

非均质砂黏互层堤基渗透通道演化对边坡稳定性的影响

任钟刚

(水发规划设计有限公司, 济南 250000)

摘要: 为探究非均质砂黏互层堤基中渗透通道的演化规律及其对边坡稳定性的影响, 通过室内渗流试验和大型边坡物理模型试验, 从通道深度、纵向位置、数量三个方面分析孔隙水压力和边坡整体破坏时间的演化特性。室内试验发现砂土和黏土的渗透性差别较大, 水力梯度为 4.5 时在砂黏界面处发生管涌, 形成集中渗流通道。边坡模型试验结果表明: 通道深度增加时, 破坏时间显著缩短, 孔隙水压力峰值呈增大趋势; 越靠近坡脚, 水力响应越快, 破坏时间最短 (2.9 h), 峰值压力最高 (41.20 kPa); 通道数量增多形成局部渗流网络, 使破坏时间提前且峰值压力增大; 优势渗流通道加快了孔隙水压力的积累和消散过程, 造成非均质砂黏互层边坡失稳。研究成果可为非均质土层中渗流风险的识别及防控措施优化提供参考。

关键词: 砂黏互层; 渗流通道; 孔隙水压力; 水力梯度; 边坡稳定

中图分类号: TV223.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0122-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.018

Effect of Seepage Channel Evolution in Heterogeneous Sand-Clay Interbedded Levee Foundation on Slope Stability

REN Zhonggang

(Shui Fa Planning & Design Co., Ltd., Ji'nan 250000, China)

Abstract: To explore the evolution law of seepage channels in heterogeneous sand-clay interbedded embankment foundations and its influence on slope stability, through indoor seepage tests and large-scale slope physical model tests, the evolution characteristics of pore water pressure and overall slope failure time were analyzed from three aspects: channel depth, longitudinal position, and quantity. The indoor tests found that the permeability of sand and clay was significantly different. When the hydraulic gradient was 4.5, piping occurred at the sand-clay interface, forming a concentrated seepage channel. The results of the slope model tests indicated that as the channel depth increased, the failure time decreased significantly while the peak pore water pressure increased; the closer to the toe of the slope, the faster the hydraulic response, with the shortest failure time (2.9 hours) and the highest peak pressure (41.20 kPa); the increase in the number of channels formed a local seepage network, which advanced the failure time and increased the peak pressure; the dominant seepage channels accelerated the accumulation and dissipation process of pore water pressure, causing instability of the heterogeneous sand-clay interbedded slope. The research results can provide a reference for the identification of seepage risks and the optimization of control measures in heterogeneous soil layers.

Key words: sand-silt interbedded layer; seepage channel; pore water pressure; hydraulic gradient; slope stability

0 引言

在非均质砂黏互层地基中,砂土和黏土渗透性的差异使土层界面处很容易产生渗流集中现象,造成优势流甚至管涌型渗透破坏,严重威胁堤坝、边坡等工程的长期安全^[1]。该类堤基地质结构复杂,岩性交互频繁,渗透各向异性明显,界面处容易形成并发展渗透通道,这直接影响着水分输运和孔隙水压力分布,进而对边坡应力场和稳定性产生影响^[2]。因此,对砂-黏界面渗流特性及其在边坡渗流稳定中的作用进行研究,对于揭示非均质地层中渗流破坏机理、完善渗流风险评价方法有重要的理论意义。

许多学者就非均质土层中渗流风险的识别及防控措施优化进行了大量研究^[3-4]。莫永杰等^[5]通过研究吹填与碾压筑堤在水位速降变化规律,得出吹填筑堤稳定性更优;尹伟强等^[6]根据非饱和渗流理论来研究山区河流洪水涨落时堤防的非稳定渗流特性。结果表明其浸润线呈内凹状,有滞后性,迎水坡水力坡降大于稳态渗流;魏衍杰等^[7]采用水力试验和数值模拟研究不同土壤质地和水分特征曲线模型在瞬态非饱和渗流条件的适用性,结果显示模型选择对边坡渗流分析的可预测性和稳定性评价有很大影响;王倩芸等^[8]通过 SEM 试验得出渗流作用下滑带土微观结构演变规律,即细颗粒向大孔隙迁移填充,使渗透系数随渗流时间增加而降低,最后趋于稳定;邱军领等^[9]用 COMSOL 模拟分析了含裂隙土体隧道在降雨入渗下变形的特点。结果表明,近裂隙侧位移大于远侧,裂隙宽度增大明显,变形大,降雨强度影响小;阙云等^[10]通过数字照相技术对比分析了普通边坡与含优先流边坡的降雨入渗过程,结果表明优先流改变了渗流场;刘春等^[11]通过模型试验和监测分析得出,在地下水位波动的时候,砂层排水会造成上覆黏土层释水滞后、产生负压和附加压应变,从而导致黏土层被持续缓慢压缩;林键等^[12]研究了围压对弱胶结砂岩渗透率及孔隙结构的影响,发现围压会显著降低渗透率,主要是通过大孔隙的闭合和自由孔隙转化为束缚孔隙来实现的;

何海龙等^[13]通过水文勘察得出铁矿边坡地下水运移规律,得出强降水经由排土场蓄水之后沿裂隙带渗流劣化岩体是失稳主要原因;赵宽耀等^[14]利用试验发现了黄土隐伏裂隙是优势流的渗流机制,高强度灌溉时优势流起主导作用,水快速下渗;低强度长历时基质流起主导作用,地表形成饱和层;同霄等^[15]通过现场观测和数值模拟研究了黄土降雨入渗深度,结果表明非饱和入渗深度小,优势通道入渗深度大、影响范围广。

基于此,以山东省某非均质砂黏互层地基为例,通过室内试验和物理模型模拟,对砂黏互层地基界面渗流特性进行研究,主要研究通道深度、纵向位置、数量等对孔隙水压力演化、破坏时滞、整体稳定性的影响规律,分析渗透通道对于边坡稳定的影响,为非均质土层中渗流风险的准确识别及工程防控措施的优化设计提供依据。

1 工程概况

山东省菏泽市属于黄河冲积平原地区,堤防和渠坡工程大都建在典型的非均质砂黏互层地基上。在长期渗流以及水位循环变动作用下,此类堤基中易形成并发展出优势渗透通道,诱发渗透变形,使土体抗剪强度明显降低,威胁边坡的整体稳定。此外,部分渠段已出现岸坡塌落、冲沟发育等失稳现象,亟需对非均质砂黏互层中渗透通道的演化规律及多场耦合作用下边坡稳定性响应机制、风险预警方法等重要问题展开系统研究,从而改善此类工程地质条件下渗流防控和边坡稳定性评价的科学性。

2 土样性质与界面渗流试验

2.1 基本工程性质测试

砂土中粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量占比超过 98%,级配良好的中粗砂,透水性很强。粉质黏土的粒度分布以黏粒(<0.005 mm)和粉粒为主,具体见表 1。

通过固结快剪试验得到土体的抗剪强度参数,砂土具有典型的散粒体摩擦特性,黏聚力 c 为 2.1 kPa,内摩擦角 φ 为 32.5°。黏土黏聚力 c 为 21.4 kPa,内摩

岩土力学

擦角 φ 为 18.7° 。砂土的稳定性主要依靠颗粒间的摩擦和咬合,对含水率的变化比较敏感,黏土的强度主要依靠黏聚力,遇水软化效应大。

表 1 基本参数测试结果

Table 1 Test results of basic parameters

类别	不均匀 系数 C_u	曲率系 数 C_c	天然密度 /(g/cm^3)	天然含水 率 /%	塑限 /%	饱和渗透系 数/(cm/s)
砂土	5.2	1.1	1.92	4.5		3.6×10^{-3}
黏土			1.86	24.8	25.2	2.1×10^{-6}

2.2 砂-黏界面渗流试验

2.2.1 砂-黏界面渗流试验方案

设计砂-黏界面专项渗流试验,试验利用自制有机玻璃圆柱形渗透仪(内径 10 cm,高 30 cm)进行。试样制备时,先在仪器底部铺 2 cm 厚透水石和滤布,然后分层填入预先配置好的重塑黏土,控制其干密度为 $1.65 \text{ g}/\text{cm}^3$,含水率为 24%,分层击实到总厚度 10 cm,模拟相对隔水的黏土层。在上表面铺一层标准石英砂,厚度为 5 cm 代表上覆透水砂层。试样制备完成后,用自下而上的真空抽气结合水头饱和和法充分饱和。试验开始后利用马氏瓶供水系统给砂层顶部施加稳定的竖向渗流,初始水力梯度为 0.5,然后以每 30 min 递增 0.5 的步幅逐渐增大,直到观察到明显的界面破坏现象为止。

2.2.2 渗流试验结果分析

由图 1 可知,在低水力梯度阶段 ($i < 3.0$),从 $i = 0.5$ 时的 $0.09 \text{ cm}^3/\text{s}$ 增加到 $i = 3.0$ 时的 $0.54 \text{ cm}^3/\text{s}$,近似线性增长,对应的渗流速度变化率 d_v/d_i 为 $0.18 \sim 0.36$,说明此阶段的渗流主要是基质流。当水力梯度从 3.0 增加到 3.5 时, d_v/d_i 从 0.36 突增到 0.62,渗流量从 $0.54 \text{ cm}^3/\text{s}$ 非线性跃升到 $0.80 \text{ cm}^3/\text{s}$,水分在界面处积聚并形成连续侧向水流,渗流模式由均质基质流向非均质优势流发生了根本的转变。随着梯度进一步增大到 4.5 的临界水力梯度,渗流量继续增大到 $1.42 \text{ cm}^3/\text{s}$,说明系统在临界状态下渗透能力不断增大,并伴随着管涌破坏的开始。

水力梯度增大到临界值 $i = 4.5$ 时,界面处开始出现砂粒跳动和微细颗粒运移。约 15 min 后局部运移逐渐贯通形成稳定的细沟状管涌通道,通道出口处颗粒流出速率达到 $0.8 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。通道发育沿着砂和黏土层界面向下延伸,向上游的砂层内溯源延伸

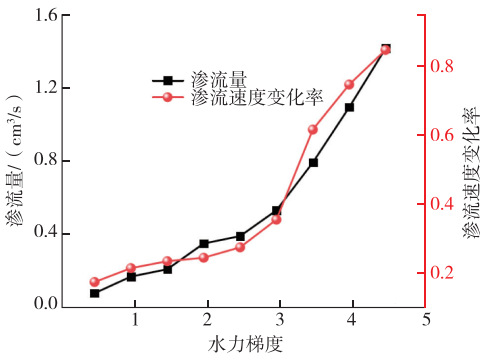


图 1 渗流试验结果

Fig. 1 Results of percolation test

2~3 cm。此时下游渗流量在临界梯度后 30min 内又增加了约 35%,证明通道的形成大大提高了体系的渗透能力,这表明砂黏互层界面处一旦出现管涌,就会迅速形成稳定的集中渗流通道,因此后续试验需重点关注界面处。

3 边坡模型试验与稳定性分析

考虑到砂-黏界面渗流试验只反映了单一界面的微观渗流失稳机制,为了探究该机制在实际非均质多层堤基结构中的宏观表现以及对整体边坡稳定性的影响,进一步开展包含多层砂-黏互层结构及预设渗透通道的大型边坡模型试验,在模拟持续降雨条件下,研究渗透通道的几何特征在复杂地层中对孔隙水压力场演化及边坡最终失稳过程的控制作用。

3.1 堤基边坡物理模型试验

3.1.1 模型制作

由图 2 可知,模型尺寸为长 1.0 m、宽 0.6 m、高 1.0 m,边坡高度设计为 0.6 m,坡比为 1:1.5。模型严格按照地质原型,用分层压实法精细填筑,底部铺设 0.1 m 厚的粗砂垫层,其上交替填筑三层黏土层和两层砂层,模拟非均质砂黏互层结构。填筑过程中在预设位置处理入直径为 2 mm 的圆柱形通道(方向垂直于坡面),通道内填充松散的标准砂子,深度、纵向位置、数量根据研究变量确定。在预设通道的中心位置以及其正下方紧邻的土层界面处设置一个微型孔隙水压力传感器,用来监测通道全过程孔隙水压力的变化。

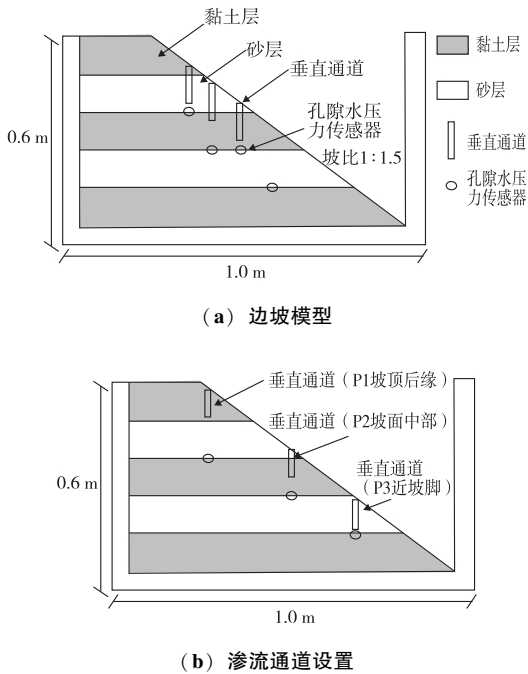


图 2 边坡模型图
Fig. 2 Slope model diagram

3.1.2 工况设计

利用控制变量法来研究渗透通道深度、纵向位置以及数量对边坡渗流稳定性的影响。试验设置恒定降雨强度为 60 mm/h。通道深度设四个水平；纵向位置设三个水平，坡顶后缘（P1）、坡面中部（P2）、近坡脚（P3）；通道数量设四个水平 $N=1、2、3、4$ （分别对应 1 到 4 个平行通道），具体工况设置见表 2。

表 2 设计工况
Table 2 Design conditions

研究变量	条件	变化水平
通道深度	P2（坡面中部） $N=1$	0.10、0.15、0.20、0.25 m
纵向位置	$D=0.2\text{ m}$ $N=1$	坡顶后缘（P1）、坡面中部（P2）、近坡脚（P3）
通道数量	$D=0.2\text{ m}$ P2（坡面中部）	1、2、3、4

3.2 结果分析

3.2.1 通道深度影响

由图 3 可知，通道深度 D 为 0.10 m 时，孔隙水压力在监测开始后大约 5.0 h 由初始负压变为正压。随着深度增加， D 为 0.15、0.20、0.25 m 工况下的转正时滞分别缩短到约 4.2、3.3、2.5 h，说明更深的通道可以大幅度减少水分运移到监测点所需要的时间。各通道孔隙水压力达到峰值后都逐渐下降，

0.10、0.15、0.20 和 0.25 m 通道深度的峰值压力分别为 27.8、45.6、48.9 和 50.5 kPa，峰值压力随深度增加而明显增大。压力达到峰值后开始缓慢消散，在监测结束时各通道的压力分别约为 21.6、25.8、31.6 和 20.8 kPa。这是由于深部通道贯通后，涉及的水体体积更大，压力释放和能量耗散过程更明显，表明通道深度影响水分汇集的效率，也控制孔隙水压力的积累规模和消散特征。

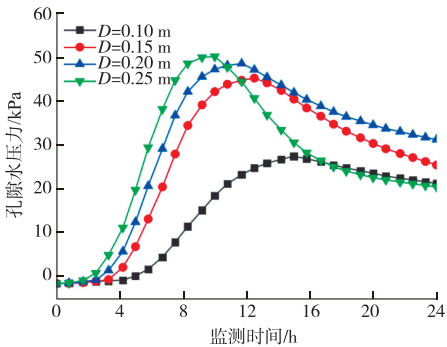


图 3 不同通道深度下孔隙水压力变化
Fig. 3 Changes in pore water pressure under different channel depths

由图 4 可知， D 为 0.10 m 工况下，边坡在降雨开始后 18.2 h 发生破坏； D 为 0.15 m 工况下破坏时间缩短到 10.4 h； D 为 0.20、0.25 m 工况的破坏时间也提前到 6.9、4.5 h。更深的通道加快了水分向坡体深部的输送，使潜在滑面上的孔隙水压力增大，从而使有效应力和抗剪强度更快地降低。也就是说，更深的通道贯通一般会破坏更大的范围土体的渗透稳定性，诱发的应变软化区更接近潜在的深层滑裂面。

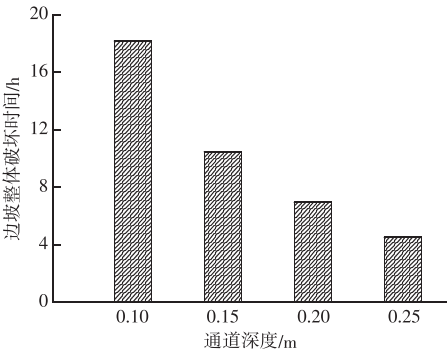


图 4 不同通道深度下边坡整体破坏时间变化
Fig. 4 Variation of overall slope failure under different channel depths

岩土力学

3.2.2 通道纵向位置影响

由图 5 可知, P1 工况下, 压力在降雨开始后约 5.0 h 转为正压; P2 工况提前到约 4.2 h; P3 工况响应最快, 约 2.5 h 转正。P1、P2、P3 的峰值压力分别为 22.85、35.05、41.20 kPa, 其中 P3 工况在约 5.8 h 时达到峰值, 比 P2、P1 工况提前较多。这是由于通道位置越靠近坡脚, 水分沿优势路径汇集到潜在滑裂面附近的速度越快, 孔隙水压力达到峰值的时间越早, 越早削弱土体的抗剪强度, 对边坡稳定性造成的威胁越大。

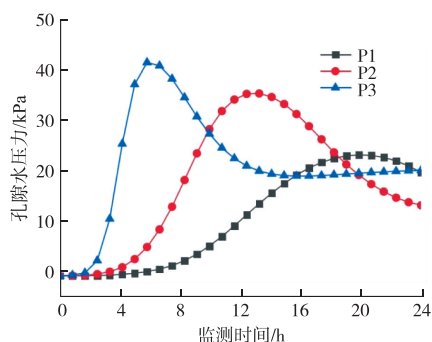


图 5 不同纵向位置下孔隙水压力变化

Fig. 5 Changes in pore water pressure at different vertical positions

由图 6 可知, P1 工况边坡破坏时间为降雨开始后 10.8 h, P2、P3 工况分别在降雨开始后 4.5、2.9 h 发生整体失稳。坡脚附近通道的发育和贯通直接扰动、软化了边坡最重要的抗滑区域, 几乎在水分汇集完成、通道贯通的瞬间便发生了大规模的剪切破坏。位于坡顶后缘的通道水分运移路径长, 对主要滑裂面的直接影响小, 影响范围要经过长时间才能扩展到临界区, 所以破坏过程明显滞后。

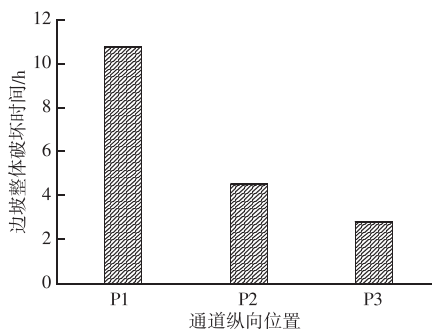


图 6 不同纵向位置下边坡整体破坏时间变化

Fig. 6 Variation of overall slope failure time under different vertical positions

3.2.3 通道数量影响

由图 7 可知, 压力上升速率和峰值强度随 N 值增大而同步增大, 4 个工况的峰值压力分别为 35.05、41.68、47.15、49.50 kPa, 其中 $N=4$ 工况在 6.62 h 时达到峰值。峰值后各个曲线均呈现缓慢下降的趋势, 监测结束时压力分别为 12.85、18.18、22.75 和 23.75 kPa 左右, 这是由于通道数量的增加形成了局部高渗透性的渗流网络, 提高了水分向关键区域输送的效率和总量, 使边坡渗流失稳的风险急剧增大。

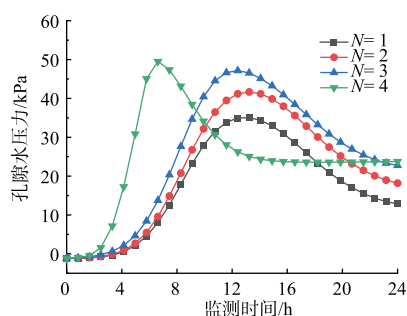


图 7 不同通道数量下孔隙水压力变化

Fig. 7 Changes in pore water pressure under different channel quantities

由图 8 可知, 单一通道工况下边坡在降雨开始后 4.5 h 发生整体失稳。通道数量增加到 2 个时, 破坏时间急剧缩短到 3.2 h。在最不利的 4 个通道工况下, 边坡整体破坏时间缩短到 1.8 h。每增加一个通道所引起的破坏时间减量分别为 1.3、0.8 和 0.6 h, 叠加效应使边坡稳定性迅速劣化。

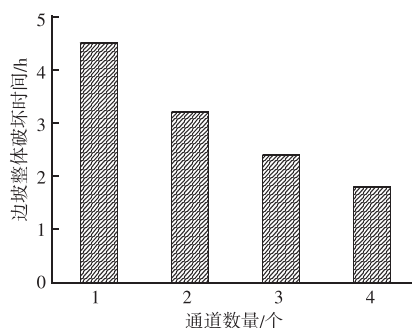


图 8 不同通道数量下边坡整体破坏时间变化

Fig. 8 Variation of overall slope failure time under different numbers of channels

3.3 渗流通道对边坡稳定影响

由图 9 可知, 非均质砂黏互层结构中, 界面或者预设的松散通道形成了渗透性明显大于周围土体的

薄弱带, 渗流通道的存在彻底改变了渗流的边界条件和时空分布。降雨沿着该通道快速下渗, 形成高度集中的优势流, 水分绕过低渗透性的土层, 输送到深层潜在滑裂面附近。水分汇集造成该区域孔隙水压力急剧升高, 有效应力相应减小, 土体的抗剪强度明显降低。渗流集中会加大通道壁的冲刷和颗粒运移, 使通道孔径增大、导水能力增强, 渗流侵蚀和力学软化相互促进, 局部破坏区很快连接贯通, 形成宏观的剪切滑移带。

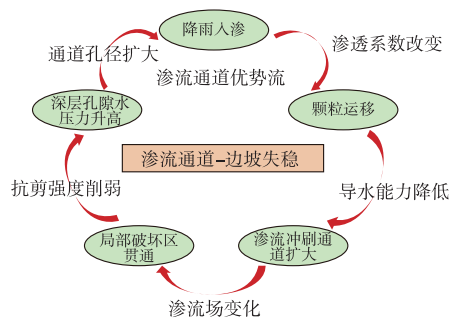


图9 渗流通道对边坡稳定影响

Fig. 9 The influence of seepage channels on slope stability

4 结论

通过室内试验以及物理模型模拟, 对非均质砂黏互层堤基中渗透通道的演化规律及其对边坡稳定的影响进行系统研究, 得出主要结论如下:

(1) 砂土和黏土的渗透系数相差较大 (分别为 3.6×10^{-3} 、 2.1×10^{-6} cm/s), 砂黏土界面处在临界水力梯度为 4.5 时出现管涌破坏, 形成渗流通道。

(2) 边坡模型试验中, 通道深度从 0.10 m 增大到 0.25 m 时, 孔隙水压力转正时间与破坏时间均缩短, 且深部通道 (D 为 0.25 m) 的压力消散幅度最大。

(3) 近坡脚通道的水力响应最快, 渗流通道为 4 个的工况下破坏时间由单通道的 4.5 h 锐减到 1.8 h, 表明局部渗流网络形成会极大加快边坡整体失稳。

(4) 渗流通道形成优势路径, 使水分快速下渗并汇集在潜在滑裂面上, 造成孔隙水压力迅速增大, 在渗流作用和力学耦合作用造成局部破坏区贯通,

进而引起宏观滑动。

参 考 文 献

- [1] 李千, 樊秀峰, 吴振祥. 软式透水管作用下边坡排水效应试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (增刊 1): 143-148.
- [2] 周新涛, 张电吉, 朱元栩, 等. 多软弱夹层岩质边坡失稳特性及非饱和渗流特性研究 [J]. 矿业研究与开发, 2025, 45 (7): 208-217.
- [3] 庞永利, 何滔, 赵景龙, 等. 基于高密度电法的露天矿边坡地下水渗流通道探测技术应用 [J]. 中国煤炭地质, 2023, 35 (6): 68-71.
- [4] 李鸿娟, 徐啸川. 水位下降对堤防边坡稳定性影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 31-38, 74.
- [5] 莫永杰, 徐啸川. 水位速降条件下吹填及碾压筑堤渗流稳定性模型试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 48-53, 67.
- [6] 尹伟强, 吴涛. 山区河流洪水涨落时双层堤基非稳定渗流数值分析 [J]. 水电能源科学, 2024, 42 (9): 190-193, 198.
- [7] 魏衍杰, 盛园园, 马超. 瞬态渗流条件下水力特性对非饱和边坡稳定性的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 88-92.
- [8] 王倩芸, 唐辉明, 鲁莎, 等. 渗流作用下黄土坡临江一号滑坡滑带土结构演变规律分析 [J]. 安全与环境工程, 2024, 31 (6): 134-144.
- [9] 邱军领, 贾珂, 赖金星, 等. 含裂隙土质隧道降雨入渗双通道渗流模型 [J]. 岩土工程学报, 2025, 47 (3): 548-558.
- [10] 阙云, 陈建安, 蔡松林, 等. 降雨下透明土边坡渗流与失稳模型试验可视化 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (2): 218-225, 233.
- [11] 刘春, 施斌, 吴静红, 等. 排灌水条件下砂黏土层变形响应模型试验 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (9): 1746-1752.
- [12] 林键, 杨溢, 曹广勇, 等. 静水压作用下砂岩渗透特性及渗透率模型改进 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20 (3): 776-787.
- [13] 何海龙, 王鹏胜, 薛陆, 等. 地下水运移对露天矿山边坡的影响探析与渗流减缓措施研究 [J]. 甘肃科学学报, 2024, 36 (3): 90-99.
- [14] 赵宽耀, 许强, 刘方洲, 等. 黄土中优势通道渗流特征研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (5): 941-950.
- [15] 同霄, 彭建兵, 朱兴华, 等. 黄土地区降雨的优势入渗深度 [J]. 水土保持通报, 2017, 37 (3): 231-236.