

DOI: 10.11779/CJGE20221293

# 泡沫流体抑制土体渗透破坏发生发展试验研究

王 媛<sup>1</sup>, 巩佳琨<sup>2</sup>, 邱昊天<sup>2</sup>, 邱 天<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 堤防工程是中国防洪减灾体系的重要组成部分, 管涌等渗透破坏对堤防工程安全造成重大影响。目前堤防险情处置仍主要依赖传统技术和人海战术, 险情控制能力亟待提升。提出一种基于孔隙增阻和抑制颗粒运移的泡沫流体抑制堤基土体渗透破坏新技术。为了研究泡沫流体抑制土体渗透破坏的可行性和相关机理, 研发了泡沫流体抑制土体渗透破坏试验系统, 开展了无泡沫流体试验和不同泡沫流体赋存范围条件下的泡沫流体抑制土体渗透破坏发展室内试验。结果表明, 泡沫流体可有效抑制土体渗透破坏发展, 其抑制效果受泡沫流体赋存区域的影响。泡沫流体可通过降低出砂口附近土层渗透性、抑制土层中的颗粒运移和增大流体流动阻力等机制抑制堤基渗透破坏发生发展。

**关键词:** 渗透破坏; 泡沫流体; 渗透性; 颗粒运移; 赋存区域

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)02-0366-09

作者简介: 王 媛(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事岩土体渗流与控制方面的研究工作。E-mail: wangyuanhhu@163.com。

## Experimental study on application of foam fluids in restraining seepage failure of soils

WANG Yuan<sup>1</sup>, GONG Jiakun<sup>2</sup>, QIU Haotian<sup>2</sup>, QI Tian<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Embankment project is an important part of the disaster prevention and reduction system of China. Seepage failure, such as piping is a serious challenge to the safety of the embankment project. Currently, the treatment of piping risk still relies on the traditional method and huge-crowd strategy. Foam fluids have great application potential for suppressing the occurrence and development of piping. In this study, a new technology is proposed for restraining seepage failure by the foam fluids based on their capability to increase flow resistance and adjust the seepage field of the heterogeneous embankment foundation. In order to investigate the feasibility of foam application in restraining the seepage failure of embankments and the related mechanisms, an experimental system is developed for studying foam-restraining of seepage failure. A series of experiments including the traditional piping experiments and foam-restraining experiments under various foam occurrence conditions are conducted. The results show that the foam can effectively restrain the seepage failure of embankments, and the effects are affected by the foam occurrence area. The mechanisms including reducing soil permeability, restraining soil particle migration and increasing flow resistance.

**Key words:** seepage failure; foam fluid; permeability; particle migration; occurrence area

## 0 引言

中国是世界上洪水灾害最严重的国家之一, 历史上曾多次发生重大洪水灾害。例如, 2020年长江发生流域性大洪水, 造成3417.3万人受灾, 直接经济损失超过1300亿元, 对人民群众的生命财产安全、社会经济的发展造成了重大威胁。堤防工程是中国防洪减灾体系的重要基础, 是国家水安全特别是防洪安全的重要保证。然而, 中国堤防工程建设背景和地质条件复杂, 大多历经数次加固加高, 质量隐患众多, 汛期在高水位作用下极易发生险情<sup>[1]</sup>。管涌等渗透破坏是堤

防工程的主要险情形式之一, 例如, 1998年长江全流域大洪水中, 长江中下游地区堤防发生较大险情1702处, 其中管涌872处, 占比51.2%<sup>[2]</sup>。目前全球气候变暖问题愈发严重, 极端天气灾害频发, 进一步加剧了堤防工程在汛期发生管涌等渗透破坏和溃堤的风险<sup>[3]</sup>。如何实现渗透破坏的快速控制, 是堤防工程中亟需解决的难点问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2240210, 52279098); 江苏省水利科技项目(2021075); 江苏省自然科学基金项目(BK20200525)

收稿日期: 2022-10-20

国内外学者在管涌等渗透破坏处置技术方面开展了大量研究,大致可分为非汛期渗流控制技术和汛期险情处置技术两大类。非汛期措施侧重于增强堤基抗渗透变形能力,降低堤基内水力坡降。减压井由于具有效果好、造价低等优势,在中国除险加固工程中被广泛采用。张家发等<sup>[4]</sup>对减压井运行机制进行了深入研究,Hadjt等<sup>[5]</sup>对减压井反滤层与减压排水效果进行了室内试验研究,确定了反滤层设计标准。该技术虽然综合效果良好,但也面临着长期运行过程中易发生淤堵导致排水效果降低的问题<sup>[6]</sup>。防渗墙技术也是非汛期堤防工程除险加固的主要措施之一。毛昶熙等<sup>[7]</sup>推导了适用于悬挂式防渗墙管涌发展的临界水力坡降计算公式,为防渗墙设计提供了重要指导。张家发等<sup>[8]</sup>通过砂层模型对比分析了有、无悬挂式防渗墙在管涌险情控制方面的作用,结果表明悬挂式防渗墙可显著控制险情扩展,但对渗流控制效果不显著。由于常规堤坝防渗墙存在对堤坝扰动较大,形成实际防渗效果周期长等问题,以聚氨酯为代表的有机高分子化学注浆技术受到国内外学者的广泛关注<sup>[9]</sup>。此外,近年来微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)技术<sup>[10]</sup>也被探索用于堤防渗透破坏防治,通过微生物矿化作用在岩土材料中生成碳酸盐等无机化合物增强土体整体性、减小其透水性,进而降低渗透破坏发生的风险。Rosenbrand等<sup>[11]</sup>则提出在堤基内部管涌通道处置入由粗砂和砾石构成的粗砂屏障,阻止砂颗粒流失,延缓渗透破坏发展。

汛期管涌等渗透破坏险情处置措施聚焦于在迎水面进行封堵减少水流入渗,在渗透破坏发生处导水降压,防止泥沙流失。目前管涌等渗透破坏险情应急处置方法仍以传统方法为主,险情发生后,在管涌口铺设砂砾石等透水材料进行反滤处理,设置围井进行导渗或铺设盖重、蓄水反压降低渗透水流的水力坡降,减小堤基内部发生渗透破坏的可能性<sup>[12]</sup>。传统渗透破坏险情处置措施侧重于通过降低渗透破坏通道的水力坡降和出砂口的颗粒流失稳定渗透破坏发展。堤基渗透破坏的本质是高水力坡降作用下土体内渗流诱发颗粒流失进而引起的土体破坏。通过增大堤基内孔隙渗流阻力,抑制颗粒运移,可为渗透破坏险情处置提供新思路。

泡沫流体是气体以气泡形式分散到液体中形成的分散体系,其中液体为连续相,气体为分散相(图1)。泡沫流体因其独特的微观结构和流变性被广泛应用于提高原油采收率、二氧化碳地质封存和含水层土壤修复等领域<sup>[13-15]</sup>。泡沫流体的重要特性之一是其具有“封堵”作用。当泡沫流体在岩土体等多孔介质中流动时,由于气泡的半径大小大于孔喉的半径,气泡必

须变形才能通过,气泡变形产生毛细管阻力,在孔喉处产生阻力效应(贾敏效应)。滞留在孔隙中的泡沫流体由于贾敏效应的影响,极大地增加流体流动阻力<sup>[16]</sup>,从而起到“封堵”作用。

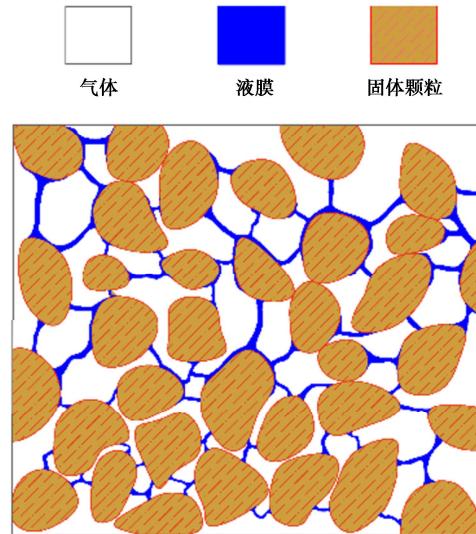


图1 泡沫流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foam fluid

泡沫流体的降渗增阻特性,特别是其优先封堵高渗透区域的“选择性封堵”特性,使得其能够在调控非均匀渗流场、抑制渗流通道产生和扩展等方面发挥重要作用,在堤防渗透破坏防控领域具有潜在的巨大应用价值。例如,可以在管涌等渗透破坏发生前在堤防土体中的薄弱地带或隐患区域注入泡沫流体延阻渗透破坏的发生;或在管涌等渗透破坏发生后,在探明的管涌口附近一定深度的土层内注入泡沫流体,抑制渗透破坏的发展(图2)。然而目前应用泡沫流体防控堤防土体渗透破坏的研究尚未见报道。本文通过开展室内模型试验,对应用泡沫流体抑制堤防渗透破坏的可行性及相应机理进行初步探索。



图2 泡沫流体抑制土体渗透破坏应用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of application of foam fluids in restraining seepage failure of soils

## 1 试验方法

### 1.1 土体渗透破坏试验模型

本文试验在自主研发的泡沫流体抑制堤基土体渗透破坏试验系统中开展。该试验系统包括水头控制系统

统、泡沫流体注入系统、砂槽渗透主体和计算机分析系统,如图3所示。

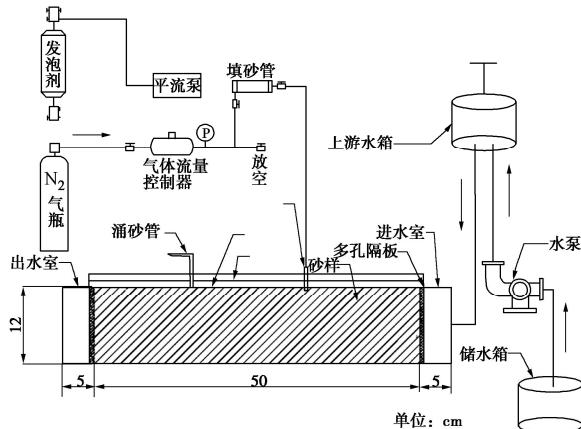


图3 试验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

为了尽可能地对试验过程进行观测,减小测压管等对土体的扰动,在本初始研究中采用小比尺模型,渗透主体长50 cm,宽4 cm,高12 cm,砂槽模型由透明有机玻璃制成。模型的宽度对渗透破坏发展过程的影响主要体现在渗透破坏通道的形态方面,对渗透破坏整体发展影响较小<sup>[17]</sup>。模型两侧分别为进水室和出水室,在填装试样的砂槽与进水室中间设置一块多孔隔板以使水流均匀流入试样内,另外多孔隔板与试样接触面处设置一层土工滤网,以防止砂颗粒通过多孔隔板流入进(出)水室。砂槽顶面为透明有机玻璃盖板,玻璃盖板与砂样之间为硅胶垫层,试验时通过在模型边壁涂抹凡士林并用螺栓固定拧紧密封防渗。在玻璃盖板上距离进水室35 cm处预设直径5 mm的出水口,模拟上覆层被冲破后形成的出砂口,出砂口通过导管连接量筒和天平以测定涌水流量和涌砂量。在距离预设出砂口距离为5, 10, 15 cm处分别预设3个泡沫流体注入孔。砂槽模型侧面布设4排,每排8根测压管,每根测压管从侧面深入试样2 mm,顶部测压管距离上部玻璃盖板5 mm,测压管读数及上游水头均以模型槽顶面为零势面。本试验系统通过气体流量控制器和液体平流泵分别将气体和溶液定量注入填砂管中以生成泡沫流体,随后将预制泡沫流体注入砂槽模型中。试验中通过高清摄像装置实时记录模型顶面和侧面的试验现象。

## 1.2 试验材料

作为初始研究,本文中的试验采用连续级配砂样,颗粒级配如图4所示。试验砂样选用0.075~1 mm中国ISO标准砂,根据《土工试验方法标准:GB/T 50123—2019》测得试样相对质量密度为2.67,渗透系数为 $1.8 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (表1)。多孔介质中泡沫流体性质受到多孔介质渗透率、表面活性剂种类和浓度、气体种类、

盐度等多种因素影响<sup>[18-19]</sup>,本初始研究暂不考虑泡沫流体性质的影响,采用常用气体和表面活性剂开展试验。用于制备泡沫流体的气体和液体分别为高纯度(99.999%)氮气,由质量百分数为3%的氯化钠(NaCl)溶液和烯基磺酸钠(AOS)表面活性剂配制的质量百分数为0.5%的表面活性剂溶液。氮气与表面活性剂溶液以表观总流量2 mL/min按照一定气液比(气体流量占总流量比值)注入泡沫发生装置生成泡沫流体。泡沫流体的强度可通过其表观黏度表征。图5展示了氮气与表面活性剂溶液以表观总流量2 mL/min注入试验砂样中生成的稳态泡沫流体的表观黏度随气液比的变化。图中的虚线为对试验数据点进行最小二乘法拟合得到的拟合曲线。如图5所示,泡沫流体的表观黏度随着气液比的增大呈现先增大后减小的趋势,在气液比约0.9时达到峰值。本试验采用的气液比约为0.8,此时泡沫流体强度接近该试验条件下的最大泡沫流体强度。

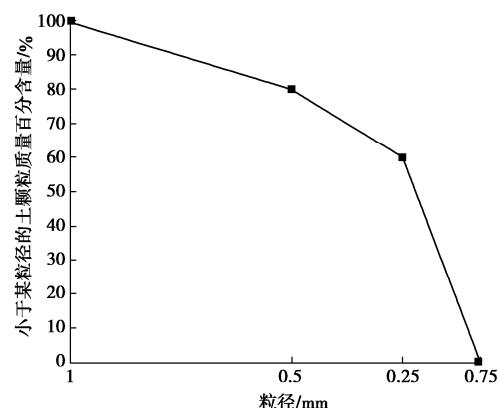


图4 试样级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curve of materials

表1 试验砂样的物理性质

Table 1 Physical properties of sand samples

$d_{60}/\text{mm}$	$d_{20}/\text{mm}$	干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对质量密度	渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
0.25	0.13	1.51	2.67	$1.8 \times 10^{-3}$

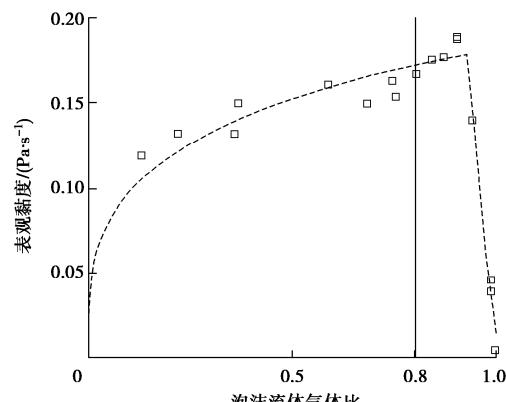


图5 泡沫强度曲线图

Fig. 5 Curves of foam strength

### 1.3 试验方案

本文开展两类试验: 无泡沫流体注入的土体渗透破坏试验和泡沫流体抑制土体渗透破坏发展试验。其中, 泡沫流体抑制土体渗透破坏试验步骤如下:

(1) 砂槽模型装样并饱和。按照预设级配配制试验砂样并充分拌和, 依据预设的密实度水下分层填筑, 每层厚度约为 2 cm, 保证填筑砂层的均匀性, 击实至预定密实度后填筑下一层, 直至设计高度。抹平压实后依次放置硅胶垫层和盖板, 用螺栓固定拧紧, 饱和砂样 24 h 以上<sup>[20-22]</sup>。

(2) 泡沫流体制备及注入。按照预设气液比与流速将氮气与表面活性剂溶液注入泡沫发生器预生成泡沫, 待泡沫流体达到动态稳定状态后(压力曲线稳定), 将一定量的预制泡沫流体通过选定的泡沫注入孔注入砂槽模型, 观察并记录泡沫流体在砂样中的扩散过程。

(3) 渗透破坏试验。打开预设出砂口开始渗透破坏试验, 逐级提升上游水头(水力坡降随之提升), 每 10 min 提升一级水头(1 cm), 待渗流稳定后进行下一级水头试验。判断渗流稳定的标准为: 多次测量渗流量基本稳定, 出砂口附近无明显砂粒移动且涌砂管无砂粒涌出、水流清澈。试验开始后记录每级水头下相应的涌水量、涌砂量, 并记录土样顶面的渗透破坏区域上溯过程及泡沫流体赋存范围变化。

(4) 每组试验结束之后清洗砂样并烘干, 试验装置复位。

无泡沫流体注入的渗透破坏试验, 依据上述步骤

(1), (3), (4) 开展。

### 1.4 渗透破坏判别

在某级水头下, 出砂口出现砂颗粒涌出或砂沸, 该级水头记作渗透破坏启动水头<sup>[23]</sup>, 对应的上游进水室到出砂口间的水力坡降记为渗透破坏启动水力坡降。

在某级水头下, 渗流无法达到稳定状态, 渗透破坏区域不断上溯发展直至与上游进水室贯通, 该级水头记为渗透破坏临界水头<sup>[24]</sup>, 对应的上游进水室到出砂口间的水力坡降记为渗透破坏临界水力坡降。

## 2 试验过程

为了研究渗流作用下土体中的渗透破坏过程以及泡沫流体对土体渗透破坏的抑制效果及机理, 采用泡沫流体抑制堤基土体渗透破坏试验系统, 对土样进行不同工况条件下的渗透破坏试验(包括无泡沫流体注入的渗透破坏试验、不同泡沫流体赋存区域和注入位置条件下的渗透破坏试验), 实时监测并记录试验结果。

### 2.1 无泡沫流体注入渗透破坏试验

无泡沫流体注入的渗透破坏发展与此前学者们开

展的类似试验现象相似<sup>[25]</sup>, 主要经历以下 3 个阶段:

(1) 试验初期, 出砂口水流清澈, 流量随水力坡降的提升而增大, 大致呈线性关系, 无砂沸现象。

(2) 当水力坡降提升至 0.29 时, 出砂口出现砂沸。继续逐步提升水力坡降至 0.69 的过程中, 出砂口涌砂量较小, 未观察到明显渗透破坏区域发展。当水力坡降提升至 0.71 时, 试样顶面出现明显渗透破坏区域(图 6 中的红色轮廓线围绕区域)。保持水力坡降不变, 出砂口涌砂量逐渐减少直至停止, 渗透破坏区域也随之停止发展。当水力坡降继续提升时, 渗透破坏区域重新上溯发展, 并且出现横向扩展。至水力坡降提升至渗透破坏临界水力坡降前, 渗透破坏区域在每级水力坡降下最终均能稳定, 停止发展(图 5)。

(3) 直至水力坡降提升至 1.17 时, 渗透破坏区域持续向上游发展, 直至与进水室贯通, 达到渗透破坏临界水力坡降。

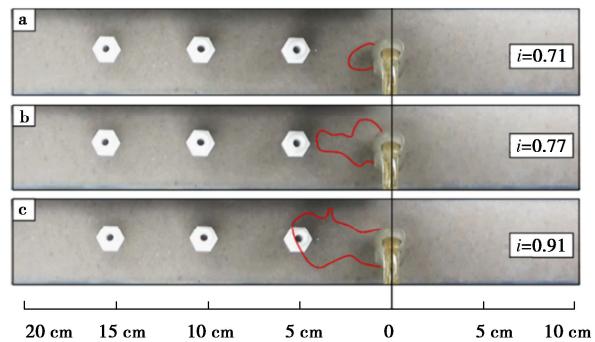


图 6 无泡沫流体试验渗透破坏区域随水力坡降提升演化过程

Fig. 6 Evolution of seepage failure area without foam fluids with hydraulic gradient

### 2.2 不同赋存区域泡沫流体抑制渗透破坏试验

在无泡沫流体注入试验的基础之上开展 2 组试验, 选取距出砂口 5 cm 处的泡沫流体注入孔分别注入不同量的泡沫流体(注入时长 40, 90 min), 分别代表 2 种典型泡沫流体赋存区域(图 7 中红色虚线内的浅色区域): 前者, 泡沫流体仅存在于出砂口上游; 后者, 泡沫流体同时赋存于出砂口上游和下方。

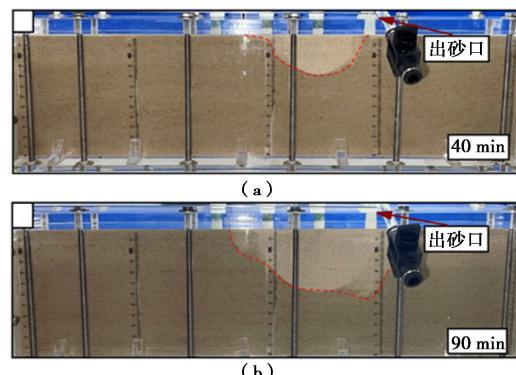


图 7 泡沫流体赋存范围对比

Fig. 7 Comparison of foam occurrence areas

在泡沫流体覆盖出砂口上游（注入时长 40 min）的试验中，当水力坡降为 0.11 时，出砂口开始有水流出现；当水力坡降提升至 0.29 时，出砂口出现砂沸现象；继续提升水力坡降至 0.63 时，出砂口周围出现明显侵蚀，观察到渗透破坏区域发展；当水力坡降升至 0.71 时，渗透破坏区域与泡沫赋存区域发生接触，出砂口流量出现明显下降，渗透破坏区域停止上溯发展，出砂口无涌砂，此情况持续至水力坡降 1.34；当水力坡降提升至 1.37 时，渗透破坏区域迅速发展，并贯通至进水室。

泡沫流体覆盖出砂口上游和下方（注入时长 90 min）的试验现象与前者明显不同。试验前期，当水力坡降小于 0.8 时，出砂口未出现涌水及砂沸现象；继续提升水力坡降，出砂口开始有气泡涌出并缓慢出现渗水；继续匀步提升水头高度，出砂口仅轻微涌水，流量随水头升高而缓慢增大，但仍未出现砂沸以及砂颗粒涌出现象；直至水力坡降提升至 1.86 时，出砂口突然出现大量气泡以及砂颗粒涌出，短时间内出砂口流量迅速上升，试样顶面发生渗透破坏并迅速贯通至上游进水室。

### 2.3 不同注入位置泡沫流体抑制渗透破坏试验

本组试验通过调整注入孔位置研究泡沫流体注入位置对渗透破坏发展的影响机制，泡沫流体注入量（注入 40 min）和气液比（0.8）保持一致。泡沫流体通过距离出砂口距离分别为 5, 10, 15 cm 的注入孔注入砂槽模型，其赋存区域距离出砂口位置随注入孔的不同而变化（图 8）。

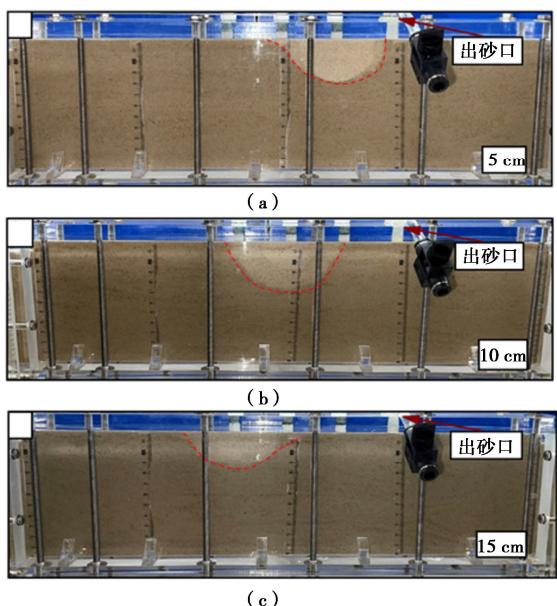


图 8 不同注入位置的泡沫流体赋存区域

Fig. 8 Foam occurrence areas at different injection locations

在泡沫流体通过距出砂口 10 cm 的注入孔注入砂

样的试验中，出砂口在水力坡降为 0.26 时开始出现砂沸；水力坡降提升至 0.6 时渗透破坏区域上溯约 1.5 cm 后停止发展，直至水力坡降提升至 0.69 时渗透破坏区域再次开始上溯并随着水力坡降的提升缓慢发展；当渗透破坏区域发展至泡沫赋存区域边缘时，渗透破坏区域停止上溯；继续提升水力坡降至 1.03，渗透破坏区域突破泡沫流体前缘继续发展，但上溯发展速度缓慢；直至水力坡降提升至 1.23 时，渗透破坏区域持续快速发展并贯通至进水室，达到渗透破坏临界水力坡降。

在泡沫流体通过距出砂口 15 cm 的注入孔注入砂样的试验中，水力坡降为 0.2 时出砂口出现砂沸；随着水力坡降的提升，出砂口间歇性涌出气泡与砂颗粒；当水力坡降提升至 0.54 时，出砂口出现明显侵蚀；当梯度提升至 1.00 时，渗透破坏区域上溯发展至泡沫赋存区前端，随即突破泡沫区前沿继续上溯；当水力坡降提升至 1.11 时，渗透破坏区域持续发展至进水室。

## 3 泡沫流体抑制渗透破坏发展机制分析

下面结合试验现象、出砂口涌水涌砂量变化规律和渗透破坏区域发展过程对泡沫流体抑制渗透破坏发展机制进行分析。

### 3.1 泡沫流体对渗透破坏启动水力坡降的影响

泡沫流体可抑制砂颗粒运移，提高渗透破坏启动水力坡降。图 9 对比了不同试验条件下出砂口累计涌砂量随水力坡降的变化。当泡沫流体覆盖出砂口上游区域时，发生砂沸时的水力坡降高于无泡沫流体对照试验，出砂口上游的泡沫流体一定程度上延缓了砂沸，提升了渗透破坏启动水力坡降。但是，水力坡降达到破坏临界梯度时的累积涌砂量与对照试验几乎相同。对照试验中累计涌砂量在渗透破坏开始发生后（水力坡降 0.69）随水力坡降的升高而逐渐增多，而在泡沫流体赋存于出砂口上游区域的试验中，涌砂量在水力坡降提升至 0.71 后不再增大，直至水力坡降达到渗透破坏临界水力坡降。当泡沫流体覆盖出砂口下方土层时，出砂口始终未出现砂沸和砂颗粒运移，直至水力坡降达到渗透破坏临界梯度。泡沫流体不仅大幅提升了渗透破坏临界水力坡降，并且将渗透破坏启动水力坡降提升至接近于渗透破坏临界水力坡降。渗透破坏启动水力坡降接近渗透破坏临界水力坡降从侧面说明了出砂口上游区域的泡沫流体抑制砂颗粒运移的能力弱于赋存于出砂口下方的泡沫流体。其可能原因是出砂口上游的泡沫流体部分存在于试样与顶面硅胶垫之间的缝隙中，其抑制砂颗粒运移的能力弱于多孔介质中的泡沫流体。若试样上覆黏土层，出砂口上游区域的泡沫流体抑制砂颗粒的能力将更强，进一步提升渗

透破坏临界水力坡降。

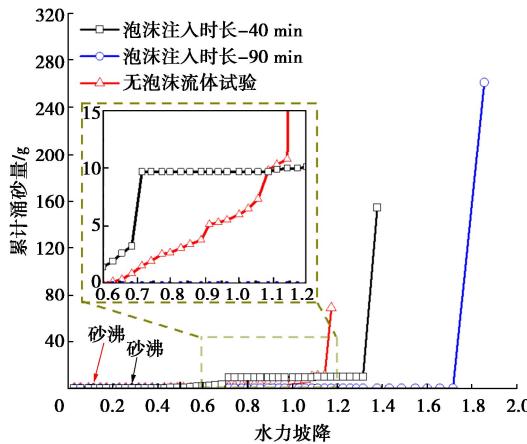


图9 累计涌砂量随水力坡降变化曲线

Fig. 9 Variation of cumulative amount of sand boiling with hydraulic gradient

### 3.2 泡沫流体对渗透破坏区域发展的影响

泡沫流体可抑制渗透破坏区域的上溯发展。图10展示了泡沫流体赋存于出砂口上游区域试验中渗透破坏区域的发展过程，其中红色实线为渗透破坏侵蚀区域边界，蓝色虚线为泡沫流体赋存区域边界。当水力坡降提升至0.71时，渗透破坏区域前缘发展至泡沫流体赋存区域边缘，随后停止上溯发展，直至水力坡降提升至1.34，这与出砂口涌砂量变化规律一致(图9)。当泡沫流体同时覆盖出砂口上游区域和出砂口时泡沫流体抑制渗透破坏区域发展效果更为显著，在水力坡降达到渗透破坏临界水力坡降前甚至无法观察到渗透破坏区域。因此，泡沫流体可增大流体渗流阻力，有效抑制渗透破坏发展。

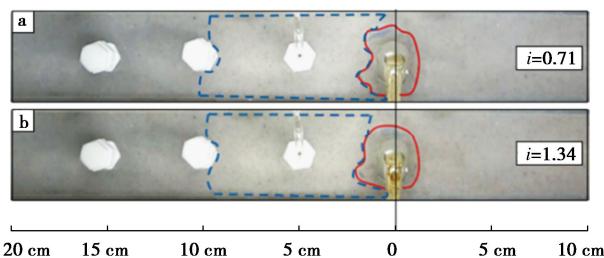


图10 泡沫区阻挡渗透破坏区域发展

Fig. 10 Development of seepage failure area stopped by foam area

### 3.3 泡沫流体对出砂口流量的影响

出砂口附近的泡沫流体可极大地降低出砂口流量。如图11所示，在对照试验中，出砂口流量随水力坡降升高而增大，最终达到约60 mL/min。当泡沫流体仅覆盖出砂口上游区域时，流量起初随水力坡降的升高而增大，当水力坡降达到0.71时，出砂口流量骤降，随后维持较小流量(低于10 mL/min)直至水力

坡降达到渗透破坏临界水力坡降。其主要原因是：在0.71水力坡降作用下，渗透破坏区域前缘发展至泡沫流体赋存区域边缘，泡沫流体降低了其赋存区域土体的渗透性，进而降低出砂口流量。当泡沫流体同时覆盖出砂口上游区域和下方时，直至水力坡降提升至0.8时才观察到出砂口有水缓慢流出，并随着水力坡降的提升缓慢变化，最大值仅为约1 mL/min，远低于相同水力坡降时对照试验中的出砂口流量。其可能原因为泡沫流体大幅降低了出砂口下方土体的渗透性。由此可见，泡沫流体可降低其赋存区域内的土体渗透性，进而降低出砂口流量。

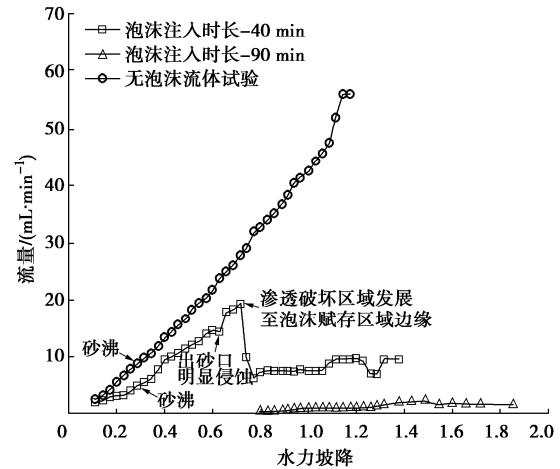


图11 出砂口流量随水力坡降变化曲线

Fig. 11 Flow rates at various hydraulic gradients

### 3.4 泡沫流体对渗透破坏临界水力坡降的影响

泡沫流体可有效提升渗透破坏临界水力坡降。如图12所示，在无泡沫流体渗透破坏对照试验中渗透破坏区域长度随水力坡降的提升而增长，与倪小东等<sup>[23]</sup>研究结果一致，渗透破坏临界水力坡降约为1.17。当泡沫流体仅赋存于出砂口上游区域时，试样在水力坡降提升至0.69前发生稳定渗流，与渗透破坏对照试验类似，出砂口上游的泡沫流体对渗透破坏的发生影响不大。然而，渗透破坏区域在0.71的水力坡降作用下发展至距出砂口约2 cm处，随后不再随水力坡降的提升而继续发展，直至水力坡降提升至1.37时短时间内发生贯通破坏，此条件下的渗透破坏临界水力坡降为1.37。当泡沫流体覆盖出砂口上游区域和下方时，试验现象与无泡沫流体的对照试验和泡沫流体仅覆盖出砂口上游的试验均显著不同。在水力坡降提升至1.86前，试样中未观察到渗透破坏；当水力坡降提升至1.86时，出砂口附近出现渗透破坏，且破坏区域迅速从出砂口贯通至进水室。该水力坡降(1.86)即为渗透破坏临界水力坡降，约为无泡沫流体试验中破坏临界水力坡降的1.5倍。因此，泡沫流体可有效提升渗透破

坏临界水力坡降，特别是当泡沫流体赋存于出砂口下方时效果最为显著。

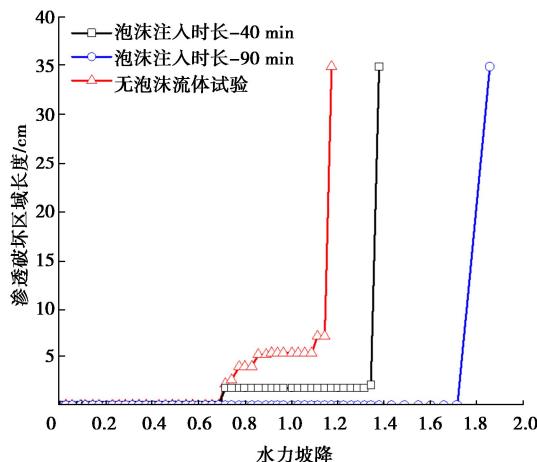


图 12 渗透破坏区域长度随水力坡降变化曲线

Fig. 12 Seepage failure areas at various hydraulic gradients

### 3.5 泡沫流体注入位置对渗透破坏抑制效果的影响

如图 13 所示，当相同量的泡沫流体分别通过距离出砂口 5, 10, 15 cm 的注入孔注入砂样时，渗透破坏临界水力坡降分别为 1.37, 1.23, 1.11，渗透破坏临界水力坡降随着泡沫注入位置远离预设出砂口而降低，渗透破坏启动水力坡降亦从 0.29 降低至 0.2，预示着当泡沫流体注入量相同时，泡沫流体抑制渗透破坏发展效果随着注入位置远离出砂口而减弱。分析其部分原因是：随着泡沫流体赋存区域远离出砂口，当渗透破坏区域发展至泡沫赋存区域边缘时，渗透破坏区域尖端的水力坡降更大<sup>[26]</sup>，且泡沫流体在水流冲刷下部分流失，使得泡沫流体赋存区域更易被突破，堵水作用减弱。

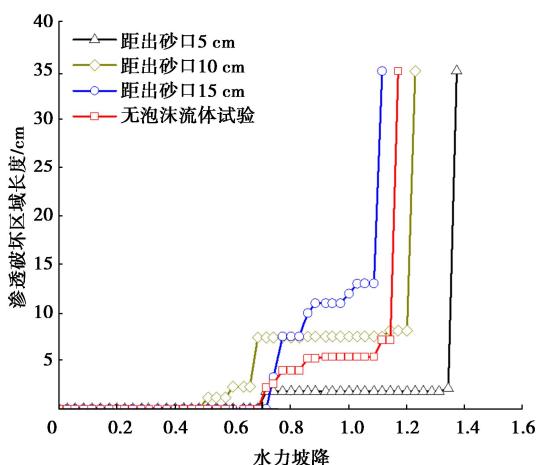


图 13 渗透破坏区域长度随水力坡降变化曲线

Fig. 13 Seepage failure areas at various hydraulic gradients

此外，在泡沫流体注入位置距离预设出砂口 10, 15 cm 的试验中渗透破坏发展过程与无泡沫流体注入的对照试验类似，呈现出阶段性发展的特征，这与注

入位置距离预设出砂口 5 cm 时的渗透破坏发展过程不同：①渗透破坏区域在与泡沫赋存区域边缘接触前呈现阶段性发展，其可能原因是部分泡沫流体在水动力作用下由初始赋存区域向出砂口流动，使得渗透破坏区域上溯发展过程中沿程遇到部分泡沫流体“阻挡”，进而呈现阶段性发展状态。②试验前期，其渗透破坏发展甚至快于无泡沫流体注入的对照试验。可能原因是距离出砂口较远的泡沫流体赋存区域无法降低出砂口流量（图 14）及抑制出砂口附近的颗粒运移，反而可能由于水流冲刷溶解表面活性剂降低颗粒间摩擦力等原因，“促进”渗透破坏发展。

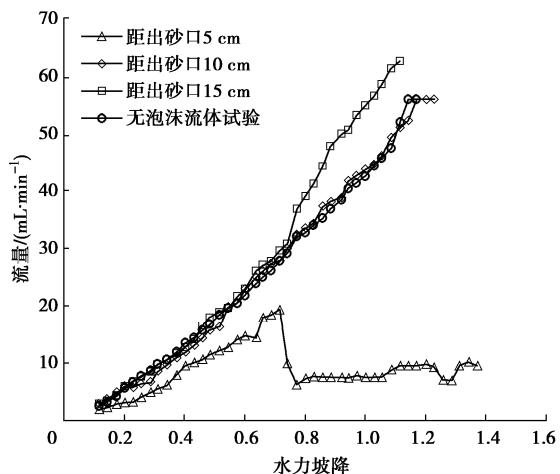


图 14 出砂口流量随水力坡降变化曲线

Fig. 14 Flow rates at various hydraulic gradients

综上所述，泡沫流体对渗透破坏发展具有显著抑制效果，其机制包括：抑制砂颗粒运移，提高渗透破坏启动水力坡降；降低土层渗透性，减小出砂口流量；增大流体渗流阻力，抑制渗透破坏区域发展；提高渗透破坏临界水力坡降，进而抑制渗透破坏发生发展。

## 4 结 论

本文采用自主研发的泡沫流体抑制堤基土体渗透破坏室内模型试验系统，对应用泡沫流体抑制堤基土体渗透破坏发展的可行性和相关机制开展了初步研究，得到如下 4 点结论。

(1) 泡沫流体可大幅降低土层渗透性，降低出砂口流量；抑制颗粒运移，提高渗透破坏启动水力坡降；增大流体流动阻力，提升渗透破坏临界水力坡降，抑制渗透破坏区域上溯发展，这是泡沫流体抑制渗透破坏发展的重要机制。

(2) 泡沫流体抑制堤基土体渗透破坏发生发展效果受泡沫流体赋存区域范围和距离出砂口位置等因素的影响。泡沫流体赋存区域距离出砂口越近，其抑制效果越好；当泡沫流体覆盖出砂口下方时渗透破坏抑制效果最为显著。

(3)本文试验中覆盖出砂口下方的泡沫流体较之在渗透破坏区域上游区域的泡沫流体表现出更强的降渗增阻、抑制颗粒迁移及抑止渗透破坏发展的能力,其可能原因是试样顶面的泡沫流体部分存在于砂层与顶面硅胶垫之间的空隙中,其强度弱于多孔介质中的泡沫,且与颗粒协同迁移特性与多孔介质中不同,削弱了泡沫流体的作用。在渗透破坏上溯发展方向上泡沫流体抑制渗透破坏的机理和效果仍有待进一步研究。

(4)本文采用小尺度砂槽模型,试样未采用上覆黏土层及间断颗粒级配的影响,且采用在渗透破坏发生前预先注入泡沫流体的方式开展试验,目的在于尽量减少试验变量,对泡沫流体抑制渗透破坏发展的可行性和抑制机理开展初步研究。泡沫流体停止注入后的迁移流失和性能弱化对其抑制土体渗透破坏效果的影响机制,水动力作用下泡沫流体的赋存机制和性质演化,泡沫流体性质和注入压力、注入时机等关键注入参数对堤基土体渗透破坏抑制效果的影响机制等问题将在下一步研究中进行探讨。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水利发展报告[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China Water Development Report[R]. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese))
- [2] 吴庆华, 张伟, 邬爱清, 等. 堤防管涌险情研究进展[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 39-44. (WU Qinghua, ZHANG Wei, WU Aiqing, et al. Research progress on dyke piping[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(10): 39-44. (in Chinese))
- [3] GU L, YIN J B, ZHANG H B, et al. On future flood magnitudes and estimation uncertainty across 151 catchments in mainland China[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(S1): 779-800.
- [4] 张家发, 曹星, 李思慎. 堤防加固设计中的若干技术问题[J]. 人民长江, 2000, 31(1): 9-10. (ZHANG Jiafa, CAO Xing, LI Sishen. Some technical issues about dyke strengthening design[J]. Yangtze River, 2000, 31(1): 9-10. (in Chinese))
- [5] HADJHT T, SHERMANW C. Laboratory testing of filter sand slot sizes for reliefwells[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(9): 1325-1346.
- [6] 吴昌瑜, 张伟, 李思慎, 等. 减压井机械淤堵机制与防治方法试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3181-3187. (WU Changyu, ZHANG Wei, LI Sishen, et al. Research on mechanical clogging mechanism of relief well and its control method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3181-3187. (in Chinese))
- [7] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤防非稳定渗流几个关键值的经验公式[J]. 水力学报, 2004, 35(1): 52-56. (MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Empirical formulas for important parameters of unsteady seepage of levees[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(1): 52-56. (in Chinese))
- [8] 张家发, 吴昌瑜, 朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水力学报, 2002, 33(9): 108-111, 116. (ZHANG Jiafa, WU Changyu, ZHU Guosheng. Experimental study on seepage deformation propagation control using impervious wall of suspension type[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 108-111, 116. (in Chinese))
- [9] 王复明, 李嘉, 石明生, 等. 堤坝防渗加固新技术研究与应用[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 1-11. (WANG Fuming, LI Jia, SHI Mingsheng, et al. New seepage-proof and reinforcing technologies for dikes and dams and their applications[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(12): 1-11. (in Chinese))
- [10] JIANG N J, SOGA K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. Géotechnique, 2017, 67(1): 42-55.
- [11] ROSENBRAND E, VAN BEEK V, BEZUIJEN A, et al. Multi-scale experiments for a coarse sand barrier against backward erosion piping[J]. Géotechnique, 2022, 72(3): 216-226.
- [12] 毛昶熙. 堤防工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (MAO Changxi. Dikes Engineering Manual[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [13] 李兆敏, 徐正晓, 李宾飞, 等. 泡沫驱技术研究与应用进展[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(5): 118-127. (LI Zhaomin, XU Zhengxiao, LI Binfei, et al. Advances in research and application of foam flooding technology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(5): 118-127. (in Chinese))
- [14] 段海燕, 王雷. 我国石油工业二氧化碳地质封存研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(1): 121-124. (DUAN Haiyan, WANG Lei. Study on the carbon dioxide geological storage

- in petroleum industry in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, **31**(1): 121-124. (in Chinese))
- [15] 刘相良, 李英杰, 赵健艾, 等. 表面活性剂泡沫强化修复污染土壤研究进展[J]. 化学通报, 2017, **80**(12):1116-1122. (LIU Xiangliang, LI Yingjie, ZHAO Jianai, et al. Research progress of surfactant foam-enhanced remediation technology for contaminated soil[J]. Chemistry, 2017, **80**(12):1116-1122. (in Chinese))
- [16] KOVSCEK A R, RADKE C J. Fundamentals of foam transport in porous media[M]// Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry. SCHRAMM L L, Ed., Washington D C: American Chemical Society, 1994: 115-163.
- [17] VANDENBOER K, VAN BEEK V M, BEZUIJEN A. 3D character of backward erosion piping[J]. Géotechnique, 2018, **68**(1): 86-90.
- [18] DU D X, ZHANG X, LI Y G, et al. Experimental study on rheological properties of nanoparticle-stabilized carbon dioxide foam[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, **75**: 103140.
- [19] DU D X, ZHANG X, YU K Q, et al. Parameter screening study for optimizing the static properties of nanoparticle-stabilized CO<sub>2</sub> foam based on orthogonal experimental design[J]. ACS Omega, 2020, **5**(8): 4014-4023.
- [20] 陈建生, 张华, 王霜, 等. 多层堤基中土层结构变化对管涌影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2213-2219. (CHEN Jiansheng, ZHANG Hua, WANG Shuang, et al. Experimental researches on effect of foundation structure on piping in multilayer embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2213-2219. (in Chinese))
- [21] 王霜, 陈建生, 周鹏. 三层堤基中细砂层厚度对管涌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(10): 2847-2854. (WANG Shuang CHEN Jiangsheng, ZHOU Peng. Effect of thickness of fine sand layer on piping development in three-stratum dike foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(10): 2847-2854. (in Chinese))
- [22] 陈建生, 何文政, 王霜, 等. 双层堤基管涌破坏过程中上覆层渗透破坏发生发展的试验与分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1777-1783. (CHEN Jiansheng, HE Wenzheng, WANG Shuang, et al. Laboratory tests on development of seepage failure of overlying layer during piping of two-stratum dike foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1777-1783. (in Chinese))
- [23] 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 Xiangdong, WANG Yuan, WANG Fei. Study on piping by sand-bank model and simulation by PFC3D[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2009, **41**(6): 51-57. (in Chinese))
- [24] 姚秋玲, 丁留谦, BEEK V V, 等. 非均质堤基管涌小尺寸试验模拟与预测模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, **33**(5): 77-81. (YAO Qiuling, DING Liuqian, BEEK V V, et al. Small scale experiments and prediction rule for piping in dike foundations with heterogeneity[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, **33**(5): 77-81. (in Chinese))
- [25] 姚秋玲, 丁留谦, 孙东亚, 等. 单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, **38**(2): 13-18. (YAO Qiuling, DING Liuqian, SUN Dongya, et al. Experimental studies on piping in single-and two-stratum dike foundations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, **38**(2): 13-18. (in Chinese))
- [26] 肖莹萍. 双层堤基管涌通道上溯规律的试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. (XIAO Yingping. Experimental Investigation of Backward Erosion Piping in Two-stratum Dike Foundations[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese))