

DOI: 10.11779/CJGE20231105

# 细颗粒含量影响渗流侵蚀规律的细观机理研究

梁 越<sup>1,2,3</sup>, 冉裕星<sup>\*1</sup>, 许 彬<sup>1,2,3</sup>, 张鑫强<sup>4</sup>, 何慧汝<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学水利水运工程  
教育部重点实验室, 重庆 400074; 4. 江西省港口集团有限公司江西省水运咨询有限公司, 江西 南昌 330008)

**摘要:** 开展细颗粒的运移特性探究对于明确渗流侵蚀规律具有极为重要的意义, 细颗粒含量将直接影响土体的抗侵蝕性能。基于自研的粒子图像测速 (PIV) /平面激光诱导荧光 (PLIF) 渗流侵蚀试验系统, 分析了初始细颗粒含量对于渗流侵蚀过程中的临界水力梯度及流速变化影响。研究表明: 根据流速演变规律, 渗流侵蚀过程可基本分为稳定、局部破坏、整体破坏 3 个阶段, 从而定义了局部破坏、整体破坏临界水力梯度, 两种临界水力梯度均随初始细颗粒含量的增加而增大。当初始细颗粒含量低于 20% 时, 试样处于欠填状态, 具有明显整体破坏现象; 整体破坏后, 试样实测平均流速随水力梯度的增加而加速上升。当初始细颗粒含量高于 30% 时, 试样基本处于满填状态, 具备极高抗侵蝕性能; 试样整体实测平均流速偏低。局部破坏阶段中, 试样实测平均流速变化速率随初始细颗粒含量的增加而显著降低。可知, 初始细颗粒含量对于试样的渗流侵蚀细观机理具有显著影响。

**关键词:** 细颗粒含量; 透明土技术; 粒子图像测速 (PIV); 平面激光诱导荧光 (PLIF); 渗流侵蚀

中图分类号: TU44 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)05-1099-08

作者简介: 梁 越(1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事水利工程灾害形成机理及防治方面的教学与科研工作。E-mail:  
liangyue2560@163.com。

## Microscopic mechanism of content of fine particles affecting seepage erosion law

LIANG Yue<sup>1, 2, 3</sup>, RAN Yuxing<sup>1</sup>, XU Bin<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Xinqiang<sup>4</sup>, HE Huiru<sup>1</sup>

(1.The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. National Engineering  
Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Key Laboratory of  
Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Jiangxi Port  
Group Co., Ltd. Jiangxi Water Transport Consulting Co., Ltd, Nanchang 330008, China)

**Abstract:** Exploring the transport characteristics of fine particles is of great engineering significance for clarifying the law of seepage erosion, as the content of fine particles will directly affect the resistance of soils to erodibility. Based on the self-developed PIV/PLIF seepage erosion test system, the effects of the initial content of fine particles on the flow velocity and the critical hydraulic gradient during the seepage erosion process are investigated. The results show that: (1) The process of seepage erosion can be basically divided into three phases, i.e., stable, localized destruction and overall destruction, according to the evolution law of flow velocity. This leads to the definition of the critical hydraulic gradients for localized and overall destruction, and the critical hydraulic gradients of the specimen increase with the increase of the initial content of fine particles. (2) When the initial content of fine particles is less than 20%, the specimen is in an underfilled state, exhibiting an overall destruction phenomenon, and the actual measured average flow velocity of the specimen accelerates with the increase of the hydraulic gradient after overall destruction. When the initial content of fine particles exceeds 30%, the specimen is essentially in a fully filled state, with an extremely high resistance to erodibility and the overall measured average flow speed of the specimen is relatively low. (3) During the phase of localized destruction, the rate of variation in the measured average flow speed of the specimen decreases significantly with the increase of the initial content of fine particles. It is known that the initial content of fine particles has a significant impact on the microscopic mechanism of seepage erosion for the specimen.

**Key words:** fine particle content; transparent soil technology;

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52379097); 重庆市技术创新与应用发展专项基金项目 (CSTB2022TIAD-GPX0045); 重庆市教委科学技术研究计划项目 (KJQN202300744); 广西科技计划项目资助 (桂科AA23062023); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS22403); 重庆市研究生联合培养基地项目 (JDLHPYJD2021004)

收稿日期: 2023-11-15

\*通信作者 (E-mail: ryx1572284718@163.com)

particle image velocity (PIV); planar laser-induced fluorescence (PLIF); seepage erosion

## 0 引言

渗流侵蚀是导致土体坍塌沉降、土工结构破坏的重要原因之一，大多堤防工程、坝体渗流破坏与渗流侵蚀有关。渗流侵蚀具有多种表现，其中细颗粒的流失是一种重要的表现形式，故研究细颗粒含量对于渗流侵蚀规律的影响具有极为的重要意义<sup>[1-2]</sup>。

基于无黏性土、砂土体、砂砾石等传统试验材料，多名学者<sup>[3-6]</sup>分别通过自研的渗流侵蚀装置对不同颗粒级配下的试样进行了室内侵蚀模型试验，均认为细颗粒含量对于渗流侵蚀过程中的宏观流速、临界水力条件具有显著影响。刘杰等<sup>[7]</sup>研究表明当砂砾层中细颗粒含量低于 20%时，细颗粒流失率可达 100%，此时骨架结构无明显变化；当高于 20%时，细颗粒的流失将对砂砾土层结构稳定性产生影响。唐凯等<sup>[8]</sup>针对极细砂试样进行分析，认为细颗粒含量将对试样的孔隙分布产生重要影响；当细颗粒含量高于 15%并上升时，细颗粒的自由度将逐步受到限制，颗粒间相互作用增强。故从细观层面上来说，细颗粒含量将影响试样结构形态及其稳定性，细颗粒的流失将引发试样抗剪强度性质（如颗粒咬合力、内摩擦角）及剪切行为的变化，进而在水力梯度作用下，形成不同程度的渗流侵蚀特征<sup>[9-11]</sup>；Ruttithivaphanich 等<sup>[12]</sup>对细颗粒影响下的砾石土液化特性及动力特性进行了评价，认为细颗粒含量对于土体的压力耗散程度以及结构变化具有显著影响。针对渗流侵蚀过程，Liang 等<sup>[13-14]</sup>和梁越等<sup>[15]</sup>采用自研的渗透仪对不同粒径分布、不同干密度条件下的砂砾层渗流侵蚀过程进行了细致的探究，发现粗颗粒特征粒径、干密度等因素均对于试样的临界水力梯度具有显著影响，即使试样具有相同的不均匀系数或细颗粒含量。天然土是最贴近工程实际的试验材料，可进行力学、物理、化学特性等方面的有效研究；但其复杂的内部构造与组成成分仍是影响观测或进行量化分析的难点所在。物化性质与天然土相似且易于观测的透明土是一种良好的室内试验材料，其可有效模拟低塑性黏土、砂土等多种天然土<sup>[16]</sup>。不少学者利用透明土材料，结合平面激光诱导荧光<sup>[17]</sup>（PLIF）对桩基承载力及位移<sup>[18]</sup>、多孔介质剖面孔隙流速特性<sup>[19]</sup>、非均匀渗流侵蚀特性<sup>[20]</sup>等方面进行了可视化的研究。梁越等<sup>[21]</sup>利用自研的基于双光源 PIV/PTV 的渗流侵蚀试验系统，从细观角度出发对渗流侵蚀过程中流体运动以及颗粒流失之间的相互作用进行了探讨，并有效验证了透明土材料及自研试验系统运用于研究渗流侵蚀过程的可靠性。

鉴于当前研究基础<sup>[2-21]</sup>，本试验从细观尺度出发，基于自研 PIV/PLIF 渗流侵蚀试验系统开展室内模型试验，探究了不同初始细颗粒含量下的透明土试样于渗流侵蚀过程中的流速及临界水力梯度发展规律，分析了不同细颗粒含量下的颗粒迁移影响因素，研究成果可为渗流侵蚀探测分析提供可靠理论依据。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验材料

为保证试验土样具有良好的光学特性及可视性，本试验采用透明度高、物化性质稳定且与真实土体颗粒粒径相近的熔融石英砂颗粒作为试验多孔介质，其平均密度约为  $2.20 \text{ g/cm}^3$ ， $25^\circ\text{C}$  环境温度下折射率为 1.4584，粒径为  $0.5\sim30 \text{ mm}$ <sup>[22-24]</sup>。孔隙溶液选用混合比例为 4.2 : 1 的十五号白油与正十二烷混合溶液，混合溶液  $25^\circ\text{C}$  条件下折射率为 1.4585；其中十五号白油密度为  $0.83 \text{ g/cm}^3$ ，正十二烷密度为  $0.75 \text{ g/cm}^3$ ，所有折射率信息均采用 2WAJ 单目折射仪测量获得。

为了探究不同初始细颗粒含量对于土体渗流侵蚀规律的影响，试验选用细颗粒（ $0.5\sim1.0 \text{ mm}$ ）含量不同的 3 组（R10, R20, R30）缺级配熔融石英砂颗粒，试样级配曲线如图 1 所示（图中粒径百分比为小于某粒径的颗粒百分比含量），各组试样参数如表 1 所示。

表 1 透明土试样参数

Table 1 Parameters of transparent soil

试样参数	细颗粒含量/%	孔隙率	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
R10	10	0.41	1.39
R20	20	0.38	1.39
R30	30	0.35	1.39

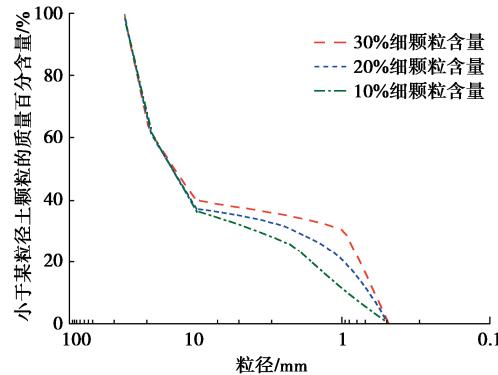


图 1 级配曲线图

Fig. 1 Grain-size distribution curves

### 1.2 基于 PIV/PLIF 的渗流侵蚀试验系统

采用自研的 PIV/PLIF 渗流侵蚀试验系统（图 2）渗流侵蚀过程进行了细致的观测及记录，渗流侵蚀试验系统主要含有渗流侵蚀系统、激光成像系统、信息

采集系统、图像处理系统4个组成部分。激光成像系统放置于渗流侵蚀系统右侧并平行于渗流侵蚀装置, 用以创造激光成像环境; 渗流侵蚀系统、信息采集系统、图像处理系统从左至右依次进行连接, 形成试验、观测、采集、处理的一体化流程。渗流侵蚀系统主要由渗流侵蚀装置、透明土试样、水头控制装置(含手摇绞盘)、孔隙溶液组成, 在水头控制装置的调控作用下, 渗流侵蚀装置中将对试样产生从下至上的渗流侵蚀; 激光成像系统主要由10 W的532 nm绿色激光发射器、数码相机(PENTAX K-3)以及550 nm长通滤波器组成, 激光发射器将用于创造激光环境, 数码相机用于对渗流侵蚀过程中的示踪粒子运动轨迹进行追踪记录, 长通滤波器将过滤掉多余的散光; 信息采集系统主要由DH3281数据采集系统(采集速度为2次/s)与传感装置组成, 用于数据的监测与记录; 图像处理系统主要由图像粒子测速(PIV)软件与IMAGE PRO PLUS软件组成, 分别用于透明土试样流场图像粒子测算及处理经由PLIF获得的荧光图片。

本试验选用由东方流体公司生产的镀银空心玻璃微珠作为示踪粒子。空心玻璃微珠试验温度下为固态, 粒径范围为5~30  $\mu\text{m}$ , 密度为0.75  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 示踪粒子密度几乎与孔隙溶液密度相统一, 故可用于流场分析。为保证拍摄图片中出现明显观察对比效应, 试验过程中激光设备将发射出绿色激光(切片厚度为1 mm), 混合足量尼罗红染料的试样将在激光激发作用下形成明显散斑, 此时流场呈现明黄色、空心玻璃微珠示踪粒子将呈现暗橙色、熔融石英颗粒将呈现黑色阴影。PLIF技术可凭借示踪粒子的跟踪优势实现流动下的可视化, 故由于试验进程的推进而出现明显褪色现象时, 适时向缓冲区中加入适量的尼罗红染料随渗流对试样进行补充。

### 1.3 试验流程

具体操作步骤如下: ①调整各设备至指定位置, 确保镜头轴线垂直于激光面。②将尼罗红染剂掺入透明土试样中, 并注入孔隙溶液使得试样完全浸透。③真空充分饱和试样并放入侵蚀装置中, 记录试样初始试验状态。④打开激光发射器, 从右至左发射激光形成明显的激光面。⑤使用带有长通滤波器的数码相机拍摄试验过程视频及显色图像。⑥试验过程中, 采取先慢后快的水力梯度分级施加策略<sup>[17]</sup>, 以控制试验进程, 最大水力梯度施加值为0.50; 试验初期, 调节水箱以每次0.01的水力梯度频率对试样进行渗流侵蚀刺激, 同时获取不同水力梯度下的稳定截面数据; 当出现局部破坏现象时适当变化频率, 频率可适当调整为每次0.01~0.03, 直至产生整体破坏或达到最大水力

梯度值时停止调整。⑦维持最终水力梯度并每隔30 s记录1组试样状态, 共计3组后停止; 每次数据采集均需记录对应状态下的观测图像。⑧对于已发生整体破坏的试样, 获取0.30水力梯度下的渗流数据后停止试验, 并恢复至初始状态。⑨对各组试样依次重复操作②~⑧, 直至遍历所有试验工况且获得所有渗流数据。⑩整理观测图像及渗流数据并对整理后的渗流数据及经处理后的显色图像进行分析。

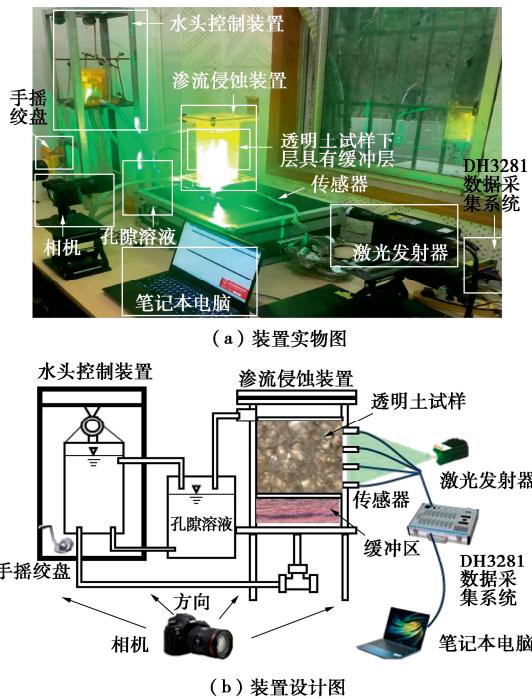


图2 渗流侵蚀试验系统

Fig. 2 Experimental system for model tests

## 2 试验结果及分析

### 2.1 初始细颗粒含量对流速的影响规律分析

对不同初始细颗粒含量下的透明土试样在同一截面处的示踪粒子渗流频率变化进行分析。选择R10, R20, R30共3组透明土试样分别在水力梯度分别为0.10, 0.20, 0.30时的稳定渗流数据进行整理分析, 获得的实测渗流频率分布情况如图3所示。为便于分析描述, 文中定义两处特征分界流速值: 以1.5 mm/s为高、低流速的特征分界流速值, 以0.1 mm/s为绘图特征分界流速值。当试样处于稳定阶段时, 流速处于0~1.5 mm/s的示踪粒子累计频率均在90%以上; 当进入局部破坏阶段时, 流速高于1.5 mm/s的示踪粒子累计频率显著上升; 故文中定义流速低于1.5 mm/s的示踪粒子为低流速粒子, 反之为高流速粒子。以两类特征分界流速值进行分区, 各区累计渗流频率如图3内表格所示。

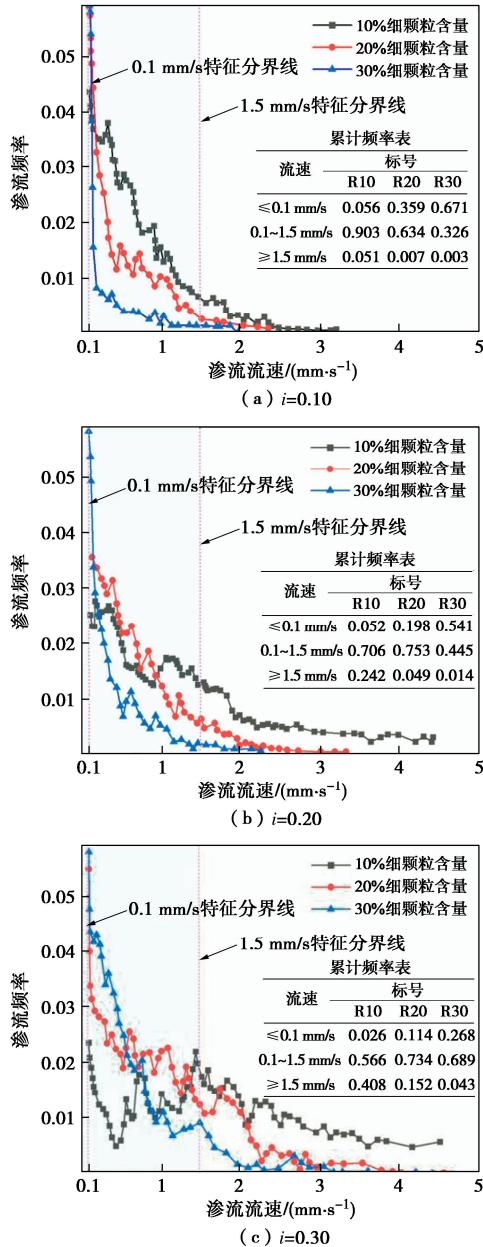


图 3 实测渗流频率分布图

Fig. 3 Frequencies of measured particle velocity distribution

由图 3 综合分析可知：初始细颗粒含量对于示踪粒子的整体渗流频率分布具有显著影响。对比图 3

(a) ~ (c) 可知：在 3 组水力梯度下，随着初始细颗粒含量的增加，低流速粒子累计频率普遍具有显著上升趋势。

针对初始细颗粒含量为 10% 的 R10 试验组，在 0.10 水力梯度下，已获得较低流速的示踪粒子已初步具备较大规模，高流速粒子已呈现一定占比。当水力梯度提升至 0.20 时，高流速粒子整体渗流频率水平出现明显上升，示踪粒子加速现象突出，但低于 0.1 mm/s 低流速粒子占比几乎不变；高流速粒子累计频率增加 0.191。当水力梯度提升至 0.30 时，高流速粒子占比规模进一步扩大，累计频率进一步增加 0.166；同时低

于 0.1 mm/s 低流速粒子占比出现陡降，降幅约 50%。陡降现象出现的主要原因在于：在高水力梯度下，试样中的细颗粒已大量流失，可测的示踪粒子量已大幅度降低且未启动的细颗粒量已降低；处于 0~0.1 mm/s 流速段的示踪粒子无补充，故出现陡降变化。针对初始细颗粒含量为 20% 的 R20 试验组，在 0.10 水力梯度下，试样中大部分示踪粒子处于低流速状态，相对规模低于 R10 试验组。当水力梯度为 0.20 时，高、低流速频率整体分布比例与 R10 试验组相似，均大致呈现 20:1。此时高流速粒子累计频率出现显著上升，增量为 0.042。连续提升水力梯度至 0.30，高流速粒子累计频率进一步提升，累计频率增幅相对水力梯度为 0.20 时达 200%。针对初始细颗粒含量为 30% 的 R30 试验组，在水力梯度低于 0.20 时，其虽然具有一定量的示踪粒子可采集到流速值，但超过 50% 的示踪粒子流速仍处于 0.1 mm/s 以下，且超过 98% 的示踪粒子处于低流速状态。在 0.30 水力梯度下，高流速粒子累计频率虽已有显著提高，但其整体渗漏频率分布仍偏向低流速区，其中约 96% 的示踪粒子流速集中在 0~1.5 mm/s。

结合试验现象综合分析可知：粒子流速累计频率依照其累计频率占比大小可大致区分出 3 个阶段：当流速小于 0.1 mm/s 的示踪粒子占比高于 50% 时，试样基本处于稳定阶段；当低流速粒子累计频率占比较高（占比约 95%），但多数示踪粒子流速处于 0.1~1.5 mm/s 时，试样基本已进入局部破坏阶段；当突破某一水力梯度时，高流速粒子累计频率占比出现明显提升（增幅高于 200%），可知此时初始细颗粒含量对于示踪粒子流速的影响已显著降低，示踪粒子流速随水力梯度加速提升，试样或已发生整体破坏，渗漏通道已贯通。

将各组试样各水力梯度下得到的流速数据进行加权平均，得到各组渗漏频率曲线下所对应的实测平均流速，如表 2 所示。

表 2 实测平均流速

Table 2 Measured average flow rates 单位：mm/s

水力梯度	R10	R20	R30
0.10	0.25	0.18	0.13
0.20	0.53	0.41	0.31
0.30	0.77	0.74	0.52

由表 2 分析可知：初始细颗粒含量不变的情况下，示踪粒子实测平均流速将随水力梯度增加而增加，且增幅显著上升。同一水力梯度下，示踪粒子实测平均流速将随着初始细颗粒含量值的增加而降低；且随着初始细颗粒含量的提高，示踪粒子实测平均流速增幅明显降低。

## 2.2 初始细颗粒含量对临界水力梯度的影响规律分析

整理获得的不同水力梯度下的示踪粒子实测渗流频率数据, 采用加权平均法获得各组数据下对应实测平均流速, 进而得到各水力梯度与其对应实测平均流速之间的关系。由观测图像分析可知, R10, R20 试验组具有明显的局部破坏现象及整体破坏现象, R30 试验组无整体破坏现象。因此渗流侵蚀过程可大致分为稳定阶段、局部破坏阶段、整体破坏阶段 3 个阶段。分别定义第二、三阶段初始水力梯度为局部破坏临界水力梯度  $i_{loc}$ 、整体破坏临界水力梯度  $i_{glo}$ 。图 4 反映了不同水力梯度条件下的实测平均流速变化以及不同初始细颗粒含量下的临界水力梯度变化。

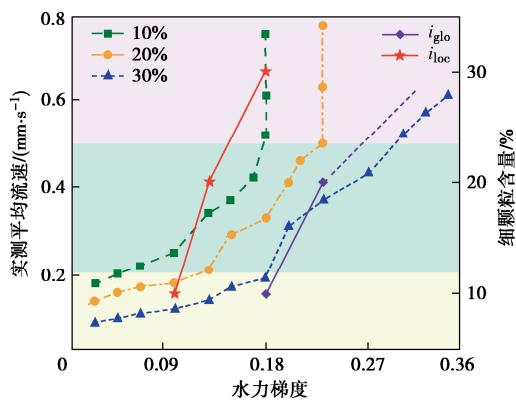


图 4 水力梯度变化规律图

Fig. 4 Variation laws of hydraulic gradient

根据关系曲线变化特征, 可将关系曲线依照变化速率大致分为逐次递增的 3 个阶段, 这与观测图像所分离出的阶段数相同。由 2.1 节中分析可得, 示踪粒子不同阶段渗流状态与其速度变化具有较为明显对应关系, 故 3 个阶段可进行依次对应。

分析图 4 中水力梯度与渗流速度关系曲线可知: 不同初始细颗粒含量下, 实测平均流速变化曲线均呈现先缓后陡的变化趋势。截取关系曲线前半段进行分析: 3 组试验均存在明显局部破坏临界水力梯度, 且局部破坏临界水力梯度随着初始细颗粒含量的上升而不断增大(如  $i_{loc}$  曲线所示); 同时其发生局部破坏时对应示踪粒子实测平均流速具有明显的下降趋势。对其后半段进行分析: R10, R20 试验组出现明显水力梯度不变而实测平均流速仍不断上升的变化趋势, 结合现象可知两组试验均已发生整体破坏。两组试样整体破坏临界水力梯度分别为 0.18, 0.23, 整体破坏临界水力梯度随初始细颗粒含量的上升而增大, 对比可知整体破坏临界水力梯度变化规律与局部破坏临界水力梯度变化规律相似(如  $i_{glo}$  曲线所示)。R30 试验组在发生局部破坏后直至最大水力梯度值, 示踪粒子实

测平均流速始终未出现明显陡增现象, 故可基本认为 R30 试验组在提供水力梯度范围内始终不存在整体破坏临界梯度(为更好完善  $i_{glo}$  曲线, 曲线后半段以短点线以表示可能发展趋势, 趋势斜率同局部破坏阶段线性拟合斜率保持一致)。

为进一步分析各试验组在局部破坏阶段中的变化规律特性, 分别截取图 4 中 R10, R20, R30 试验组在局部破坏阶段内的所有数据点进行绘图分析(R30 试验组截取图 4 中水力梯度小于 0.35 的数据点, 其局部点拟合斜率与整体斜率匹配度最高)。如图 5 所示, 对截取的数据点分别进行线性拟合分析, 从左至右直线依次指代 10%, 20%, 30% 初始细颗粒含量下的拟合线, 拟合斜率记为  $k$ ,  $R^2$  为相关系数(下标 g, y, b 分别指代 10%, 20%, 30% 试验组对应拟合参数)。

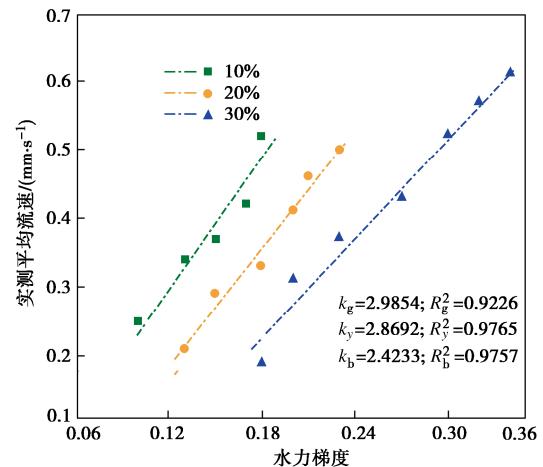


图 5 发展阶段线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of development stage

由图 5 分析可知: 对于具有整体破坏临界水力梯度的 R10, R20 试验组, 其初始细颗粒含量越高, 所对应局部破坏阶段的水力梯度与实测平均流速关系线性相关指数越高, 如  $R_y^2=0.9765 > R_g^2=0.9226$ ; 同时其局部破坏阶段整体变化率具有极高相似度, 拟合斜率均值  $\bar{k}=2.9273$ , 偏差率仅为 2%, 故可知渗流侵蚀的局部破坏阶段具有普遍相似性。对于几乎不存在整体破坏临界水力梯度的 R30 试验组, 其局部破坏阶段整体变化幅度相较于 R10, R20 试验组显著变缓, 拟合斜率  $k_b=2.4233$  低于前两组试验斜率均值  $\bar{k}=2.9273$ 。当初始细颗粒含量高于 20% 时, 线性相关性指数高于 0.97, 上下浮动小于 0.005。

## 3 细颗粒运移规律影响机制分析

渗流侵蚀的发生使得渗漏通道周围土体的结构破坏, 结构破坏的主要表现为堆积于骨架周围的颗粒发生错动或脱离, 从而使得整体结构稳定性的降低, 并

随着时间推移，最终骨架结构发生崩塌。图 6 分别展示了 R10, R20, R30 试验组在 0.30 水力梯度作用下渗透侵蚀前 (-F)、后 (-B) 的 3 组稳定观测图像。

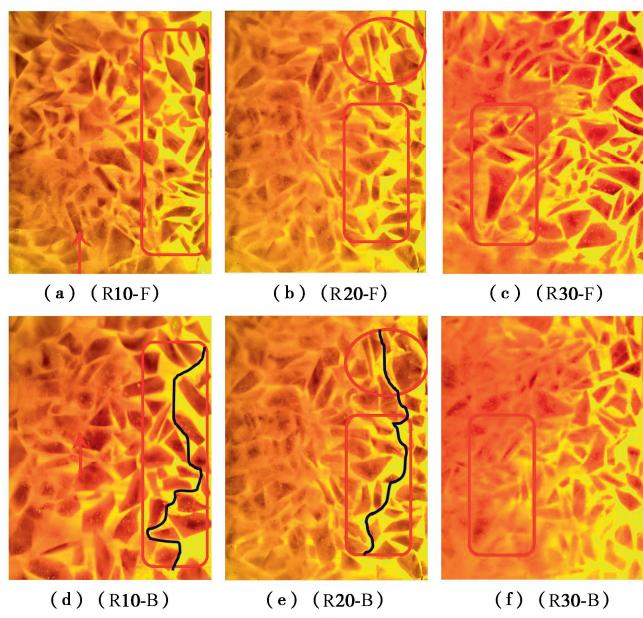


图 6 渗透前后对比图

Fig. 6 Comparison between before and after permeation

如图 6 (a), (d) 所示：当初始细颗粒含量为 10% 时，试样中的细颗粒不足以较为均匀的分布于骨架间隙中（如图 6 (a) 中箭头所指区域，大部分细颗粒堆积于试样底部，使得上部孔隙空间偏大）。水力梯度作用下图像左侧细颗粒逐步向上运移，受骨架颗粒限制，产生局部的堆积（如图 6 (d) 中箭头所指区域）；图像右侧已形成明显的优势渗漏通道，（如图 6 (d) 中黑色曲线所示），右侧区域内细颗粒几乎全部流失，骨架结构出现明显的局部重组现象（对比两图方框区域中部区域）。如图 6 (b), (e) 所示：当初始细颗粒含量为 20% 时，试样内细颗粒分布更为均匀。水力梯度作用下图像右下侧细颗粒逐步沿孔隙运移（由两图中所示方框区域逐步运至圆形区域），图像右侧出现较为明显的优势渗流路径（如图 6 (e) 中黑色曲线所示）；图像左侧细颗粒分布变化不明显。如图 6 (c), (f) 所示：当初始细颗粒含量为 30% 时，骨架颗粒间的孔隙填充更为紧密（如图 6 (c) 所示，水力梯度作用前几乎没有明显欠填充的区域）。水力梯度作用下整体细颗粒分布状态未发生明显变化，仅局部区域出现细颗粒的轻微脱离并低速运移（如两图中方框区域所示，细颗粒的局部运移使得图像中的骨架颗粒观测视线受到一定程度的遮挡）；右下虽出现高亮区域，但骨架颗粒间接接触紧密，未出现渗漏通道，故可知试样处于整体稳定状态。

图 7 展现了 R20 试验组在 0.30 水力梯度作用下的细观对比图，图 7 (a) 为渗透侵蚀前颗粒的依附于骨

架颗粒的初始图像，图 7 (b) 为渗透侵蚀后细颗粒脱离骨架颗粒表面时的细观图像。对比图 7 (a), (b) 可知，熔融石英骨架颗粒与示踪粒子显色效果明显，使得观测效果良好。观察渗透侵蚀前后细观对比图像，受水力梯度作用，外侧细颗粒将首先脱离骨架颗粒表面成为游离细颗粒，进而在水力梯度作用下进行孔隙空间中的运移（如图 7 (b) 中 B, C 区中箭头所指点位）。

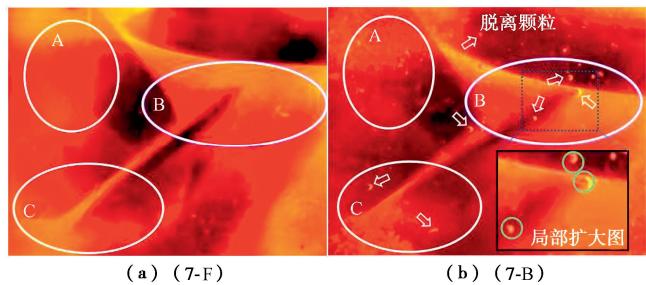


图 7 细观对比图

Fig. 7 Detail comparison

结合图 3~5 进行分析：当初始细颗粒含量较低时，试样孔隙空间处于未被完全填满的状态且颗粒间的连接较为松散，此时对该试样施加较低的水力梯度即可使得试样快速出现局部破坏现象；进一步提升水力梯度，细颗粒将随优势渗流路径不断运移、流失，最终形成显著的渗漏通道，造成试样的整体破坏。渗透侵蚀破坏后，水力梯度不变而流速仍出现急剧变化现象的原因主要为渗漏通道出口出现空洞现象，此现象的发生使得渗流路径缩短，从而使得实际水力梯度增大；同时水力梯度的上升将使得渗漏通道末端渗流具备更强侵蚀能力，促使空洞直径的扩大。空洞的扩张以及实际水力梯度的上升将协同促进渗透侵蚀破坏进展（骨架坍塌前，细颗粒在优势渗流路径上的运移几乎不受限制）。当初始细颗粒含量较高时，试样孔隙空间几乎处于封闭状态且颗粒间接触更为紧密，此时即使对该试样施加较高水力梯度也仅能使得少量细颗粒在局部空间低速运移，使得该试样仅存在局部破坏现象，主要原因因为试样孔隙空间几乎被细颗粒填满，流动空间狭窄且颗粒间相互作用力更强，故细颗粒的脱离、运移更为困难。

综合分析可知：初始细颗粒含量的增加将极大的抑制渗透侵蚀破坏的形成与发展。细颗粒含量的上升产生的主要影响有：①颗粒的可流动空间面积减小；②细颗粒之间的接触更为紧密，即颗粒间的固锁作用更强，两个影响之间的相互协同作用将极大程度限制渗透侵蚀发展进程。

## 4 结 论

本文主要关注渗透侵蚀过程中初始细颗粒含量这一重要因素对于流速及临界水力梯度的影响问题。基

于透明土技术, 结合自研 PIV/PLIF 渗流侵蚀试验系统, 对不同初始细颗粒含量下的试样进行了渗流侵蚀试验。试验过程中, 获取了不同水力梯度下的渗流频率分布图像及渗流侵蚀各阶段关键水力梯度参数。得到3点结论。

(1) 同水力梯度下, 初始细颗粒含量越高, 实测平均流速值越低。局部破坏阶段实测平均流速增幅随初始细颗粒含量的增加而降低。当初始细颗粒含量不高于20%时, 均存在高流速粒子累计频率大规模上升现象, 显现时间随初始细颗粒含量升高而延后, 整体破坏后实测平均流速具有稳定性。当初始细颗粒含量为30%时, 0.30水力梯度作用下, 流速低于0.1 mm/s的示踪粒子累计频率具有明显降低。

(2) 局部破坏临界水力梯度、整体破坏临界水力梯度均随初始细颗粒含量的增加而上升。针对初始细颗粒含量不高于30%的渗流侵蚀试样, 均存在局部破坏临界水力梯度。针对初始细颗粒含量不高于20%的渗流侵蚀试样, 其同时存在整体破坏临界水力梯度; 当初始细颗粒含量达30%时, 试样几乎不具备整体破坏可能。

(3) 初始细颗粒含量的上升将增强颗粒之间固锁作用以及加剧孔隙流动空间的收缩, 两种作用因素的正向、协同发展将极大程度抑制渗流侵蚀破坏的形成与发展, 加强试样的结构稳定。

## 参考文献:

- [1] 刘杰. 土的渗透破坏及控制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (LIU Jie. Piping and Seepage Control of Soil[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 梁越, 陈建生, 陈亮, 等. 双层堤基管涌发生发展的试验模拟与分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 624-629. (LIANG Yue, CHEN Jiansheng, CHEN Liang, et al. Laboratory tests and analysis on piping in two-stratum dike foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 624-629. (in Chinese))
- [3] 张亮亮, 邓刚, 陈锐, 等. 不连续级配无黏性土渗蚀演变特征研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1412-1420. (ZHANG Liangliang, DENG Gang, CHEN Rui, et al. Experimental investigation on evolution process of suffusion in gap-graded cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1412-1420. (in Chinese))
- [4] 陈亮, 张哲, 陈成, 等. 不同细颗粒含量土体管涌三轴试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 1-4, 37. (CHEN Liang, ZHANG Zhe, CHEN Cheng, et al. Research on piping and triaxial test in soils with different fine particle content[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 36(2): 1-4, 37. (in Chinese))
- [5] 宋宜祥, 管景华, 李彦奇, 等. 反粒序砂土体内侵蚀及渗流特性变化规律试验研究[J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 16-27. (SONG Yixiang, GUAN Jinghua, LI Yanqi, et al. Experimental study on the change law of internal erosion and seepage characteristics of inverse grading sand accumulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 16-27. (in Chinese))
- [6] 李涛, 赵洪扬, 翁勃航, 等. 细颗粒形状和含量对钙质混合砂强度的影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(7): 1517-1525. (LI Tao, ZHAO Hongyang, WENG Bohang, et al. Experimental study on effects of shape and content of fine particles on strength of calcareous mixed sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7): 1517-1525. (in Chinese))
- [7] 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 Jie, XIE Dingsong, CUI Yihao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1188-1191. (in Chinese))
- [8] 唐凯, 郭丹, 沈才华, 等. 细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和细观机理[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 46-51. (TANG Kai, GUO Dan, SHEN Caihua, et al. Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 46-51. (in Chinese))
- [9] 吴杨, 崔杰, 廖静容, 等. 不同细颗粒含量甲烷水合物沉积物三轴剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 156-164. (WU Yang, CUI Jie, LIAO Jingrong, et al. Experimental study on mechanical characteristics of gas hydrate-bearing sands containing different fines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 156-164. (in Chinese))
- [10] 张延杰, 何萌, 宋萌, 等. 富水砂卵石地层力学特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1739-1747. (ZHANG Yanjie, HE Meng, SONG Meng, et al. Study on mechanical properties of water-rich sandy pebble soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(6): 1739-1747. (in Chinese))

- [11] JIANG X G, WÖRMAN A, CHEN X Q, et al. Internal erosion of debris-flow deposits triggered by seepage[J]. Engineering Geology, 2023, **314**: 107015-107026.
- [12] RUTTITHIVAPHANICH P, SASANAKUL I. Centrifuge modeling of fines content influence on liquefaction behaviors of loose gravelly soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, **149**(3): 04023008.
- [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] LIANG Y, YEH T C J, WANG J J, et al. Onset of suffusion in upward seepage under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019, **23**(12): 1520-1534.
- [15] 梁 越, 龚胜勇, 杨咏梅, 等. 间断级配散粒土侵蚀过程及强度演变机理研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(3): 632-639. (LIANG Yue, GONG Shengyong, YANG Yongmei, et al. Erosion process and strength evolution mechanism of gap-graded cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(3): 632-639. (in Chinese))
- [16] ISKANDER M G, LAI J, OSWALD C J, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(4): 425-433.
- [17] 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))
- [18] XU Z J, GUO Z X. Experimental study on bearing characteristics and soil deformation of necking pile with cap using transparent soils technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, **2021**(1): 1-11.
- [19] 梁 越, 陈鹏飞, 林加定, 等. 基于透明土技术的多孔介质孔隙流动特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1361-1366. (LIANG Yue, CHEN Pengfei, LIN Jiading, et al. Pore flow characteristics of porous media based on transparent soil technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1361-1366. (in Chinese))
- [20] 张海彬, 罗玉龙, 谷敬云, 等. 初始细颗粒含量对内部不稳定土体潜蚀机制影响的可视化试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, **40**(4): 137-140. (ZHANG Haibin, LUO Yulong, GU Jingyun, et al. Visualized experimental study on effect of initial fine particle content on suffusion mechanism of internal unstable soil[J]. Water Resources and Power, 2022, **40**(4): 137-140. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 孔纲强, 李 辉, 王忠涛, 等. 透明砂土与天然砂土动力特性对比[J]. 岩土力学, 2018, **39**(6): 1935-1941, 1947. (KONG Gangqiang, LI Hui, WANG Zhongtao, et al. Comparison of dynamic properties between transparent sand and natural sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(6): 1935-1941, 1947. (in Chinese))
- [23] 冷先伦, 王 川, 庞 荣, 等. 透明胶结土材料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(8): 2059-2068, 2077. (LENG Xianlun, WANG Chuan, PANG Rong, et al. Experimental study on the strength characteristics of a transparent cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(8): 2059-2068, 2077. (in Chinese))
- [24] 孔纲强, 孙学谨, 刘汉龙, 等. 孔隙液体对透明土渗透特性影响对比试验[J]. 水利学报, 2017, **48**(11): 1303-1310. (KONG Gangqiang, SUN Xuejin, LIU Hanlong, et al. Contrast experiments on permeability of transparent soil influenced by pore fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, **48**(11): 1303-1310. (in Chinese))