

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.094



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



振动作用下不同影响因素对渗流侵蚀现象的影响

张冬梅^{a,b}, 陈辉浩^a, 陈思睿^a, 谢小创^a

(同济大学 a. 地下建筑与工程系; b. 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 渗流侵蚀发展过程复杂、影响因素较多, 由其引发的灾害频发, 严重威胁工程结构安全。为研究振动作用下不同因素对渗流侵蚀的影响, 采用 CFD-DEM 耦合方法对 8 个间断级配砂土试样开展渗流侵蚀的数值模拟, 分析振动作用下细粒含量、围压、水力梯度对渗流侵蚀过程的作用规律, 并结合细粒流失比、试样轴向变形等指标揭示土体的细观响应特征。结果表明: 振动作用会提升细粒流失比、增大轴向变形, 加剧渗流侵蚀, 其对上层细颗粒流失的影响最为显著, 对中层影响最弱; 细粒含量越高, 细粒流失比越高, 侵蚀达到稳定所需时间也越长, 同时细粒含量是影响试样轴向变形的关键因素; 围压越大, 试样细粒流失比越大, 轴向变形也越大, 且围压对振动具有一定的弱化作用; 渗流侵蚀发展阶段内, 水力梯度越大, 细粒流失比也越大, 且水力梯度对试样轴向变形的影响最小。

关键词: 振动作用; 渗流侵蚀; 计算流体力学-离散元耦合分析方法; 影响因素

中图分类号: TU434; U457 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)05-0112-09

Effects of different influencing factors on the phenomenon of seepage erosion under vibration

ZHANG Dongmei^{a,b}, CHEN Huihao^a, CHEN Sirui^a, XIE Xiaochuang^a

(a. Department of Geotechnical Engineering; b. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The development process of seepage erosion is complex, influenced by numerous factors, and disasters triggered by seepage erosion are frequent, posing serious threats to structural safety. In order to study the effects of various factors on seepage erosion under vibration, this paper employs a CFD-DEM coupled analysis method. A series of experiments was conducted to investigate the effects of fine particle content,

收稿日期: 2024-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(52238010, 52408436, 52090082, 52108381); 国家重点研发计划(2022YFC3800905); 上海市科学技术委员会科研计划(22XD1430200, 23DZ1202806, 21DZ1200601); 上海市白玉兰人才计划浦江项目(23PJD104)

作者简介: 张冬梅(1975-), 女, 博士, 教授, 主要从事隧道及地下工程研究, E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn。
陈辉浩(通信作者), 男, 博士生, E-mail: 2210358@tongji.edu.cn。

Received: 2024-07-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52238010, 52408436, 52090082, 52108381); National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC3800905); Shanghai Science and Technology Committee Program (Nos. 22XD1430200, 23DZ1202806, 21DZ1200601); Shanghai Pujiang Programme (No. 23PJD104)

Author brief: ZHANG Dongmei (1975-), PhD, professor, main research interests: tunnels and underground structures, E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn.

CHEN Huihao (corresponding author), PhD candidate, E-mail: 2210358@tongji.edu.cn.

confining pressure, and hydraulic gradient on the seepage erosion process under vibration. The micro-responses of the gap-graded sand samples were analyzed based on the fine particle loss ratio and axial deformation. The findings indicate that under conditions of vibration, there is an increase in the fine particle loss ratio, and axial deformation is more pronounced. The vibration exerts an aggravating effect on the seepage erosion, with the greatest effect on the upper layer particles, while the middle layer particles are least affected. Higher fine particle content leads to greater fine particle loss and longer stabilization time, making it a significant factor affecting axial deformation. Greater confining pressure results in more fine particle loss and axial deformation, with confining pressure having a mitigating effect on vibration. In the development stage of seepage erosion, a larger hydraulic gradient results in a higher fine particle loss ratio, with the hydraulic gradient having the least effect on axial deformation.

Keywords: vibration action; seepage erosion; CFD-DEM coupled analysis method; influencing factors

盾构隧道管片拼装接缝较多,常出现渗水情况;渗流侵蚀是隧道周边土体中的细颗粒在流体作用下,穿过粗骨架孔隙脱离骨架,并随流体在孔隙中迁移的过程。渗流侵蚀引发的水土流失易在土体内部形成空洞,进而造成土体与隧道结构失稳破坏^[1]。渗流侵蚀的发生与演化过程复杂,且受土体级配^[2-3]、应力状态^[4-5]、水力梯度^[6-7]等多种因素影响。学者通过研究不同影响因素对隧道的渗流侵蚀作用,揭示了土体渗流侵蚀的演化机理,所得结论对保障隧道结构安全具有重要意义。

近年来,城市轨道交通建设运营规模逐年扩大。列车振动等循环荷载是诱发渗流侵蚀的关键因素,在其作用下,土体颗粒间相互作用更加复杂,进一步加剧了渗流侵蚀发生与演化的复杂性。部分学者针对振动荷载作用下土体内部稳定性开展了相关研究。Chung等^[8]基于试验分析了不同循环应力对土体颗粒迁移行为的影响。Israr等^[9]通过试验研究发现,颗粒振动与内部孔隙压力的共同作用影响颗粒几何排列,进而引发土体内部失稳与破坏。Zhang等^[10]开展颗粒迁移试验,探究循环荷载作用下荷载的频率与振幅对土颗粒迁移的影响,并揭示颗粒迁移机理。尽管相关研究分析了振动作用下土体颗粒的迁移行为与土体内部的稳定性,但此类研究仅考虑了振动因素,对相关影响因素的分析并不全面。目前针对振动作用下不同影响因素对渗流侵蚀现象的影响研究并不充分,需进一步深入研究。渗流侵蚀是土体中的细颗粒在水流作用下发生迁移的过程。颗粒级配是引发渗流侵蚀的内在几何条件,影响土体结构、孔隙分布以及土体抗渗流侵蚀能力。土体应力状态是渗流侵蚀的外在条件,决定土体在渗流侵蚀作用下的整体稳定性以及侵蚀发生的难易程度。水力梯度是渗流侵蚀的动力条件,直接影响渗流侵蚀的发生与发展过程。土体颗粒级配、应力状态以及地下水水力梯度是影响渗流侵蚀的关键因素。因此,开展振动作用

下细粒含量、围压、水力梯度等因素对渗流侵蚀影响的相关研究极为必要。

离散元法(DEM)是有效分析土体颗粒材料在静力或动力条件下力学问题的数值方法,该方法将土体离散为大量颗粒,能较好表征渗流侵蚀过程中土体内物理力学特性的演变及土体与结构间的相互作用。Zhou等^[11]采用计算流体动力学-离散元(CFD-DEM)耦合方法研究渗流侵蚀的主要特征,结果表明轴向压实度的增加会加剧砂土侵蚀。Maeda等^[12]基于离散元法,通过删除土体细颗粒模拟渗流侵蚀引发的细粒流失,分析了该作用下土体物理力学性质的变化。Yang等^[13]采用CFD-DEM耦合方法对土-结构界面的渗流侵蚀开展数值试验,分析了渗流装置内不同土层的渗流机理与特征,并推导了界面临界水力梯度的计算公式。渗流侵蚀诱发的颗粒流失是引发一系列灾害的关键因素。离散元法在研究颗粒系统力学行为、颗粒间相互作用及微观结构变化方面优势显著。Chen等^[14]基于离散元法研究了管道渗漏诱发渗流侵蚀的机理,并分析了土拱效应的发展规律,结果表明,砂土孔隙率、颗粒粒径是影响渗流侵蚀的关键因素。Cao等^[15]采用离散元法模拟水平渗流条件下的活门试验,探究土体成拱产生的非均匀应力分布对渗流发展的影响,揭示了该过程中土拱的演化规律。Xiong等^[16]基于计算流体动力学-不规则离散元法(CFD-iDEM)耦合框架,对不同长径比的球形、不规则颗粒开展一系列数值模拟,揭示了颗粒形状影响颗粒迁移与堵塞的微观机制。

笔者采用CFD-DEM耦合方法模拟间断级配砂土的渗流侵蚀试验,探究振动条件下土体细粒含量、围压、水力梯度对渗流侵蚀现象的作用规律,分析各因素的影响机制并提出相应微观解释。

1 CFD-DEM耦合原理

在CFD-DEM耦合框架中,颗粒运动依据牛顿

第二定律,以拉格朗日方法建模,流体运动则采用欧拉框架下的局部平均纳维-斯托克斯(N-S)方程描述^[17-18]。将振动作用作为外加荷载直接施加在试样壁面上,依据牛顿第二定律,颗粒在任意时间 t 的运动方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^N f_i^j + f_i^{f \rightarrow p} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^N M_i^j + M_i^{f \rightarrow p} \quad (2)$$

式中: m_i 为颗粒 i 的质量; v_i 为颗粒 i 的平动速度; N 为颗粒 i 的总接触数量; f_i^j 为接触 j 作用于颗粒 i 的接触力; $f_i^{f \rightarrow p}$ 为流体施加在颗粒 i 的作用力; I_i 为颗粒 i 的转动惯量; ω_i 为颗粒 i 的转动速度; M_i^j 为接触 j 作用于颗粒 i 的力矩; $M_i^{f \rightarrow p}$ 为流体引起的额外力矩。

流体的运动控制方程为两相耦合的纳维-斯托克斯方程,液相的质量和动量方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \otimes \mathbf{u}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \boldsymbol{\tau}_f) + M_{l,p} \quad (4)$$

式中: α_f 为流体体积分数; ρ_f 为流体密度; $\mathbf{u}_f$ 为流体的速度矢量; p 为流体的平均压力; $\boldsymbol{\tau}_f$ 为流体的剪应力张量; $M_{l,p}$ 为液-固两相动量交换源项。

液-固耦合控制方程中的动量交换源项表达式为^[19]

$$M_{l,p} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_p} (f_d)_i \quad (5)$$

式中: f_d 为颗粒所受的曳力; V 为网格单元体积; N_p 为网格中包含的颗粒总数。

CFD-DEM耦合计算整体流程可分为3个阶段。第1步,在DEM求解器中计算颗粒间的接触力,依据牛顿第二定律求解运动方程式(1)、式(2),并将求得的颗粒速度、位置信息传递至CFD求解器;第2步,在CFD求解器中结合颗粒与流体网格信息计算颗粒相体积分数,求解控制方程式(3)、式(4),得到平均流体压力和速度;第3步,根据流体的离散运动信息,结合式(5)计算液-固两相间的相互作用力,经由API(application programming interface)耦合接口实时传回DEM求解器,更新颗粒受力并修正颗粒的位置与速度。颗粒与流体间的的信息交换以液-固耦合的动量交换源项为载体进行^[19]。CFD-DEM耦合模型流程图如图1所示。

2 渗流侵蚀模型的建立

2.1 模型试样的制备及工况设置

受砂土颗粒尺寸差异的影响,土体在拖曳等外

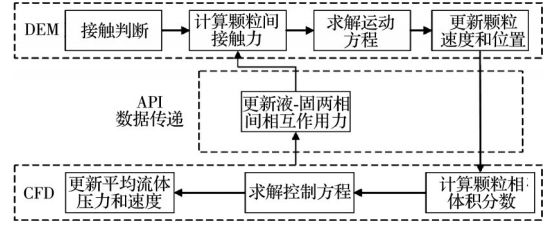


图1 CFD-DEM耦合模型流程图

Fig. 1 Process of CFD-DEM coupling model

力作用下极易出现细粒迁移,进而产生渗流侵蚀现象,该类灾害多发生于内部不稳定的砂土层。因此以间断级配砂土作为研究对象,探究不同影响因素作用下土体颗粒的渗流侵蚀规律。数值模拟采用球形颗粒,细粒粒径为0.4 mm,粗粒粒径为2.4 mm,粗细粒径比为6^[20-21]。考虑土体细粒质量占总质量的比值,模拟设置15%、25%、35%共3种细粒含量 F_c ;围压 P 设置25、50、100 kPa共3个水平。当地铁列车设计最高运行速度为80 km/h时,对应的典型振动频率主要集中在5 Hz左右^[22],因此模拟的振动频率 ω 设置为5 Hz。渗流侵蚀初期或局部区域内,渗流集中通过狭小流失孔时局部水力梯度可达到40甚至更大,据此,水力梯度 i 设置8、20、40三个水平。采用CFD-DEM耦合方法对8个立方体间断级配砂土试样开展渗流侵蚀数值模拟,具体工况设置如表1所示。

表1 工况设置

Table 1 Working condition settings

编号	振动频率 ω /Hz	细粒含量 F_c /%	围压 P /kPa	水力梯度 i
E1	0	25	50	20
E2	5	15	50	20
E3	5	25	50	20
E4	5	35	50	20
E5	5	25	25	20
E6	5	25	100	20
E7	5	25	50	8
E8	5	25	50	40

2.2 模型参数设置

DEM与CFD计算域整体尺寸分别为20 mm×20 mm×20 mm、20 mm×20 mm×28 mm;流体网格尺寸为4 mm×4 mm×4 mm。CFD计算域完全覆盖DEM计算域,CFD-DEM耦合计算域模型如图2所示。

为准确表征非黏性砂土颗粒间的接触变形,体现砂土的摩擦特性与微观力学行为,DEM基础模型采用Hertz-Mindlin(no slip),摩擦模型选用Standard Rolling Friction,未增设其他补充模型。曳力模型选用Ergun模型^[23]、Wen和Yu模型^[24],该类模型能处理复杂的颗粒流动场景,准确描述流体对

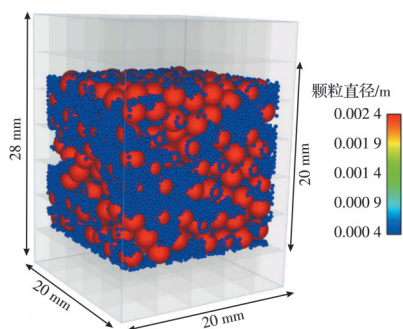


图 2 CFD-DEM 耦合计算域

Fig. 2 Computational domain of CFD-DEM coupling

颗粒的曳力作用,计算精度较高。在 CFD-DEM 耦合计算中,CFD 的计算步长取 DEM 的整数倍。由

于试样高度较小,可忽略土体内部有效应力变化对渗流侵蚀过程的影响,近似认为渗流阶段土体有效应力均匀分布^[25]。模型参数设置如表 2 所示。

2.3 边界条件设置

为方便渗流侵蚀过程中细粒向外流出,DEM 计算域底部壁面设置开孔,开孔尺寸取细粒粒径的 2.5 倍;同时在计算域其余壁面上施加法向应力。参考相关学者基于 DEM 开展的循环三轴试验研究,采用应变控制型振动加载,荷载作用在 DEM 计算域底部壁面,振幅取试样初始高度的 2%,频率设置为 5 Hz^[18, 26-27]。CFD 计算域下边界设为压力出口,上边界为压力进口,通过调整上下边界压力差实现不同水力梯度作用下的渗流侵蚀模拟。

表 2 模型参数设置

Table 2 Model parameter settings

颗粒相						流体相	
弹性模量/MPa	泊松比	颗粒密度/(kg/m ³)	恢复系数	静摩擦系数	转动摩擦系数	流体密度/(kg/m ³)	流体黏度/(Pa·s)
100	0.3	2 650	0.3	0.5	0.1	1 000	0.001

受计算能力限制,难以构建粒径分布、试样尺寸均与物理试验完全一致的 DEM 数值模型。为保证渗流侵蚀物理试验与数值模拟实验的相似性,文献[28]引入干扰系数 J 作为相似性评价指标,其定义为平均孔隙直径与细颗粒粒径之比。参照文献[28]开展物理试验与数值模拟结果的对比验证:物理试验中土体干扰系数 J 为 3.0;为验证数值模拟参数选取的合理性并满足相似性要求,数值模拟干扰系数 J 取 3.4,模拟与试验结果的对比如图 3 所示。由图 3 可知,数值模拟与试验结果整体变化趋势一致;但模拟结果达到稳态的时间相对滞后,这可能与试样内部复杂的孔隙形态影响颗粒流失有关。整体而言,数值模拟与试验结果吻合度良好,证明数值模拟结果具有一定合理性。

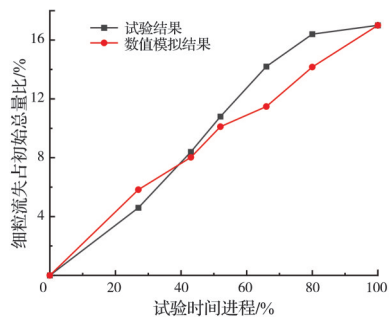


图 3 与试验结果的对比

Fig. 3 Comparison with test results

3 计算结果分析

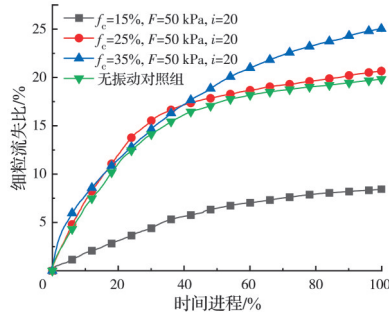
3.1 渗流侵蚀引起的质量损失

渗流侵蚀过程中的累计质量损失是评估侵蚀程

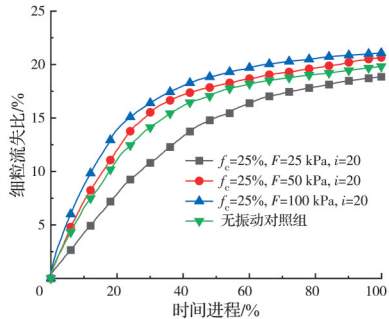
度的关键指标。以试样细粒流失质量占初始总质量的百分比(细粒流失比)作为累计质量损失的量化指标。有、无振动工况下细粒流失比随时间的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,渗流侵蚀过程可分为两个阶段:阶段 I 为侵蚀发展阶段,试样细粒流失比急剧增大,侵蚀速率相对较大;阶段 II 为侵蚀稳定阶段,细粒流失比曲线趋于平缓,侵蚀速率减小,侵蚀进入相对稳定状态。与无振动工况相比,振动工况下细粒流失比显著更大,试验时间进程为 32% 时,两种工况下的最大差值为 1.46%。

由图 4(a)可知,细粒含量越高,最终细粒流失比越大,渗流侵蚀发展阶段的流失速率越高,侵蚀达到稳定状态所需时间越长。细粒含量为 15% 时,最终细粒流失比约 8.4%;细粒含量为 25% 时,细粒流失比约 20.7%;细粒含量为 35% 时,细粒流失比约 25.04%。细粒含量为 15% 的试样粗粒间更易接触,其骨架结构相对更易稳定,在振动过程中更加不利于细粒的流失,因此其细粒流失比相对较小。由图 4(b)可知,随着渗流侵蚀过程的发展,围压越大,试样细粒流失比越大。图 4(c)所示为不同水力梯度下渗流侵蚀的变化规律。由图 4(c)可知,渗流侵蚀发展阶段,水力梯度越大,细粒流失比越大;但进入侵蚀稳定阶段,水力梯度越大,细粒流失比反而越小。其原因可能是侵蚀初期土体尚未形成稳定的骨架结构,水力梯度越高,水流拖曳力越强,细粒迅速被剥离、冲走;随着细粒的流失,粗粒骨架逐渐趋于稳定,水力梯度越高,水流对粗粒的扰动作用越强,形成的骨架结构越稳定,部分细粒被约束

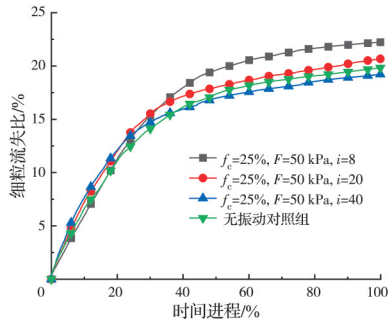
在稳定微结构内难以迁移,因此,侵蚀稳定阶段水力梯度越大,细粒流失比反而越小。与细粒含量、水力梯度引起的细粒流失相比,围压带来的细粒流失增幅在侵蚀发展阶段更为显著。



(a) 细粒含量的影响



(b) 围压的影响



(c) 水力梯度的影响

图 4 细粒流失比随时间变化曲线

Fig. 4 Fine particle loss ratio curves with time

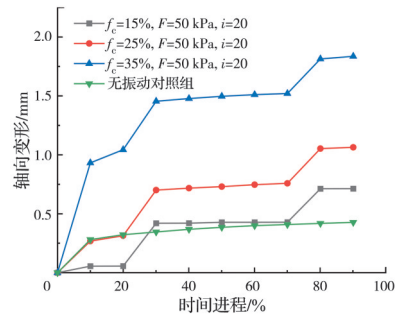
3.2 不同工况下土体的轴向变形

渗流侵蚀下细粒随水流迁移重组,土体骨架结构改变,进而引发其产生轴向变形。参考室内模型试验,将监测得到的土表位移作为反映渗流侵蚀过程土体变形的评价指标;以 DEM 计算域上、下壁面的位移差值表征振动作用引起的土体轴向变形。

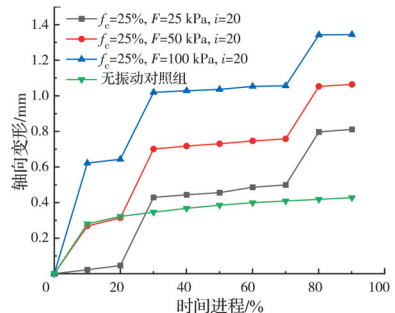
试样轴向变形随时间变化的曲线如图 5 所示。由图 5 可知,渗流侵蚀引发的轴向变形在初始阶段快速增大,随着渗流侵蚀的持续发展,最终趋于稳定;该趋势与渗流侵蚀发展阶段细粒流失比变化曲线趋势一致。因为渗流侵蚀发生初期试样中细粒流失速率较快,其轴向变形较大,随着侵蚀的继续

发展,颗粒间形成稳定的骨架结构,细颗粒继续流失但流失速率减小,试样轴向变形趋于稳定。与无振动工况相比,在振动工况下试样轴向变形更加显著,两种工况的最大差值约 0.64 mm,这是由于振动作用加剧了细颗粒移动,进而加速了细颗粒流失。

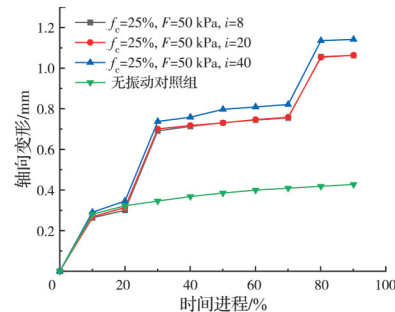
由图 5(a)可知,试样的细粒含量越高,轴向变形越大,各组试样轴向变形极差为 1.12 mm。细粒含量是影响试样轴向变形的重要因素。由图 5(b)可知,试样所受围压越大,其轴向变形越大,各组试样轴向变形极差为 0.56 mm。高围压能促进颗粒排列更为紧密。由图 5(c)可知,不同水力梯度下试样轴向变形变化曲线的发展趋势相似,且变化幅度不大,各组试样轴向变形极差仅 0.08 mm。水力梯度取 8、20 时两条曲线基本重合,说明水力梯度对试样轴向变形的影响较小。



(a) 细粒含量的影响



(b) 围压的影响



(c) 水力梯度的影响

图 5 试样轴向变形随时间变化曲线

Fig. 5 Change curves of sample axial deformation with time

3.3 振动作用下细粒渗流路径的变化

渗流侵蚀过程中,土体细粒在流体拖曳力作用下通过颗粒孔隙形成的路径进行复杂运移。以不同围压工况下的试样为例,将试样沿高度均分为上、中、下3层,分别对有、无振动作用下的细粒开展跟踪,记录颗粒在三维坐标系内的流动路径。流动路径曲线密集的区域代表颗粒滞留时间更长,曲线平直的区域则代表颗粒未发生滞留堵塞。选取上层ID为6693、中层ID为5923、下层ID为8122的颗粒开展分析,图6所示为各层对应颗粒在有、无振动作用下的流动路径曲线。

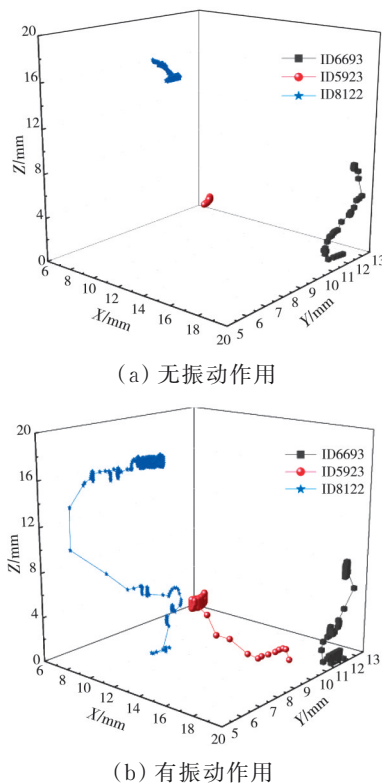


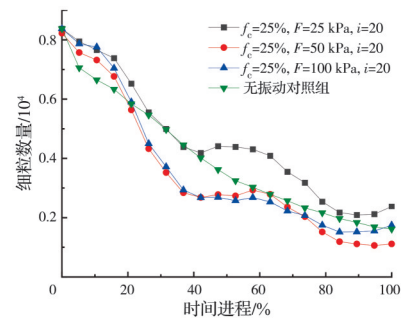
图6 颗粒的侵蚀路径

Fig. 6 Erosion path of particles

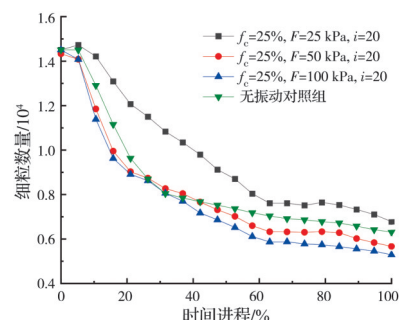
细粒的侵蚀移动过程可分为3种形式:一是细粒粒径小于收缩孔(细粒流失路径上的限制孔径),能顺利通过;二是细粒粒径大于收缩孔,会寻找其他孔隙通道通过;三是细粒粒径大于收缩孔,待土体骨架发生变形后方可通过^[29]。由图6可知,无振动作用下颗粒ID5923、ID8122分别滞留于距底面约16.5 mm的位置,颗粒ID6693则穿过收缩孔从底部开孔流出。颗粒接触力链是颗粒间传递应力所形成的连续或半连续力传递路径。在振动作用下,颗粒间的相互作用更加复杂,颗粒接触力链的演化能扩大原有收缩孔,使原本滞留的颗粒顺利通过;而原本可穿过收缩孔的颗粒,则可能因颗粒接触力链的演化发生滞留堵塞。在无振动作用下,颗粒

ID6693从底部开孔排出的时间进程为56.6%;在有振动作用下,颗粒ID6693从底部开孔排出的时间进程为46.05%,颗粒ID5923排出对应的的时间进程为87.95%,颗粒ID8122排出对应的的时间进程为50.6%。

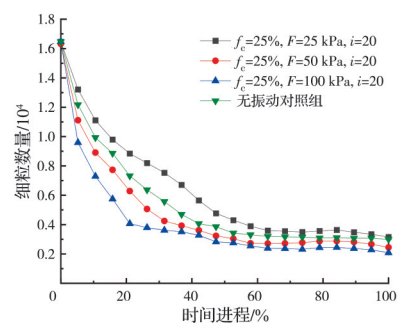
试样内部大量渗流路径交织形成复杂的渗流网络。虽然直接绘制、表征渗流路径难度较大,但细粒仅能沿连通渗流通道发生运移;因此可将试样沿高度分层,利用各层细粒数量变化间接表征不同高度区域渗流路径网络的演化特征,图7为不同围压条件下各分层细粒数量的变化曲线。由图7可知,各分层细粒数量随时间进程逐步减少,说明试样内部收缩孔相对较大,多数细粒容易通过。与无振动工况相比,振动工况下各层细粒流失加剧;由曲线间平均距离可知,振动对上层细粒流失影响最大,下层次之,对中层细粒流失影响最小。各层细粒



(a) 上层细粒分布



(b) 中层细粒分布



(c) 下层细粒分布

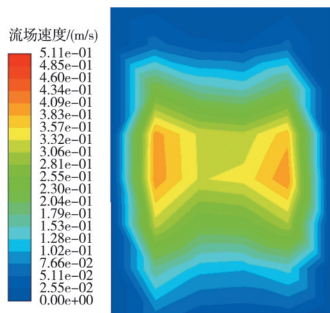
图7 不同围压下细粒分布图

Fig. 7 Fine grain distribution under different confining pressures

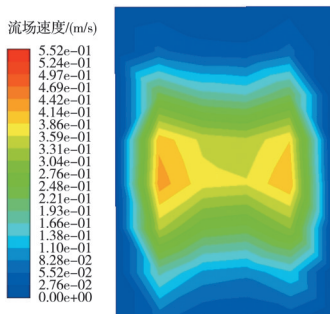
流失量随围压的升高而增加,但围压为 50、100 kPa 时各层细粒流失量差值较小;原因可能为高围压条件下,即使有振动干扰,颗粒接触力链仍相对稳定。

3.4 振动作用下侵蚀过程的流场变化

渗流侵蚀过程是颗粒与流体相互作用、共同运移的过程,流场流速的变化可在一定程度上表征渗流侵蚀过程。以不同水力梯度工况下的试样为例,试样在 $x=0.01$ m 截面处的流场速度云图如图 8 所示。由图 8 可知,流场速度较大区域主要集中在试样中部。有振动与无振动作用下的流场分布相似。



(a) 无振动作用下流场速度



(b) 有振动作用下流场速度

图 8 $x=0.01$ m 截面处流场速度云图

Fig. 8 Velocity contour of the flow field at $x=0.01$ m

试样在 $z=0.01$ m 截面处的流场平均速度曲线如图 9 所示。由图 9 可知,流场平均速度随水力梯度的升高而增大;与无振动作用相比,振动作用下流场平均速度整体更大。分析不同水力梯度下各层细粒数量的分布,其分布曲线如图 10 所示。由图 10 可知,各工况下下层流失的细粒数量最多,中层次之,上层最少。在有振动作用下,下层随水力梯度的升高而增多;中、上层则随着水力梯度的升高而减少,且两层流失的细粒总量高于下层流失量。说明水力梯度越小,整体细粒流失量越大,该规律与侵蚀稳定阶段水力梯度越小细粒流失比越高的结果一致。同时可见,水力梯度对上、中层颗粒流失的影响差异显著。由前述可知,水力梯度越高,颗粒流失速度与流场速度均越快,但颗粒流失却越

少。原因可能在于,振动条件下水力梯度越高,下层颗粒可直接经打开的收缩孔流出,而上、中层土体收缩孔相对减小且振动作用减弱,阻碍细粒流失。

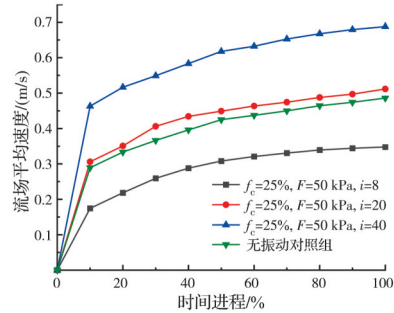
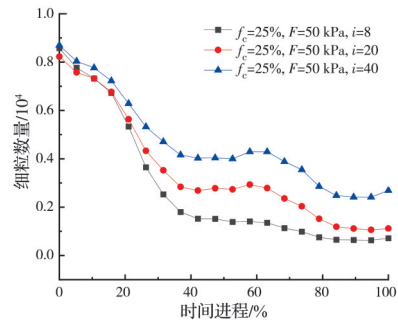
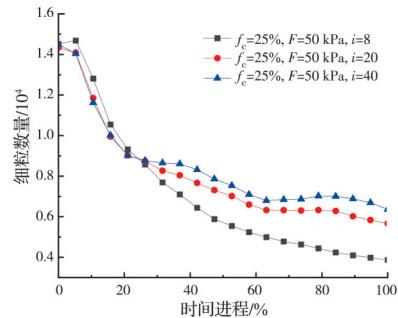


图 9 $z=0.01$ m 截面处流场平均速度曲线

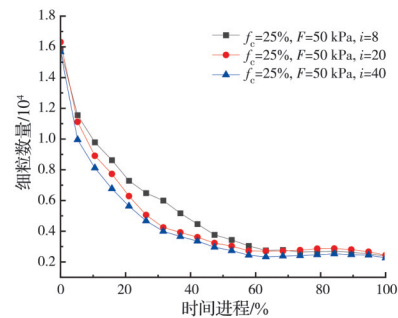
Fig. 9 Average velocity curves of the flow field at $z=0.01$ m



(a) 上层细粒分布



(b) 中层细粒分布



(c) 下层细粒分布

图 10 不同水力梯度下细粒分布图

Fig. 10 Fine grain distribution under different hydraulic gradients

4 结论

采用CFD-DEM耦合方法对振动作用下间断级配砂土在细颗粒含量、围压、水力梯度影响下的渗流侵蚀现象开展分析,得到以下主要结论:

1)与无振动作用相比,振动作用下细粒流失比更大,二者最大差值约1.46%;试样轴向变形也更显著,最大差值约0.64 mm。振动作用对渗流侵蚀具有加剧作用,并且能打破原有颗粒接触力链结构,提升颗粒运动复杂程度。

2)渗流侵蚀发展过程可分为侵蚀发展、侵蚀稳定两个阶段。细粒流失比、侵蚀达到稳定所需时长均与细粒含量呈正相关,其中细粒含量为35%时,细粒流失比约25.04%。细粒含量对土体轴向变形的影响最为显著,变形极差为1.12 mm,是影响渗流侵蚀的关键因素。

3)围压越大,试样细粒流失量与轴向变形均随之增大,轴向变形极差为0.56 mm。相较于其他影响因素,围压带来的细粒流失增量在侵蚀发展阶段更为突出;高围压条件下颗粒接触力链结构更稳定。围压对振动具有一定的弱化作用。

4)渗流侵蚀发展阶段内,水力梯度越高,细粒流失比越大;其对试样轴向变形的影响最弱,变形极差仅0.08 mm。此外,水力梯度对上、中层细粒流失作用差异显著,对下层影响较弱。

参考文献

- [1] Fannin R J, Moffat R. Observations on internal stability of cohesionless soils[J]. *Géotechnique*, 2006, 56(7): 497-500.
- [2] Terzaghi K, Peck R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1948.
- [3] Kenney T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22(2): 215-225.
- [4] Ke L, Takahashi A. Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow[J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(4): 698-711.
- [5] 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.
- [6] Chang D S, Zhang L M. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34(6): 579-589.
- [7] Chang D S, Zhang L M. Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(9): 1454-1467.
- [8] Chung IP M, Haque A, Bouazza A. Influence of cyclic stress pulse shapes on filtration behavior of railway sub-ballast[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(2): 230-235.
- [9] Israr J, Indraratna B. Internal stability of granular filters under static and cyclic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(6): 04017012.
- [10] Zhang S, Gao F, He X Z, et al. Experimental study of particle migration under cyclic loading: effects of load frequency and load magnitude[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(2): 367-380.
- [11] Zhou Z Y, Yu A B, Choi S K. Numerical simulation of the liquid-induced erosion in a weakly bonded sand assembly[J]. *Powder Technology*, 2011, 211(2/3): 237-249.
- [12] Maeda K, Wood D M, Kondo A. Micro and macro modeling of internal erosion and scouring with fine particle dynamics[C]//*Proceedings of 6th International Conference on Scour and Erosion*. Paris, 2012: 321-328.
- [13] Yang X M, Xu Z G, Chai J R, et al. Numerical investigation of the seepage mechanism and characteristics of soil-structure interface by CFD-DEM coupling method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 159: 105430.
- [14] Chen W X, Chen Y K, Su Z H, et al. Evaluation of sand subgrade seepage erosion caused by buried pipeline leakage[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2024: 1-15.
- [15] Cao Z G, Xiao Z, Cai Y Q, et al. Investigation of suffusion in soil with arching based on CFD-DEM simulation[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24(3): 04024014.
- [16] Xiong H, Zhang Z M, Yin Z Y, et al. Microscopic origins of shape effects on migration and clogging of fines in porous media using coupled CFD-iDEM[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(8): 5001-5029.
- [17] 张凡, 李玲玲, 马学东. 基于EDEM-FLUENT耦合矿物颗粒分离效果的模拟研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(6): 159-166.
Zhang F, Li L L, Ma X D. Simulation study on separation effect of mineral particles based on EDEM-FLUENT coupling[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(6): 159-166. (in Chinese)
- [18] Zhou C, Qian J G, Yin Z Y, et al. Suffusion in gap-graded granular soils subjected to strain-controlled cyclic loading with coupled CFD-DEM method[J]. *Transportation*

- Geotechnics, 2023, 42: 101098.
- [19] 和建荣, 王进明, 俞霞, 等. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的离心选矿机仿真优化分析[J]. 矿产综合利用, 2021 (2): 174-179, 140.
- He J R, Wang J M, Yu X, et al. Simulation and optimization analysis of centrifugal concentrator based on EDEM-FLUENT coupling[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2): 174-179, 140. (in Chinese)
- [20] Xiong H, Yin Z Y, Zhao J D, et al. Investigating the effect of flow direction on suffusion and its impacts on gap-graded granular soils[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (2): 399-419.
- [21] Zhou C, Qian J G, Yin Z Y. Microscopic investigation of the influence of complex stress states on internal erosion and its impacts on critical hydraulic gradients[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2022, 46(18): 3377-3401.
- [22] 张柯. 地铁行车荷载作用下黄土地层的振动响应和沉降[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- Zhang K. Vibration response and settlement of loess stratum under subway traffic load[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [23] Ergun S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48: 89-94.
- [24] Wen C Y, Yu Y H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity[J]. AIChE Journal, 1966, 12(3): 610-612.
- [25] 李伟一, 钱建固, 尹振宇, 等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学-离散元耦合模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3191-3201.
- Li W Y, Qian J G, Yin Z Y, et al. Simulation of seepage erosion in gap graded sand soil using CFD-DEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(11): 3191-3201. (in Chinese)
- [26] O'Sullivan C, Cui L, O'Neill S C. Discrete element analysis of the response of granular materials during cyclic loading[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4): 511-530.
- [27] Qian J G, Zhou C, Yin Z Y, et al. Investigating the effect of particle angularity on suffusion of gap-graded soil using coupled CFD-DEM[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 139: 104383.
- [28] Yin Y Z, Cui Y F, Tang Y, et al. Solid-fluid sequentially coupled simulation of internal erosion of soils due to seepage[J]. Granular Matter, 2021, 23(2): 20.
- [29] Zhang D M, Gao C P, Yin Z Y. CFD-DEM modeling of seepage erosion around shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 60-72.

(编辑 朱备)