

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.05.010

泡沫流体对堤基土体渗流特性影响分析

邱昊天¹,王媛²,巩佳琨¹,祁天¹,张淑君¹

(1.河海大学力学与材料学院,江苏南京210098;2.河海大学水利水电学院,江苏南京210098))

摘要:针对泡沫流体对土体渗流的影响机制仍不清晰的问题,开展了室内无泡沫流体渗透破坏试验与泡沫流体抑制渗透破坏试验,对土体渗流特征及泡沫流体对土体渗流的影响进行了研究。试验结果表明:泡沫流体对堤基土体渗流具有显著调控作用,可通过滞留在孔隙中的气泡增大渗流阻力,将局部土体转变为非饱和状态,增强土体抗渗性能;泡沫流体可延长渗流路径,降低水力梯度,抑制土体渗透破坏的发展。

关键词:堤基土体;渗透破坏;泡沫流体;压力梯度;渗流调控

中图分类号:TV139.16 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2023)05-0070-09

Effect of foam fluid on seepage characteristic in embankment foundation

QIU Haotian¹, WANG Yuan², GONG Jiakun¹, QI Tian¹, ZHANG Shujun¹

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The influence mechanism of foam fluid on the seepage in the embankment foundation and the development of embankment seepage failure are unclear. In this study, the seepage failure experiment without foam fluid and the seepage failure experiment with foam fluid are carried out to investigate the characteristics of seepage in soil during the development of seepage failure and the influence of foam fluid on soil seepage. The experimental results show that foam fluid has a significant impact on the seepage in soil. The flow resistance greatly increased by the foam bubble trapped in pores, while the soil is turned to unsaturated state, which leads to the enhanced impervious performance. Besides, the flow path becomes longer due to the existence of foam fluid, which reduces the hydraulic gradient, and in turn significantly restrains the development of seepage failure of the embankment foundation.

Key words: embankment foundation; seepage failure; foam fluid; pressure gradient; seepage regulation

堤防工程是我国防洪体系的核心组成部分,是国家水安全特别是防洪安全的重要保障。然而,由于地质条件和建设背景复杂,我国堤防工程存在诸多安全隐患,在汛期高水位作用下极易发生险情。管涌等渗透破坏是堤防工程的主要险情形式之一,在1998年长江流域大洪水中,长江干堤发生较大险情698次,其中管涌366处,占比52.4%^[1]。1998年后,我国在堤防工程建设方面的投入逐年增加,汛期险情数量与规模显著减小。尽管如此,2020年长江、淮河流域遭受强降雨袭击,许多堤防仍旧发生了管涌险情乃至溃堤。目前全球气候变暖问题愈发严重,极端气候灾害频发,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^[2-5]。

堤基渗流分析对理解堤基管涌等渗透破坏发展过程以及渗透破坏控制措施的作用机制至关重要。国内外学者围绕堤基渗流问题开展了大量研究。试验研究方面,倪小东等^[6]采用双层堤基砂槽模型试验分析了土体内部细颗粒运移引起管涌破坏的动态过程;刘杰等^[7]通过模型试验研究了砂土和两种砂砾石互层、黏土与砂和砂砾石互层共4种堤基结构的渗透破坏机理;陈建生等^[8-9]采用3层堤基试验模型,研究了不同颗

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2240210,52279098);江苏省水利科技项目(521049312);江苏省自然科学基金资助项目(BK20200525)

作者简介:邱昊天(1998—),男,硕士研究生,主要从事堤防工程渗流控制研究。E-mail:201308010022@hhu.edu.cn

通信作者:王媛(1969—),女,教授,博士,主要从事岩土体渗流与控制研究。E-mail:wangyuanhhu@163.com

引用本文:邱昊天,王媛,巩佳琨,等.泡沫流体对堤基土体渗流特性影响分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):70-78.

QIU Haotian, WANG Yuan, GONG Jiakun, et al. Effect of foam fluid on seepage characteristic in embankment foundation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5): 70-78.

粒级配组成的夹砂层对管涌发生和发展过程及其机理的影响,以及细砂层埋深对堤基管涌的影响;张家发等^[10]通过砂槽模型试验分析了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管涌发展,但对渗流控制效果不显著;丁留谦等^[11]对设置悬挂式防渗墙的双层堤基砂槽模型开展了管涌渗透破坏试验,结果表明悬挂式防渗墙对是否发生堤基管涌的影响很小,但能够有效延长渗径,明显提高堤基的整体抗渗强度与管涌溃堤的临界水力坡降。数值模拟方面,周红星等^[12]将试验模型简化为二维轴对称数值模型对堤基渗透破坏渗流场进行模拟,通过模拟结果与试验结果对比分析验证了数值模拟方法的可行性;王霜等^[13]通过有限元方法模拟了多层堤基管涌不同发展阶段堤基内部渗流场分布,结果表明管涌动态发展时土颗粒流失与土体渗透性相互影响;Vandenboer 等^[14]通过管涌室内模型试验研究,发现临界水力梯度与管涌上溯通道受模型宽度影响,并认为上溯侵蚀管涌是一种三维现象;Van Beek 等^[15]分别开展了二维和三维模型渗透破坏试验,研究分析了临界梯度、渗透破坏通道的形成与侵蚀破坏机制,并提出应开发考虑渗透破坏机制的新模型;Wang 等^[16]基于模型试验对堤坝内部侵蚀进行了数值模拟,分析了有无悬挂式防渗墙情况下堤基渗透破坏的渗流场,证明了悬挂式防渗墙能够起到延长渗流路径与改变渗透破坏路径的作用。在上述研究中,土体处于饱和水状态,土体中的渗流为水的单相流或水与可动固体颗粒的两相流。

泡沫流体是一种可压缩的非牛顿流体,是气体以气泡形式分散到液体中形成的分散体系,其中表面活性剂为连续相,具有起泡和稳泡作用,气体为分散相。泡沫流体由于其独特的流变特性被广泛应用于提高原油采收、含水层环境修复等领域^[17-21]。泡沫流体在多孔介质中具有降低流体流动性的能力^[22-23],因此在调控非均匀渗流场方面能够发挥重要作用,在堤防渗透破坏防控方面具有潜在的巨大应用前景。Aranda 等^[24]研究表明,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的发生发展。然而,由于泡沫流体由气体和液体组成,含泡沫流体的土体渗流是气-水两相流问题,其土体渗透破坏发展过程中泡沫流体对土体渗流的影响机制仍不明晰。本文通过开展无泡沫流体渗透破坏试验和泡沫流体抑制渗透破坏试验两类室内模型试验,对堤基土体渗透破坏发展过程中土体渗流特性及泡沫流体对堤基土体渗流的影响机制进行研究。

1 试验方法

1.1 试验模型

采用自主研发的泡沫流体抑制土体渗透破坏试验系统开展试验研究,该试验系统由变水头控制系统、泡沫流体注入系统、砂槽渗透主体系统、孔隙压力实时监测系统和计算机分析系统等组成,如图 1 所示。

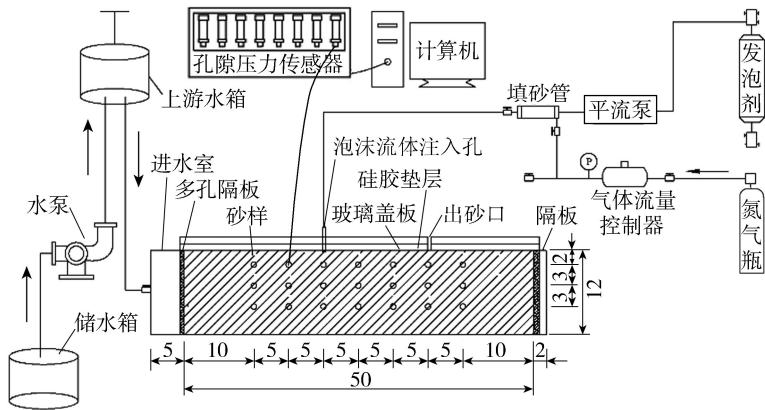


图 1 试验系统示意图(单位: cm)

Fig.1 Schematic diagram of experiment system (unit: cm)

试验模型采用小比尺砂槽模型,模型长 50 cm、宽 4 cm、高 12 cm,材质为透明有机玻璃。砂槽一侧设置进水室,进水室一端与上游水箱相连,试验过程中通过变水头控制系统控制砂槽上游水位;另一侧与砂槽渗透主体相连,中间布设多孔隔板和土工滤网,以保证水流均匀流入砂槽内,同时防止细颗粒流失而进入进水室。砂槽顶面为透明有机玻璃盖板,盖板与砂样之间设置硅胶垫层,一方面模拟弱透水性的柔性覆盖层,另一方面与模型边壁涂抹的凡士林及紧固螺栓协同防渗,提升装置的密封防渗效果。出砂口设置在玻璃盖板上距离进水室 35 cm 处,出水口直径为 5 mm,模拟上覆层被冲破后形成的出砂口。出砂口设置沟槽导流以便收集

涌水和涌砂,并通过量筒和天平测定涌水流量和涌砂量。在有机玻璃盖板上距离出水口 5、10、15、20、25 cm 处分别预设 5 个泡沫流体注入孔。在泡沫流体抑制土体渗透破坏试验中,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生成泡沫流体,然后将预制泡沫流体通过泡沫流体注入孔注入砂槽模型中。在砂槽模型侧面布设 3 排、每排 7 个孔隙压力传感器测压孔,相邻测压孔间距为 5 cm,每个测压孔从侧面深入试样 2 mm,顶部测压孔距离上部玻璃盖板 2 cm,孔隙压力传感器读数及上游水头均以模型槽顶面为零势面。

1.2 试验材料

试验选用 0.075 ~ 1 mm 中国 ISO 标准砂,采用连续级配试验砂样。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》测得砂样物理力学性质如下: $d_{60}=0.25\text{ mm}$, $d_{20}=0.13\text{ mm}$,干密度 $\rho_d=1.51\text{ g/cm}^3$,渗透系数 $k=1.8\times10^{-3}\text{ cm/s}$,孔隙率 $n=0.35$ 。试验中使用的泡沫流体是由高纯度(99.999%)氮气、氯化钠溶液和烯基磺酸钠(AOS)表面活性剂配制的质量分数为 0.5% 的表面活性剂溶液。泡沫流体的强度可通过其表观黏度表征,随气液比(气体流量与总流量的比值)变化。试验中氮气与表面活性剂溶液以表观总流量 2 mL/min 按照气液比 0.8 注入填砂管生成泡沫流体,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。

1.3 试验步骤

试验过程中通过压力传感器实时监测试验土体中不同位置的孔隙压力,反映土体内部的渗流特性,并通过高清摄像装置实时记录模型顶面和侧面的试验现象,同时测定涌水量和涌砂量辅助解释土体渗流特征。

泡沫流体抑制渗透破坏试验步骤如下:

- a. 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抛填,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玻璃盖板,用螺栓固定拧紧,让砂样饱和 24 h 以上。
- b. 连接传感器并调零。将饱和的砂槽模型连接零势面的上游水箱(起始上游水位以砂样顶面为零势面)并打开进水室阀门,逐个打开孔隙压力监测孔并连接孔隙压力传感器,待传感器显示数值稳定后以零势面的上游水位为基准将所有传感器调零。
- c. 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填砂管预生成泡沫,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流体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以及孔隙压力变化。
- d. 渗透破坏试验。待孔隙压力曲线趋于稳定后(稳定时长 5 ~ 10 min),开始渗透破坏试验,提升上游水头(水力梯度随之提升),待渗流稳定后进行下一级水头试验(每级水头 1 ~ 2 cm)。渗流稳定的判定标准为:孔隙压力曲线趋于稳定,多次测量渗流量基本稳定,出砂口附近无明显砂粒移动且无砂粒涌出,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;拍摄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;实时监测试验过程中不同位置处的孔隙压力。

e. 试验结束之后清洗砂样并烘干,试验装置复位。

无泡沫流体渗透破坏试验依据上述步骤 a、b、d、e 开展。

为了保证压力传感器能够准确反映不同试验条件下试样中的孔隙压力分布,采用不同量程的压力传感器布置方式:在无泡沫流体渗透破坏试验中,采用 21 个量程为 0 ~ 20 kPa 的压力传感器(图 2);在泡沫流体抑制渗透破坏试验中,采用 12 个量程为 0 ~ 20 kPa、9 个量程为 0 ~ 200 kPa 的孔隙压力传感器,其中量程为 0 ~ 200 kPa 的传感器以泡沫流体注入孔为中心水平对称布设(红色虚框)。本文主要通过距离模型顶面最近的传感器(1 ~ 7 号)分析泡沫流体在土体渗透破坏发展过程中对土体渗流的影响。

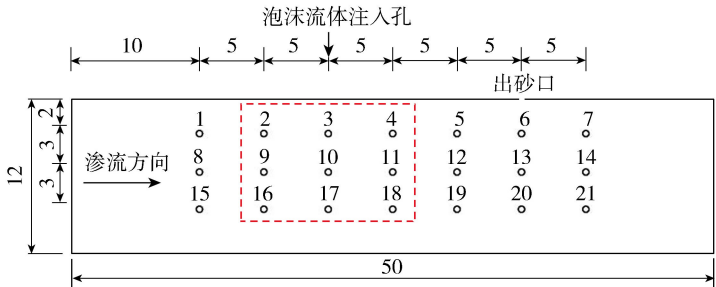


图 2 传感器布设示意图(单位:cm)
Fig.2 Schematic diagram of pressure transducer arrangement (unit: cm)

2 试验过程

2.1 无泡沫流体渗透破坏试验

无泡沫流体渗透破坏发展过程与姚秋玲等^[25]观察到的现象相似,主要经历以下几个阶段:

a. 试验初期,出砂口水流清澈,无砂沸现象,流量随上下游水力梯度(以下简称“水力梯度”)的提升而增大,大致呈线性关系。

b. 当水力梯度提升至 0.18 时,出砂口出现轻微砂沸。继续逐步提升水力梯度至 0.57 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。当水力梯度提升至 0.6 时,出砂口附近出现明显渗透破坏。保持水力梯度不变,渗透破坏区域发展至距出砂口约 3 cm 处停止发展,继续提升水力梯度,渗透破坏区域未出现明显上溯发展。当水力梯度提升至 0.69 时,渗透破坏区域重新上溯发展至距出砂口 5 cm 处。当水力梯度继续提升时,渗透破坏区域在深度方向侵蚀加剧,并随之出现横向扩展,但侵蚀破坏区域未出现上溯发展。水力梯度提升至 0.98 时,渗透破坏区域最终上溯至距出砂口 8 cm 处稳定,停止发展。

c. 水力梯度提升至 1.05 时,渗透破坏区域重新向上游发展,直至与进水室贯通,达到渗透破坏临界水力梯度。

2.2 泡沫流体抑制渗透破坏试验

在无泡沫流体渗透破坏试验的基础之上开展泡沫流体抑制渗透破坏试验,选取距出砂口 15 cm 处的泡沫流体注入孔注入泡沫流体,持续时间 60 min,泡沫流体赋存区域大致范围是以泡沫流体注入孔为中心扩散的半球形,砂层顶面扩散半径约 5.5 cm,侧面至约 7 cm(图 3)。

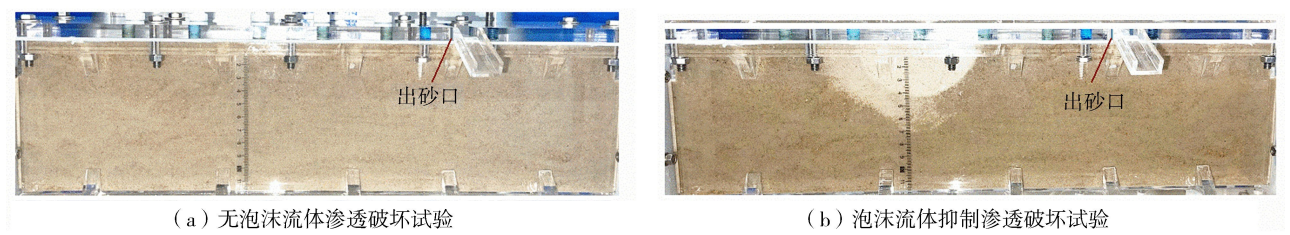


图 3 试验砂层侧面对比
Fig. 3 Side-shot comparison of sand layer in experiments

在泡沫流体抑制渗透破坏试验中,当水力梯度为 0.05 时,出砂口开始有水流出;当水力梯度提升至 0.1 时,出砂口出现局部砂沸现象;当水力梯度提升至 0.24 时,出砂口下方出现明显侵蚀;当水力梯度提升至 0.3 时,砂沸剧烈,渗透破坏区域发展至 1.5 cm(以出砂口为起点);随后渗透破坏区域随着水力梯度提升缓慢上溯,当提升至 0.92 时,渗透破坏区域发展至 9 cm,接近泡沫赋存区域前缘;继续提升水力梯度,渗透破坏区域停止发展,直至水力梯度提升至 1.32 时,渗透破坏区域才继续上溯发展,最终发展至距出砂口约 10 cm 后停止发展,直至水力梯度提升到 1.84 时,达到渗透破坏临界水力梯度,渗透破坏区域开始迅速发展,并贯通至进水室。

3 试验结果与分析

3.1 土体渗透破坏渗流分析

图 4 为无泡沫流体渗透破坏试验中各孔隙压力传感器的压力随时间的变化,可以明显看出,孔隙压力首先随水力梯度的提升而逐渐增大,随着试验的进行,距离出砂口最近的 6 号孔隙压力传感器首先响应,在近似保持稳定一段时间后压力发生突降;这一变化趋势随后依次扩展至距出砂口更远的 5 号和 4 号孔隙压力传感器。值得注意的是,与出砂口距离越近,孔隙压力响应越显著。

根据试验过程中观察到的试验现象,结合局部孔隙压力梯度与出砂口流量曲线分析可知,土体渗透破坏的发展会引起局部孔隙压力梯度的突变。图 5 为无泡沫流体渗透破坏试验中相邻传感器之间的局部孔隙压力梯度 Δi 随上下游水力梯度的变化(Δi 的正向为自进水室向出砂口的渗流方向,当 Δi 为负值时,表明该区间内流体流动方向为自出砂口向上游进水室方向;下标数字为相邻传感器的编号)。如图 5 所示, $\Delta i_{6,7}$ 始终为负值,故该区域中水流自出砂口下游向出砂口流动,并且其绝对值随着水力梯度的提升而增大,在水力梯

度达到破坏临界梯度时绝对值达到最大值。

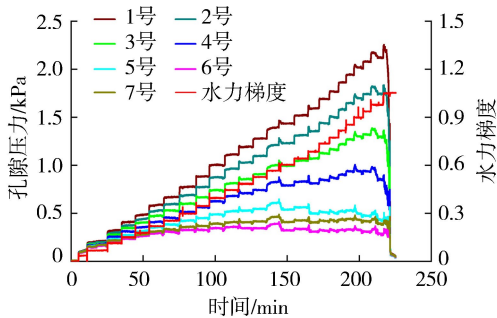


图4 无泡沫流体渗透破坏试验孔隙压力
Fig.4 Pore pressure in seepage failure experiment without foam fluid

在试验过程中,各区域土体中的局部孔隙压力梯度首先随水力梯度的提升而增大,并保持稳定直至上游水头提升至下一级水头,整体呈现非线性增长,反映土体内部渗流稳定,渗透破坏尚未发生。这与出砂口流量曲线(图6)所反映的渗流过程和所观察到的试验现象一致:试验初期,出砂口流量随水力梯度的升高而增大,且变化率随着渗透破坏的发展逐渐增大,呈现明显非线性变化。在水力梯度达到0.15之前,流量-水力梯度曲线切线斜率约为28.47,出砂口未出现砂沸;当水力梯度提升至0.57时,流量-水力梯度曲线切线斜率增大至约40.10,出砂口观察到砂沸,但未出现渗透破坏区域。随着试验的进行,局部孔隙压力梯度先后发生变化,其中,距出砂口最近的 $\Delta i_{5,6}$ 最先响应。在水力梯度提升至0.6之前, $\Delta i_{5,6}$ 随时间增大,当水力梯度提升至0.6时, $\Delta i_{5,6}$ 开始下降。观察试样顶面发现,此时出砂口附近出现明显渗透破坏,流量-水力梯度曲线切线斜率增大至75.20。继续提升水力梯度至0.64, $\Delta i_{5,6}$ 与水力梯度为0.6时相比无明显变化,保持相对稳定。观察试样顶面发现,渗透破坏区域在此时间段内未继续上溯发展。图7中土体渗透破坏试验的出砂口累积涌砂量曲线显示,在水力梯度达到0.64时,累积涌砂量未出现明显变化,佐证了渗透破坏区域在此时间段内停止上溯发展。由此可见,土体渗透破坏的发展与局部孔隙压力梯度和出砂口流量的变化密切相关。其主要原因是:随着土体渗透破坏的加剧,颗粒流失造成局部土体特别是渗透破坏区域尖端渗透性发生改变,产生的渗流高度集中^[26],因此引发局部孔隙压力梯度与出砂口流量的突变。

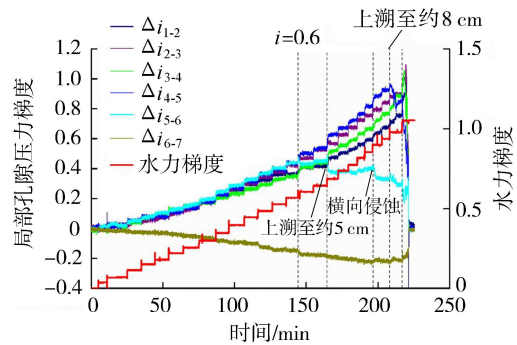


图5 无泡沫流体渗透破坏试验局部孔隙压力梯度
Fig.5 Local hydraulic gradient in seepage failure experiment without foam fluid

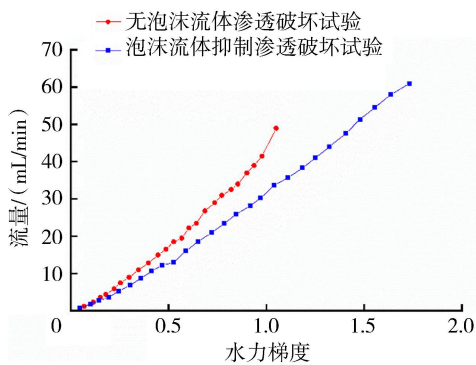


图6 出砂口流量随水力梯度变化曲线
Fig.6 Variation curves of flow rate with hydraulic gradient at the sand outlet

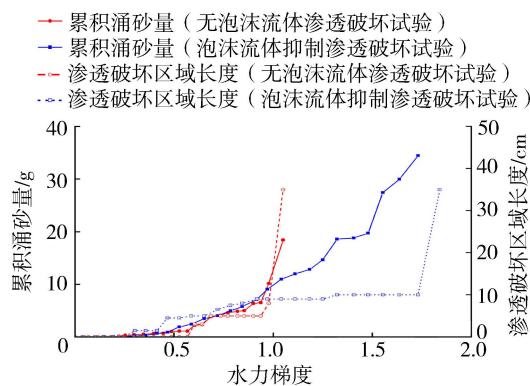


图7 累积涌砂量与渗透破坏区域长度对比
Fig.7 Comparison of cumulative amount of sand boil and seepage failure area

当水力梯度提升至0.69时, $\Delta i_{5,6}$ 再次发生突降(图5),此时,渗透破坏区域上溯发展至距出砂口约5 cm处,即5号测压孔处,并伴随着涌砂量的突然增大(图7)。此后,随着水力梯度的提升, $\Delta i_{5,6}$ 保持相对稳定,其他区域局部孔隙压力梯度则随水力梯度的提升而增大,在此时间段内渗透破坏区域前缘停留于距出砂口约5 cm处,未继续上溯发展,累积涌砂量亦没有明显变化(图7)。当水力梯度提升至0.9时,渗透破坏区域发生横向侵蚀扩展,累积涌砂量出现骤增, $\Delta i_{5,6}$ 因此再次发生突降(图5)。当水力梯度达到0.98时,渗透破坏区域再次上溯发展至距出砂口约8 cm处,累积涌砂量继续增大,此时 $\Delta i_{4,5}$ 相应地发生突降,而 $\Delta i_{5,6}$ 则未

发生明显变化。如图 5 所示,在试验后期,随着水力梯度的提升, $\Delta i_{4.5}$ 、 $\Delta i_{3.4}$ 、 $\Delta i_{2.3}$ 依次迅速发生突降,其发生顺序与渗透破坏区域的上溯发展方向一致,反映了当水力梯度达到临界水力梯度后,渗透破坏区域的迅速发展。因此,当渗透破坏发展至某一土体区段时,该段的平均孔隙压力梯度即产生变化,局部孔隙压力梯度的突变可反映土体渗透破坏的发展过程。

3.2 泡沫流体抑制渗透破坏渗流分析

图 8 为泡沫流体抑制渗透破坏试验中各孔隙压力传感器测得的压力变化曲线,3 号孔隙压力显著高于其他位置,且随着试验的开展逐渐降低,其原因是 3 号孔隙压力传感器位于泡沫流体注入孔下方 2 cm 处,处于泡沫流体赋存区域内,泡沫流体的存在极大地提升了孔隙压力。图 8 中 4 号孔隙压力出现了先上升后下降的变化,与无泡沫流体渗透破坏试验中的孔隙压力变化趋势显著不同。

泡沫流体显著提升了其赋存区域内的孔隙压力,在土体渗透破坏发生发展过程中,泡沫流体会缓慢流失,但其赋存区域内几乎无水流动。如图 9 所示,泡沫流体抑制渗透破坏试验和无泡沫流体渗透破坏试验中的局部孔隙压力梯度变化特征显著不同,泡沫流体对土体渗流产生了显著影响。在泡沫流体抑制渗透破坏试验中,泡沫流体注入孔设置于距出砂口 15 cm 处,3 号孔隙压力传感器位于泡沫流体注入孔下方 2 cm 处,2 号和 4 号孔隙压力传感器位于泡沫流体赋存区域边缘。由于泡沫流体的注入和扩散,土体中泡沫流体赋存区域内的孔隙压力显著高于无泡沫赋存的区域。泡沫流体在土体内以泡沫流体注入孔为中心呈半球形扩散,泡沫流体赋存区域内的初始压力梯度以 3 测号压孔为中心近乎对称分布($\Delta i_{2.3}$ 和 $\Delta i_{3.4}$)。如图 9 所示,在含泡沫流体的土体渗透破坏试验过程中, $\Delta i_{2.3}$ 、 $\Delta i_{3.4}$ 呈正负对称分布,并随水力梯度的提升而逐渐下降。 $\Delta i_{2.3}$ 、 $\Delta i_{3.4}$ 的下降一方面反映了泡沫流体的消散;另一方面,该泡沫流体赋存区域内局部孔隙压力梯度的绝对值在试验过程中始终呈下降趋势,从侧面反映了该区域内泡沫流体强度高,极大地提升了流体流动阻力,使得该区域内几乎无水流动,未出现水驱泡沫的复杂流动现象。

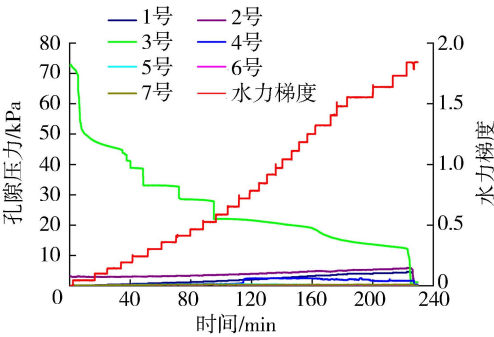


图 8 泡沫流体抑制渗透破坏试验孔隙压力
Fig. 8 Pore pressure in seepage failure experiment restrained by foam fluid

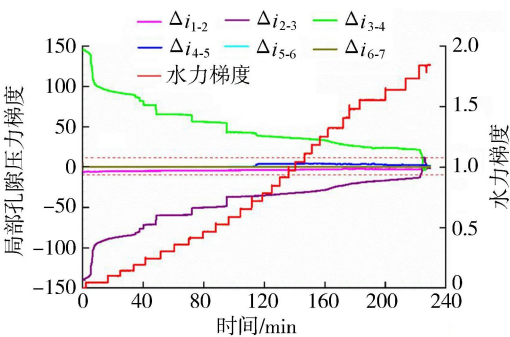


图 9 泡沫流体抑制渗透破坏试验局部孔隙压力梯度
Fig. 9 Local hydraulic gradient in seepage failure experiment restrained by foam fluid

泡沫流体对土体渗流具有调控作用,一方面滞留在孔隙中的气泡极大地提升了其赋存区域内的渗流阻力;另一方面,在泡沫流体作用下土体渗流呈现显著的多相流特征,泡沫流体赋存区域内的土体处于非饱和状态,降低了水的渗透率。为更好显示局部孔隙压力梯度变化,图 10 分别给出了 $\Delta i_{1.2}$ 、 $\Delta i_{4.5}$ 与 $\Delta i_{5.6}$ 、 $\Delta i_{6.7}$ 局部区域的放大效果。如图 10(a) 所示, $\Delta i_{4.5}$ 在水力梯度达到 0.72 之前,随水力梯度的提升而增大,其变化规律与无泡沫流体渗透破坏试验类似。当水力梯度达到 0.72 时,渗透破坏区域前缘从距出砂口约 5 cm 处上溯发展至约 6.5 cm,此时 $\Delta i_{4.5}$ 突然大幅提升,并维持相对稳定。其主要原因是该区域内存留有一定量的泡沫流体,气泡滞留在土体孔隙中,当渗透破坏区域上溯发展至该区域时,水流在孔隙中流动遇到滞留在孔隙中的气体,滞留气体一方面增大了孔隙中的渗流阻力,另一方面流体在该区域内的流动不再是只有水的单相流,而是水和气体同时流动的多相流,滞留气体降低了该区域土体的含水率,使得其处于非饱和状态,进而降低了水在该区域内的渗透率,使得水流动过程中孔隙压力梯度大幅提升。在 160 ~ 225 min 试验时间段内(水力梯度由 1.32 提升至 1.84), $\Delta i_{4.5}$ 发生了两次下降,并在下降后维持一段时间的稳定。第一次下降发生在水力梯度达到 1.32 时(试验时间约 160 min),此时渗透破坏区域发展至出砂口约 10 cm 处,到达泡沫赋存区域边缘, $\Delta i_{4.5}$ 的下降反映了该区域内渗透破坏的发生。随后在泡沫流体的抑制作用下,渗透破坏区域停止

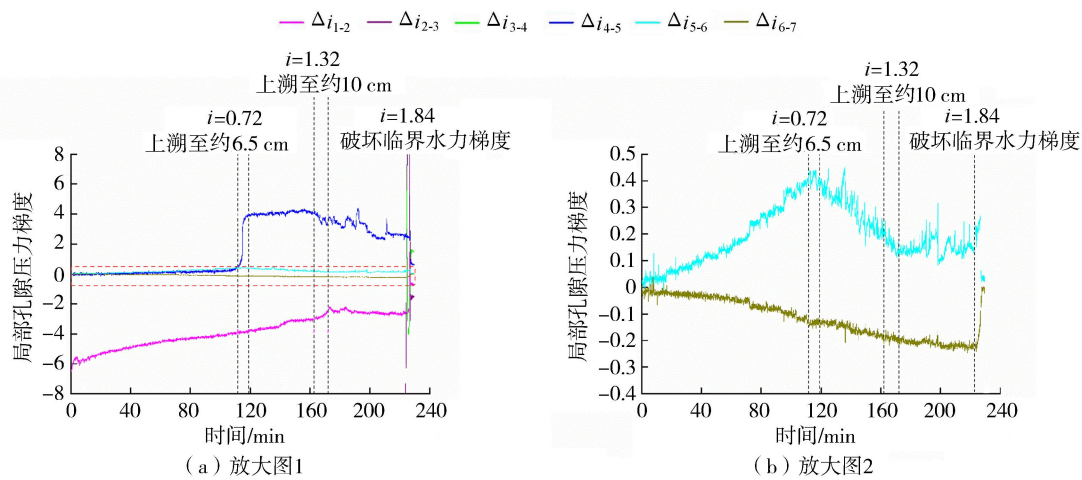


图 10 泡沫流体抑制渗透破坏试验局部孔隙压力梯度局部放大

Fig. 10 Partial enlarged image of local hydraulic gradient in seepage failure experiment restrained by foam fluid

上溯, $\Delta i_{4.5}$ 保持一段时间的稳定。在约 190 min 时, $\Delta i_{4.5}$ 再次下降, 但下降较为缓慢。在此过程中, 渗透破坏区域的长度并未增长(图 7), 依然停留在泡沫破坏区域边缘(图 11)。据此分析, 此阶段 $\Delta i_{4.5}$ 下降的主要原因不是渗透破坏区域的发展, 而是该区域内滞留气体溶解进入非饱和液体, 导致含水率上升、液体渗透率增大所致。 $\Delta i_{4.5}$ 的变化规律反映了泡沫流体对渗流的调控作用, 泡沫流体可极大地提升其赋存区域内的渗流阻力, 且能提升土体抵抗渗透破坏的能力, 延阻渗透破坏的发展。泡沫流体对土体渗透性的改变也反映在涌水量中(图 6), 在泡沫流体抑制渗透破坏试验中, 出砂口流量亦随水力梯度呈非线性增长; 但与无泡沫流体渗透破坏试验相比, 流量-水力梯度曲线切线斜率整体偏小, 其主要原因为泡沫流体降低了其赋存区域土体的渗透性, 导致出砂口涌水量降低。

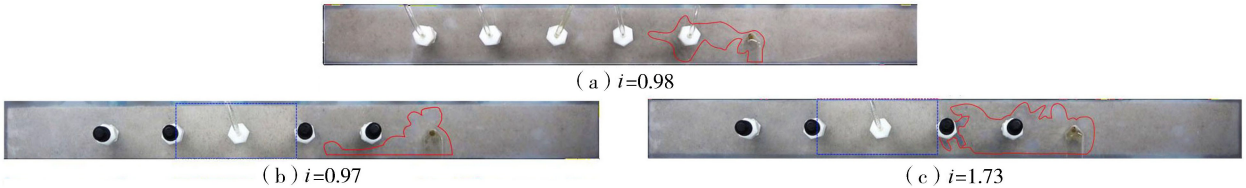


图 11 无泡沫流体渗透破坏试验渗透破坏区域与泡沫区阻挡渗透破坏区域发展对比

Fig. 11 Comparison of seepage failure area development in seepage failure experiments without foam fluid and with foam fluid

泡沫流体赋存区域重塑了土体内水的渗流路径, 降低了水力梯度, 进而抑制了土体渗透破坏的发展。如图 10(a) 所示, 尽管 1 号和 2 号孔隙压力传感器位于出砂口上游, 但是 $\Delta i_{1.2}$ 始终为负值, 其原因是 2 号孔隙压力传感器位于泡沫赋存区域边缘, 其孔隙压力远高于上游水箱, 使得 $\Delta i_{1.2}$ 为负值, 泡沫流体赋存区域的高孔隙压力使得水流几乎无法穿过该区域, 需要在泡沫流体赋存区域外形成绕渗, 渗流路径被泡沫流体赋存区域改变, 延长了渗流路径。渗流路径的延长降低了局部水力梯度, 也在一定程度上延缓了土体渗透破坏的发生和发展。 $\Delta i_{5.6}$ 整体变化趋势与无泡沫流体渗透破坏试验类似, 随着水力梯度的提升, $\Delta i_{5.6}$ 逐渐增大, 当水力梯度提升至 0.72 时, 渗透破坏区域发展至距出砂口约 6.5 cm, $\Delta i_{5.6}$ 随之达到峰值(图 10(b))。

泡沫流体减少了其赋存区域内的颗粒流失, 抑制了渗透破坏区域上溯发展, 提高了渗透破坏临界水力梯度。无泡沫流体渗透破坏试验的累积涌砂量在水力梯度达到渗透破坏临界水力梯度前与泡沫流体抑制渗透破坏试验的累积涌砂量十分接近, 其主要原因是, 试验中泡沫流体赋存区域距出砂口较远, 渗透破坏区域尚未发展至泡沫流体赋存区域, 泡沫流体尚未发挥其抑制颗粒流失的作用, 这与观察到的试验现象一致(图 11(a)(b))。如图 11(a)(b) 所示, 在渗透破坏区域(红色实线)未发展至泡沫流体赋存区域(蓝色虚线)时, 在相似的水力梯度作用下, 两组试验中渗透破坏区域长度几乎一致。在无泡沫流体渗透破坏试验中, 累积涌砂量和渗透破坏区域长度随水力梯度变化趋势基本一致; 然而, 在泡沫流体抑制渗透破坏试验中, 水力梯度提升至 1.32 之后渗透破坏区域几乎无发展, 直至渗透破坏临界水力梯度, 但是累积涌砂量依然在增长, 这反映了泡沫赋

存区域显著抑制了渗透破坏区域的上溯发展,使其横向扩展,这由试验中观察到的现象得以验证(图 11(c))。

在泡沫流体调控土体渗流、延长渗流路径等机制的作用下,泡沫流体的注入有效抑制了渗透破坏区域的上溯发展,提升了土体渗透破坏临界水力梯度。无泡沫流体渗透破坏试验的渗透破坏临界水力梯度约为 1.05,泡沫流体抑制渗透破坏试验的渗透破坏临界水力梯度约为 1.84,提升约 75%。

4 结 论

a. 泡沫流体对堤基土体渗流具有调控作用。泡沫流体作用下,土体渗流呈现多相流特征,一方面滞留在孔隙中的气泡增大了渗流阻力,另一方面泡沫流体赋存区域内的土体处于非饱和状态,降低了水的渗透率,增强了土体抗渗性能。

b. 泡沫流体可改变土体内水的渗流路径。在泡沫流体注入孔附近区域内,由于泡沫流体强度较大,孔隙中滞留的气泡极大地增加了渗流阻力,使得该区域内几乎无水流动,水需要在该区域外绕渗,延长了水的渗流路径,降低了水力梯度,进而抑制渗透破坏的发展。

c. 泡沫流体能够减少其赋存区域内的颗粒流失,迫使渗透破坏区域横向扩展,抑制渗透破坏区域上溯,提升渗透破坏临界水力梯度。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2021 中国水利发展报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021.

[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] 张芳,张芳华,张恒德,等. 长江中下游一次暖区极端致洪暴雨特征及天气学成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):16-24. (ZHANG Fang,ZHANG Fanghua,ZHANG Hengde,et al. Characteristics and synoptic causes of the extreme warm-region flood-causing rainfall over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):16-24. (in Chinese))

[4] 王磊之,胡庆芳,王银堂,等. 太湖流域 2016 年、1991 年大洪水对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):471-478. (WANG Leizhi,HU Qingfang,WANG Yintang,et al. Comparison of the two flood events occurred in 2016 and 1991 in the Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):471-478. (in Chinese))

[5] 岑威钧,李邓军,和浩楠. 持续强降雨引发水位耦合变化条件下堤防渗流及稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(4):364-369. (CEN Weijun,LI Dengjun,HE Haonan. Analysis of dike seepage and slope stability under coupled conditions of continuously heavy rainfall and consequent change of water level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(4):364-369. (in Chinese))

[6] 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 Xiaodong,WANG Yuan,WANG Fei. Study on piping by sand-bank model and simulation by PFC^{3D}[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2009,41(6):51-57. (in Chinese))

[7] 刘杰,谢定松,崔亦昊. 江河大堤双层地基渗透破坏机理模型试验研究[J]. 水利学报,2008,39(11):1211-1220. (LIU Jie,XIE Dingsong,CUI Yihao. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(11):1211-1220. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 陈建生,袁克龙,王霜,等. 细砂层埋深对堤基管涌影响的试验研究[J]. 岩土力学,2015,36(3):653-659. (CHEN Jiansheng,YUAN Kelong,WANG Shuang,et al. Experimental research on piping development considering buried depth of fine sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(3):653-659. (in Chinese))

[10] 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]. 水利学报,2002,33(9):108-111. (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. (in Chinese))

[11] 丁留谦,姚秋玲,孙东亚,等. 双层堤基中悬挂式防渗墙渗控效果的试验研究[J]. 水利水电技术,2007,38(2):23-26. (DING Liuqian,YAO Qiuling,SUN Dongya,et al. Experimental studies on the seepage control effects of suspended cutoffs[J].

Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(2):23-26. (in Chinese))

[12] 周红星,曹洪. 双层堤基渗透破坏机制和数值模拟方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(10):2128-2136. (ZHOU Hongxing,CAO Hong. Research on mechanism and numerical simulation method of seepage failure of double-layer dike foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(10):2128-2136. (in Chinese))

[13] 王霜,陈建生,钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进步,2021,41(6):39-45. (WANG Shuang,CHEN Jianshen,ZHONG Qiming. Numerical study on dynamic development process of piping in multi-stratum dike foundations[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(6):39-45. (in Chinese))

[14] VANDENBOER K,VAN BEEK V M,BEZUIJEN A. 3D character of backward erosion piping[J]. Géotechnique,2018,68(1):86-90.

[15] VAN BEEK V M,VAN ESSEN H M,VANDENBOER K, et al. Developments in modelling of backward erosion piping[J]. Géotechnique,2015,65(9):740-754.

[16] WANG Dayu,FU Xudong,JIE Yuxin,et al. Simulation of pipe progression in a levee foundation with coupled seepage and pipe flow domains[J]. Soils and Foundations,2014,54(5):974-984.

[17] 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,2019,43(5):118-127. (in Chinese))

[18] PORTOIS C,BOEIJE C S,BERTIN H J,et al. Foam for environmental remediation:generation and blocking effect[J]. Transport in Porous Media,2018,124(3):787-801.

[19] LONGPRÉ-GIRARD M,MARTEL R,ROBERT T,et al. 2D sandbox experiments of surfactant foams for mobility control and enhanced LNAPL recovery in layered soils[J]. Journal of Contaminant Hydrology,2016,193:63-73.

[20] DU Dongxing,WANG Dexi,JIA Ninghong,et al. Experiments on CO₂ foam seepage characteristics in porous media[J]. Petroleum Exploration and Development,2016,43(3):499-505.

[21] DU Dongxing,SUN Shengbin,ZHANG Na, et al. Pressure distribution measurements for CO₂ foam flow in porous media[J]. Journal of Porous media,2015,18(11):1119-1126.

[22] PANG Zhanxi. The blocking ability and flowing characteristics of steady foams in porous media[J]. Transport in Porous Media, 2010,85(1):299-316.

[23] ESTRADA E D C, BERTIN H, ATTEIA O, et al. Experimental study of foam flow in sand columns: surfactant choice and resistance factor measurement[J]. Transport in Porous Media,2015,108(2):335-354.

[24] ARANDA R,DAVARZANI H,COLOMBANO S,et al. Experimental study of foam flow in highly permeable porous media for soil remediation[J]. Transport in Porous Media,2020,134:231-247.

[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] ROBBINS B A,GRIFFITHS D V. A two-dimensional,adaptive finite element approach for simulation of backward erosion piping [J]. Computers and Geotechnics,2021,129:103820.

(收稿日期:2023-01-29 编辑:熊水斌)