

DOI: 10.11779/CJGE20240766

考虑黏土含量影响的地下工程渗流侵蚀试验与数值研究

孙齐昊^{1,2}, 柳 献^{*2}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 地下工程涌水涌砂险情会引发周围土体的渗流侵蚀, 进而造成地表沉降与塌陷, 对城市安全造成巨大威胁。现有研究主要针对砂土地层渗流侵蚀开展, 对不同地层条件下渗流侵蚀的发展过程和原理尚缺乏系统研究。为了探明含有不同黏土比例的地层中地下工程渗流侵蚀的破坏模式与力学机理, 设计并开展渗流侵蚀模型试验, 研究不同黏土含量下土体渗流侵蚀发展模式的宏观现象差异; 进一步建立考虑黏土渗流侵蚀退化的有限差分法-离散元流固耦合数值分析模型, 对不同渗流侵蚀发展模式的细观机理进行对比, 进而探讨产生不同侵蚀破坏模式的力学机理。研究结果表明: ①土体渗流侵蚀发展模式可分为无法成拱、成拱且发展、成拱且稳定 3 类; ②3 种侵蚀发展模式的宏观现象不同, 表现在侵蚀发展过程、流速分布、地层变形状态等方面; ③3 种渗流侵蚀模式的细观机制有差异, 表现在侵蚀范围、土拱效应、土压力分布等方面; ④考虑黏土渗流侵蚀退化的有限差分法-离散元流固耦合模型能够有效模拟不同渗流侵蚀模式土体的发展过程; ⑤提出极限张拉破坏高度的计算方法, 从机理上解释 3 种侵蚀模式的差异来源。研究结果为城市地下工程发生渗流时风险评估与应对措施提供了重要参考依据。

关键词: 地下工程; 渗流侵蚀; 模型试验; 流固耦合分析; 土拱效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2366-10

作者简介: 孙齐昊(1996—), 男, 博士, 主要从事隧道及地下结构事故与灾害方面的研究工作。E-mail: 1732381-sqh@tongji.edu.cn。

Model test and numerical analysis on seepage erosion in underground structures considering influence of clay content

SUN Qihao^{1,2}, LIU Xian²

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Leakage of water and sand in underground structures can cause seepage erosion of the surrounding soils, leading to ground subsidence that poses a significant threat to urban safety. Previous research has mainly focused on seepage erosion in sandy soils, and there is still a lack of systematic research on the development process and mechanism of this phenomenon in different stratum conditions. To explore failure patterns and mechanisms of seepage erosion in underground structures within strata containing different clay contents, seepage erosion model tests are designed and conducted, and the differences in phenomena of seepage erosion development under varying clay contents are analyzed. Additionally, a Finite Difference Method-Discrete Element Method fluid-solid coupled numerical analysis model considering clay seepage erosion degradation is established. This model is used to compare microscopic mechanisms of different seepage erosion development patterns, thereby exploring mechanisms underlying the different erosion failure modes. The results show that: (1) the soil can be categorized into three types: No soil cave soil, unstable soil cave soil, and stable soil cave soil, according to the differences in the development mode of the soil when seepage erosion occurs; (2) The macroscopic phenomena of the three erosion development modes are different, which can be characterized by the erosion development process, flow velocity distribution, and ground deformation; (3) The microscopic mechanisms of the three seepage erosion modes are different, which can be characterized by the erosion area, soil arch effect, and load distribution; (4) The coupled flow-solid Finite Difference Method-Discrete Element

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52478409, 52078376) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52478409, 52078376).

收稿日期(Received): 2024-08-21 **修回日期(Revised):** 2024-12-12 **接受日期(Accepted):** 2025-01-08 **网络出版日期(Online):** 2025-01-09

***通信作者** (E-mail: xian.liu@tongji.edu.cn)

Method model, which takes into account the seepage erosion degradation of the clays, is able to simulate the development process of the soils in different seepage erosion modes efficiently; (5) The computation of the ultimate tensile height is proposed, which explains the differences of the three erosion modes in terms of the mechanism. The study results provide an important reference for risk assessment and mitigation strategies in urban underground engineering projects when leakage occurs.

Key words: underground structures; seepage erosion; model test; coupled fluid-solid simulation; soil arching effect

0 引言

当地下工程发生渗漏险情时, 往往会诱发地表沉降甚至塌陷, 严重威胁到城市建设、经济发展和人民安全。地层作为地下结构的外部边界, 地下工程发生渗漏后往往造成严重的后果。当地下结构由于渗漏诱发地层灾害的同时, 结构本身也会发生沉降、结构变形受损等病害, 严重时甚至会导致倒塌事故^[1]。柳献等^[2]通过收集大量事故案例, 指出盾构隧道倒塌事故往往是特定地层条件下的衬砌结构发生渗漏水的结果。因此, 有必要针对地下工程尤其是隧道发生渗漏水后致灾机理开展研究。

针对地下工程, 研究者们通过缩尺模型试验对地下管线^[3-5]、隧道结构^[6]发生渗漏后地层侵蚀发展的过程与机理开展了相关研究。具体针对渗流侵蚀机理问题, 相关学者也通过模型试验开展了研究, 针对水力侵蚀特性^[7]、地基潜蚀^[8-9]、流固耦合过程^[10]等问题, 通过引入粒子示踪技术等方式探讨了侵蚀的物理力学机理。

除了缩尺模型试验方法以外, 研究者们采用数值模拟的方法对地下工程出现渗漏后外部地层的侵蚀发展过程进行了探索。由于土体作为典型非连续颗粒体的特征, 离散元分析方法 (discrete element method, DEM) 是该领域较为有效的数值模拟方法。DEM 往往用于模拟渗流侵蚀过程中的土体粒子响应, 而流场则需要通过其他计算方法进行处理, 通过耦合实现渗流侵蚀过程分析。研究者们采用 DEM-CFD (computational fluid dynamics)^[11-12]、DEM-FDM (finite difference method)^[13]、DEM-FEM (finite element method)^[14] 等对隧道渗流引发的地层侵蚀问题开展了模拟, 讨论了侵蚀机理和土拱效应等因素。

从上文讨论可以看出, 针对地下工程尤其是隧道与管道渗漏引起地层侵蚀的问题已经有较多研究开展, 但是现有研究主要针对砂土地层中地下工程发生渗漏后地层侵蚀发展过程, 针对粉土、黏土等地层中地下工程渗漏问题研究较少, 尚未明确不同地层中地层侵蚀发展的规律。在诸多由于地下工程渗漏诱发灾害的事故案例中, 不同的地层条件下最终展现出的侵蚀破坏模式有明显差异, 但其原理和发展过程尚缺乏

系统研究。因此有必要针对不同土体类型中地下工程发生渗流侵蚀的破坏模式开展研究。

为了初步探明不同地层类型中地下工程渗流侵蚀的破坏模式与力学机理, 本文设计并开展了土体渗流侵蚀试验。通过配制不同黏土掺量的土体, 研究了不同渗流侵蚀发展模式的差异。进一步建立考虑黏土渗流侵蚀退化的有限差分法-离散元流固耦合数值分析模型, 对不同侵蚀发展模式的微观机理进行对比, 最后探讨产生不同侵蚀模式的力学机理。

1 模型试验方法

1.1 试验土样

为了研究不同土体类型对土体渗流侵蚀模式的影响, 有必要在试验中针对渗流侵蚀的关键影响因素进行控制。根据刘秀敏等^[15]的研究, 土体渗透系数、内摩擦角、黏聚力是影响渗流侵蚀模式的重要参数。因此, 试验中采用混合不同比例的砂土与黏土的方法来获得性质稳定且关键参数有明显差异的混合土体, 从而针对性探讨关键参数对土体渗流侵蚀发展的影响。

砂土原料采用石英砂, 其性质稳定无杂质, 因此可重复性高。试验用砂土 $d_{60}=1\text{ mm}$, $d_{10}=0.1\text{ mm}$, 最大干密度 1.81 g/cm^3 , 最小干密度 1.46 g/cm^3 , 最大孔隙比 0.82 , 最小孔隙比 0.46 , 不均匀系数 $C_u=10$, 颗粒级配曲线如图 1 所示。黏土材料选用天然黏土颗粒, 其黏聚力为 20.4 kPa , 内摩擦角为 18.5° , 渗透系数为 $1.26\times 10^{-9}\text{ m/s}$ 。

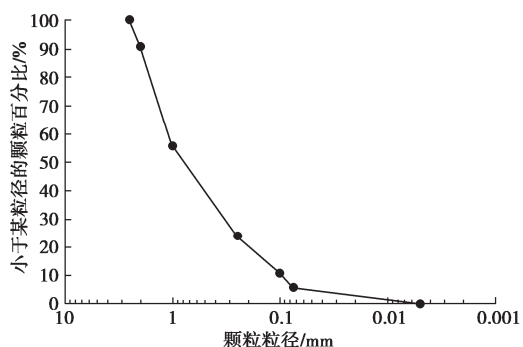


图 1 试验砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of test sand

在混合砂土与黏土时, 首先将砂土与黏土烘干,

表 1 混合土体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of mixed soil

编号	砂土与黏土比例	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·s ⁻¹)
A	1 : 0	14.7	0	40.17	2.21×10 ⁻⁵
B	1 : 0.05	15.1	1.81	35.56	1.33×10 ⁻⁶
C	1 : 0.10	15.4	2.88	35.87	8.04×10 ⁻⁷
D	1 : 0.20	15.8	4.28	34.16	6.45×10 ⁻⁷

随后按照干质量的比例控制砂土与黏土的混合比。试验中选用砂土与黏土的干质量比例分别为：1 : 0, 1 : 0.05, 1 : 0.10, 1 : 0.20。控制土样的含水率为 15%。采用直剪试验测定混合土体的黏聚力与内摩擦角，通过常水头法测定砂土的渗透系数，采用变水头法测定混合土体的渗透系数。不同混合比例的混合土体的物理力学参数见表 1。

1.2 试验模型箱

为了研究地下工程中发生渗漏后地层渗流侵蚀的发展过程，本文设计了如图 2 所示的模型试验装置，长 500 mm，宽 150 mm，高 200 mm。试验装置采用亚克力玻璃制作，可以时刻观察土体内部侵蚀发展现象。该模型可与隧道顶部涌水涌砂险情相对应，其他地下工程的渗流侵蚀发展过程具有本质上的类似性。

试验模型箱由 3 部分组成，装置中央为土槽，长 300 mm，用于盛放土样和触发侵蚀过程。土槽底部开设通长缝隙，底部缝隙宽度超过土体的临界缝宽^[6]，设置为 20 mm。土槽两侧对称布置两个水槽，为中央土槽提供水源补给。水槽与土槽之间采用透水板分隔，只允许水自由通过，防止土体漏入水槽。

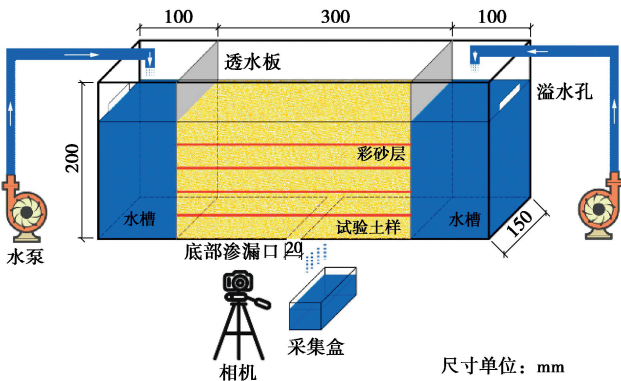


图 2 渗流侵蚀试验模型箱示意图

Fig. 2 Illustration of seepage erosion test device

1.3 试验步骤

本试验研究重点在于对比不同土体类型在发生渗流侵蚀时不同的发展模式，具体试验步骤如下：

- (1) 试验准备：试验前检查模型箱密封性，堵住不需要的溢水孔，底部渗漏孔采用遇水膨胀橡胶密封。
- (2) 土样制备：采用嵌压密技术^[16]填筑土层：分 3 层填筑土体，具体填筑时，首先根据 80% 密实度

控制要求，计算并称取每一层所需土量，再逐层填入并压实至指定高度，随后再进行下一层填筑。每层铺设少量染色砂用于观察土体侵蚀发展过程。将土样装样后，在水槽中加入水并放置 24 h，使土样充分饱和。

(3) 开展试验：试验过程中向模型箱两侧水槽持续加水。由于水槽外侧设置溢水孔，因此在持续加水的过程中，多余的补给水会通过溢水孔自然流出，保证水槽内部水位稳定不变。水槽中水位始终与土槽中土体高度保持齐平，高度为 15 cm。试验开始时，底部取出遇水膨胀橡胶，底部水头降低，土体自然发生渗流侵蚀。试验过程中对侵蚀发展全程进行拍摄记录。

2 试验结果分析

2.1 渗流侵蚀发展过程

根据渗流侵蚀发展模式不同，分别讨论土样 A、土样 B、土样 C 与 D 3 种发展模式。采用 Particle Image Velocimetry (PIV) 技术^[17]对 3 类不同土体在渗流侵蚀发展过程中的位移场进行分析对比，采用绿色箭头表明土体位移方向。

土样 A 渗流侵蚀发展过程如图 3 所示。在底部渗漏后首先在渗漏点附近出现土体流失并产生位移；随后土体侵蚀流失范围逐渐向上扩大；当侵蚀范围发展到地表，侵蚀范围内产生剪切破坏面，范围内土体均产生向下位移；随着渗漏持续，地表沉降速度加快，剪切破坏面内土体逐渐流失掏空。根据土样 A 的侵蚀特征，将该侵蚀模式定义为“无法成拱地层”。

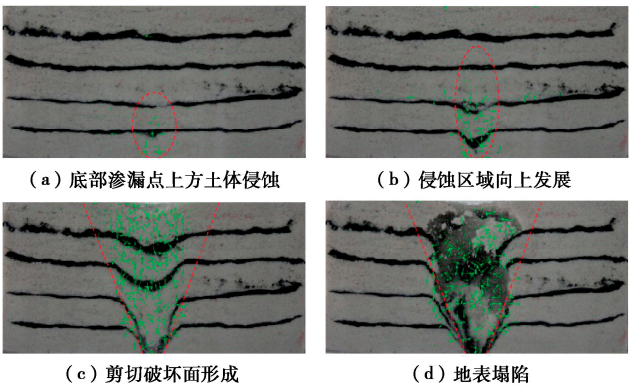


图 3 土样 A 渗流侵蚀发展过程

Fig. 3 Seepage erosion processes of soil sample A

土样 B 渗流侵蚀发展过程如图 4 所示。从图 4 中

可以看出: 土样 B 在底部出现渗漏点后首先在渗漏点上方发生侵蚀, 出现初始土洞; 随着渗流力持续作用, 初始土洞上方土体失稳流失, 随后再次稳定, 产生二级土洞, 但地表维持稳定; 当二级土洞失稳时, 地表土体失稳坠落。根据土样 B 的侵蚀特征, 将该侵蚀模式定义为“成拱且发展地层”。

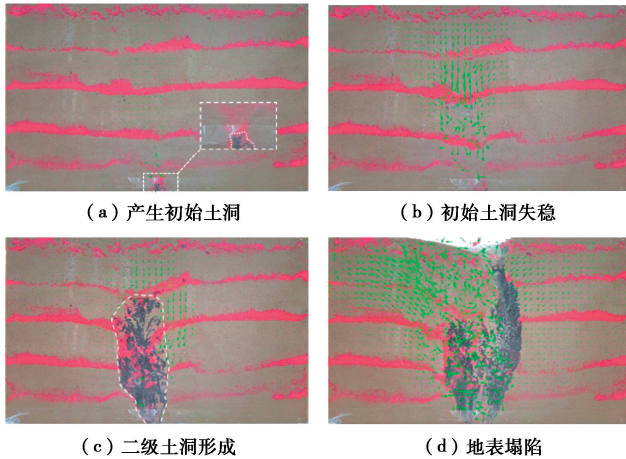


图 4 土样 B 渗流侵蚀发展过程

Fig. 4 Seepage erosion processes of soil sample B

土样 C 与 D 的渗流侵蚀模式相同, 因此以土样 C 为例讨论其发展模式。其渗流侵蚀发展过程如图 5 所示。底部出现渗漏点后发生土体侵蚀流失, 随后初始土洞出现, 但 3 h 后初始土洞始终保持稳定, 无新增位移 (图中无绿色箭头)。根据土样 C 和 D 的侵蚀特征, 将该侵蚀模式定义为“成拱且稳定地层”。

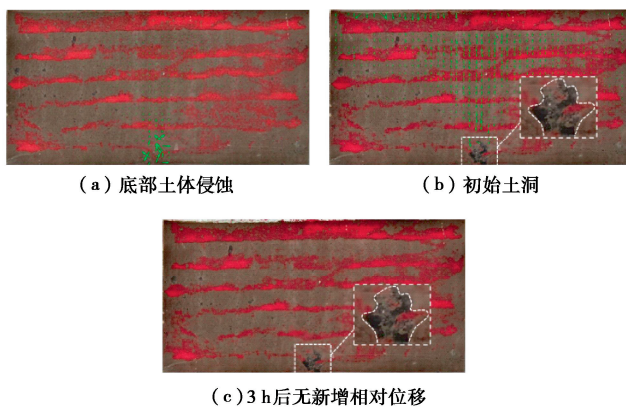


图 5 土样 C 渗流侵蚀发展过程

Fig. 5 Seepage erosion processes of soil sample C

2.2 渗流侵蚀速度场变化分析

基于 PIV 技术处理, 将 3 种地层渗流侵蚀全过程中流速的变化进行对比, 如图 6 所示。为了便于对比, 横坐标为每种试验的相对时间, 总时间均设为 1, 纵坐标为某时刻土体的最大流速。从图 6 中可以看出 3 种地层表现出明显不同的速度变化:

(1) 土样 A 在渗流侵蚀的全过程中速度基本保

持稳定, 在 0.04~0.06 mm/s 范围内小幅度波动。

(2) 土样 B 在渗流侵蚀发展过程中流速有明显的阶段变化。侵蚀发生后速度逐渐增大, 形成土拱后速度维持稳定, 当土拱失稳时再次加快。

(3) 土样 C 和 D 在形成初始土洞时速度接近 0.02 mm/s, 但随着土拱的自发稳定, 土体速度越来越低, 最后趋于 0。

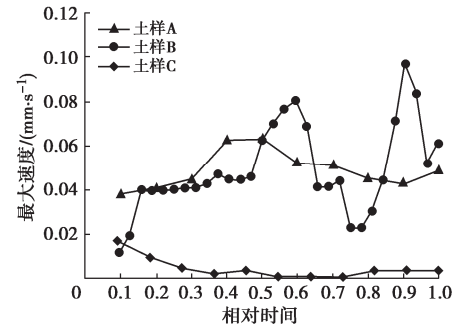


图 6 不同土体渗流侵蚀过程速度变化对比

Fig. 6 Comparison of velocity in processes soil seepage

3 流固耦合数值分析模型

3.1 流固耦合计算原理

对于渗流侵蚀问题, 采用“粗糙网格单元网格法”进行计算。通过土体孔隙率计算渗透系数, 再将其赋给连续性介质计算程序得到流场分布, 进而计算得到颗粒所受流体作用力。该耦合方式可以针对土体侵蚀、隧道突水和管涌的机理进行模拟^[18]。

土体颗粒在流场中的受力满足方程:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \frac{\vec{f}_{\text{mech}} + \vec{f}_{\text{fluid}}}{m} + \vec{g} \quad (1)$$

式中: $\partial \vec{u}$ 为颗粒速度; m 为颗粒质量; \vec{f}_{fluid} 为流体作用在颗粒上的总作用力; \vec{f}_{mech} 为颗粒所受到的外力和 (外部施加的力和颗粒之间的接触力); \vec{g} 为重力产生加速度。

流体作用在颗粒上的力 \vec{f}_{fluid} 主要为流体产生的拖曳力。拖曳力可以根据下式求解:

$$\vec{f}_{\text{drag}} = V_i \gamma_w J \quad (2)$$

式中: V_i 为颗粒体积; γ_w 为水重度; J 为水力梯度。

为了实现流体-土体之间的双向耦合, 土体对流场的影响主要通过渗透系数的改变而体现。渗透系数通过孔隙率转换得到

$$k = \frac{1}{C_s S_s^2 T^2} \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} \quad (3)$$

式中: C_s 为颗粒的形状因子; S_s 为单位体积颗粒的表面积; T 为曲折因素; μ 为动力黏度; e 为孔隙比。

为了实现双向耦合计算, 采用 DEM 与 FDM (finite

difference method) 联合计算的方法, 计算流程如图 7 所示。

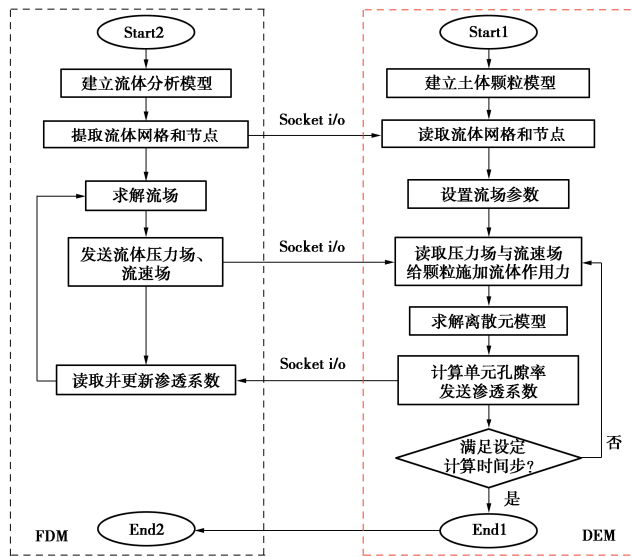


图 7 流固耦合计算流程

Fig. 7 Fluid-solid coupled calculation process

3.2 黏土侵蚀退化实现原理

为了解决黏土颗粒过小难以模拟的问题, 本文在离散元流固耦合模型的基础上引入黏土侵蚀退化模型来反映渗流侵蚀过程中的黏土侵蚀。

黏土体的侵蚀退化过程如图 8 所示。在模拟中, 将黏土受渗流力作用而逐渐流失的过程采用离散元颗粒之间的接触强度衰减来实现^[19]。

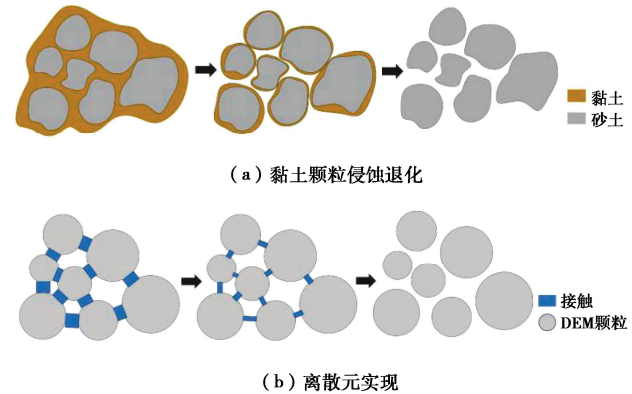


图 8 黏土侵蚀退化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of clay erosion degradation

黏土在渗流侵蚀的过程中, 侵蚀质量根据式 (4) 计算。当渗流剪应力超过临界剪应力时发生黏土质量损失, 否则黏土质量不发生损失。

$$m = \begin{cases} k_{er} (|\tau| - \tau_c)^b & (|\tau| > \tau_c) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 为每单位面积和单位时间内损失的土体质量 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); k_{er} 为表面侵蚀速度; τ 为表面切应力; τ_c 为临界剪切应力; 指数 b 一般默认是 1; 具体取值

上, 临界剪切力 $\tau_c = 1.0 \text{ Pa}$, $k_{er} = 10^{-5} \text{ s/m}^{[20]}$ 。

在试验中, 黏土的加入增加了原本砂土颗粒之间的黏聚力。本模型中采用线性接触黏结模型模拟加入黏土的混合土体。因此假定接触黏结模型中的纵向和切向黏结强度完全来自于黏土的贡献。当黏土彻底流失时, 黏结强度完全降低为 0, 退化成为无黏性土。

基于该思想, 黏土黏结强度的对应的衰减比例等于附着在颗粒表面的黏土侵蚀流失的比例。以法向黏结强度 σ 为例, 则下式可以得到

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta m_{j_clay}}{m_{j_clay}} \quad (5)$$

式中: Δ 为物理量的变化量; m_{j_clay} 为颗粒 j 分到的黏土质量。

假设黏土以附着层的形式按照砂土颗粒的表面积均匀分布在所有砂土颗粒表面, 则颗粒的黏土含量与颗粒本身的表面积比例相等。则在总数为 N 的砂土颗粒中, 黏土总质量 m_{clay} 时, 颗粒 j 分到的黏土质量为

$$m_{j_clay} = \pi R_j^2 \frac{m_{clay}}{\sum_{i=1}^N \pi R_i^2} \quad (6)$$

式中: m_{j_clay} 为颗粒 j 分到的黏土质量; R 为颗粒半径, 下标 i 和 j 均表示颗粒的编号; N 为颗粒总数; M_{clay} 为黏土总质量。

每单位面积和单位时间内损失的黏土质量可以根据 $k_{er} (|\tau| - \tau_c)^b$ 计算得到, 乘上 Δt 以及颗粒表面积 πR_j^2 则获得在该时间段内黏土损失的总质量, 即

$$\Delta m_{j_clay} = \Delta t k_{er} (|\tau| - \tau_c)^b 4\pi R_j^2 \quad (7)$$

将侵蚀黏土质量采用式 (7) 代入式 (5) 替换, 则可以得到接触强度的劣化公式, 以法向黏结强度 σ 为例, 其经过 Δt 时间后衰减强度为

$$\Delta \sigma = \sigma \frac{\Delta m_{j_clay}}{m_{j_clay}} = \sigma \frac{\Delta t k_{er} (|\tau| - \tau_c)^b 4\pi R_j^2}{m_{j_clay}} \quad (8)$$

3.3 数值模型建立

土体颗粒与颗粒之间的接触设置为线性接触黏结模型, 颗粒与墙体之间设置为线性接触模型。颗粒与颗粒之间的黏结达到黏结强度后断裂, 退化成为线性接触模型。通过直剪试验进行参数校正, 对应于 3 种不同土体的模型细观参数如表 2 所示^[13]。

考虑到本模型试验中, 几何特性和加载条件没有显著的纵向变化, 因此, 可以将问题按照平面应变假设简化为二维平面内的分析, 综合考虑计算效率采用二维模型分析。采用与模型试验相同的尺寸建立流场分析模型, 流场网格均匀划分, 单元边长为 10 mm 。按照与模型试验相同的尺寸建立土体模型。模型建立后首先在重力作用下进行自平衡, 随后在模型底部墙

体对应位置与试验相同的位置和大小打开渗漏点, 使其在自重和渗流力的共同作用下发生渗流侵蚀, 土体模型如图 9 所示。

表 2 数值模型细观参数

Table 2 Fine-scale parameters of numerical model

模型	土体类型	NSC	USC	SSC
接触	摩擦系数	0.9	0.8	0.8
	法向刚度/(N·m ⁻¹)	5.0×10 ⁷	10.0×10 ⁷	10.0×10 ⁷
	切向刚度/(N·m ⁻¹)	2.5×10 ⁷	5.0×10 ⁷	5.0×10 ⁷
	法向黏结强度/N	0	36	40
	切向黏结强度/N	0	36	40
颗粒	颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2700		
	阻尼	0.7		
	孔隙率	0.4		
流体	密度/(kg·m ⁻³)	1000		
	体积模量/Pa	2.0×10 ⁹		

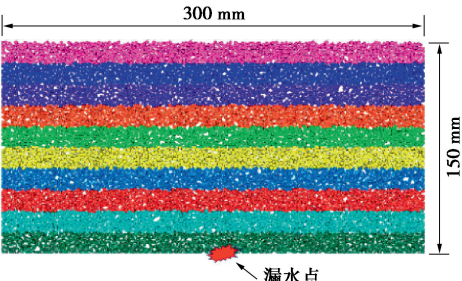


图 9 离散元土体模型
Fig. 9 DEM soil model

4 数值模拟结果分析

4.1 数值模型验证

基于上述数值模拟理论, 建立数值模型并与试验结果进行对比, 验证数值模型的正确性。

土样 A (无法成拱地层) 模拟结果如图 10 所示。对比数值模拟结果和试验结果 (图 3) 可以看出, 土体模型表现出与试验结果相符合的侵蚀流失现象, 如图 10 所示。侵蚀过程中无法出现土拱现象。

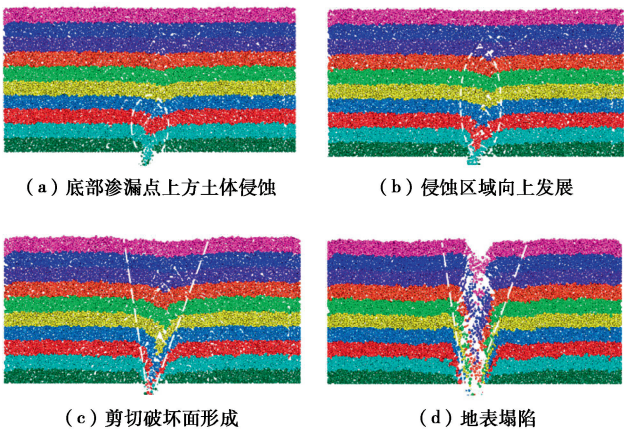


图 10 土样 A 渗流侵蚀过程模拟
Fig. 10 Simulations of seepage erosion processes of soil sample A

土样 B (成拱且发展地层) 模拟结果如图 11 所示。对比数值模拟结果和试验结果 (图 4) 可以看出, 数值模拟基本重现了成拱且发展地层的主要发展特征。土体在侵蚀过程中成拱, 且随着拱失稳而继续发展。

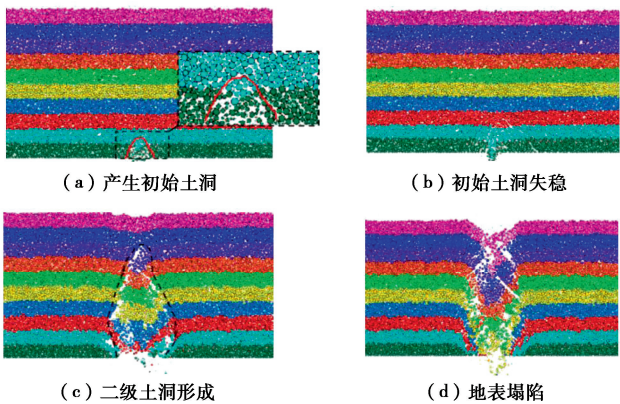


图 11 土样 B 渗流侵蚀过程模拟
Fig. 11 Simulations of seepage erosion processes of soil sample B

土样 C (成拱且稳定地层) 模拟结果如图 12 所示。对比数值模拟结果和试验结果 (图 5) 可以看出, 数值模拟基本重现了成拱且稳定地层的主要发展特征。侵蚀产生稳定土洞。

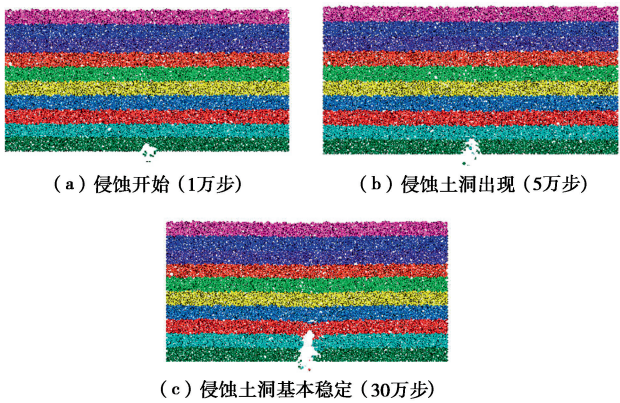


图 12 土样 C 渗流侵蚀过程模拟
Fig. 12 Simulations of seepage erosion processes of soil sample C

4.2 渗流侵蚀特征分析

土样 A 在渗流侵蚀发展的过程中, 孔隙率随之发生对应的变化, 如图 13 所示。渗流侵蚀开始后, 底部渗漏点处孔隙率迅速上升。随着渗流侵蚀的持续, 伴随着流失区域不断向地表发展, 渗漏点向上逐渐出现孔隙率明显增大的区域。

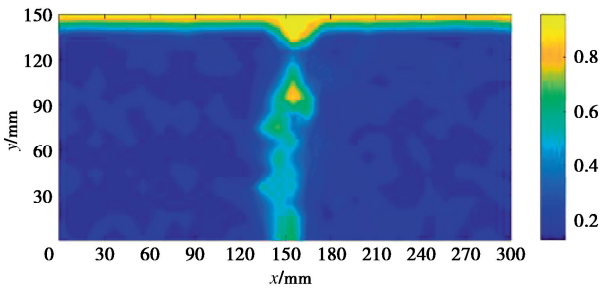


图 13 土样 A 孔隙率分布变化
Fig. 13 Change in porosity distribution of soil sample A

土样 B 发生渗流侵蚀过程中孔隙率变化如图 14 所示。从图中可以看出,土拱形成时,土拱内部孔隙率迅速增大,这也导致渗流速度随之加大,加快侵蚀过程。但渗流侵蚀全过程中,孔隙率增加被限制在土拱内部,外部地层受影响较小,说明土拱效应阻碍了渗流侵蚀的发展。

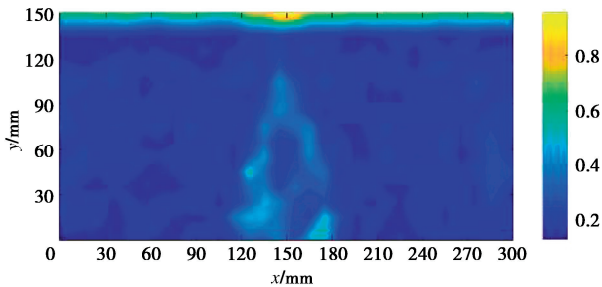


图 14 土样 B 孔隙率分布变化

Fig. 14 Change in porosity distribution of soil sample B

土样 C 渗流侵蚀过程中孔隙率分布变化如图 15 所示。从图中可以看出,地层底部发生渗流侵蚀时,渗流点附近孔隙率迅速上升,但周围地层孔隙率几乎没有变化,说明土拱效应阻碍了渗流侵蚀的发展。

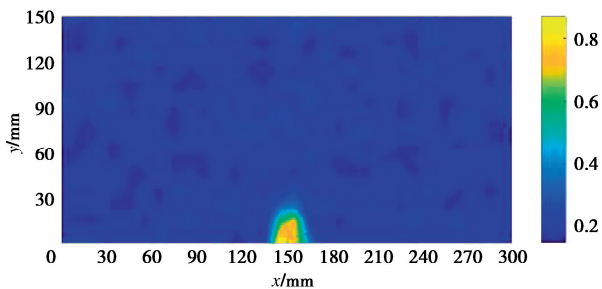


图 15 土样 C 孔隙率分布变化

Fig. 15 Change in porosity distribution of soil sample C

4.3 位移特征分析

基于数值模拟结果,进一步对不同破坏模式下地层渗流侵蚀发展过程中的位移特征展开对比。对不同深度处的土体沉降规律进行监测,分析渗流侵蚀过程中侵蚀现象充分发展、具备明显特征的关键时刻沉降。

土样 A 土体沉降分布如图 16 所示。从图 16 中可以看出,由于侵蚀发展的过程中没有明显的土拱效应作用,因此一旦底部渗流侵蚀开始,沉降迅速影响到地表,表现为连续性沉降,一直发展到地表塌陷。

侵蚀发展过程中,土样 B 地层沉降如图 17 所示。从图 17 中可以看出,渗漏点附近出现沉降时,上方土体几乎没有沉降,说明成拱且稳定地层在出现侵蚀土洞后,上方的地层由于土拱效应的作用,仍然保持稳定。

土样 C 的地层沉降如图 18 所示。从图 18 中可以看出,不同深度处的地层几乎没有沉降现象,说明土

拱效应稳定了上方地层,导致几乎没有位移产生。

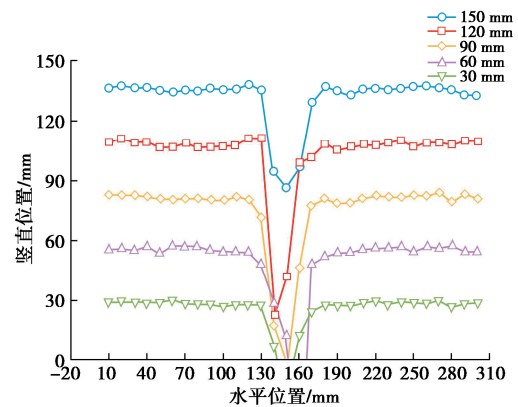


图 16 土样 A 地层变形规律

Fig. 16 Deformation pattern of soil sample A

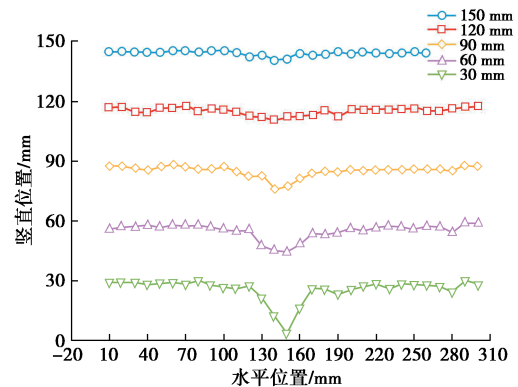


图 17 土样 B 地层变形规律

Fig. 17 Deformation pattern of soil sample B

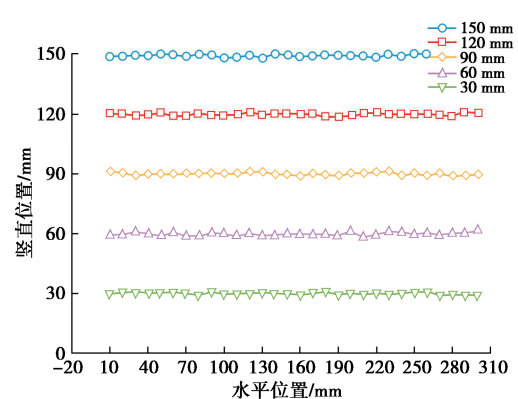


图 18 土样 C 地层变形规律

Fig. 18 Deformation pattern of soil sample C

4.4 土拱效应分析

3 种不同侵蚀破坏模式的地层表现出的宏观差异是土拱的稳定性,因此基于数值模拟对 3 种土体侵蚀过程中土拱效应进行分析。通过接触力链的分布反映土拱效应,力链的粗细表示接触力的大小。

土样 A 渗流侵蚀过程中接触力链分布如图 19(a) 所示。从图 19 中可以看出,渗流侵蚀发生以后,土拱效应始终未能稳定出现。土样 B 颗粒之间的接触力链

分布如图 19 (b) 所示。从图 19 中可以看出, 渗流后颗粒间形成了不稳定应力拱。土样 C 颗粒之间的接触力链分布如图 19 (c) 所示, 可以看出明显的土拱效应。

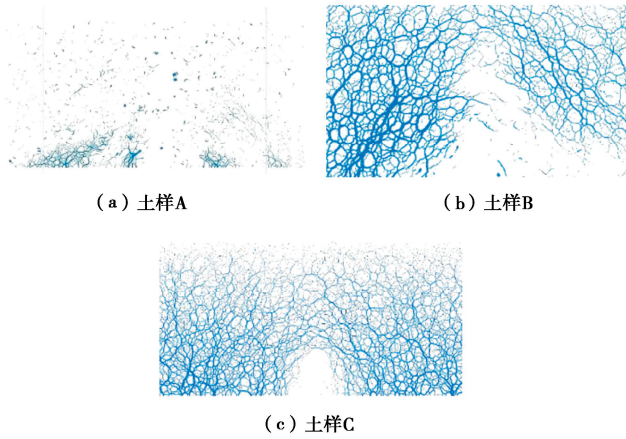


图 19 接触力链

Fig. 19 Contact force chain

5 渗流侵蚀模式差异性的机理分析

5.1 第一阶段: 渗流侵蚀与张拉破坏

当土体底部突然出现渗漏点时, 土体内部其他位置与渗漏点处产生压力差, 因此渗流发生。根据其实际效果可以列出该点由于渗漏新增应力的表达式:

$$\sigma_w = \rho_w g h' \quad (9)$$

$$\tau_w = \gamma_w J = -\rho_w g \frac{dH}{ds} \quad (10)$$

式中: ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度; γ_w 为水的重度; h' 为讨论位置与渗漏点的水头高程差, 在本问题中为该点埋深; σ_w 为压力差产生的作用于土体颗粒的正应力; τ_w 为渗流力; J 为水力梯度。

为了简化问题, 以成拱且稳定土体为例讨论渗流侵蚀初始阶段的力学机理。由于成拱且稳定土体的渗透系数极小, 导致渗流流速极小, 渗流力 τ_w 可以忽略。因此, 在成拱且稳定土体中, 当底部渗漏产生水头差引起的正应力 σ_w 超过土体抗拉强度时, 土体在该位置处发生张拉破坏。土的抗拉强度大约为黏聚力的 $1/3$ ^[21], 当张拉破坏发生时式 (9) 可变为

$$\frac{1}{3}c \leq \rho_w g h' \quad (11)$$

引入 h 表述发生张拉破坏的位置距离底部渗漏点的高度, 因此有 $h' + h = H$, H 为土体总埋深。此时式 (11) 可以表述为

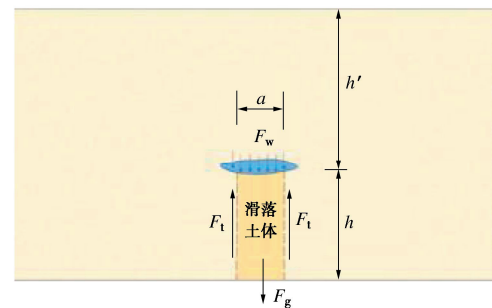
$$\frac{1}{3}c \leq \rho_w g (H - h) \quad (12)$$

根据式 (12) 能够计算得到发生张拉破坏的最大

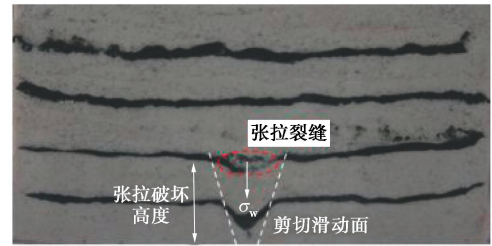
高度 h_{\max} , 称为极限张拉破坏高度, 在 h_{\max} 以下的土体均能够产生由于拉应力导致的水平张拉裂缝:

$$h_{\max} = H - \frac{c}{3\rho_w g} \quad (13)$$

在土体由于水头差产生的正应力而发生拉裂缝以后, 拉裂缝到底部渗漏点之间的部分土体受力状态发生改变。在拉裂缝上方土体自发形成土拱, 因此暂时保持稳定。下方土体受到裂缝处水压力 F_w 和本身自重 F_g 作用, 依靠两侧与相邻土体的抗剪力 F_t 抵抗。如果裂缝处水压力与自重超过抗剪强度, 则该部分土体将会剪切滑落。假定破坏面沿底部开洞宽度两侧竖直向上, 如图 20 所示。



(a) 失稳土体受力示意图



(b) 实际土体受力分布

图 20 失稳土体受力示意图

Fig. 20 Illustration of destabilized soil

则该关系可以表述为

$$2F_t \leq F_w + F_g \quad (14)$$

对式中各力进行计算, 得到下式:

$$2\tau_f h \leq \rho_w g h' a + \rho_s g h a \quad (15)$$

$$\tau_f = c + k\rho_s g \left(H - \frac{1}{2}h \right) \tan\varphi \quad (16)$$

式中: a 为底部渗漏点宽度; τ_f 为两侧土体抗剪强度; k 为土体侧压力系数; ρ_s 为土体密度。根据式 (15), (16) 可以进一步计算出张拉破坏发生后发生竖直剪切破坏的土体高度。但是需要指出的是, 在最底部由于自重和压力差产生剪切剥落后, 由于张拉裂缝仍然能在上方产生, 因此剪切滑落的过程将会持续, 直到达到极限张拉高度时停止。

以本试验中土样 C 为例进行验算。土样 C 的黏聚力 $c = 2.88$ kPa (表 1), 代入可以计算得出土样 C 的

极限张拉破坏高度 $h_{\max} = 5.4 \text{ cm}$ 。在试验中, 土样 C 在第一阶段实际产生的土洞高度最后稳定在 4.04 cm , 略小于理论计算的 5.4 cm 。原因是正面玻璃板的边界摩擦提供一部分抗力, 限制底部土体剥落, 造成试验中土洞高度略小于理论计算高度。

以上推导虽然以土样 C 为例开展, 但是在最初的底部侵蚀发展过程上, 3 种不同土体均具有相似的发展现象, 说明该理论推导对 3 种不同土体均适用。例如对于土样 A, 由于土样 A (砂土) 的黏聚力 c 接近 0, 因此张拉破坏的条件几乎对土样 A 内任意位置均满足, 其现象如图 20 (b) 所示。

5.2 第二阶段: 土拱作用

对于土样 B 和土样 C, 由于黏聚力的存在, 在极限张拉高度下方土体均侵蚀流失后, 土体将会自发形成土拱, 导致渗漏点上方产生土洞。该特征在数值模拟过程和试验现象中均有验证。此时底部侵蚀区域上方土体受力状态与初始状态已经不同, 侵蚀区域上方土体受到了底部土拱的支持力而暂时实现稳定。

在渗流侵蚀的过程中, 渗流力所产生的剪切应力将会对土拱中的土体颗粒产生剪切作用。当渗流的剪切力超过土体颗粒本身的临界剪应力时, 渗流力逐步将组成土拱的土体内部细颗粒冲刷带走。土拱随着局部颗粒流失, 最终发生突然失稳。因此在土样 B 中出现了不稳定的土拱, 并随着渗流的持续而失稳。

对于成拱且稳定地层 (即土样 C), 由于其黏聚力大, 同时渗透系数小, 相同的水力梯度下产生的渗流流速较小, 无法达到使土拱内部颗粒迁移的临界流速, 因此在试验中产生土拱后始终稳定。

6 结 论

本文设计并开展了土体渗流侵蚀试验, 提出了不同黏土含量时土体发生渗流侵蚀的 3 种不同发展模式, 并通过数值分析, 从细观层面上深化讨论了渗流侵蚀不同发展模式的特征。最后探讨了产生不同侵蚀破坏模式的力学机理。主要得到以下 5 点结论。

(1) 根据地层发生渗流侵蚀时的发展模式差异, 可以将不同黏土含量的土体分为 3 类侵蚀模式: 无法成拱、成拱且发展、成拱且稳定。

(2) 3 种侵蚀模式宏观现象不同: 无法成拱土体渗流侵蚀过程连续, 过程中无明显的土洞现象; 成拱且发展土体伴随着土体侵蚀流失出现不稳定土洞; 成拱且稳定土体由于稳定土拱作用而自发稳定。

(3) 3 种渗流侵蚀模式的微观机制有差异, 集中体现在土体颗粒接触力链稳定性差异上, 说明土拱效应的差异造成宏观现象的差异。

(4) 考虑黏土渗流侵蚀退化的离散元流固耦合模

型能够有效模拟由于黏土含量不同引起不同渗流侵蚀模式土体的发展过程。

(5) 提出极限张拉破坏高度的计算方法, 并从机理上解释 3 种侵蚀模式的差异来源。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 柳献和孙齐昊设计研究内容, 柳献提供研究指导, 孙齐昊完成试验, 柳献和孙齐昊参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。LIU Xian and SUN Qihao designed the research. LIU Xian provided research supervision. SUN Qihao conducted the experiments. Both LIU Xian and SUN Qihao participated in writing and revising the manuscript. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] TAN Y, LU Y, WANG D L. Catastrophic failure of Shanghai metro line 4 in July, 2003: occurrence, emergency response, and disaster relief[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, **35**(1): 04020125.
- [2] 柳 献, 孙齐昊. 盾构隧道连续性倒塌特征分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021, **41**(6): 913-922. (LIU Xian, SUN Qihao. Characteristics analysis on progressive collapse of shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, **41**(6): 913-922. (in Chinese))
- [3] GUO S, SHAO Y, ZHANG T Q, et al. Physical modeling on sand erosion around defective sewer pipes under the influence of groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **139**(12): 1247-1257.
- [4] 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.
- [5] 刘成禹, 陈博文, 林 炜, 等. 地下管道破损诱发沉降的预测模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(3): 416-424. (LIU Chengyu, CHEN Bowen, LIN Wei, et al. Prediction model for settlement caused by damage of underground pipelines and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(3): 416-424. (in Chinese))
- [6] 郑 刚, 姚 杰, 戴 轩, 等. 不同管片张开量下隧道外水土流失规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(6): 969-977. (ZHENG Gang, YAO Jie, DAI Xuan, et al. Experimental study on sand inflow under different opening widths of shield tunnel segments[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2018, **40**(6): 969-977. (in Chinese))
- [7] 刘汉龙, 钟文涵, 仇文岗, 等. 基于透明土石混合体的水力侵蚀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(9): 1868-1877. (LIU Hanlong, ZHONG Wenhan, ZHANG Wengang, et al. Hydraulic erosion characteristics based on transparent soil-rock mixture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(9): 1868-1877. (in Chinese))
- [8] 金 伟, 邱子源, 张 丹, 等. 泸定水电站坝基覆盖层深部潜蚀对土骨架变形影响评价试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(4): 705-715. (JIN Wei, QIU Ziyuan, ZHANG Dan, et al. Experimental study and evaluation on influence of deep alluvium foundation suffusion on deformation of soil skeleton in foundation of Luding Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(4): 705-715. (in Chinese))
- [9] 罗玉龙, 李 澳, 张海彬, 等. 不同层间系数条件下双层地基潜蚀可视化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, **43**(1): 226-235. (LUO Yulong, LI Ao, ZHANG Haibin, et al. Visual experimental study on suffusion in double-layered soil under different retention ratios[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, **43**(1): 226-235. (in Chinese))
- [10] 梁 越, 代 磊, 魏 琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(6): 1133-1140. (LIANG Yue, DAI Lei, WEI Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(6): 1133-1140. (in Chinese))
- [11] ZHANG P Y, MU L L, HUANG M S. A coupled CFD-DEM investigation into hydro-mechanical behaviour of gap-graded soil experiencing seepage erosion considering cyclic hydraulic loading[J]. Journal of Hydrology, 2023, **624**: 129908.
- [12] QIAN J G, LI W Y, YIN Z Y, et al. Influences of buried depth and grain size distribution on seepage erosion in granular soils around tunnel by coupled CFD-DEM approach[J]. Transportation Geotechnics, 2021, **29**: 100574.
- [13] LONG Y Y, TAN Y. Soil arching due to leaking of tunnel buried in water-rich sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **95**: 103158.
- [14] ZHANG Z G, MAO M D, PAN Y T, et al. Experimental study for joint leakage process of tunnel lining and particle flow numerical simulation[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, **138**: 106348.
- [15] 刘秀敏, 陈从新, 于群群, 等. 黏土颗粒含量对土洞稳定性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(9): 1914-1922. (LIU Xiumin, CHEN Congxin, YU Qunqun, et al. Experimental study on the influence of clay particle contents on the stability of soil caves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(9): 1914-1922. (in Chinese))
- [16] LADD R S. Preparing test specimens using undercompaction[J]. Geotechnical Testing Journal, 1978, **1**(1): 16-23.
- [17] THIELICKE W, SONNTAG R. Particle image velocimetry for MATLAB: accuracy and enhanced algorithms in PIVlab[J]. Journal of Open Research Software, 2021, **9**(1): 1-12.
- [18] 石 崇, 张 强, 王盛年. 颗粒流 (PFC5.0) 数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical Simulation Technology and Applications of Particle Flow (PFC5.0) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))
- [19] GU D M, HUANG D, LIU H L, et al. A DEM-based approach for modeling the evolution process of seepage-induced erosion in clayey sand[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(6): 1629-1641.
- [20] UTLEY B C, WYNN T M. Cohesive soil erosion: theory and practice[C]// World Environmental and Water Resources Congress 2008, Honolulu, Hawaii, USA. American Society of Civil Engineers, 2008: 1-10.
- [21] 谭鉴益. 坛状圆柱状岩溶塌陷预测模型与分析[J]. 水文地质工程地质, 2001, **28**(4): 19-22. (TAN Jianyi. Prediction model and analysis of altar-shaped cylindrical karst collapse[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, **28**(4): 19-22. (in Chinese))