

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.036

丁子玥, 许增光, 曹成, 等. 渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 143-152.

DING Ziyue, XU Zengguang, CAO Cheng, et al. Influence analysis of discrete element model parameters in seepage erosion simulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 143-152.

渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析

丁子玥, 许增光, 曹成, 赵凌峰, 王宇

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: [目的] 由于工程中渗流侵蚀发生的隐蔽性和发展的复杂性, 离散元模拟成为学者开展渗流侵蚀机理研究的重要手段。固体模型的参数化构建通过控制模型内部颗粒的填充和分布影响水流作用下颗粒的运移和流失, 是开展渗流侵蚀离散元模拟的关键环节。[方法] 当前有关离散元模型参数的研究主要为单参数讨论, 从土体孔隙、土体颗粒和墙体边壁 3 个维度出发, 考虑孔隙率、颗粒重叠比和墙体模量的变化构建 6 组土体模型, 对其进行向上渗流计算并记录内部颗粒流失过程、力链结构变化及孔隙率变化过程, 以评估 3 个参数对模型的影响性大小并从细观角度分析离散元模型参数对渗流侵蚀过程的影响机理。[结果] 离散元模型参数通过影响模型内部的颗粒和力链组成影响水流作用下颗粒的流失阶段。初始孔隙率控制模型内部的颗粒填充数目; 墙体模量和颗粒重叠比影响模型内部的接触数目。颗粒和接触数目较多的模型, 其内部颗粒多以颗粒群的形式移动; 反之, 不形成接触的自由细颗粒以单颗粒在模型内部发生纵向迁移, 孔隙率曲线呈现波动变化。[结论] 研究结果从细观角度阐述参数对模型的影响, 以期为基于流固耦合理论的离散元模拟方法的使用提供理论参考。

关键词: 渗流侵蚀; 离散元模拟; 间断级配土; 细颗粒流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0143-10

Influence Analysis of Discrete Element Model Parameters in Seepage Erosion Simulation

DING Ziyue, XU Zengguang, CAO Cheng, ZHAO Lingfeng, WANG Yu

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] Due to the hidden nature of seepage erosion occurring in engineering and the complexity of its development, discrete element simulation has become an important tool for scholars to carry out research on seepage erosion mechanisms. The parametric construction of the solid model influences the transport and loss of particles under water flow by controlling the filling and distribution of particles within the model, and is a key component in carrying out discrete elemental simulations of seepage erosion. [Methods] The current research on discrete element model parameters is mainly a single-parameter discussion. In this paper, from the three dimensions of soil pore space, soil particles and wall sidewalls, six sets of soil models are constructed by considering the changes of porosity, particle overlap ratio and wall modulus, and upward seepage calculations are carried out to record the internal particle loss process, the structural change of the force chain, and the change of the porosity process, in order to evaluate the influence of the three parameters on the model. The influence mechanism of the discrete element model parameters on the seepage and erosion process was also analyzed from a fine-grained point of view. [Results] Discrete element model parameters affect the stage of particle loss under water flow by influencing the composition of particles and force chains within the model. Initial porosity controls the number of particles filling the interior

收稿日期: 2024-03-23

修回日期: 2024-04-15

录用日期: 2024-04-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52179143, 52209167); 陕西省科技创新团队项目 (2022TD-01); 陕西省重点研发计划项目 (2022ZDLNY02-04)

第一作者: 丁子玥 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事坝基土内部侵蚀数值模拟研究。E-mail: 1394086016@qq.com

通信作者: 许增光 (1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水工渗流与防渗研究。E-mail: xuzengguang@xaut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

of the model; wall modulus and particle overlap ratio affect the number of contacts within the model. Models with a high number of particles and contacts have internal particles that tend to move as clusters of particles; conversely, free fine particles that do not form contacts undergo longitudinal migration as single particles within the model, and the porosity profile shows fluctuating changes. [Conclusion] In this study, the effect of parameters on the model is described from a fine-grained point of view, with a view to providing a theoretical reference for the use of discrete element simulation methods based on the fluid-structure coupling theory.

Keywords: seepage erosion; discrete element simulation; intermittent graded soil; loss of fine particles

Received: 2024-03-23

Revised: 2024-04-15

Accepted: 2024-04-25

Online(www.cnki.net): 2024-06-25

由渗流侵蚀引起的土体破坏广泛存在于坝基覆盖层、坡积物、湖积土等土石混合体中。其发展过程的隐蔽性使得由此引发的工程事故难以预防,一旦在坝体下游形成可见的塌坑或涌水,围绕局部破坏点的周围土体会快速响应,从而给工程带来严重事故^[1-2]。因此,深入研究渗流侵蚀的影响因子及其发展演化过程对土石坝、堤防、围堰等工程的防灾和防渗设计具有重要意义。

学者们对影响土体渗流侵蚀的因素展开了大量的试验研究,分析了土体级配曲线、细粒含量、土体密实度、水力梯度、土体围压等参数变化对土体的土体破坏过程、临界水力梯度及土体应力状态的影响^[3-10]。已有研究^[4,11]表明,级配曲线、细粒含量等几何因素控制下的土体的颗粒填充和内部结构是导致模型渗流过程差异性的基础因素,围压等条件通过改变土体的密实程度改变模型土体侵蚀破坏过程。在室内试验中,模型内部颗粒的运移过程及模型内部接触网络变化难以取得。基于流固耦合理论的离散元法能从细观角度监测和记录颗粒层面土体渗流侵蚀过程和相关参数变化。倪小东等^[12-13]以室内砂槽试验为参照开展稳定流和非稳定流下的颗粒流模拟,表明离散元方法研究管涌问题的可行性;ABDELH-AMID 等^[14]使用 Boltzman—DEM 方法对大坝过滤层颗粒进行渗流模拟。与试验研究中试样的制备环节相对应,离散元模拟需要对土体模型进行参数化构建,除对土体模型的配比设置外,还需对一些控制模型内部颗粒填充和接触情况的离散元模型参数进行试算取值。GUO 等^[15]讨论了砂粒形状对土壤可蚀性的影响;吴凤元等^[16]研究摩擦系数对无黏性颗粒模型渗流破坏过程的影响及临界水力梯度的影响;AHMADI 等^[17]考虑了真实颗粒扩散的各向异性,基于离散元方法研究颗粒组构对不稳定土壤微观结构的影响;常利营等^[18]评估了球形和棒状颗粒形状模拟结果与试验结果的差距。上述学者多对影响离散元模型构建中的单因素展开讨论并参照室内试验讨

论了有效性,本文参考渗流侵蚀试验对相关离散元参数开展系统研究,定性分析离散元参数对土体侵蚀破坏过程的影响性,为学者们构建离散元模型时的参数试算提供依据。

本文针对离散元模型参数对渗流破坏过程的影响展开研究,利用基于流固耦合理论的离散元方法对 6 组不同参数组合的固相模型进行向上渗流模拟,从细观角度分析探讨颗粒数目和接触数目变化对颗粒流失阶段、力链结构变化和孔隙率变化的影响,对初始孔隙率、墙体模量和颗粒重叠比的影响性大小进行排序并阐明其对土体渗流侵蚀过程的影响机理,以期对采砂、大坝、隧道等工程中的渗流侵蚀导致的土体破坏的机理研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土体

根据王宇^[19]于 2019 年 7 月所搭建的间断级配土体内侵蚀破坏试验进行级配取值和离散元模型构建,以研究土体渗流侵蚀导致土体破坏的过程。试验是在直径 0.1 m、高度 0.3 m 的圆柱形有机玻璃筒中进行的。有机玻璃桶底部有 1 个进水口,进水口与流量计相连;有机玻璃的顶部与出水口相连(图 1)。根据刘杰等^[20]对不稳定土体的界定,选用 5~10 mm 的粗砂及 0.5~1.0 mm 的标准砂以 4:1 比例配制成的级配不连续土作为试验用材,混合砂试样初始孔隙度测量为 0.24。王宇^[19]为观察渗流作用下孔隙中细料的移动流失过程,对 0.5~1.0 mm 的标准砂用绿色染料进行染色。该试验为后文离散元模型的建立和渗流计算提供了参考。

1.2 计算模型验证

1.2.1 土体模型构建 土体模型的构建流程见图 2,其中假定土颗粒为球形刚体。PFC^{3D}(Particle Flow Code in 3 dimension)软件基于牛顿第二定律运行代码程序,并应用所设置的参数对颗粒间的接触力和位移进行求解,从而生成稳定的离散元模型^[21]。

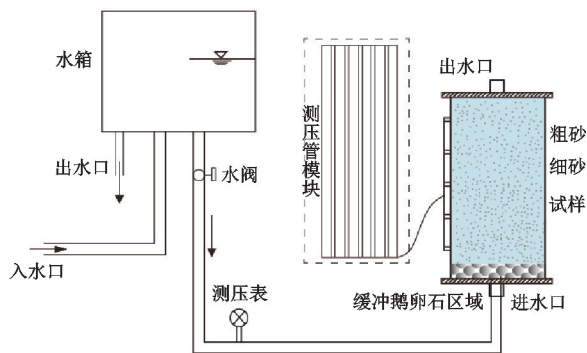


图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test setup

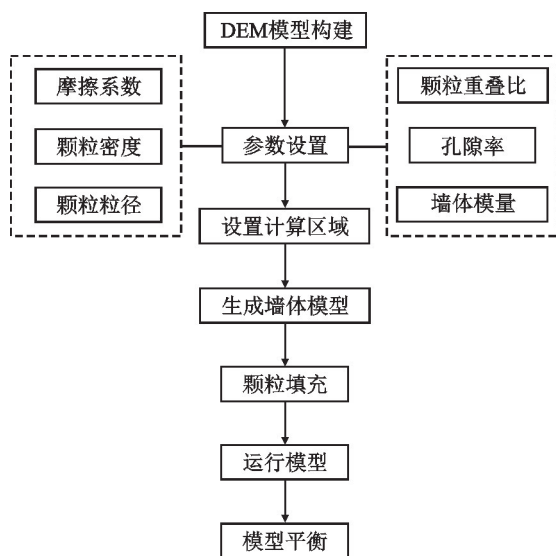


图2 DEM模型构建流程

Fig. 2 Flowchart of DEM model construction

本文建立了1个直径40 mm、高度80 mm的数值模型,约为试验模型的6.4%。土体模型的粒径级配参考王宇^[19]的试验试样进行设置。PFC^{3D}软件的计算力与模型内颗粒最大最小粒径比($d_{\max}/d_{\min}$)有关,粒径比越大,数值模型计算越慢。因此,最终将0.5~1.5 mm的细颗粒简化为1.0~1.2 mm,将5~10 mm的粗砂简化为8.3~8.5 mm。其他参数取值见表1。其中,砂土的真实摩擦系数为0.5~0.7,根据前人^[20]对土体离散元模拟相关研究,摩擦系数取0.5。天然砾石的杨氏模量约为70~170 MPa,在数值模拟中使用的有效模量与杨氏模量呈正比,本研究的颗粒有效模量取100 MPa。其他相关参数的选取参考前人^[14,22]进行土体离散元模拟的有关研究中选取。

表1 模型参数设置

Table 1 Model parameter setting

参数类型	数值
粗颗粒直径/mm	8.3~8.5
细颗粒直径/mm	1.0~1.2
颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 650
摩擦系数	0.5
颗粒有效模量/MPa	100

1.2.2 监测数据设置及流固耦合计算 在模型进行流固耦合计算时,每经过0.1 s计算时间对模型的颗粒流失情况、接触变化及力链分布情况进行记录,以探究不同水力梯度下不同细颗粒含量模型的内部颗粒堆积情况和接触动态变化过程。此外,本研究依据圆柱形试样半径大小,通过在模型内部不同位置设置半径为34 mm的测量球来对孔隙率、接触数目等变量进行监测(图3)。

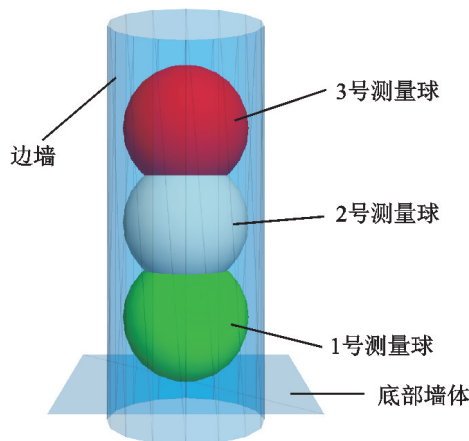


图3 测量球位置示意

Fig. 3 Schematic of the measuring ball position

土体模型生成后,流体计算模块基于Navier-Stokes方程对流体单元进行求解并实现与固体颗粒计算信息的交互^[23]。基于每个流体单元所含颗粒大于100个的原则对原型试样模型进行网格剖分(图4)。

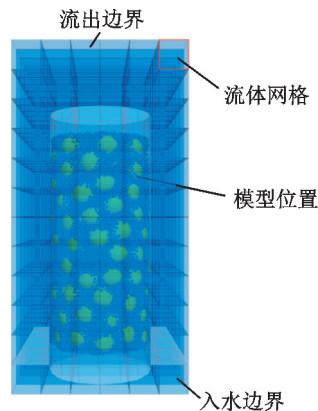


图4 流体网格剖分

Fig. 4 Fluid mesh sections

在进行流固耦合计算时,PFC^{3D}稳步的步长非常小,一般为100 ns,模型计算时间往往无法与试验时间(实际的物理时间)同步,造成计算结果与试验结果难以对比的问题。HU等^[22]通过对离散元模型进行水力梯度加载,表明提高水力梯度可以加快体积压缩率和孔隙率变化率。为加快计算时间,WANG等^[24]通过对同一模型放大10倍水力梯度进行流体计算并对比2个测试模型的孔隙率变化情况(图5),结果表明,增加水力梯度可以在不影响颗粒流失规律的情况下加快模型试样的行为。因此,本研究在设置流体计

算的水力梯度时在试验水力梯度的基础上放大 10 倍以加快计算时间(表 2)。

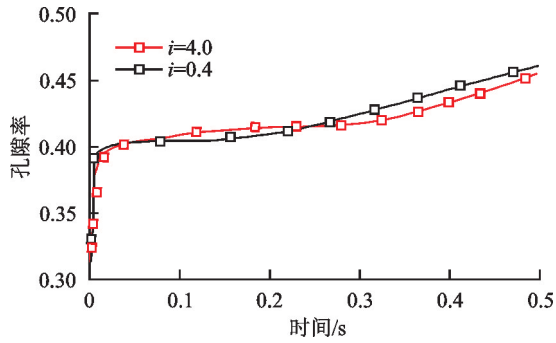


图 5 测试模型不同水力梯度下孔隙率对比^[24]

Fig. 5 Comparison of porosity under different hydraulic gradients of test models^[24]

表 2 流体参数

Table 2 Fluid parameter table

参数类型	数值
流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000
黏滞系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.001
网格大小/mm	10×10
水力梯度区间	1.0~6.0

本研究通过控制水流压力来控制水力梯度,水力梯度加载方式,流体单元每计算 0.1 s,水力梯度(i)增加 1 个单位(图 6)。在进行流固耦合计算时,PFC^{3D}计算模型时间步长设置为 2.0×10^{-7} ,流体计算时间步长设置为 2.0×10^{-5} ,数据每 0.02 s 保存 1 次。这个过程一直持续,直到土体模型内部的颗粒完全被水流冲出时,计算结束。

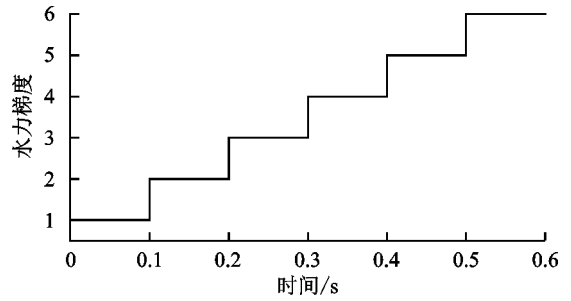
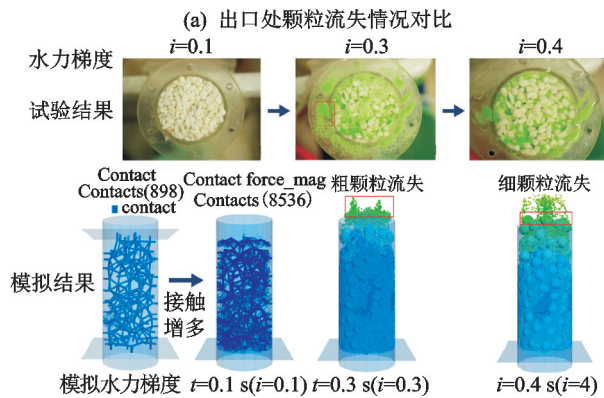


图 6 入水边界水力梯度加载方式

Fig. 6 Inlet boundary hydraulic gradient loading method

1.2.3 模型验证 运行程序、离散元模型流体计算结果见图 7,将其与试验现象在模型出口处和沿渗流方向的颗粒流失情况进行对比。模拟中模型充水的初始时刻,试样与数值模型均无颗粒流失,数值模型内部颗粒接触变多;随着水头及水力梯度的增加,细颗粒开始在模型内部发生纵向移动并从试样出口处流失;水头进一步增加,粗颗粒逐渐松动并流出模型,标志着土体的破坏。结合试验结果,对模拟结果进行全过程对比分析:0~0.1 s 计算时刻为模型的固结沉降阶段,模型内部细颗粒重新填充孔隙,内部接触数目增加,孔隙率减小,力链结构密实;0.1~0.3 s 计算时刻为细颗粒流失阶段,与试样绿色细颗粒流出模型出口相对应,模型表层细颗粒流出;0.3~0.4 s 计算时刻为骨架颗粒流失阶段,试样表层开始由粗颗粒涌出,标志着模型的破坏;0.5~0.6 s 计算时段,与试验相比,数值模型较大的水力梯度加快颗粒的行为,模型呈现为整体上升,试验试样内部细颗粒伴随着粗颗粒逐层流出模型。

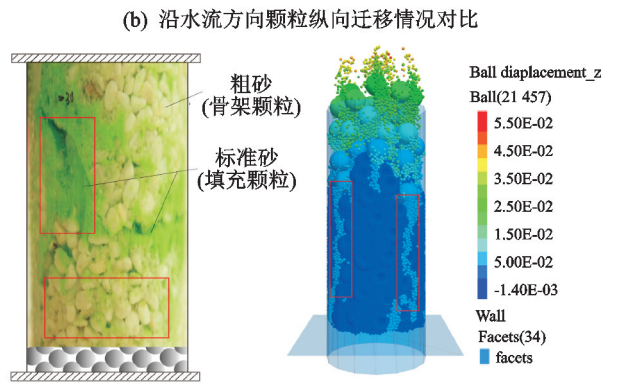


图 7 模型试样与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of model specimens and test results

由图 8 可知,数值模型孔隙率变化趋势与试验土体的孔隙率变化趋势一致。数值模拟的水力梯度是试验水力梯度的 10 倍,水力梯度的增长加速数值模型孔隙率的变化。与试验结果相比,数值模型在 0.3 s 计算时刻后孔隙率持续增长,而土体试样孔隙率先增长,在水力梯度为 0.5 后逐步稳定。这是由于数值模型的初始孔隙率比试验孔隙率大,未充水时模型中填充孔隙的细颗粒较少。随着细颗粒的流失,可填充孔隙的细颗粒减少,

因此孔隙率不断增大。试验结果与数值模拟结果基本吻合,从而验证模型方法对渗流计算的有效性。

1.3 离散元参数组别设置及模型流体计算

固相模型的参数化构建是土体渗流侵蚀数值模拟的重要环节。在 PFC^{3D}中,模型的构建旨在对颗粒填充和颗粒分布进行控制,本节生成 6 组土体模型对孔隙率、颗粒重叠比和墙体模量对土体侵蚀破坏过程的影响进行定性分析,参数设置见表 3。孔隙率用于

控制模型内部颗粒的填充情况;由图 9 可知,颗粒重叠比是指 2 颗粒接触间距与接触任意一端颗粒直径的比值。在生成离散元模型时,颗粒之间具有较大的重叠量,需要重叠比来控制 2 颗粒间的接触程度,从而控制模型内部颗粒分布情况。离散元模拟土体渗流的相关研究中,颗粒重叠比常取值为 0.15~0.25^[25-26]。墙体有效模量与墙体刚度呈正比,其与室内试验所用仪器的刚性壁与柔性壁所对应,可以影响模型内部颗粒的填充情况^[27],结合离散元模拟取值^[24,28],本文取 $1e^{10}$ 和 $1e^{11}$ 。

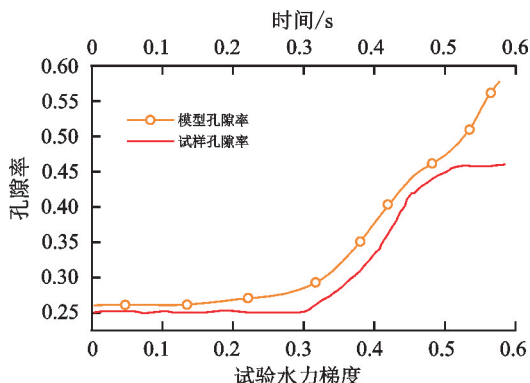


图 8 试验砂样与数值模型孔隙率变化对比

Fig. 8 Comparison of changes in porosity between test sand samples and numerical models

表 3 模型组别设置

Table 3 Model group setting

模型编号	孔隙率	重叠比	墙体模量	颗粒数目
A1 模型	0.24	0.15	$1e^{10}$	21 998
A2 模型	0.24	0.15	$1e^{11}$	21 998
A3 模型	0.24	0.18	$1e^{11}$	21 998
A4 模型	0.26	0.15	$1e^{10}$	21 457
A5 模型	0.26	0.18	$1e^{11}$	21 457
A6 模型	0.28	0.15	$1e^{11}$	20 885

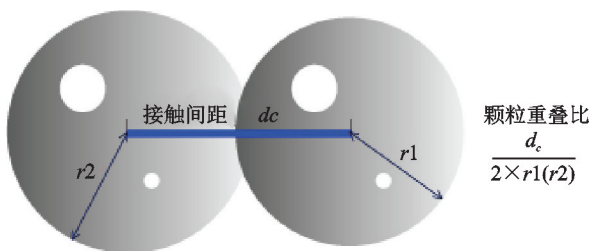


图 9 颗粒重叠比示意

Fig. 9 Schematic representation of particle overlap ratio

依照表 3 相关参数生成 A1~A6 模型,PFC^{3D} 软件运行代码使其内部达到稳定后,采用与试验计算模型相同的流体取值及水力梯度加载方式对其进行流体计算。

2 结果与分析

对 A1~A6 模型进行流体计算,监测和分析各个模型的颗粒流失过程、力链结构变化、接触数目变化过程及孔隙率变化曲线。通过与试验比对将离散元

模型(A4 模型)流体计算结果划分为固结沉降阶段、细颗粒流失阶段、骨架颗粒流失阶段和模型整体上升阶段。以这 4 个阶段为基准,分析其余组别模型所经历的阶段差异性。

2.1 颗粒流失变化过程

由图 10 可知,通过对比可知,A2 和 A3 模型,A4、A5 和 A6 模型 2 组模型颗粒流失过程基本一致。A1 模型不经历固结沉降和细颗粒流失阶段。在 0.1 s 计算时刻,A1 模型内部粗颗粒就开始携带细颗粒流出模型,0.1~0.3 s 计算时段为粗颗粒流失阶段,0.3~0.6 s 计算时段为模型整体上升阶段,模型内部颗粒逐层流出容器。A2(A3)模型不经历固结沉降阶段;0.1 s 计算时刻,细颗粒已经流出模型,0.1~0.2 s 计算时段为细颗粒流失阶段;粗颗粒在 0.2~0.3 s 计算时段之间流出模型,标志着 A2 模型发生破坏。A4、A5 和 A6 模型细颗粒先在模型内部发生纵向迁移;在 0.2 s 计算时段,表层细颗粒流出容器,孔隙率随之增大,底层细颗粒向上补充,发生渗透挤密现象;0.3 s 计算时刻,粗颗粒流出模型,模型发生破坏,细颗粒的纵向移动最为明显。

2.2 力链及接触变化过程

由图 11 可知,间断级配土体内部具有 3 种接触,分别为粗颗粒之间形成的强接触、细颗粒之间形成的弱接触及粗颗粒和细颗粒之间形成的接触^[22]。

强接触相互连接在模型内部形成骨架体系,该体系作为主要结构抵抗水流作用;弱接触和粗颗粒—细颗粒接触起辅助作用。在水流作用下颗粒的流失和模型内部力链变化是同步发生的,A2 和 A3 模型以及 A4、A5 和 A6 模型 2 组模型的力链变化过程相同,用 A2 模型表征 A3 模型,用 A4 模型表征 A5 和 A6 模型。由图 12 可知,0.1 s 计算时刻,在水流作用下 A1 和 A2(A3)模型内部的骨架体系开始瓦解,粗颗粒携带着细颗粒形成伞状接触以颗粒群的方式开始靠近模型出口。此时,初始接触较少的 A4(A5)和 A6 模型内部细颗粒以“一”字形或“Y”字形的接触形式在模型内部移动。0.1~0.3 s 计算时段,A1 模型内部伞状力链继续移动,颗粒以颗粒群形式流出模型。此时,A2(A3)模型骨架的体系的破坏为细颗粒的移动提供了空间,A2(A3)与 A4(A5、A6)模型内部细颗粒轻微碰撞形成“一”字形、“Y”字形或“U”字形的接触并组成平行力链发生细颗粒的流失。0.3 s 计算时刻,所有模型出口处涌出大量伞状接触,此时 A2~A6 模型的粗颗粒以颗粒群的形式流出模型,标志着模型发生破坏。0.3~0.6 s 计算时刻,全部模型整体抬升,细颗粒重新填充骨架孔隙,模型内部颗粒相互挤压并以“哑铃状”力链和“爪形”力链逐层流出模型。

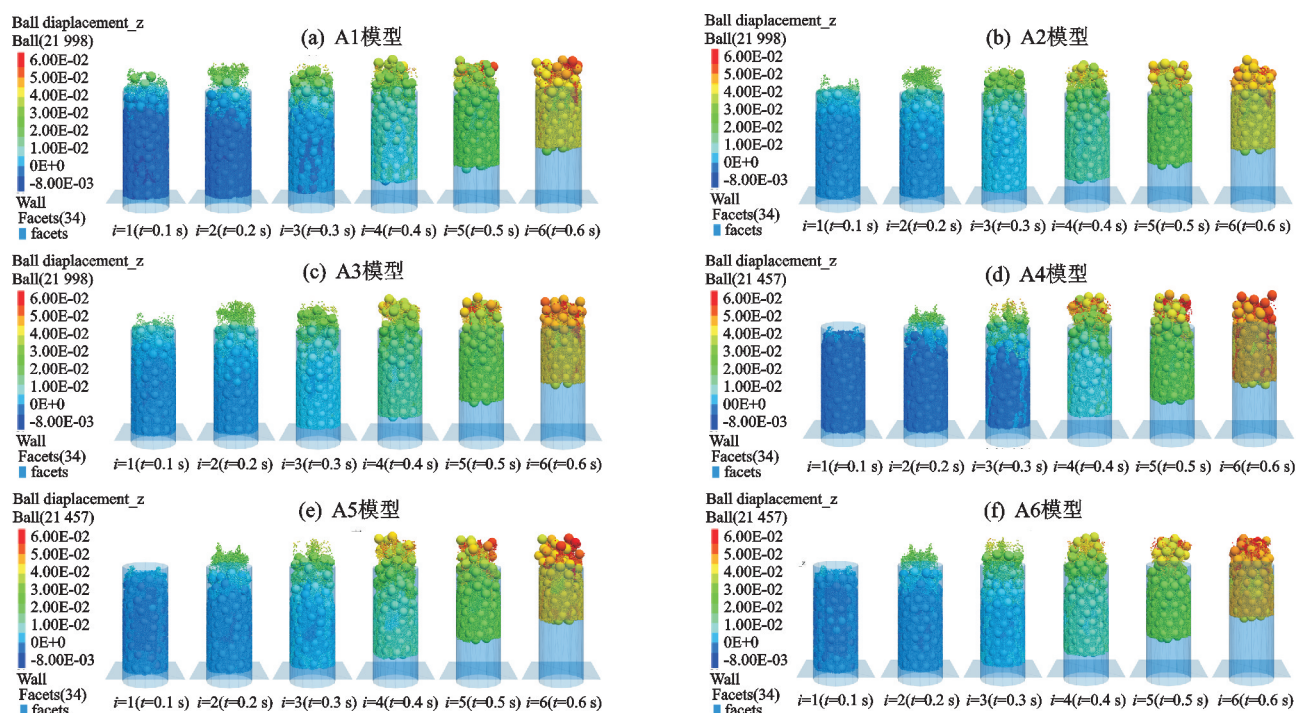


图 10 A1~A6 模型颗粒流失过程

Fig. 10 Model A1~A6 particle loss processes

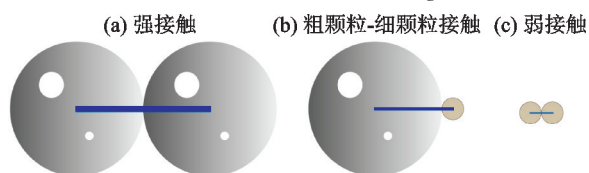


图 11 模型内部接触示意

Fig. 11 Model internal contact schematic

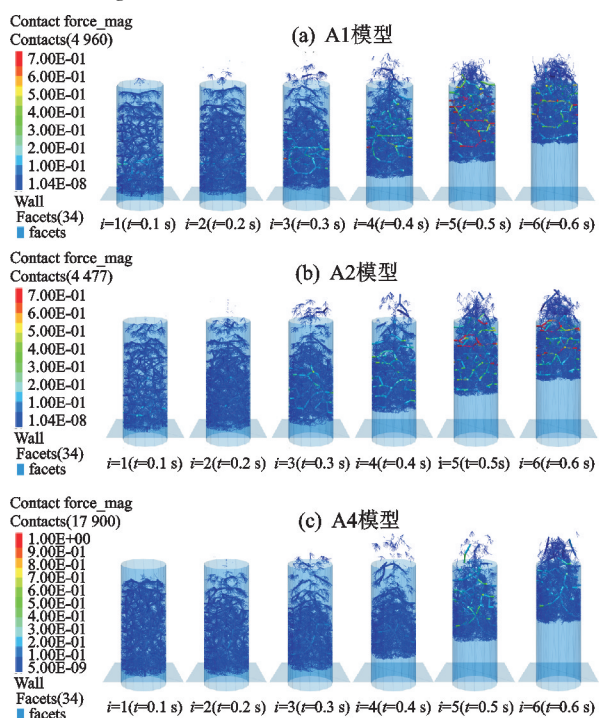


图 12 各模型力链变化过程

Fig. 2 Processes of change in the force chains of the models

水流作用下 3 种接触的变化过程见图 13, 该过

程中强接触数量普遍较小,在条形图中对其进行局部放大。在充水的初始时刻,颗粒填充较好的 A1、A2、A3 模型土体发生膨胀,接触数量由 11 903, 9 982, 9 632 骤降。模型初始未充水状态下, A2 模型接触数量比 A1 模型少 1 921, A3 模型比 A2 模型少 350。由此可见,重叠比和墙体模量直接影响模型内部的接触数量,重叠比和墙体模量越大,总接触数目越少。A2(A3)模型在接触骤降后模型能继续发生颗粒的固结沉降及细颗粒的流失。模型内部的骨架体系和弱接触的占比决定着模型渗流过程的变化。由于 3 个参数相互组合对模型内部力链体系的影响,水流作用下 A2(A3)、A4(A5)、A6 模型颗粒所经历的 4 个阶段的持续时间有所不同: A2(A3)模型内部含 21 998 个颗粒,弱接触占比 95.11%,颗粒分布密实,细颗粒流失阶段持续时间短,骨架颗粒流失和整体上升阶段持续时间长; A4(A5)模型各阶段分布均匀,既存在细颗粒的纵向迁移也存在模型的整体上升;而 A6 模型弱接触占比 5.14%,伴随着细颗粒的流失,可填充孔隙的细颗粒减少,粗颗粒流失时间也较 A4(A5)模型长。由于水流对模型底层颗粒的持续作用,6 种模型底层颗粒均挤压密实并最终逐层流出模型。

2.3 孔隙率曲线变化规律

6 组模型内部的孔隙率变化见图 14,不同模型的孔隙率变化曲线不同,同一模型的孔隙率曲线变化呈现出空间差异性。位于模型底层的测量球 1 区域孔隙率在模型发生临界破坏时刻开始增长且增长速率

最快;位于中层的测量球2区域孔隙率在模型发生破坏的后期逐步增大;位于模型表层的测量球3区域孔隙率曲线呈现波动性变化,孔隙率先增大后减小最终趋于稳定,不同模型的波动程度不同。通过对比可知,初始孔隙率相同的模型孔隙率曲线变化趋势及变化范围基本一致。在模型充水的初始时刻:A1、A2和A3模型孔隙率变化曲线均存在明显的突变,突变程度由模型底层到表层逐渐增大。在0~0.1 s计算时段,相同孔隙率的A4与A5模型内部不同区域内孔隙率略有不同:A4模型内部不同区域孔隙率大小

相同且变化一致,A5模型孔隙率由表层到底层逐渐减小。A6模型与A4、A5模型孔隙率曲线变化趋势基本一致,孔隙率更大的A6模型的固结沉降阶段时间更长,表层区域的孔隙率曲线在0.2~0.4 s计算时段波动更明显。综上所述,水流作用下模型渗流侵蚀过程的孔隙率曲线变化主要由初始孔隙率决定。初始孔隙率较小时,模型内部颗粒的整体性较好,孔隙率在充水的初始时刻会发生突变;随着孔隙率的增大,模型内部不同区域的孔隙率变化差异性增大,表层区域的孔隙率波动变得剧烈。

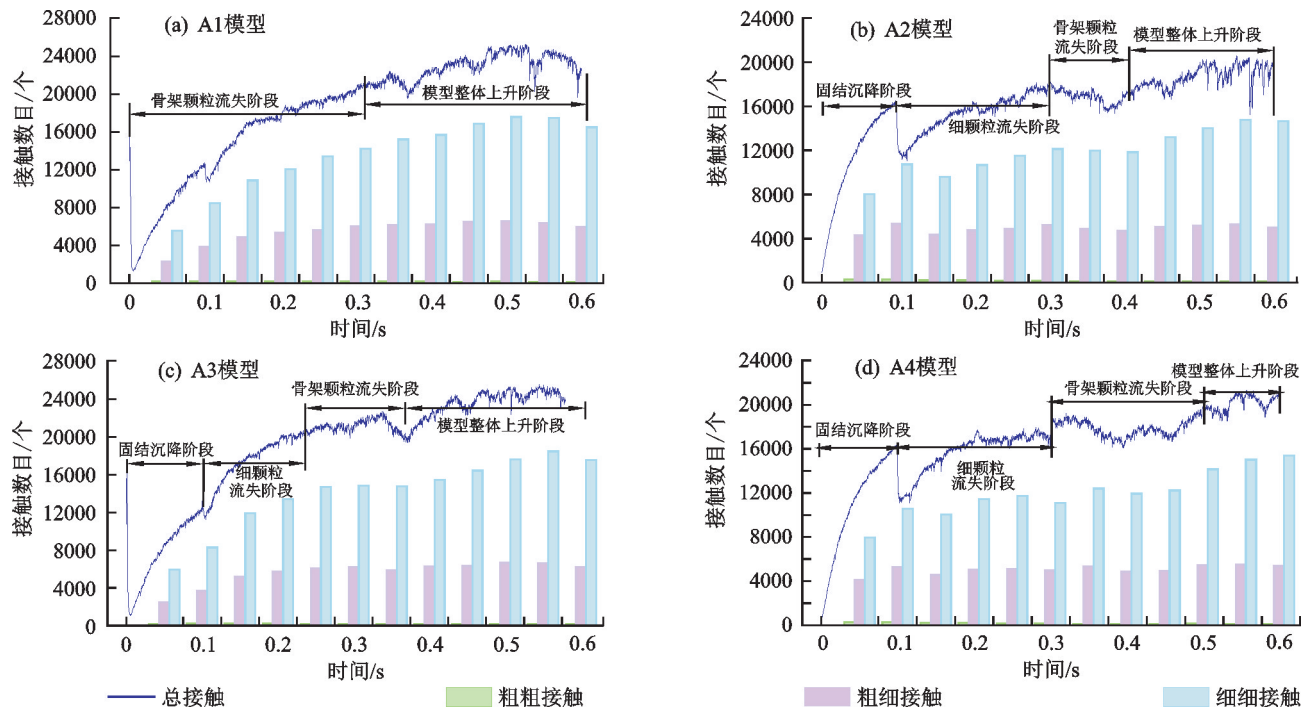


图13 各模型内部接触数量随计算时间变化

Fig. 13 Number of contacts within each model over time

3 讨论

通过对水流作用下不同模型的参数记录和过程分析可知,颗粒流失过程不同的模型其孔隙率变化可以相同,孔隙率、墙体模量及颗粒重叠比通过直接影响模型内部颗粒和接触数目造成A1~A6模型颗粒流失和相关参数的差异性。

由表4可知,初始孔隙率的大小通过控制模型内部的颗粒数目,影响未充水状态下细颗粒在孔隙中的填充情况,最终造成水流作用下孔隙率的变化。A1、A2和A3模型初始孔隙率较小,模型颗粒较多,细颗粒在孔隙中填充较充分,颗粒之间比较密实,没有孔隙可供细颗粒发生纵向迁移,因此模型在充水的初始时刻,模型内部颗粒整体松动,孔隙率发生突变。A6模型初始孔隙率最大,模型内部颗粒数量最少,细颗粒在孔隙中多为悬浮状态,模型在充水的初始时刻(0~0.1 s),表层颗粒移动伴随着内部颗粒的相互挤

压,孔隙率持续下降;0.2~0.3 s计算时段,细颗粒持续流失,底层区域发生渗透挤密现象,细颗粒重新填充;0.3 s计算时刻左右,细颗粒的纵向移动减慢,粗颗粒开始流出,模型逐渐呈现整体破坏。

颗粒重叠比和墙体模量直接影响模型内部的总接触数量。颗粒重叠比和墙体模量越小,模型颗粒之间的接触越多,模型的整体性越强,模型越容易呈现整体上升的现象。模型颗粒流失过程的差异性是由颗粒数目和接触数目共同影响的。根据6个模型经历颗粒流失的阶段和孔隙率变化规律将其分为3类:初始孔隙率、墙体模量和颗粒重叠比都较小的A1模型为第1类,该模型颗粒数量和接触数量最多,在水流作用下,该模型粗颗粒直接流出模型发生破坏;与A1孔隙率相同,但重叠比和墙体模量较大的A2和A3模型为第2类,该类模型接触数量比A1模型少,该类模型的粗颗粒最先在模型内部发生纵向迁移,当

粗颗粒移动至模型出口处,骨架体系被破坏,孔隙增大,细颗粒最先流出模型外;孔隙率较大的 A4、A5、A6 模型为第 3 类,该类模型中由粗颗粒相互接触形成的强接触占比较大,细颗粒存在明显的纵向迁移,模型的固结沉降、颗粒流失和渗透挤密对应测量球 3 区域(模型上层区域)孔隙率呈现先减小(0~0.1 s 计算时刻)后增大(0.1~0.3 s 计算时刻)再减小(0.3~0.6 s 计算时刻)的,从而使得 A4、A5 和 A6 模型的平

均孔隙率增幅较小。由表 4 可知,墙体模量和重叠比不变的情况下,随着孔隙率的增大,模型内部颗粒数减小,总接触减少,但强接触占比增加,细颗粒更容易在模型内部发生纵向迁移,固结沉降和细颗粒流失阶段持续时间更长(图 13);孔隙率相同时,模型内部颗粒数目相同,墙体模量和重叠比越大,模型内部总接触数目越少,强接触占比越大,颗粒更容易在模型内部发生纵向迁移。

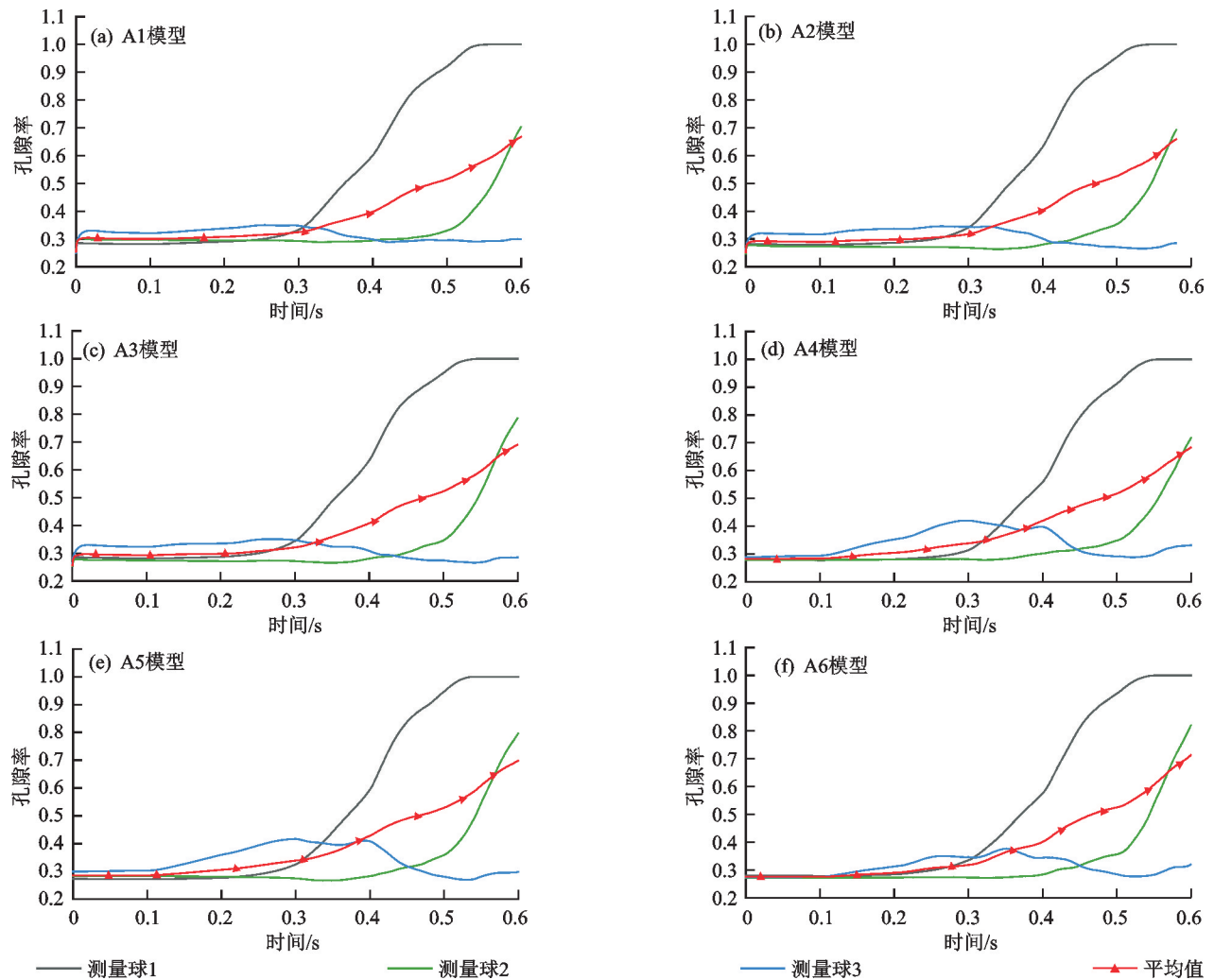


图 14 A1~A6 模型孔隙率随计算时间变化

Fig. 14 Porosity over time for each model

表 4 各模型初始颗粒及接触数目

Table 4 Number of initial particles and contacts for each model

模型编号	总颗粒数目	粗颗粒数	总接触数目	强接触数目	弱接触数目	强接触占比/%
A1	21 998	175	11 903	582	11 321	4.89
A2	21 998	175	9 982	580	9 402	5.81
A3	21 998	175	9 632	594	9 038	6.17
A4	21 457	165	905	430	475	47.51
A5	21 457	165	898	414	484	46.10
A6	20 885	153	389	369	20	94.86

模型内部的颗粒数目直接影响颗粒在孔隙中的迁移和重填情况^[9]。3 个参数中,能够直接控制模型

内部颗粒数目的初始孔隙率对颗粒渗流侵蚀过程的影响性最大。墙体模量的大小直接影响颗粒和墙体

之间的模量比,墙体模量越接近颗粒模量时,模型内部弱接触数量越多。重叠比则是通过影响颗粒之间的重叠程度来影响接触数量,初始重叠比越小,颗粒之间的间距越小,颗粒接触越多。由表3可知,对比A1、A2和A3模型的接触占比情况可知,相比于颗粒重叠比对接触的影响,墙体模量的增大使得强接触占比从4.89%提高到5.81%,并且改变粗颗粒和细颗粒的流失情况,使得A1模型细颗粒不经历固结沉降和细颗粒流失阶段,墙体模量通过改变接触数目对颗粒流失情况影响更大。

4 结论

(1)在水流作用下,模型的渗透破坏过程可分为固结沉降、细颗粒流失、骨架颗粒流失和模型整体上升阶段4个阶段。不同模型所经历的阶段与其内部初始未充水状态下的接触数目有关,A1模型内部接触数量最多,颗粒最密实,模型整体性好,不经历固结沉降阶段和细颗粒流失阶段;A6模型内部接触数目少,整体上升阶段持续时间最短。

(2)水流作用下,同一模型的孔隙率曲线变化呈现出空间差异性,表层区域孔隙率最先增大且呈现波动变化;底层区域孔隙率随着细颗粒的流失呈线性上升;中部区域位于两者之间呈凹曲线平稳增大。

(3)由模型内部力链形式的变化以及接触变化曲线可知,在细颗粒流失阶段,颗粒多以单颗粒形式流失;在临界破坏以后,颗粒以伞状、哑铃状力链的颗粒群形式流出模型逐渐呈现整体上升。

(4)孔隙率、颗粒重叠比和墙体模量通过影响模型内部颗粒数目、接触数目及力链组成来影响模型所经历的渗流阶段。孔隙率越小,模型内部颗粒数目越多;墙体模量和颗粒重叠比越小,模型内部接触数目越多,模型的整体性越好,整体上升阶段持续时间越长。

参考文献:

- [1] 张秀丽.国内外大坝失事或水电站事故典型案例原因汇集[J].大坝与安全,2015(1):13-16.
ZHANG X L. Collection of typical cases of domestic and foreign dam failures or hydroelectric power plant accidents causes[J].Dams and Safety,2015(1):13-16.
- [2] 李宏恩,马桂珍,王芳,等.2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策[J].水利水运工程学报,2021(5):101-111.
LI H E, MA G Z, WANG F, et al. Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5):101-111.
- [3] 张刚,周健,姚志雄.堤坝管涌的室内试验与颗粒流细观模拟研究[J].水文地质工程地质,2007,34(6):83-86.
ZHANG G, ZHOU J, YAO Z X. Study on mesomechanical simulation of piping with model tests and PFC^{2D} [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007,34(6):83-86.
- [4] 袁涛,蒋中明,刘德谦,等.粗粒土渗透损伤特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(4):1311-1316,1336.
YUAN T, JIANG Z M, LIU D Q, et al. Experiment on the seepage damage coarse grain soil[J].Rock and Soil Mechanics,2018,39(4):1311-1316,1336.
- [5] 姚志雄,周健,张刚,等.颗粒级配对管涌发展的影响试验研究[J].水利学报,2016,47(2):200-208,218.
YAO Z X, ZHOU J, ZHANG G, et al. Experimental study of particle grading impact on piping mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 200-208, 218.
- [6] 姚志雄,周健,张刚.砂土管涌机理的细观试验研究[J].岩土力学,2009,30(6):1604-1610.
YAO Z X, ZHOU J, ZHANG G. Meso-experimental research on piping mechanism in sandy soils[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(6):1604-1610.
- [7] 吴梦喜,叶发明,张琦.细颗粒流失对砂砾石土本构关系的影响研究[J].岩土力学,2017,38(6):1550-1556.
WU M X, YE F M, ZHANG Q. Effect of fine grain loss on the stress-strain relationship of sand and gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(6):1550-1556.
- [8] 罗玉龙,吴强,詹美礼,等.考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界坡降试验研究[J].岩土力学,2012,33(增刊1):73-78.
LUO Y L, WU Q, ZHAN M L, et al. Experimental study on critical slope drop of piping in suspended cutoff wall-gravel foundation considering stress state[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(S1):73-78.
- [9] 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.
- [10] 蒋中明,王为,冯树荣,等.砂砾石土渗透变形特性的应力状态相关性试验研究[J].水利学报,2013,44(12):1498-1505.
JIANG Z M, WANG W, FENG S R, et al. Experimental of study on the relevance between stress state and seepage failure of sandy-gravel soil[J].Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(12):1498-1505.
- [11] 李小泉,鲁涛,罗启迅.宽级配砾石防渗土料的防渗抗渗特性研究[J].水电站设计,2022,38(1):83-87,96.
LI X Q, LU T, LUO Q X. Analysis on anti-seepage characteristic of wide-graded gravel soil [J]. Design of

- Hydroelectric Power Station, 2022, 38(1): 83-87, 96.
- [12] 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.
- NI X D, ZHAO S L, WANG Y. Numerical analysis of generation and evolution of piping mechanism in meso-level under unsteady flow[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3154-3161.
- [13] 倪小东, 王媛, 王飞. 管涌的砂槽试验研究及颗粒流模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(6): 51-57.
- NI X D, WANG Y, WANG F. Study on piping by sand-bank model and simulation by PFC^{3D}[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(6): 51-57.
- [14] ABDELHAMID Y, EL SHAMY U. Pore-scale modeling of fine-particle migration in granular filters[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(3): e4015086.
- [15] GUO Y, YANG Y, YU X B. Influence of particle shape on the erodibility of non-cohesive soil: Insights from coupled CFD-DEM simulations[J]. Particuology, 2018, 39: 12-24.
- [16] 吴凤元, 梁力, 樊赟赟, 等. 基于 PFC^{3D} 的无黏性土渗流临界水力梯度模拟分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 428-432.
- WU F Y, LIANG L, FAN Y Y, et al. Simulation of critical hydraulic gradient in no cohesive soil with PFC^{3D}[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(3): 428-432.
- [17] AHMADI M, MADADI M, DISFANI M, et al. Reconstructing the microstructure of real gap-graded soils in DEM: Application to internal instability[J]. Powder Technology, 2021, 394: 504-522.
- [18] 常利营, 陈群, 叶发明. 颗粒流模拟砂土渗流规律的适用性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊 2): 571-576.
- CHANG L Y, CHEN Q, YE F M. Study on applicability of particle flow to simulate seepage law of sandy soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 571-576.
- [19] 王宇. 基于流固耦合理论的管涌侵蚀机理细观数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- WANG Y. Numerical simulation of piping erosion mechanism based on fluid-solid coupling theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [20] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1188-1191.
- LIU J, XIE D S, CUI Y H. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1188-1191.
- [21] ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(13): 3378-3396.
- [22] HU Z, YANG Z X, ZHANG Y D. CFD-DEM modeling of suffusion effect on undrained behavior of internally unstable soils[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 126: e103692.
- [23] JACKSON R. The dynamics of fluidized particles[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [24] WANG Y, CHAI J R, XU Z G, et al. Numerical simulation of the fluid-solid coupling mechanism of internal erosion in granular soil[J]. Water, 2020, 12(1): e137.
- [25] NIE Z H, ZHU Y G, ZOU J F, et al. DEM study of the microscopic characteristics and internal stability of binary mixtures[J]. Powder Technology, 2019, 352: 314-324.
- [26] CHENG K, ZHANG C Y, PENG K R, et al. Un-resolved CFD-DEM method: An insight into its limitations in the modelling of suffusion in gap-graded soils[J]. Powder Technology, 2021, 381: 520-538.
- [27] 田大浪, 谢强, 宁越, 等. 间断级配砂砾石土的渗透变形试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3663-3670.
- TIAN D L, XIE Q, NING Y, et al. Experimental investigation on seepage deformation of gap-graded sand-gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3663-3670.
- [28] XIAN M T, XU Z G, CHEN B. Numerical investigation of variable-mass seepage mechanism of broken rock mass in faults[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 160: e105527.