

文章编号:1673-9469(2025)02-0037-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.02.005

基于 PFC-CFD 耦合的发泡泥浆渗流数值模拟研究

袁俊平¹,徐星宇^{1*},陈龙²,丁国权¹,蔺彦玲^{1,3}

(1.河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室,江苏 南京 210098;

2.南京中兴新软件有限责任公司,江苏 南京 210012;3.江苏开放大学 建筑工程学院,江苏 南京 214257)

摘要: 基于 PFC3D 软件建立了一维发泡泥浆渗流模型,开展流固耦合模拟,并通过 FISH 函数实现气泡粒径的动态调整。此外,开发了连续注浆算法,验证了泥浆分布的均匀性与连续性,成功模拟发泡泥浆在土层中的渗流过程。针对泥膜形成时间难以确定的问题,提出三类计算终止条件,并通过对比室内试验与数值模拟结果,验证了模型的合理性。

关键词: 发泡泥浆;PFC3D;流固耦合;渗流;模型参数

中图分类号:TU43

文献标识码:A

Numerical Simulation of Foamed Mud Seepage Based on PFC-CFD Coupling

YUAN Junping¹, XU Xingyu^{1*}, CHEN Long², DING Guoquan¹, LIN Yanling^{1,3}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Nanjing Zhongxing New Software Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210012, China; 3. College of Architecture and Engineering, Jiangsu Open University, Nanjing, Jiangsu 214257, China)

Abstract: Based on the PFC3D software, a one-dimensional foam mudstone seepage model was established, and the fluid-solid coupling simulation was carried out. The dynamic adjustment of bubble particle size was realized through the FISH function. In addition, a continuous grouting algorithm was developed, and the uniformity and continuity of mudstone distribution were verified. The seepage process of foam mudstone in soil layers was successfully simulated. Regarding the problem that the formation time of mud film is difficult to determine, three types of calculation termination conditions were proposed. By comparing the results of indoor experiments and numerical simulations, the rationality of the model was verified.

Key words: foamed mud; PFC3D; fluid-solid coupling; seepage; model parameters

发泡泥浆是一种轻质泥浆,其黏度和切力大,最早应用在气钻探工程^[1],多用于低压高渗透性地层,可起到防止钻井护壁泥浆泄漏和保护油气层的作用^[2-3]。为了寻求最优的材料配比,学者们主要利用离心机、流变仪、泥浆渗透装置等仪器设备,通过水油比试验、流变性能测试试验、岩心渗透率试验^[4-5],测试发泡泥浆的流变性、热稳定性、储层保护性能及堵漏效果等指标^[6-7]。研究发现,泥浆护壁作用的关键是泥浆中的固体物质和地层中的细颗粒在孔壁形成的泥膜^[8]。因此,学者们

对泥膜形成过程及影响因素开展了一系列的室内泥浆渗透和成膜试验研究^[9-10]。由于室内试验耗时长、成本高、测试结果离散性较大,更多研究者通过数值模拟手段,用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)、FLUENT 等流体力学软件来刻画泥浆的流动特性^[11-12],以颗粒程序(Particle Flow Code, PFC3D)、离散单元法(Discrete Element Method, DEM)等离散元软件来模拟泥浆中的固体物质和地层中的土颗粒,进而计算泥浆渗透力作用下固体颗粒的受力变形^[13-14]。通过这种方

收稿日期:2024-11-13

基金项目:江苏省住房和城乡建设厅建设系统科技项目(2023ZD040);江苏开放大学(江苏城市职业学院)“十四五”2023年度科研规划课题(2023XK020);国家重点研发项目(2024YFF1700701)

第一作者:袁俊平(1975—),男,湖北麻城人,博士,教授,从事堤坝与道路工程、非饱和土特性方面的研究。

*通信作者:徐星宇(2000—),女,安徽蚌埠人,硕士研究生,从事土石坝数值模拟方面的研究。

法,已经实现了对水平井环空泡沫流体携岩屑过程中岩屑沉降过程^[15]和滤饼“穿孔试验”^[16]等的模拟,揭示了泥膜形成过程的细观机制和宏细观联系^[17]。

然而,现有泥浆护壁过程的数值模拟方法仍存在一些不足,如:未考虑泡沫随泥浆流动时因压力变化而发生胀缩情况;模拟中泥浆一次生成,缺少后续补充,未形成连续渗流过程;计算模型终止条件较为简单,难以确定泥膜形成的准确时间等。为此,本文基于 PFC-CFD 耦合方法^[18],建立发泡泥浆一维渗流模型,研究提出了模拟气泡胀缩变化和泥浆连续渗流的实现方法,为研究发泡泥浆的成膜机理和护壁效果提供了有效技术手段。

1 发泡泥浆渗流模型构建

本文构建发泡泥浆渗流模型的思路是:利用 PFC 软件建立泥浆在土中渗流的流固耦合模型,通过 CFD 模块处理流体部分。将气泡视作离散体引入模型,使用 FISH 语言编写函数描述气泡的胀缩行为,提出连续注浆模拟方法以实现渗流过程中泥浆的持续补充。最后,设立合适的模型运算终止条件,以实现发泡泥浆在土层中形成稳定渗流或出现泥膜现象的准确模拟。

1.1 流固耦合模拟

耦合模型中的固体部分包括土层、泥浆中的固相和气泡,将其分为生成区域和土层区域两部分。其中,生成区域是无网格区域,使用 generate 命令生成泥浆颗粒(即泥浆中固相和气泡),并使得各颗粒之间没有接触。土层区域是网格区域,参照分层压实法生成土颗粒^[19]。根据土层的孔隙率和颗粒粒径分布情况确定区域内的颗粒数目,在扩展的初始生成域内构建颗粒体系后,通过调整边界条件将其逐渐压缩至目标计算区域尺寸。在一个较大空间内生成颗粒后压缩至计算区域大小。由于在 PFC 中,颗粒的初始生成位置具有随机性,因此在模拟土层时需设定特定的空间范围,即构建“墙体”,来限定颗粒的生成区域,确保其分布在预定的空间范围内且不会重叠。待两个区域生成后,即启动计算循环,通过颗粒间相互作用调整,使得模型达到动态平衡。

耦合模型中的流体部分为泥浆中的液相,通过 PFC 软件中的 CFD 模块进行计算。为简化问题,本研究中仅考虑泥浆在土层中的单向流动,而在数值模拟中,也主要针对六面体流域内的单向流动,故将所有 CFD 单元均设置为六面体单元,并仅在土层区

域生成流体网格,如图 1 所示。流体网格的构建可通过 Python 求解器 fipy 库中的 Grid3D 函数实现。

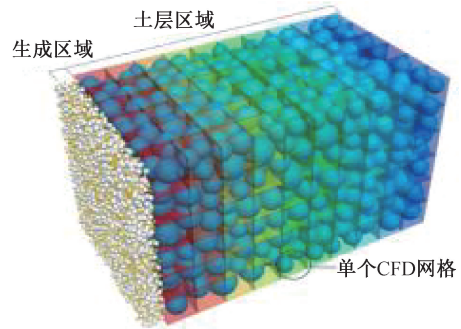


图 1 流体网格布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fluid grid arrangement

PFC 的 CFD 模块使用狄利克雷边界条件(第一类边界条件),在进行流体计算时需给出初始压力边界条件。压力在入口处满足:

$$\vec{\nabla}_p = -\vec{v}_{in} \frac{k}{\mu \varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\vec{\nabla}_p$ 指压力梯度, Pa/m; k 为渗透率, m^2 ; μ 为流体动力黏度, $Pa \cdot s$; ε 为孔隙度; \vec{v}_{in} 为指定入口速度, m/s。

压力在出口处满足:

$$p = 0 \quad (2)$$

分别在耦合模型的入流口和出流口设置压力后,泥浆中的悬浮颗粒(固相和气泡)在渗流力的作用下进入土层区域,流体网格内土体孔隙率和流体流速随之改变,耦合模型中的土颗粒和泥浆中的悬浮颗粒(固相和气泡)所受拖曳力也随之变化,即固体部分会随之调整。由此,实现了对泥浆渗入土体时的流固耦合相互作用的模拟。

1.2 气泡胀缩模拟

气泡在孔隙网络中的物理行为复杂,受外界温度和压力变化的影响,其粒径大小会发生变化。本文使用 FISH 语言编写函数描述气泡的胀缩行为。

气泡在周围压力减小时会发生膨胀。模型中压力仅在 y 轴方向变化,编写函数以 y 坐标为主,编写思路如下:当气泡颗粒进入土层后,程序会记录每一步中所有气泡颗粒的 y 坐标,并监测 y 坐标的增量 Δy 。当 Δy 超过预设的阈值后,便将其粒径做一次放大,如此不断地执行气泡膨胀函数,以实现气泡膨胀的模拟。

具体的思路如下:将土层模型的长度 L 分割为 1 000 份,定义每一份的长度为 $\Delta y = L/1\,000$,如图 2 所示。随着气泡在 y 轴方向上坐标的增加,

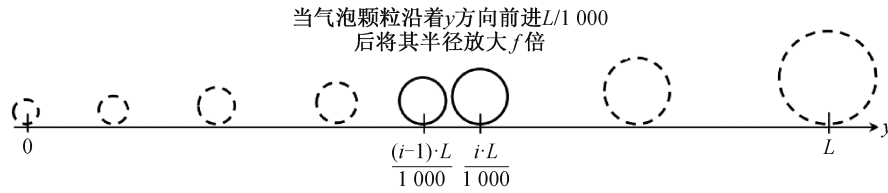


图 2 气泡放大程序处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bubble magnification program processing

压强逐渐减小,导致气泡半径增大。设起始位置的压强为 p_0 ,末端压强为 p_e ,根据式(3)可求出气泡颗粒位于 $iL/1000$ 的半径,而式(4)即为气泡每前进 $L/1000$ 长度所要放大的系数 f 。

$$r_{(i)} = \sqrt[3]{\frac{C}{p_0 + \frac{i(p_e - p_0)}{1000}}} \quad (3)$$

$$f = \sqrt{\frac{(i-1) + (1001-i) \frac{p_0}{p_e}}{i + (1000-i) \frac{p_0}{p_e}}} \quad (4)$$

式中: $1 \leq i \leq 1000$, C 为固定常数。

气泡在通过孔隙喉道时会缩小,直至其直径足以通过。如图 3 所示,缩小函数的编写思路如下:在程序运行过程中,当某气泡颗粒与土层颗粒的接触数大于 1 时,表明气泡颗粒与两个或两个以上的土层颗粒有接触,将该气泡颗粒的粒径缩小至原来的 99%,直到其粒径刚好通过喉道,即满足接触数等于或小于 1。该函数定期执行,并在压力梯度增大时按比例缩短时间步长,以实现气泡缩小的模拟。

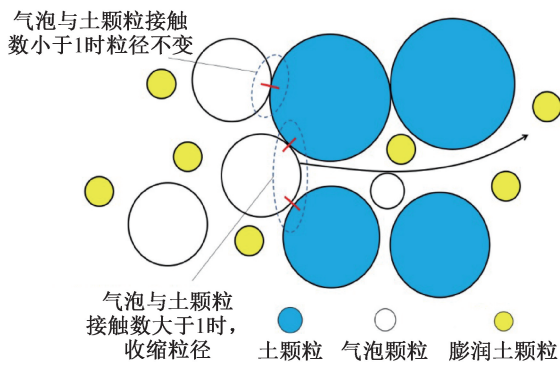


图 3 气泡缩小思路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of idea for reducing the size of bubbles

1.3 连续注浆的实现与观测

本文采取分批次生成泥浆并赋值速度的方式,以控制参与计算的颗粒数目,设置观测截面、观测区域和测量球,对注浆过程进行采集与记录。

连续注浆的思路如图 4 所示:首先在生成区域生成第一批泥浆颗粒,使之以 v_0 的速度向右匀速运动,当第一批颗粒完全进入土层区后,重复操作以生成第二批泥浆颗粒,并赋值同样的速度 v_0 。当颗粒运行到右侧墙体时,删除颗粒。如此循环往复,实现发泡泥浆的连续注浆。图 5 为颗粒连续补充示意图,在数值模型中按照上述方法进行模拟,不同颜色代表不同批次生成的颗粒,这些颗粒在生成区域内匀速运动,进入土层区域后受流体力作用加速,实现颗粒的连续补充。

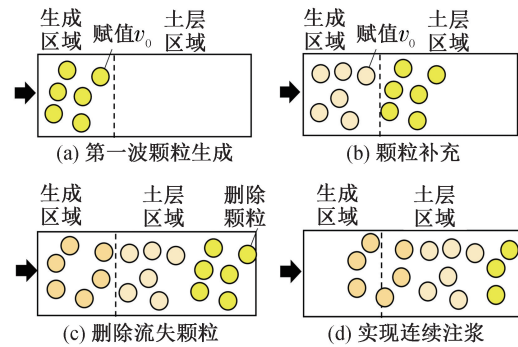


图 4 连续补浆实现示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the realization of continuous plugging

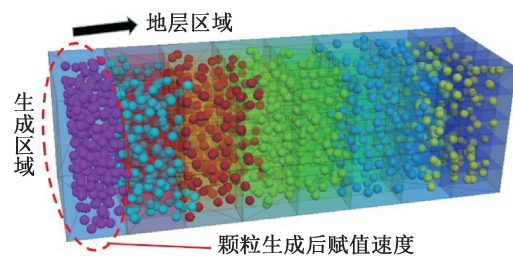


图 5 颗粒连续补充示意图

Fig. 5 Schematic diagram of continuous particle replenishment

为研究发泡泥浆入流过程中不同参数的变化,设置如图 6 所示的观测截面、观测区域和测量球,编写 FISH 函数,并结合 PFC 中的“measure”和“history”两个命令进行记录。将土层长度 L 均分为 10 个观测区域,每隔 5000 个时间步记录一次各观测区域内颗粒数量的变化情况。在每个观测区域内生成 25 个直径为 $L/10$ 的测量球,当膨润土、气泡颗粒进入土层模型后,会改变模型的相关

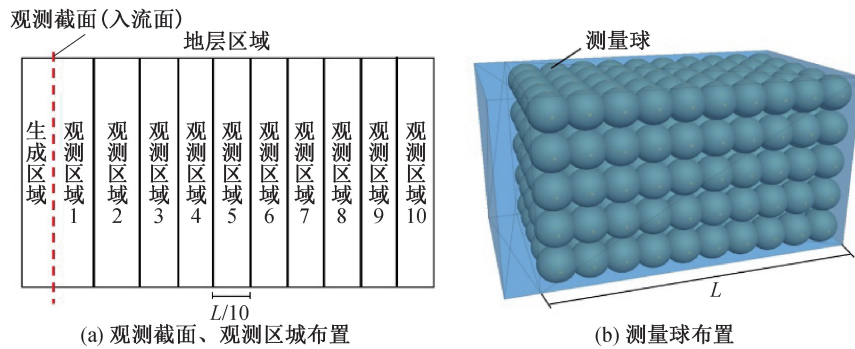


图6 观测截面、观测区域、测量球布置图

Fig. 6 Arrangement diagram of observation cross-section, observation area and measurement sphere

参数,通过测量球可监测记录参数的变化。

1.4 模型的运行与终止

传统的一维入渗模型通常以达到运算上限为终止条件,泥膜的形成与运算终止未能同步。基于此,本文设置了三类模型运算的终止条件:

(1)当形成泥膜时,则运算终止。若在较长时间内(单位时间 5 000 个时间步)颗粒的数目始终为 0,气泡或膨润土难以进入土层,则表明泥膜形成。

(2)膨润土颗粒损失过多,则运算终止。在现实中,泡沫泥浆方案不合理会造成膨润土大量流失。在程序设计中,通过持续统计膨润土颗粒的流失数目,当流失的膨润土颗粒数目超过最初生成的膨润土颗粒数目时,计算停止,判定方案不合理。

(3)成膜时间太长,则运算终止。若发泡泥浆在较长时间内依旧无法堵塞土层,可能会导致情况(2)的发生,方案同样不合理。因此,在程序设计中,当计算步数达到一个较长的时间(本文设为 200 万时间步,即 400 个单位时间),计算停止。

当满足以上三种条件之一,则利用 PFC 的 solve fishhalt 功能终止模型运行。

2 模型参数确定

本文通过试验和理论推导的方式确定具体参数。在模拟过程中,运算涉及三个部分:墙体、颗粒及流体网格。墙体的主要作用为生成计算区域,已在第一节中有所介绍,以下将重点讨论膨润土和气泡颗粒参数以及接触模型参数的确定方法。

2.1 颗粒参数的确定

颗粒参数包括膨润土颗粒和气泡颗粒的粒径

及数目。有研究表明,在膨润土粒径级配曲线中小于含量 85%所对应的颗粒粒径(d_{85})对泥膜的形成起到关键性作用^[20],且较小的粒径在泥膜的形成过程中无法起到堵漏作用,因此,本研究将膨润土的颗粒粒径均视作相等。膨润土颗粒粒径通过试验确定,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[21]进行试验,得到膨润土的粒径级配曲线如图 7 所示,取膨润土粒径级配曲线中小于含量 85%对应的粒径 $d_{85}=0.08$ mm 作为多组膨润土的平均粒径。

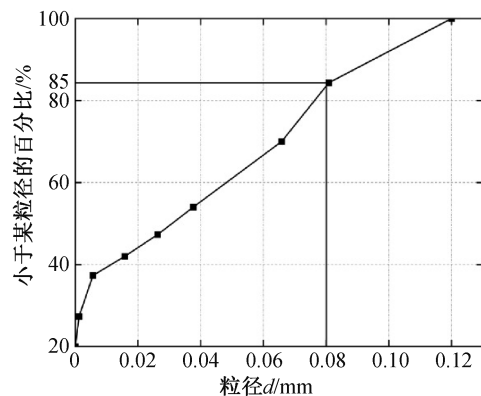


图7 膨润土颗粒粒径级配曲线

Fig. 7 Particle size distribution curve of bentonite particles

气泡颗粒粒径通过“显微镜采集图像+软件统计半径”的方式^[22]确定。通过气泡图像分析,虽然气泡大小存在差异,但不足以划分为多个粒径等级。同时,将气泡分为不同粒径计算会显著增加计算量。为简化计算,采用了平均粒径的方法以有效表征气泡整体特性。利用 Photoshop 和 ImageJ 软件,计算出每个气泡的等效粒径,再依据式(5)计算得到所有气泡的平均半径。

$$r_t = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (5)$$

式中: r_f 为平均半径, μm ; n 为气泡数量, 个; r_i 为气泡 i 的等效半径, μm 。根据平均半径将数值模拟中气泡颗粒的半径定为 $70 \mu\text{m}$, 即粒径为 $140 \mu\text{m}$ 。

颗粒数目采用公式推导的方式确定。泥浆中膨润土与水的质量之比称为膨水比, 记作 R_{sw} ; 泡沫与泥浆基浆的体积之比称为泡沫浓度, 记作 C_g 。单位体积 ($V=1 \text{ cm}^3$) 发泡泥浆中膨润土颗粒的数目可根据式 (6) 确定, 气泡颗粒的数目根据式 (7) 确定。

$$n_b = \frac{\frac{G_s}{1 + R_{sw}} R_{sw}}{\frac{4}{3} \pi r_b^3 \cdot \rho_b} = \frac{3G_s R_{sw}}{4(1 + R_{sw}) \pi r_b^3 \rho_b} \quad (6)$$

$$n_g = \frac{1 - \frac{G_s \cdot V}{1 + R_{sw}} (1 - \frac{1}{\rho_b} R_{sw})}{\frac{4}{3} \pi r_g^3} = \frac{3[\rho_b - G_s(\rho_b - R_{sw})]}{4\pi r_g^3 \rho_b (1 + R_{sw})} \quad (7)$$

式中: G_s 为土粒相对密度; n_b 、 n_g 指膨润土颗粒、气泡颗粒的数量, 个; r_b 、 r_g 指膨润土颗粒、气泡颗粒的半径, μm ; ρ_b 指膨润土中气泡的密度, g/cm^3 。

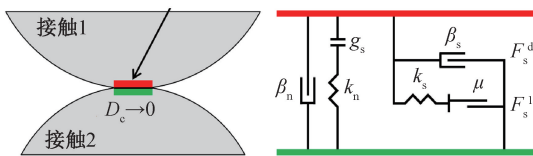
此外, 由于泡沫浓度是根据发泡泥浆比重间接推导而得, 故给出数值模拟中泡沫浓度 C_g 的表达式为

$$C_g = \frac{V_g}{V - V_g} = \frac{(1 + R_{sw}) \rho_b}{G_s(\rho_b - R_{sw})} \quad (8)$$

式中: V 指单位体积, cm^3 ; V_g 指泥浆中气泡的体积, cm^3 。

2.2 接触模型参数的设置

本文选取 PFC 内置的线性接触模型进行计算, 如图 8 所示, 不同计算单元 (膨润土颗粒、气泡颗粒、墙体) 之间均使用此模型。



注: D_c 为接触面之间的接触位移, K_n 为法向刚度, K_s 为切向刚度, β_n 为法向临界阻尼比, β_s 为切向临界阻尼比, μ 为摩擦系数, F_s^1 为切向线性力, F_s^d 为切向阻力, g_s : 表面间隙。

图 8 线性弹性模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of linear elasticity model

利用模型公式计算出单元之间的法向刚度、切向刚度、摩擦系数, 参考 itasca 手册确定模型中的颗粒参数, 汇总于表 1。

表 1 数值模型参数汇总表

Tab. 1 Summary of numerical model parameters

模型成分	相关参数	数值
墙体	法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^{10}
	切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^{10}
	滑动摩擦系数	0.8
土层颗粒	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	3
	法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.6×10^4
	切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1.6×10^4
	滑动摩擦系数	0.8
膨润土颗粒	粒径/mm	0.08
	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.7
	法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^3
	切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^3
	滑动摩擦系数	0.5
气泡颗粒	粒径/mm	1.4
	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1
	法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	10
	切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	10
流体单元	滑动摩擦系数	0.7
	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1
	黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1×10^{-3}
颗粒相	时间步长/s	1×10^{-8}
流体相		1×10^{-6}

3 数值模拟合理性验证

3.1 流固耦合方法验证

流固耦合方法的基准验证是确保数值模型计算精度和效率的重要步骤。本文基于 PFC3D 内置的经典案例^[23] (静水中单个球形颗粒的沉降问题和水流穿过砂床试验) 进行了基准验证。通过对比三个膨润土颗粒在静水中稳定沉降末速的数值解与解析解, 以及水槽中颗粒均匀分布时模型渗透系数的数值解与解析解, 结果表明模型计算与解析解误差较小, 验证了本文流固耦合方法的合理性, 见表 2 和表 3。

表 2 单球沉降问题的数值模拟与解析解结果对比

Tab. 2 Comparison of numerical and analytical results for the single sphere sedimentation problem

球序号	颗粒半径/mm	解析解 / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	数值解 / $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	误差率 /%
1	1.0	-1.45	-1.50	3.4
2	1.5	-3.27	-3.33	1.8
3	2.0	-5.81	-5.86	0.8

表3 水流砂床试验的数值解与解析解的对比

Tab.3 Comparison of numerical and analytical results for the water flow through sand bed test

数值解/($m \cdot s^{-1}$)	解析解/($m \cdot s^{-1}$)	误差率/%
0.5478	0.5492	2.55

3.2 连续性及均匀性验证

由于室内试验无法准确观测到泥浆气泡颗粒的微观变化,因此,按照前文方式建模,通过检验泥浆的连续性和均匀性,验证连续注浆算法的合理性。模型、测量球和观测面的设置如图9所示。

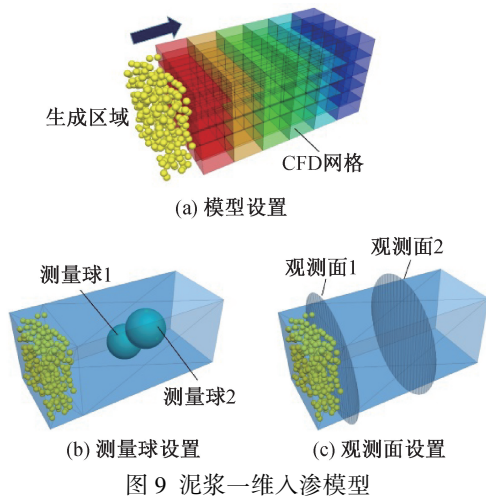


图9 泥浆一维入渗模型

泥浆的均匀性是指流域内不同区域的颗粒数目大致相同。连续性是指在一定时间内通过流域截面的颗粒数量基本保持稳定。这里,通过统计测量球和观测面的颗粒数目变化来检验泥浆的均匀性和连续性。

记录1s内测量球内的颗粒数目,如图10所示,可见测量球1和测量球2的颗粒数目最大差值仅为1,说明均匀性良好。

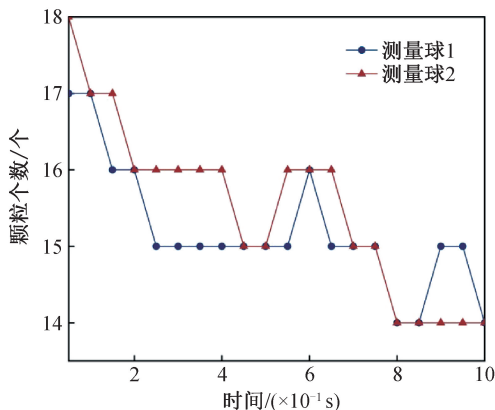


图10 测量球内颗粒数目随时间变化图

Fig.10 Variation of the number of particles within the sphere over time

记录5s内(每0.1s记录一次)通过两个截面的颗粒数目随时间的变化情况,如图11所示。可见,通过两个截面的颗粒数目随时间的推进约有5个颗粒的波动,变化幅度较小,呈现出良好的连续性。

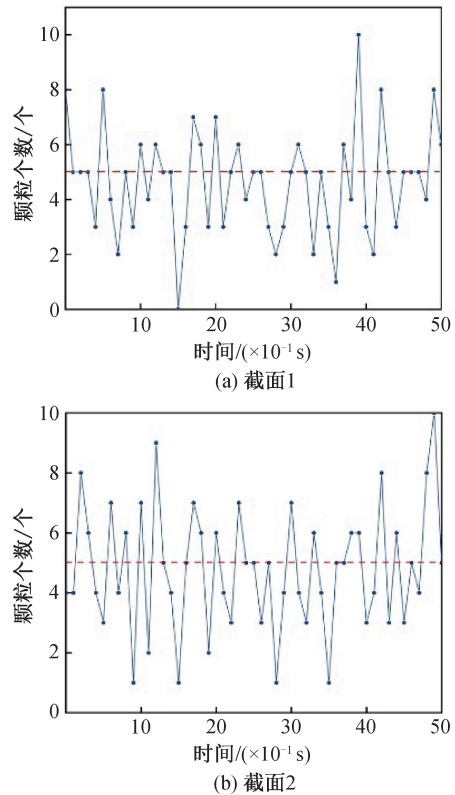


图11 每隔0.1s通过截面1、截面2颗粒数目
Fig.11 Number of particles passing through section 1 and section 2 every 0.1 seconds

绘制通过两个截面的颗粒数目随时间变化的曲线,如图12所示,可见两条曲线基本重合,这意味着模型中的泥浆呈现为匀速流动。对所得曲线拟合,可得到一条过原点的直线,其斜率则表示在一段时间内通过固定截面的颗粒数目。

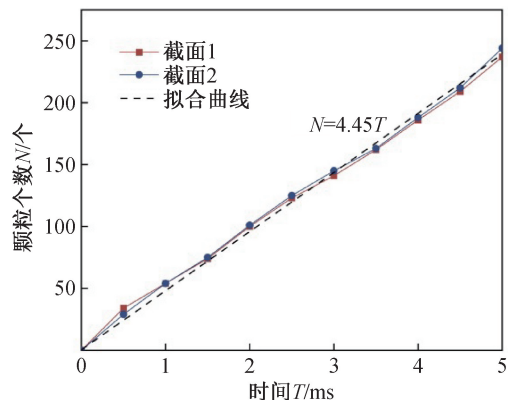


图12 通过截面1、截面2的颗粒数目随时间变化情况
Fig.12 Variation of number of particles passing through section 1 and section 2

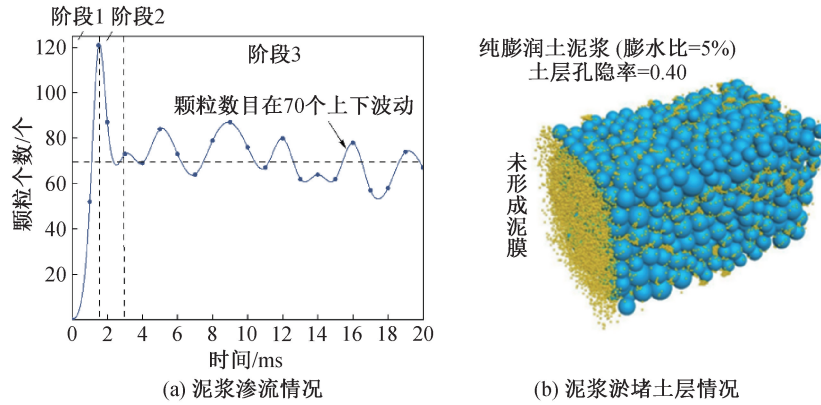


图 13 未形成泥膜时泥浆渗流情况

Fig. 13 Slurry seepage conditions before mud membrane formation

使用纯膨润土泥浆进行渗流和淤堵的模拟,通过入流颗粒数量的变化来判断泥膜的生成情况。如图 13(a) 所示,入流颗粒数经历了陡增、陡降和波动三个阶段,最终在 70 个上下波动,模型达到计算上限。计算结束时的泥浆淤堵情况如图 13(b) 所示,膨润土颗粒几乎充满了整个土层,局部区域出现颗粒聚集,未形成完整泥膜。

使用发泡泥浆进行模拟,图 14 展示了入流颗粒数量随时间的变化过程,可分为三个阶段。在阶段 3 中,气泡颗粒在土层表面形成了群体结构,封堵了大部分孔隙通道,仅有少部分颗粒能够通过。此外,少量气泡通过收缩粒径进入土层。经过较长时间后,不再有颗粒进入土层,表明泥膜已经形成。

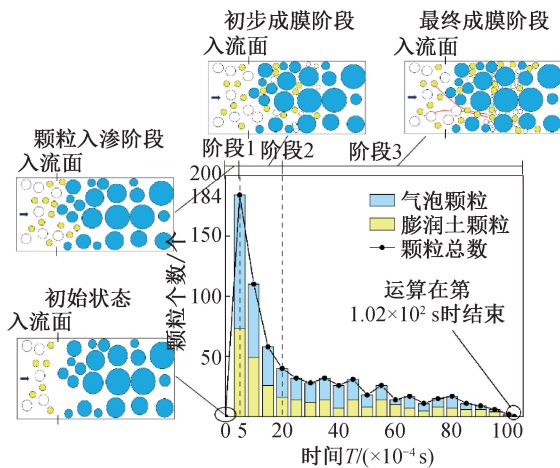


图 14 形成泥膜时泥浆渗流情况

Fig. 14 Slurry seepage conditions during mud membrane formation

性,本文进行了发泡泥浆在土层中渗流的室内模型试验。

试验目的在于验证数值模拟中发泡泥浆的流动规律是否与实际情况相符合。室内模型试验选用高渗透性的砂土,均匀压实成高 20 cm 的土柱,如图 15 中的试验柱 2,底层铺设大粒径土颗粒作为过滤层,保持其孔隙率为 0.40。土体的颗粒范围为 1~2 mm,土层渗透系数为 1.1 cm/s,孔径比为 8.95,并按如下参数配置发泡泥浆:膨润水比例为 5%,泡沫浓度为 20%,材料密度为 0.92 g/cm³,漏斗黏度为 120 s,塑性黏度为 26 mPa·s。

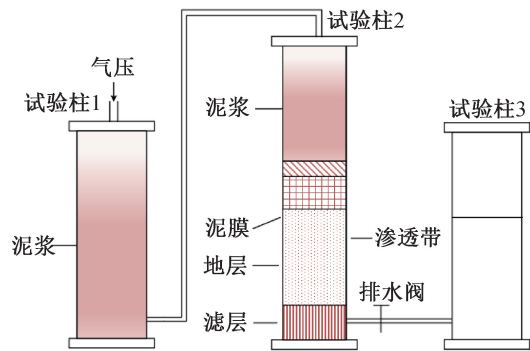


图 15 试验装置示意图

Fig. 15 Schematic diagram of experimental apparatus

孔径比为土体平均孔径 D_0 与发泡泥浆的有效粒径 d_e 的比值,土层平均孔径 D_0 可由式(9)求得,有效粒径为 2.5 倍的 d_{85} ($d_{85} = 0.08$ mm)。

$$I = \frac{D_0}{d_e} \quad (9)$$

式中: $d_e = 2.5d_{85}$ 。

3.3 综合验证

为了进一步验证本文所提数值方法的有效

$$D_0 = 1.875 \sqrt{\frac{K}{3.691}} \quad (10)$$

式中: K 为渗透系数,该式适用于不均匀系数 $C_u < 7$,且有效粒径 $d_{10} < 9.6$ mm的粗粒土。

分别设置100、200、300 kPa的压力值,对应50、100、200 kPa/m的压力梯度。记录不同压力下泥浆入渗量与时间的关系,如图16所示。

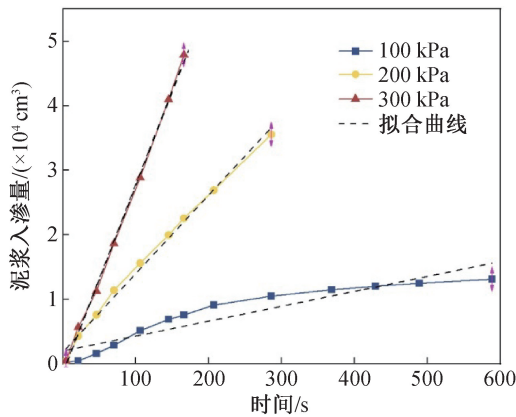


图16 不同压力梯度下的泥浆入渗量-时间关系图(室内试验)

Fig. 16 Mud infiltration amount versus time under different pressure gradients (in-situ test)

采用本文提出的数值方法建立数值模型,土柱尺寸为 0.6 cm \times 1 cm \times 0.6 cm,配制与室内模型试验相同配比的发泡泥浆。对土柱分别施加50、100、200、300 kPa的压力,对应压力梯度为500、1 000、2 000、3 000 kPa/m的压力梯度。记录泥浆的入渗量和时间的关系,如图17所示。

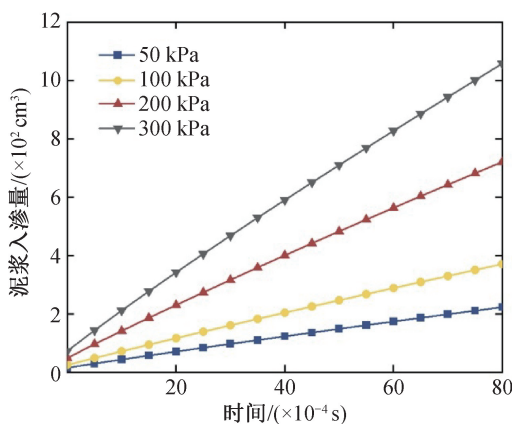


图17 不同压力梯度下的泥浆入渗量-时间关系图(数值模拟)

Fig. 17 Mud infiltration amount versus time under different pressure gradients (numerical simulation)

对比图16和图17可知,受试验条件及泥浆流体参数等因素影响,数值模拟与室内模型试验得到的泥浆入渗速率存在一定差异,但在较大的压力梯度条件下(渗透压力超过200 kPa时),数值模

拟和室内模型试验所得泥浆入渗量随时间变化曲线均呈线性关系,表现出一致的渗流规律。实际中,泥膜形成的时间较长,但在数值模拟中,通过加压方式加速了泥膜形成的过程^[24],不仅体现了离散元方法在效率上的优势,也为更快得到规律性结果提供了科学依据。

4 结论

为了研究发泡泥浆在土层中的渗流和成膜特性,本文提出了一种基于PFC3D建立发泡泥浆一维渗流模型的数值模拟方法,得到以下结论:

1)建立了发泡泥浆渗流模型;开展流固耦合模拟,观测颗粒细观性质的变化。重点阐述了模拟气泡行为的方法,通过简化复杂的物理过程,编写FISH函数,实现粒径放缩功能,从而将气泡引入模型中。

2)开发了连续注浆算法;验证泥浆的均匀性与连续性,模拟真实的发泡泥浆颗粒在土层中渗流的情况,为泥浆成膜机理及规律提供理论基础。

3)验证了所提模型和方法的合理性:根据静水小球沉降与水流穿砂床试验的数值模拟结果表明,两类模拟的数值解与解析解最大误差分别为3.40%和2.55%,验证了流固耦合方法的合理性;通过一维泥浆入渗模型验证泥浆的均匀性与连续性;通过数值模拟与室内试验结果的对比,证明数值模型与室内试验在渗流规律上的一致性。

参考文献:

- [1] 王中华. 国内钻井液技术进展评述[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 95-102.
- [2] 王富华, 梁国昌, 郭保雨. 用于低压低渗透油气藏的可循环泡沫塌钻井液[J]. 钻井液与完井液, 2009, 26(1): 6-8.
- [3] 吴飞. 充气钻井液在低压渗透地层的防漏堵漏机理[J]. 天然气工业, 1995, 15(4): 40-43+111.
- [4] 王广财, 熊开俊, 曾翔宇, 等. 可循环油基泡沫钻井液在胜北油田的应用[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(6): 17-20.
- [5] 王超群, 陈缘博, 赵志强, 等. 国外微泡沫钻井液技术新进展及探讨[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(2):

- 133-139.
- [6] KHAMEHCHI E, TABIBZADEH S, ALIZADEH A. Rheological properties of aphron based drilling fluids[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43 (6): 1076-1081.
- [7] XI X, JIANG S G, SHI Q L, et al. Experimental investigation on the leakage plugging and fire extinguishment characteristics of industrial solid waste-based composite foam slurry materials[J]. Energy, 2023, 269: 126780.
- [8] 徐涛, 史庆锋, 章定文, 等. 泥水盾构开挖面泥膜渗透特性与压力传递机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45 (9): 1878-1887.
- [9] 叶伟涛, 王靖禹, 付龙龙, 等. 福州中粗砂地层泥水盾构泥浆成膜特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1260-1269.
- [10] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2007, 40(1): 81-95.
- [11] 张彬, 黄建喜, 曹佳艺. 可循环泡沫钻井完井液防地层污染数值模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(5): 141-145.
- [12] 亚尔巴. 泡沫钻探消泡方法试验研究及泡沫携岩屑能力数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [13] 加瑞, 朱伟, 闵凡路. 泥浆颗粒级配和地层孔径对泥水盾构泥膜形成的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30 (8): 100-108.
- [14] DONG K J, ZOU R P, YANG R Y, et al. DEM simulation of cake formation in sedimentation and filtration [J]. Minerals Engineering, 2009, 22(11): 921-930.
- [15] 汪志明, 洪玉奎, 郭晓乐, 等. 泡沫质量和环空返速对泡沫携岩能力影响的数值模拟 [J]. 石油钻采工艺, 2008 (3): 34-37.
- [16] FALAHATI N, CHELLAPPAH K, ROUTH A F. Assessing filter cake strength via discrete element method simulations[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2021, 173: 215-223.
- [17] 刘成, 孙钧, 杨平, 等. 泥膜形成与状态划分细观分析及模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 435-442.
- [18] ZOU Y H, CHEN C, ZHANG L M, et al. Simulating progression of internal erosion in gap-graded sandy gravels using coupled CFD-DEM [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(1): 1-9.
- [19] 刘童. 高速公路路基分层填筑施工技术研究[J]. 交通世界, 2021 (15): 120-121.
- [20] MIN F L, ZHU W, HAN X. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2013, 38: 423-430.
- [21] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [22] 赵世森, 李树忱, 王鹏程, 等. 土压平衡盾构渣土改良泡沫半衰期细观测定方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 195-202.
- [23] GROUP I C. PFC3D (particle flow code in 3 dimensions) [R]. Version 3.1. Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [24] 代远. 基于颗粒流方法开展渗透注浆与泥浆成膜效果研究[D]. 南京: 河海大学, 2014.

(责任编辑 王利君)