- [27] 刘成禹, 张翔, 程凯, 等. 地下工程涌水涌砂诱发的沉降试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(3): 843 - 851. (LIU Cheng-yu, ZHANG Xiang, CHENG Kai, et al. Experimental study of settlement caused by water and sand inrush in underground engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(3): 843 - 851. (in Chinese))