

DOI: 10.11779/CJGE20220468

# 不连续级配无黏性土渗蚀演变特征研究

张亮亮<sup>1,2</sup>, 邓刚<sup>1,3</sup>, 陈锐<sup>\*1,2</sup>, 张茵琪<sup>3</sup>, 罗之源<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518055;  
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 渗蚀是指土体内部细颗粒在渗流作用下克服粒间作用力逐步脱离, 在粗颗粒骨架孔隙中发生迁移, 并可能引起土骨架应力重分布和变形的侵蚀过程。利用自制局部孔压可测的三轴渗蚀装置, 研究了细颗粒含量和相对密度对不连续级配无黏性土渗蚀行为的影响, 并根据渗流沿程局部水力梯度的时空演变揭示了土体渗蚀发展的演变特征。结果表明: 不连续级配无黏性土启动和破坏水力梯度随细颗粒含量/相对密度的增大而增大; 相对密度越大侵蚀程度越小, 且等向应力下相对密度增大到一定值后, 土体会由渗流不稳定状态转变为稳定状态; 土体渗蚀启动的内部表现是局部水力梯度的突变及渗流沿程上的不均匀分布。土体渗蚀导致细颗粒流失, 土体孔隙比增大, 在等向应力条件下, 会引发体积收缩现象。

**关键词:** 不连续级配无黏性土; 细颗粒含量; 相对密度; 渗蚀; 局部演变特征

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1412-09

作者简介: 张亮亮(1992—), 男, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事岩土体渗透破坏方面的研究工作。E-mail: zlliang1992@163.com。

## Experimental investigation on evolution process of suffusion in gap-graded cohesionless soil

ZHANG Liangliang<sup>1,2</sup>, DENG Gang<sup>1,3</sup>, CHEN Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yinqi<sup>3</sup>, LUO Zhiyuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518055, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** The suffusion involves selective erosion and gradual migration of fine particles through the voids of soil skeleton formed by coarse particles under seepage flow. As a result, redistribution of soil skeleton stress and deformation of soil may be induced. In this study, a series of suffusion tests are carried out using the triaxial erosion apparatus with measurable local pore pressure. The effects of the initial fine particle content and initial relative density on the suffusion of a gap-graded cohesionless soil are investigated. According to the spatial-temporal evolution of local hydraulic gradients along seepage path, the evolution process of the suffusion is revealed. Test results show that both the initiation and the failure hydraulic gradients of the gap-graded cohesionless soil increase with the increase of the fine particle content and relative density. The cumulative loss of fine particles decreases significantly with the increase of the relative density. When the relative density increases to a certain value under isotropic stress condition, the gap-graded cohesionless soil will change from an unstable state of seepage to a stable one. Additionally, the internal manifestation of suffusion initiation of soil is the mutation and uneven distribution of local hydraulic gradient along seepage path. The suffusion will cause the loss of fine particles, as well as the increase of the void ratio. Under the isotropic stress condition, the volume shrinkage is induced.

**Key words:** gap-graded cohesionless soil; fine particle content; relative density; suffusion; local evolution characteristic

## 0 引言

土石坝破坏案例约有 50%源自土体渗透变形(即内侵蚀, internal erosion)<sup>[1]</sup>。渗蚀(suffusion)是其中一种模式<sup>[2]</sup>, 指土体内部细颗粒在渗流作用下克服

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278339); 深圳市科技计划项目(KQTD20210811090112003); 深圳市自然科学基金基础研究面上项目(JCYJ20190806144603586); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(GE0145B032021)

收稿日期: 2022-04-19

\*通信作者(E-mail: cechenrui@hit.edu.cn)

粒间作用力逐步脱离, 在粗颗粒骨架孔隙中迁移, 并可能引起土骨架应力重分布和变形的侵蚀过程。渗蚀高度发展可引发土体渗透破坏<sup>[2-3]</sup>。

多年来, 众多学者针对土体渗蚀及其影响因素进行了广泛的研究, 探讨了几何条件(颗粒级配、细颗粒含量等)<sup>[4-5]</sup>、水力条件(水力梯度、渗流方向等)<sup>[6-7]</sup>和力学条件(应力状态、密实程度等)<sup>[8-9]</sup>等对土体渗蚀的影响, 如刘杰等<sup>[10]</sup>、陈生水等<sup>[11]</sup>和陈群等<sup>[12]</sup>分别对瀑布沟(187 m)、大石峡(247 m)和双江口(314 m)等土石坝坝料开展了试验, 发现坝料细颗粒含量和干密度对土体渗透性和抗渗能力影响显著。Liang 等<sup>[13]</sup>和 Liu 等<sup>[14]</sup>对砂砾石进行了不同压实度下的渗蚀试验, 表明增大压实度不仅能提高土料渗蚀的启动水力梯度, 还能减小土料侵蚀程度。袁涛等<sup>[15]</sup>开展的不连续级配粗粒土渗透试验发现, 渗蚀会引起土体渗透系数变化, 且启动水力梯度随细颗粒含量的增加而增大。Ke 等<sup>[16]</sup>和 Wang 等<sup>[17]</sup>分别开展的不连续级配无黏性土和砾石土渗蚀研究也有类似发现。此外, Moffat 等<sup>[18]</sup>开展了无黏性土渗蚀试验, 指出细颗粒迁移会引发土体内部颗粒重排列, 进而影响渗蚀的发展进程。谷敬云等<sup>[19]</sup>和梁越等<sup>[20]</sup>利用透明土技术从细观层面探讨了渗蚀过程中细颗粒迁移对渗透稳定性的影响。同时考察土体渗蚀空间和时间发展, 渗蚀全过程渗出水和细颗粒质量变化、土体体积变化过程的研究较少。

土体渗蚀常有局部性<sup>[21-22]</sup>, 是一个渐进发展变化过程。细颗粒迁移机制是影响渗蚀的核心问题<sup>[23-24]</sup>, 考虑细颗粒启动和沉积、堵塞, 根据局部水力特性空间和时间发展研究细颗粒的迁移规律, 同时分析水力过程与体积变化、孔隙比变化的交互影响, 能够更好地揭示土体渗蚀发展规律及其内在机理。本文利用自制的三轴应力作用下渗蚀装置, 连续量测渗流过程中的孔压沿程分布、渗出水和细颗粒质量、试样各向变形, 开展了系列不连续级配无黏性土渗蚀试验, 揭示了细颗粒含量和相对密度对土体渗蚀行为的影响, 量化了局部水力梯度、土体体积和渗出土水的演变特征, 以进一步深入认识土体渗蚀行为。

## 1 试验概述

### 1.1 试验装置

三轴应力作用下渗蚀装置由6个系统组成(图1), 包括: ①渗蚀及轴压施加系统, 提供了土样渗蚀腔室并可对土样施加轴向压力; ②围压施加系统, 通过压力/体积控制器为土样提供等向应力; ③压力水供给系统, 通过气水压力转换, 在土样顶面提供稳定的高水头; ④土-水分离系统, 接收土样渗出的土水, 通过细滤网进行土-水分离, 并量测流失的细颗粒质量; ⑤出流水收集系统, 收集自土-水分离系统分离产生的出流水, 并进行质量测量; ⑥全局与局部孔压及试样变形

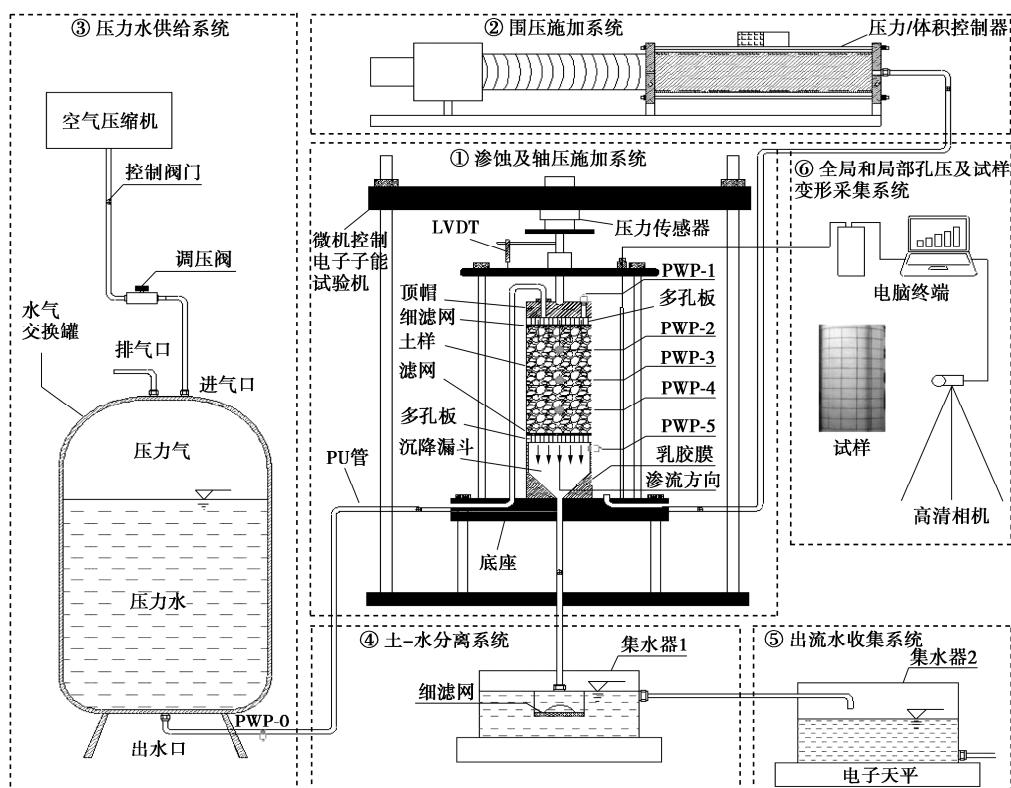


图1 三轴渗蚀试验装置

Fig. 1 Triaxial test apparatus for suffusion

采集系统，采用高清相机持续拍摄土样照片，计算变形；通过开孔后的乳胶膜<sup>[25]</sup>在土样不同高度等距离布设孔压传感器（PWP，量程为 100 kPa，精度为 0.1%FS），结合土样两端孔压传感器（同量程同精度），测量土样全局水力梯度和特定传感器间的局部水力梯度。

研发的装置具有如下特点：①能独立控制三轴应力状态和水力梯度，较好模拟土体所处的应力和渗流状态组合；②可连续量测土样全局和局部水力梯度的全时演变过程；③可连续量测渗出的细粒和渗水质量；④可连续非接触量测土样变形。装置可以从渗流状态、颗粒迁移、土样变形等角度全面展现三轴应力条件下土体渗蚀发展的多种信息。

## 1.2 试验材料、方法及方案

### （1）试验材料

参考 Ke 等<sup>[16]</sup>在渗蚀试验中使用的土料，本文试验采用的土料由粗粒组 C 和细粒组 F 两组硅质砂土混合组成，其中粗粒组粒径为 2.48~3.35 mm，细粒组粒径为 0.106~0.212 mm，混合而成的土料为不连续级配无黏性土。研究中将细粒组质量占土样总质量的百分比定义为细颗粒含量（用 FC 标识），试验用土料包括 3 种细粒组含量，级配曲线如图 2 所示，基本物性参数如表 1 所示。以 FC30（细粒组含量为 30%）土样为例，其有效粒径  $d_{10}$  为 0.13 mm，中值粒径  $d_{30}$  为 0.21 mm，限制粒径  $d_{60}$  为 2.82 mm，根据《土的工程分类标准：GB/T 5045—2007》，土样为级配不良砂（SP）。土样的直径为 150 mm，高度为 300 mm，满足《土工试验方法标准：GB/T 50123—2019》中土样尺寸至少大于土料最大粒径 6 倍的要求。

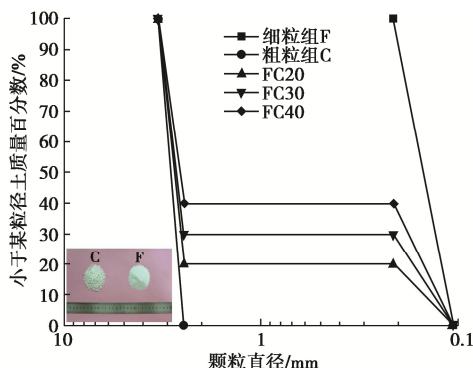


图 2 试验用土颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution of test soils

根据 Kézdi<sup>[3]</sup>、Kenney 等<sup>[26]</sup>提出的土体稳定性判断标准，各试验土料均为内部不稳定土（如表 2），即土料易发生渗蚀。

为保证渗流过程中粗粒组不出现流失，而细粒组

自由迁移，土样底部布设孔径为 1.18 mm 的滤网<sup>[27]</sup>。

表 1 试验材料基本物性参数

Table 1 Physical properties of test soils

基本物性参数	细粒含量 FC/%	颗粒相对质量 $G_s$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	最大孔隙比 $e_{max}$	最小孔隙比 $e_{min}$
细粒组	100	2.65	1.45	0.96	1.306	0.706
粗粒组	0	2.65	1.16	0.98	1.053	0.697
FC20	20	2.65	19.20	15.41	0.764	0.428
FC30	30	2.65	21.69	0.12	0.748	0.378
FC40	40	2.65	22.83	0.10	0.729	0.336

### （2）试验过程

试验主要包括 4 个步骤：①土样制备与压实，②土样饱和，③土样固结，④水力梯度逐级施加。

土样制备与压实。为保证土样的均匀性，采取分层压样法压实土样，每层压实厚度为 30 mm（共 10 层）。首先根据预设的土样相对密度计算所需干土质量，按照图 2 级配称取每层所需的粗细粒组质量。其次，将每层粗细粒组和相当于该层干土质量 2% 的水分均匀拌和以减少颗粒离析现象。然后，将拌和后的土样均匀装填在制样器中，用击实锤击实到预定高度。最后，重复上述操作逐层完成土样的压实。

土样饱和。采用先通 CO<sub>2</sub>（约 8 h）后用无气水进行水头饱和（约 10 h）的方法完成土样饱和，土样饱和后经检测  $B$  值均大于 0.9。

土样固结。逐级施加（1 kPa/min）固结压力至 100 kPa 的围压目标值，自土样顶部收集并称量从土样内部排出的水，待孔压消散达到 95% 时且孔压读数稳定后，认为土样完成固结。

水力梯度施加。参照 Chang 等<sup>[27]</sup>采用的方法和试验过程通过压力水供给系统（如图 1 所示）逐级增加土样入渗口处的水头，对土样施加水力梯度，每级水力梯度维持 10 min 用于观察试验现象。若某级水力梯度下通过土样的渗水量骤然增大且细颗粒大量涌出（发生渗蚀破坏）或达到进水端所能提供的最大压力值时，则停止试验。

自水力梯度逐级增大开始，全程量测相关数据。定期（3 s 一次）采集土样的全局和局部孔隙水压力，以获取全局水力梯度和渗流沿程的局部水力梯度，如，全局水力梯度  $i_g = \Delta P_{15} / (\gamma_w \cdot H)$ ，其中  $\Delta P_{15}$  为 PWP-1（采用测得压力水头与位置水头之和）与 PWP-5（同上）之间的水头差， $\gamma_w$  为水的重度， $H$  为土样高度。每级水力梯度施加后，利用土-水分离系统中的细滤网收集被侵蚀的细颗粒，并通过出流液收集系统定时测

表 2 试验工况

Table 2 Test program

试验系列	方案编号	FC /%	干密度 $\rho_d$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D_r$	初始孔隙 比 $e$	有效围 压/kPa	固结后孔隙 比 $e_0$	内部稳定性判定	
								Kézdi	K-L
系列 I	FC20-D8-C100	20		0.87			0.461	U	U
	FC30-D8-C100	30		0.78			0.462	U	U
	FC40-D8-C100	40	1.8	0.65	0.472	100	0.466	U	U
	FC30-D8-C100-R1	30		0.75			0.462	U	U
	FC30-D8-C100-R2	30		0.75			0.462	U	U
系列 II	FC30-D6-C100		1.6	0.25	0.656		0.600	U	U
	FC30-D7-C100		1.7	0.50	0.559		0.518	U	U
	FC30-D8-C100	30	1.8	0.75	0.472	100	0.462	U	U
	FC30-D9-C100		1.9	0.95	0.395		0.388	U	U
	FC30-D9-C100-R1		1.9	0.95	0.395		0.388	U	U

注: 方案编号中, FC 为细颗粒含量;  $D$  为干密度; C (confining pressure) 为等向应力即围压数值; R 为重复性试验。内部稳定性判定中, U 表示内部不稳定。Kézdi 法中  $d_{c15}/d_{85}>4$  为内部不稳定, 其中  $d_{c15}$  为土体粗粒组 15% 质量百分数所对应粒径;  $d_{85}$  为土体细粒组 85% 质量百分数所对应粒径。K-L 法 (Kenney 和 Lau 方法) 中  $(H/F)_{\min}<1$  为内部不稳定, 其中  $H$  为土体任意粒径  $d$  对应质量百分数;  $F$  为土体任意粒径  $d\sim 4d$  之间颗粒对应质量百分数。

表 3 可重复性试验结果

Table 3 Results of repeatability tests

试验工况	$i_{in}$	$C_v/$ %	$i_f$	$C_v/$ %	$k_0/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_v/$ %	$k_{in}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_v/$ %	$k_{av}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$C_v/$ %
FC30-D8-C100	1.15		2.27		0.0381		0.0365		0.0378	
FC30-D8-C100-R1	1.17	0.8	2.46	4.2	0.0392	4.5	0.0366	0.5	0.0375	1.8
FC30-D8-C100-R2	1.15		2.24		0.0423		0.0369		0.0389	

量渗水量 (30 s 一次), 计算渗流速度, 以获取土样渗透系数。利用高清相机对渗蚀过程中土样拍照 (60 s 一次), 参照 Chen<sup>[28]</sup>提出的图像处理方法, 通过对不同时刻乳胶膜上网格线的交点在土样垂直平面上正投影的差异来计算土样变形。

### (3) 试验方案

为研究不连续级配无黏性土渗蚀行为及其影响因素, 开展了两个系列的渗蚀试验, 如表 2 所示。试验系列 I, 分别控制细颗粒含量为 20%, 30%, 40%, 以研究细颗粒含量的影响; 试验系列 II, 采用固定的细颗粒含量 (30%), 分别控制相对密度为 0.25, 0.50, 0.75, 0.95, 以研究相对密度的影响。

## 2 渗蚀试验结果与分析

### 2.1 试验可重复性检验

试验方案中的 FC30-D8-C100、FC30-D8-C100-R1 及 FC30-D8-C100-R2 为 3 次初始条件完全相同的试验, 以检验试验的可重复性。3 次重复性试验获得的全局渗透系数  $k_g$  (即整个土样的平均渗透系数) 与全局水力梯度  $i_g$  (即整个土样的平均水力梯度) 关系曲线基本重合 (图 3), 土样的特征水力参数 (启动水力梯度  $i_{in}$ 、破坏水力梯度  $i_f$ 、初始渗透系数  $k_0$ 、启动渗透系数  $k_{in}$  及平均渗透系数  $k_{av}$ ) 如表 3 所示。根据

Richards 等<sup>[29]</sup>和 Liang 等<sup>[30]</sup>提出的方法, 变异系数  $C_v$  小于 10% 时, 认为试验具有可重复性。本文三次试验土样特征参数的  $C_v$  均小于 4.5%, 试验可重复性良好。

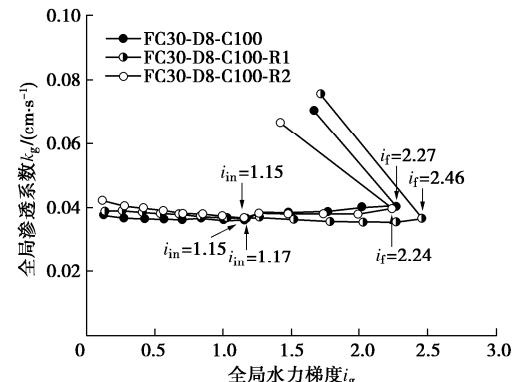
图 3 重复性试验土样的  $k_g$ - $i_g$  演变

Fig. 3 Evolution of global hydraulic conductivity with global hydraulic gradient in repeatability tests

### 2.2 土体渗蚀发展的演变过程

图 4,5 为不同细颗粒含量和相对密度下土样渗流速度  $v$  随全局水力梯度  $i_g$  增加的发展规律。本文以试验 FC30-D8-C100 为例, 将土样渗蚀发展进程分为 3 个阶段:

(1) 渗蚀前期阶段 (第 I 时段 A→B:  $0 < i_g < i_{in}$ ), 随着全局水力梯度增加, 土样渗流速度近似等幅度增

加, 出流液清澈, 未发现细颗粒流失, 表明这个阶段土样尚未发生渗蚀。

(2) 渗蚀发展阶段(第 II 时段  $B \rightarrow C$ :  $i_{in} \leq i_g < i_f$ ), 当全局水力梯度增加到  $B$  点时, 发现开始有细颗粒被渗透水流带出, 出流液逐渐浑浊。本文将该点视为土样渗蚀发展的起点, 并将对应的水力梯度称为渗蚀启动水力梯度  $i_{in}$ , 与 Ke 等<sup>[16]</sup>和 Liang 等<sup>[30]</sup>研究中的定义一致。土样渗蚀启动后, 细颗粒发生渐进性流失, 且侵蚀量随全局水力梯度的增加而增大。本文试验中, 细颗粒含量 20%, 30% 及 40% 的土样  $i_{in}$  分别为 0.70, 1.15 及 1.55; 30% 细粒含量, 相对密度 0.25, 0.50, 0.75 及 0.95 的土样  $i_{in}$  分别为 0.42, 0.57, 1.15 及 1.49。

(3) 渗蚀破坏阶段(第 III 时段  $C \rightarrow D$ :  $i_g \geq i_f$ ), 当全局水力梯度增加到  $C$  点, 土样渗流速度骤然增加而水力梯度突然下降, 且伴有细颗粒大量涌出, 说明土样内部形成了贯穿的渗流通道, 土样无法承受更大的水力梯度而失去抗渗能力。本文将  $C$  点对应的全局水力梯度称为破坏水力梯度 ( $i_f$ )。细颗粒含量 20%, 30% 及 40% 的土样  $i_f$  分别为 2.09, 2.27 及 4.24; 30% 细粒含量, 相对密度 0.25, 0.50 与 0.75 条件下的土样  $i_f$  分别为 1.45, 1.76 与 2.27。细粒含量 30%、相对密度为 0.95 的土样只发生了渗蚀启动而未发生渗蚀破坏(如图 5)。

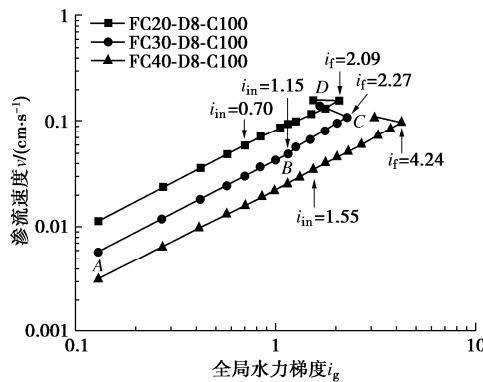


图 4 不同细颗粒含量下土样的  $l_{gv}$ - $l_{gi_g}$  演变

Fig. 4 Evolution of seepage velocity with global hydraulic gradient at various FCs

### 2.3 细颗粒含量对抗渗强度及侵蚀程度的影响

图 6 为细颗粒含量对抗渗强度及侵蚀程度的影响规律, 其中用细颗粒侵蚀率表示侵蚀程度, 启动时刻细颗粒侵蚀率  $E_{in-c}$  是指在启动水力梯度  $i_{in}$  作用下, 细颗粒流失质量在土样细颗粒总质量中的占比; 渗蚀全程细颗粒侵蚀率  $E_{f-c}$  是指土样渗蚀全程最终的细颗粒流失质量在土样细颗粒总质量中的占比。特别需要说明的是, 当未发生渗蚀破坏时, 该侵蚀率指特定水力梯度下的侵蚀率, 如细粒含量 30%、相对密度 0.95 的

方案中是指土样全局水力梯度为 10 时的侵蚀率。

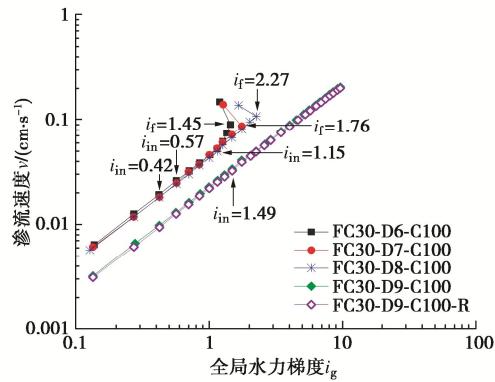


图 5 不同相对密度下土样的  $l_{gv}$ - $l_{gi_g}$  演变

Fig. 5 Evolution of seepage velocity with global hydraulic gradient at various relative densities

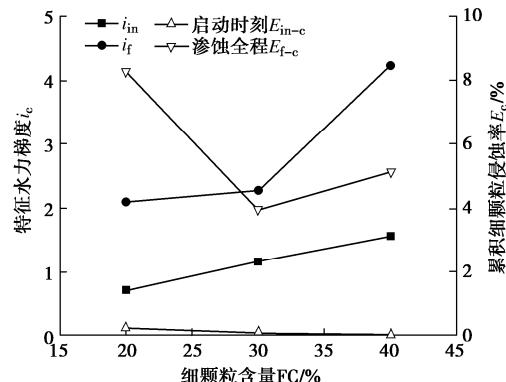


图 6 细颗粒含量对抗渗强度及侵蚀程度的影响

Fig. 6 Effects of FC on initiation and failure hydraulic gradients as well as cumulative loss of fine particles

土体启动水力梯度随细颗粒含量的增加近线性增大, 破坏水力梯度随细颗粒含量的增加而非线性增大; 但渗蚀全程的细颗粒侵蚀率并不随细颗粒含量单调变化。30% 细颗粒含量土样(FC30)的破坏水力梯度略大于 20% 细颗粒含量土样(FC20), 但渗蚀全程中的总细颗粒侵蚀率比 20% 和 40% 细颗粒含量土样都要低。上述现象可能源于不同细颗粒含量形成的不同孔隙结构。根据 Ke 等<sup>[16]</sup>提出的临界细颗粒含量计算公式, 本试验土样对应的粗颗粒骨架孔隙处于完全填充状态时的临界细颗粒含量为 38.2%。FC20 和 FC30 土样处于尚未完全填充状态, 大部分细颗粒以松散状态堆积于粗颗粒骨架孔隙中, 不参与粗颗粒骨架的受力传递。同时, 土样孔隙比相对较大, 可供细颗粒迁移的渗流通道尺寸较大, 因此, FC20 土样的抗渗强度最小, 对应的侵蚀程度最为严重。FC30 和 F40 土样中细颗粒含量与完全填充时的临界含量更为接近, 参与土骨架受力传递的细颗粒更多, 因此, 抗渗强度更高, 而侵蚀程度略低。F40 土样固结后孔隙比略高(表 2),

土体受力骨架中的孔径相对更大, 可能是其侵蚀率比F30 土样略高的原因。综上所述, 细颗粒含量对土体的抗渗能力和侵蚀程度有着显著影响, 虽然高细颗粒含量下的土体有较高的抗渗强度, 但仍会发生不容忽视的细颗粒侵蚀流失现象, 这点在实际工程的渗流稳定设计中应加以重视。

## 2.4 相对密度对抗渗强度及侵蚀程度的影响

图 7 给出了相对密度对土样抗渗强度及侵蚀程度的影响规律。相对密度越高, 渗蚀启动与破坏水力梯度呈非线性增大, 而土样在渗蚀启动和渗蚀全程中的细颗粒流失量越小。分别与陈勇等<sup>[9]</sup>开展的恒定水力梯度下不连续级配粉质砂土的渗蚀试验、Liang 等<sup>[13, 30]</sup>开展的不连续级配砾石土渗蚀试验结果相近。

前已述及, 细颗粒含量 30%、相对密度为 0.95 的土样未发生渗蚀破坏(图 5), 图 7 中绘制的渗蚀全程细颗粒侵蚀率为全局水力梯度为 10 时的侵蚀率(0.59%)。该方案试验中, 随着全局水力梯度持续增大, 渗流速度近似线性增大(但斜率有所减小, 系来源于渗透压密), 即使全局水力梯度增大至 30(即孔隙水压力已接近外加等向应力。当孔压等于围压时, 有效应力将减小至零, 土样相应部位成为液态, 已不再是渗蚀问题), 土样仍未发生渗蚀破坏。

(0.59%)。该方案试验中, 随着全局水力梯度持续增大, 渗流速度近似线性增大(但斜率有所减小, 系来源于渗透压密), 即使全局水力梯度增大至 30(即孔隙水压力已接近外加等向应力。当孔压等于围压时, 有效应力将减小至零, 土样相应部位成为液态, 已不再是渗蚀问题), 土样仍未发生渗蚀破坏。

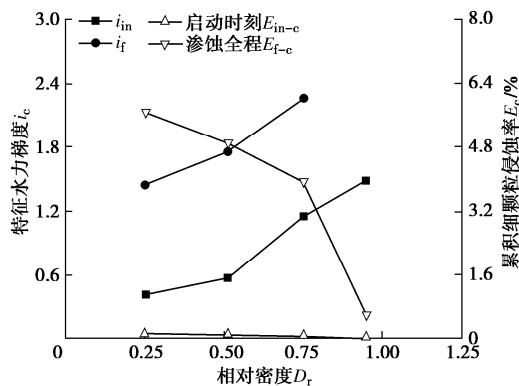


图 7 相对密度对土样抗渗强度及侵蚀程度的影响

Fig. 7 Effects of relative density on initiation and failure hydraulic gradients as well as cumulative loss of fine particles

可见, 在等向应力状态下, 相对密度增大到一定值后, 土样会由渗流不稳定状态转变为渗流稳定状态而不发生渗蚀破坏。出现该渗流稳定状态转变现象的原因可能在于, 高相对密度对应的土样孔隙比已远小于其他方案, 加之等向应力作用, 进一步减小了孔隙比(固结后土样孔隙比减小, 如表 2 所示), 导致土样中孔隙尺寸即渗流通道尺寸接近或小于细颗粒; 此外, 土样受等向应力作用, 可能强化粗细颗粒间的相互作用, 致使更多的细颗粒参与粗颗粒骨架的受力传递。在这样的情况下, 即使水力梯度再大也难以出现细颗

粒大规模迁移和流失。这也说明, 土料内部稳定与否, 实际上并不是土料固有特性, 而是依赖于所处状态。

此外, 与 Ke 等<sup>[16]</sup>开展的竖直向上渗流和 Deng 等<sup>[31]</sup>进行的竖向应力下水平渗流时的不连续级配无黏性土渗蚀试验对比发现, 无论渗流方向是水平向还是垂直向, 土体的启动和破坏水力梯度均随相对密度的增大而呈非线性增加, 这也证明了土体密实程度(相对密度)对渗蚀有较大影响。

## 3 土体渗蚀局部演变特征分析

### 3.1 土体内部局部水力梯度的时空演变规律

试验测定了 PWP-1~PWP-5 各点孔隙水压力, 计入各点的位置水头, 用两点间总水头差除以相应渗径长度作为局部水力梯度, 如定义  $i_{k-j}$  为 PWP- $k$  与 PWP- $j$  之间土样段的局部水力梯度(其中  $k=1, 2, 3, 4; j=2, 3, 4, 5$ ; 其中  $j>k$ )。

以试验 FC30-D8-C100 为例分析土样局部水力梯度的时空演变规律(图 8)。

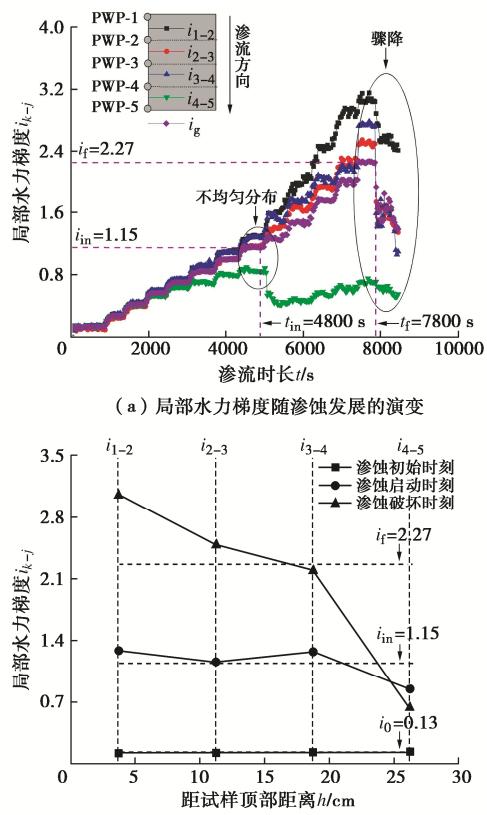


图 8 FC30-D8-C100 土样局部水力梯度的时空演变特征

Fig. 8 Spatial-temporal evolution characteristics of local hydraulic gradient of FC30-D8-C100 specimen

渗蚀前期阶段( $0 < i_g < i_{in}$ ), 渗流沿程的局部水力梯度几近相等且近似等于全局水力梯度(图 8(a))。说明这一时段内的渗流作用还不足以驱动细颗粒发生

侵蚀而流失，渗流沿程的孔隙结构均匀分布，土样仍保持着良好的渗流稳定性。

渗蚀发展阶段 ( $i_{in} \leq i_g < i_f$ )，试验持续到 4800 s 后，土样下游部位的水力梯度  $i_{4-5}$  骤然减小而中上游部位的水力梯度  $i_{1-2}$ ,  $i_{2-3}$  及  $i_{3-4}$  均有一定程度的增大。同一水平水力梯度下渗流沿程上局部水力梯度的空间分布不再均匀，一般地， $i_{1-2} > i_{3-4} > i_{2-3} > i_g > i_{4-5}$  (图 8 (b))。该现象说明土样发生了渗蚀，细颗粒开始发生迁移，进而引发了土样内部孔隙结构的非均匀变化。

渗蚀破坏阶段 ( $i_g \geq i_f$ )，7800 s 后，土样全局水力梯度和渗流沿程的局部水力梯度均骤然减小，流速突增，说明此时土样中形成了贯穿的渗流通道，使得细颗粒能自由地“逃逸”出土样。在破坏水力梯度  $i_f$  下  $i_{1-2} > i_{2-3} > i_g > i_{3-4} > i_{4-5}$  (上游大于下游)，局部水力梯度空间分布的非均匀性加剧，其中  $i_{1-2}$  达到 3.05，是  $i_f$  的 1.4 倍，是  $i_{4-5}$  的 4.8 倍 (图 8 (b))。

由上述土体内部局部水力梯度时空演变规律可见，渗蚀启动后 ( $i_g \geq i_{in}$ )，土体内部孔隙结构会因细颗粒的迁移堵塞和疏通流失而发生非均匀变化，致使土体渗透性在渗流沿程上出现空间变异性，细粒残存或淤堵较多的部分，局部渗透系数较低，承担局部水力梯度较高；反之，细粒含量较低的部分，局部水力梯度也较低。渗透性的空间变异进一步会导致局部水力梯度及抗渗性能 (如局部破坏水力梯度) 的不均匀分布，且这种不均匀分布随渗蚀发展逐渐加剧，最终诱发土体渗蚀破坏。上述规律与谷敬云等<sup>[19]</sup>透明土渗蚀试验中的发现相近，细颗粒迁移在土样内部不同区域分布不均衡导致了土体孔隙比、渗透性的非均匀变化。

### 3.2 土体全局和局部变形及孔隙比演变规律

以试验 FC30-D8-C100 为例分析土样在渗蚀历程中的全局和局部变形规律，如图 9 所示 (正值表示压缩)。等向应力条件下土样在渗蚀过程中的体变  $\varepsilon_v$ 、轴变  $\varepsilon_a$  及径变  $\varepsilon_r$  均保持正值，即总体上，土样体积收缩、轴向收缩及径向收缩，且数值持续增大。渗蚀中土样孔隙比  $e_v$  按 Ke 等<sup>[24]</sup>提出的方法计算 (式 (1))，其同时考虑了细颗粒流失与土体体变影响。

$$\varepsilon_v = (1 - \varepsilon_0) \left( \frac{e_0 + \Delta FC}{1 - \Delta FC} \right) - \varepsilon_v \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_0$  为固结后初始孔隙比； $\Delta FC$  为累积细颗粒流失质量占土样细颗粒总质量的百分比。

渗蚀前期阶段 ( $0 < i_g < i_{in}$ )，几乎没有细粒流失，土样在渗透水流的作用下产生渗透压密效应<sup>[15]</sup>，其随着水力梯度会持续提高，从而使得土样孔隙比缓慢减小 (图 9)，土样渗透系数略有降低 (图 3)。在此期间，随着土体骨架的压密，粗细颗粒可能都出现了一定的结构调整，但这种调整形成了较为均匀的空间分布。

正如梁越等<sup>[20]</sup>进行的不连续级配透明土渗蚀试验，将土体结构的这种调整归因于粗颗粒骨架孔隙间自由细颗粒的重分布，且水力梯度较小时重分布较为均匀。

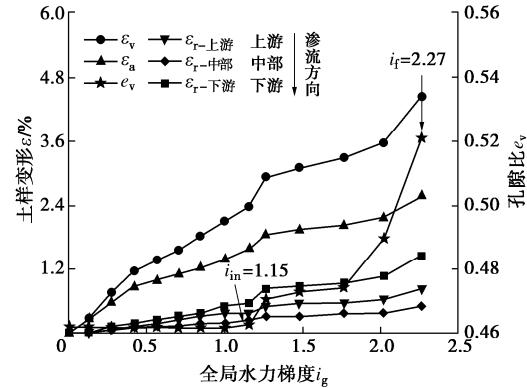


图 9 FC30-D8-C100 土样全局和局部变形演变

Fig. 9 Evolution of global and local deformations of FC30-D8-C100 specimen

渗蚀发展阶段 ( $i_{in} \leq i_g < i_f$ )，自渗蚀启动后，随着水力梯度提高，受粒间力约束较小的细颗粒逐渐被渗透力拖曳离开原位，细颗粒发生迁移流失，渗蚀启动，土样内部细颗粒空间分布发生调整。由于不同位置启动后细颗粒的行进距离差异、细颗粒补给条件差异，渗流沿程孔隙结构出现非均匀变化，细颗粒迁移及沉积淤堵引起的局部渗透系数和水力梯度承担比例调整。细颗粒迁移的累积导致颗粒间作用力调整，土样骨架在等向应力作用下发生压缩。从局部水力梯度的变化看，土样底部 (渗流下游) 较早出现局部梯度偏离全局水力梯度现象，且局部水力梯度在全局水力梯度超过启动梯度后即跌落，说明下游侧最早发生细颗粒迁移，且细颗粒迁移已达一定比例，颗粒间孔隙增大、局部渗透性提高较多，因而出现了较大径向压缩变形。除土样下游径变  $\varepsilon_r$  下游 较大外，上游径变  $\varepsilon_r$  上游 也大于中部径变  $\varepsilon_r$  中部 (图 9)，可能缘于上游细颗粒发生迁移后没有来自“再上游”的补给，致使随着渗蚀发展，上游侧细颗粒含量低于中游侧，体缩量也相对略大。需要注意的是，细颗粒流失和土样体积变形都会影响土样孔隙比的变化，细颗粒流失释放出孔隙体积，而土样体积收缩减少孔隙体积，因此孔隙比的变化是两者叠加的结果，在本方案中，随着水力梯度提高，孔隙比总体呈现先减小后增大的趋势。

渗蚀破坏阶段 ( $i_g \geq i_f$ )，在试验持续到破坏水力梯度时，细颗粒大量涌出，土样出现体变、孔隙比骤然增大现象。其后，土样内部已经形成了贯穿的渗流通道，水力梯度难以提高，渗透系数大幅提高 (图 3)。

## 4 结 论

本文采用孔压沿程分布、渗出水和细颗粒质量发

展过程、试样各向变形过程可测的三轴渗蚀装置, 研究了细颗粒含量和相对密度对不连续级配无黏性土渗蚀行为的影响, 考察了局部水力梯度时空演变特征及渗蚀过程细颗粒的迁移规律, 得到以下3点结论。

(1) 土体渗蚀随全局水力梯度的增加可分为渗蚀前期, 渗蚀发展和渗蚀破坏3个阶段; 土体渗蚀启动的内部表现是局部水力梯度的突变及渗流沿程上的不均匀分布; 渗蚀启动后, 土体内部孔隙结构会因细颗粒的迁移而发生非均匀变化, 进而导致土体渗透性、承担水力梯度及抗渗性能在渗流沿程上的空间变异性。这种空间变异随渗蚀发展而加剧, 最终引发土体渗蚀破坏。

(2) 土体渗蚀启动和破坏水力梯度随细颗粒含量的增加而非线性增大, 但细颗粒侵蚀率与细颗粒含量并不单调相关, 具有良好的粗细粒充填关系和较低孔隙比的土体侵蚀率相对更低。土体抗渗强度与相对密度正相关, 侵蚀率与之负相关, 且相对密度增大到一定程度后即不再发生渗蚀破坏。

(3) 在等向应力条件下, 土体渗蚀行为会引发体积收缩、轴向收缩和径向收缩现象; 受渗透压密影响, 土体孔隙比在渗蚀初期逐步减小, 之后, 因细颗粒流失致孔隙增大及渗蚀引起土体体变的共同影响, 土体孔隙比随渗蚀发展逐步增大。

## 参考文献:

- [1] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(5): 1000-1024.
- [2] International Commis on Large Dams. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Toundations (ICOLD Bulletin 164)[R]. Paris: International Commis on Large Dams, 2017.
- [3] KÉZDI, A. Soil Physics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [4] 李伟一, 钱建固, 尹振宇, 等. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的CFD-DEM模拟[J]. 岩土力学, 2021, **42**(11): 3191-3201.  
(LI Weiyi, QIAN Jiangu, YIN Zhenyu, 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))
- [5] OUEIDAT M, BENAMAR A, BENNABI A. Effect of fine particles and soil heterogeneity on the initiation of suffusion[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, **39**(3): 2359-2371.
- [6] 宋林辉, 黄强, 闫迪, 等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1635-1641.  
(SONG Linhui, HUANG Qiang, YAN Di, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1635-1641. (in Chinese))
- [7] PACHIDEH V, MIR MOHAMMAD HOSSEINI S M. A new physical model for studying flow direction and other influencing parameters on the internal erosion of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, **42**(6): 20170301.
- [8] 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.
- [9] 陈勇, 闵泽鑫, 夏振尧, 等. 渗流作用下粉土质砂潜蚀演化特征与预测模型[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023: 1-9. (CHEN Yong, MING Zexin, XIA Zhenyao, et al. Evolution characteristics and prediction model on suffusion of silty-sand subjected to seepage[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023: 1-9. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210816.1145.003.html>. (in Chinese))
- [10] 刘杰, 谢定松. 砾石土渗透稳定性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2632-2638. (LIU Jie, XIE Dingsong. Research on seepage stability experiment of gravelly soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2632-2638. (in Chinese))
- [11] 陈生水, 凌华, 米占宽, 等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 26-31. (CHEN Shengshui, LING Hua, MI Zhankuan, et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 26-31. (in Chinese))
- [12] 陈群, 谷宏海, 何昌荣. 砾石土防渗料-反滤料联合抗渗试验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(1): 13-18. (CHEN Qun, GU Honghai, HE Changrong. Combination seepage failure test of gravelly soil and the filter[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, **44**(1): 13-18. (in Chinese))
- [13] LIANG Y, YEH T C J, ZHA Y Y, et al. Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage[J]. Soils and Foundations, 2017, **57**(5): 849-860.
- [14] LIU K W, QIU R Z, SU Q, et al. Suffusion response of well graded gravels in roadbed of non-ballasted high speed

- railway[J]. Construction and Building Materials, 2021, **284**: 122848.
- [15] 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 Tao, JIANG Zhongming, LIU Deqian, et al. Experiment on the seepage damage coarse grain soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(4): 1311-1316, 1336. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] WANG J J, QIU Z F. Anisotropic hydraulic conductivity and critical hydraulic gradient of a crushed sandstone-mudstone particle mixture[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, **35**(1): 89-97.
- [18] MOFFAT R, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(3): 399-412.
- [19] 谷敬云, 罗玉龙, 张兴杰, 等. 基于平面激光诱导荧光的潜蚀可视化试验装置及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(6): 1287-1296. (GU Jingyun, LUO Yulong, ZHANG Xingjie, et al. A suffusion visualization apparatus based on planar laser induced fluorescence and the preliminary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(6): 1287-1296. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 常东升, 张利民. 土体渗透稳定性判定准则[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 253-259. (CHANG Dongsheng, ZHANG Limin. Internal stability criteria for soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 253-259. (in Chinese))
- [22] 朱 秦, 苏立君, 刘振宇, 等. 颗粒迁移作用下宽级配土渗透性研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 125-134. (ZHU Qin, SU Lijun, LIU Zhenyu, et al. Study of seepage in wide-grading soils with particles migration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 125-134. (in Chinese))
- [23] 周 健, 姚志雄, 张 刚. 基于散体介质理论的砂土管涌机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(4): 749-756. (ZHOU Jian, YAO Zhixiong, ZHANG Gang. Research on piping mechanism in sandy soils based on discrete element theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(4): 749-756. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] 陈 锐, 谭润锵, 赵燕茹, 等. 一种用于乳胶膜开孔后的密封装置及其使用方法: CN111042097A[P]. 2020-04-21. (CHEN Rui, TAN Runqiang, ZHAO Yanru, et al. Sealing Device Used after Hole Forming of Latex Film and Application Method of Sealing Device: CN111042097A[P]. 2020-04-21. (in Chinese))
- [26] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, **22**(2): 215-225.
- [27] CHANG D S, ZHANG L M, et al. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(6): 103889.
- [28] CHEN C, ZHANG L M, ZHU H. A photographic method for measuring soil deformations during internal erosion under triaxial stress conditions[J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, **41**(1): 20170031.
- [29] RICHARDS K S, REDDY K R, et al. True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(1): 102246.
- [30] LIANG Y, ZENG C, WANG J J, et al. Constant gradient erosion apparatus for appraisal of piping behavior in upward seepage flow[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(4): 630-642.
- [31] DENG G, ZHANG L L, CHEN R, et al. Experimental investigation on suffusion characteristics of cohesionless soils along horizontal seepage flow under controlled vertical stress[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, **8**: 195.