

中文引用格式:孙祚,佟瑞鹏,齐庆杰,等. 水位升降作用下露天矿岩质边坡变形破坏机制[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 127-135.

英文引用格式:SUN Zuo, TONG Ruipeng, QI Qingjie, et al. Deformation and failure mechanisms of open-pit mine rock slopes under water level fluctuations[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 127-135.

水位升降作用下露天矿岩质边坡变形破坏机制^{*}

孙祚^{1, 2}副研究员, 佟瑞鹏¹教授, 齐庆杰²教授, 刘英杰^{**2, 3}研究员,
甘一雄^{2, 3}助理研究员, 孟城²

(1 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 2 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 3 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 北京 100013)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.1577

基金项目:国家自然科学基金资助(52174188)。

【摘要】 为解决蓄水废弃露天矿岩质边坡在水位升降作用下易沿节理面失稳的问题,通过制备含节理及软弱夹层的相似材料,开展边坡物理模型试验。基于正交试验设计优化相似材料配比,确保其力学与渗流特性与原岩相似。在模型内部布设孔隙水压力、土压力、含水率及位移传感器,系统监测水位升降过程中边坡的多场响应。通过设置不同循环次数与水位变化速率工况,研究边坡的变形特征与破坏机制。结果表明:相同速率下多次水位升降引发的冲刷效应对边坡表面产生一定程度的破坏,但内部结构损伤较小,单一的水位缓速升降对整体稳定性影响不大。水位的升降速率对边坡影响较为显著,水位下降速率与坡体位移增速成正相关,指向坡体外侧的孔隙水压力越大,孔隙水压力受滞后效应影响越明显,边坡失稳可能性越高。

【关键词】 水位升降; 露天矿; 岩质边坡; 变形破坏; 相似材料; 模型试验

Deformation and failure mechanisms of open-pit mine rock slopes under water level fluctuations

SUN Zuo^{1, 2}, TONG Ruipeng¹, QI Qingjie², LIU Yingjie^{2, 3}, GAN Yixiong^{2, 3}, MENG Cheng²

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2 Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 3 State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, Beijing 100013, China)

Abstract: To investigate the instability of rock slopes along joint surfaces in water-impounded abandoned open-pit mines under fluctuating water-level conditions, physical model tests were performed using similar materials containing joints and weak interlayers. The mix proportion of the similar materials was optimized through orthogonal experimental design to ensure that their mechanical and seepage properties corresponded to those of the in-situ rock mass. Multiple types of sensors were embedded in the model to monitor pore water pressure, earth pressure, moisture content, and displacement, enabling

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0127-09; 收稿日期:2025-10-08; 修稿日期:2025-12-24

** 通信作者:刘英杰(1985—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,主要从事煤矿灾害监测预警与防控、应急救援技术与装备的研究与开发应用。E-mail: liuyingjie@mail.ccit.cetg.cn。

systematic observation of the multi-field responses of the slope during water-level fluctuations. Working conditions with different numbers of cycles and varied rates of water-level change were designed to examine the deformation characteristics and failure mechanisms of the slope. The results indicate that certain damage to the slope surface is caused by the scouring effect induced by repeated water-level fluctuations at a constant rate, although internal structural damage is limited. This suggests that overall stability is little influenced by slow, single water-level fluctuations. The rate of water-level change is shown to significantly affect slope behavior, with slope displacement increases positively correlated with the rate of water-level decline. Furthermore, the greater the outward-directed pore water pressure of the slope is, the more significantly it is influenced by the hysteresis effect, and the higher likelihood of slope instability becomes.

Keywords: water level rise and fall; open-pit mine; rock slope; deformation failure; similar materials; model test

0 引言

双碳背景下,资源枯竭的废弃露天矿坑数量将大量增加。蓄水型废弃露天矿是一种成本低、功能性强的绿色生态治理技术,但库岸的岩质边坡在周期性蓄水和排水作用下,消落带的岩体会逐渐退化,增加局部塌岸的风险,滑坡是其引发的最典型灾害之一^[1-2]。库岸边坡长期受到库水位变化影响,其破坏和变形机制相较于一般岩质边坡显得更为复杂。

对于库岸岩质边坡岩体劣化机制和稳定性分析,国内外学者从理论方法^[3-4]、模型试验^[5-8]以及数值模拟^[9-12]等方面开展了诸多研究。库水入渗将抬升边坡内部地下水位,扩大地下潜水层的范围,进而降低抗滑力^[13]。蓄放水引起的库水位波动也会改变边坡内部渗流场,使其结构更加松散,从而加速边坡的下滑与变形破坏^[14]。研究表明:边坡岩土体的物理力学特性经历长时间干湿循环而发生不可逆的劣化是边坡在极端条件下发生失稳的重要诱因^[15-18]。与此同时,相似材料的研制是物理模型试验开展的前提条件,也是决定模型能否真实反映原型物理性质的关键因素^[19-21]。ZHAO Bingchao 等^[22]用河砂、重晶石粉、黏土、石膏和硅藻土配制了湿陷性黄土相似材料;陈帆等^[23]选用黏土、重晶石粉、河砂和水成功配置黏土相似材料,再现了地铁隧道涌水涌砂灾害演化过程。陆先伦等^[24]基于透明相似模型试验技术,开展了主控裂隙边坡内部变形破坏演化过程的模型试验;安彩龙等^[25]研制出一种能同时模拟边坡岩体物理力学性能和渗流作用的固-液两相相似材料,为相似材料试验相关研究提供了一定参考。

综上,学者们针对水位升降对边坡稳定性的影响机制开展了丰富的研究,然而,已有研究尚未系统开展考虑水位循环作用下含软弱夹层的岩质边坡稳

定性分析,且针对不同水位升降次数和升降速率对边坡稳定性的影响机制研究不够深入。鉴于此,笔者拟基于正交试验开展相似材料配比研究,阐明蓄水型露天矿边坡的渗流-应力响应特征,揭示其边坡变形破坏机制,以期对蓄水废弃露天矿运行过程中边坡稳定性预警与防控提供试验支持和理论依据。

1 相似材料配比试验

1.1 相似材料选取及配比

基于试验研究背景和目的,参考地质力学模型试验常用相似材料原料,选取石英砂(节理层材料)、重晶石砂(粗骨料/充填材料)、重晶石粉(细骨料/增密剂)、水泥(胶结剂)、自来水作为边坡岩体相似材料原料。优先保证强度参数和渗透系数的相似。采用正交设计进行相似材料配比试验,以重晶石砂、重晶石粉、水泥掺量、水作为试验的主要影响因素,每个影响因素设计2个水平,各影响因素水平值见表1。

表1 相似材料正交设计水平

Table 1 Level of orthogonal design for similar materials					
编号	水泥掺量/%	重晶石砂/g	重晶石粉/g	水泥/g	水/g
1	1.0	1 810	1 000.5	40	240
2	1.2	1 810	1 000.5	48	250
3	1.4	1 810	1 000.5	56	255
4	1.6	1 810	1 000.5	64	260
5	1.8	1 810	1 000.5	72	265
6	1.0	3 300	564	40	240
7	1.2	3 300	564	48	250
8	1.4	3 300	564	56	255
9	1.6	3 300	564	64	260
10	1.8	3 300	564	72	265

1.2 相似材料样品制备及力学性质测定

测定养护完全后的相似材料样品的力学参数,结果见表 2。

表 2 相似材料力学参数测定结果
Table 2 Measurement results of mechanical parameters for similar materials

编号	抗压强度/MPa	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	渗透系数/(m·h ⁻¹)	泊松比
1	0.24	2.437	29.31	5.884×10 ⁻⁸	0.28
2	0.268 5	2.520	27.15	5.54×10 ⁻⁸	0.33
3	0.324 4	2.543	28.27	5.652×10 ⁻⁸	0.32
4	0.37	2.587	31.44	4.987×10 ⁻⁸	0.28
5	0.13	2.349	35.75	6.130×10 ⁻⁸	0.29
6	0.17	2.373	36.66	5.927×10 ⁻⁸	0.26
7	0.33	2.392	35.42	6.429×10 ⁻⁸	0.23
8	0.37	2.406	38.95	6.698×10 ⁻⁸	0.27

比较测得的相似材料力学性质与原岩材料力学性质,得到合适的相似材料配比,结果见表 3。

表 3 材料力学性质试验结果对比
Table 3 Comparison of test results of mechanical properties of materials

参数	相似材料	原岩材料(砂岩)	相似比
质量 m/g	482	500	1:1.04
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.32	2.57	1:1.10
抗压强度 σ/MPa	0.34	80	1:235
泊松比 ν	0.27	0.33	1:1.22
弹性模量 E/MPa	29.31	6 600	1:225

2 蓄水露天矿边坡相似模型试验

2.1 试验系统搭建

室内边坡模型试验主要装置包括模型箱、水位升降系统、测量系统、控制系统和监测系统等。将试验物理模型概化为由基岩、节理和软弱夹层 3 部分组成,概化后的边坡模型如图 1 所示。模型尺寸长宽高为 1 m×0.8 m×1 m。试验中概化设计的边坡模型坡高为 1 m,坡角为 60°,含平直状岩体结构面坡体层面间距为 50 mm,软弱夹层厚度为 4 cm,倾角为 45°。相

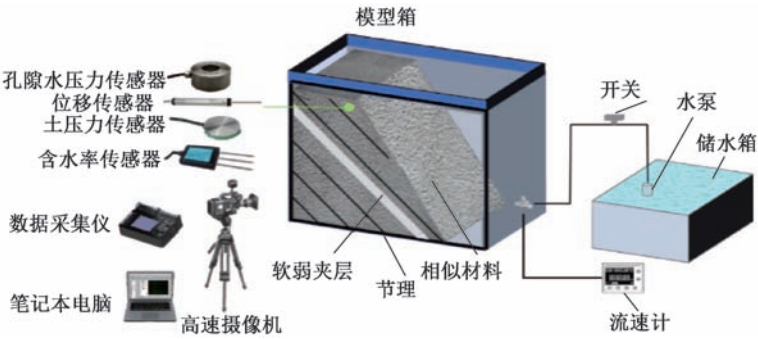


图 1 试验系统概化
Fig.1 Experimental system schematic diagram

邻 5 cm 处设置 2 条竖直节理,厚度 2 cm。布设传感器情况如图 2 所示,试验过程伴随高速摄像机摄影。

2.2 室内边坡模型试验工况设计

- 结合试验研究目标,设计试验工况如下:
- 1) 为研究不同次数的水位升降试验结果,控制模型装置内水位升降实现干湿循环效果,设置蓄水罩 V_s = 排水速率 V_d = 1.5 L/min,当水位达到设定高度时,停止蓄水;水位升降幅度控制以 25 cm 为一阶段,每阶段静置 1.5 h,最高水位 75 cm,至最高水位后静置 5 h。按此程序进行 4 次干湿循环。
 - 2) 为研究不同水位变化速率的影响结果,以蓄水速度的不同倍数(取 2、4、8、12 倍)进行排水,完成 4 次水位循环升降过程。

2.3 不同次数水位升降试验结果分析

- 不同次数水位升降模型试验各曲线结果如图 3 所示。由图 3 可知:
- 1) 位移变化。从图 3a 可以看出,位移量整体处于较低水平,最大位移量不超过 0.7 mm。表明水位的波动升降仅对坡体表面有一定的劣化作用,对其内部影响程度很小。
 - 2) 孔隙水压力及土压力变化特征。从图 3b、图 3c 可以看出,每次循环都将促进坡体进一步劣化。由于入渗与出渗过程缓慢,孔隙水压力和土压力的变化相较于水位波动具有较为明显的滞后性。
 - 3) 含水率变化特征。从图 3d 可以看出,不同位置的含水率均呈现与水位相同的变化趋势,且不

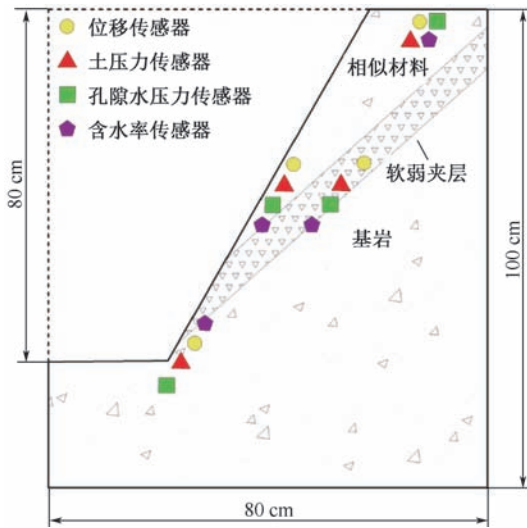


图2 传感器布置分布

Fig. 2 Distribution diagram of sensor arrangement

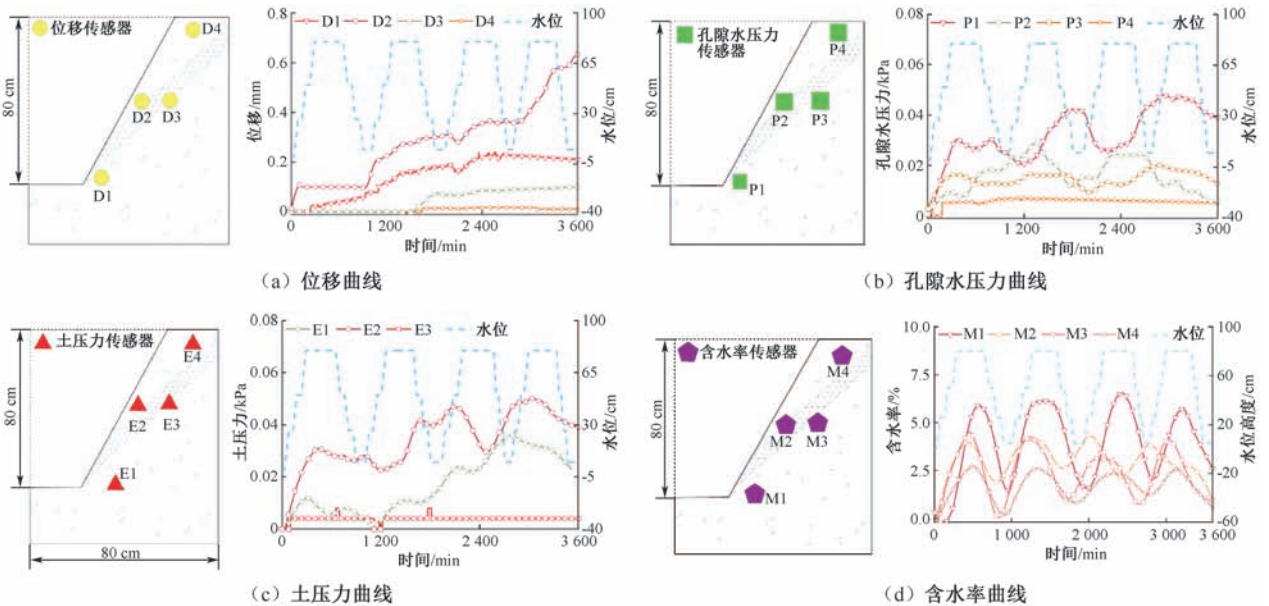


图3 不同次数干湿循环模型试验结果变化曲线

Fig. 3 Curves of model test results under different numbers of wet-dry cycles

与水位上升作用机制相反,水位下降使坡体前缘受到指向坡外的渗透压力,各测点变形减小,曲线较为平缓。水位升降对坡体前缘位移变化影响远大于对坡体后缘,距离水位面越近,位移变化幅度越大。

2) 孔隙水压力变化特征。由图 4b 可知:在水位下降过程中,坡体外部的水压力值降低,引起坡体内部的水压力值大于坡体外部,水在坡体内部流动,改变了其孔隙水压力。水位下降速度越大,边坡内部孔隙水压力消散越慢,因此,水位下降时应重点关注边坡的浸水软化作用,水位下降和地下水引起的

同循环次数各位置含水率峰值基本保持一致,表明持续的水位升降作用对边坡体内含水率的变化影响较小。

综上,多次水位循环对位移、孔隙水压力、土压力及含水率变化特征等各参数影响并不大,边坡整体亦未见明显的破坏迹象或趋势,说明单纯的在一定速率下干湿循环作用对边坡各部位及整体稳定性无较大威胁。

2.4 水位速率变化试验结果分析

定义 n 为排水速率为蓄水速率的 n 倍,设置 $n = 2, 4, 8, 12$ 这 4 种工况。不同水位变化速率试验获得的曲线如图 4 所示。由图 4 可知:

1) 位移变化特征。由图 4a 可知:水位上升坡体前缘受到指向坡内的渗透压力,导致位移增大。

动态渗透是诱发滑坡的主要原因。

3) 土压力变化特征。由图 4c 可知:库水位升降使得其波动范围内的土压力增减,其增减速度与库水位变化速度成正比。水位升降使得坡体内土压力增加,其压力值增加幅度与蓄排水速率成正比。

4) 含水率变化特征。由图 4d 可知:入渗过程中,不同位置含水率的变化速率不同,主要趋势可分为快速增长、缓慢增长、稳定 3 个阶段,在快速增长阶段之前有一相对较长起始阶段,此阶段含水率基本保持不变。

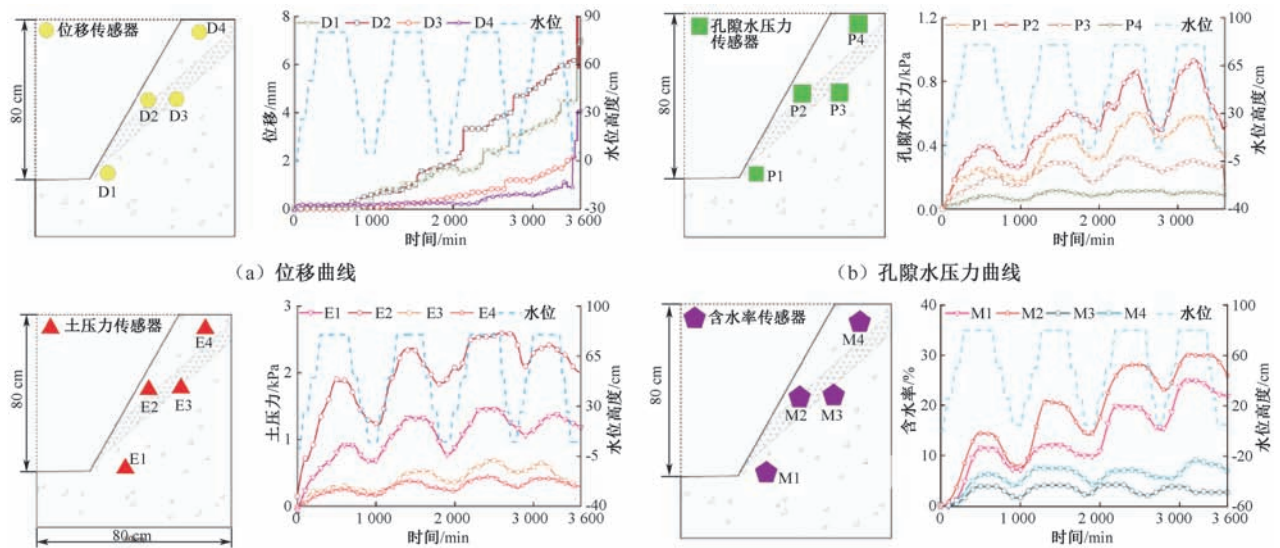


图 4 不同水位变化速率试验结果变化曲线
Fig. 4 Curve of test results under different water level change rates

3 岩质边坡变形破坏机制

3.1 浸润线变化特征

水位的上升与下降主要改变边坡内部渗流场,即影响边坡浸润线变化。浸润线变化过程如图 5 所示。初次水位上升阶段的瞬态浸润线拟合后近似为上凹形曲线,表明随坡外水位上升,其水头压力逐渐增大,在水头压力作用下水体不断向边坡内部岩土体渗透扩散,水头压力随渗透半径增大而逐渐耗损,直至一定渗透半径后渗透阻力与渗透水头压力达到平衡,渗透过程结束。

水位下降阶段瞬态浸润线拟合后近似为下凹形曲线,表明随坡外水位的迅速下降,水头压力减小,水位线以上坡体内部的水体产生相对于坡外的渗透水压,随坡内水体的不断外渗流出,水位逐渐下降,最终坡体浸润线呈现出下凹特征。

由图 5 可知:水位动态变化对边坡稳定性的影响主要表现在 2 个方面:①渗透作用会降低边坡岩土体的物理力学性质,削弱边坡的抗剪强度;②水位升降会改变边坡内孔隙水压力,同时也会造成边坡的冲刷和软化,最终导致边坡逐渐失稳。

3.2 破坏过程分析

边坡破坏过程如图 6 所示,按照 4 个阶段分析边坡破坏过程。

1) 阶段 1: $V_d=2V_s$ 。由图 6a 可知:坡面未出现侵蚀和垮塌现象,无明显宏观变形和破坏特征。此时库水自由入渗,表面被冲刷软化,边坡由非饱和状

态逐渐变为部分饱和状态,边坡处于稳定状态。

2) 阶段 2: $V_d=4V_s$ 。由图 6b 可知:1 次升降循环结束后在坡脚位置发现长度 2 cm 裂缝,边坡两侧出现多条短裂缝,并伴随一条明显的横向裂缝。坡顶附近逐渐出现细长张拉裂纹,随着水位下降,最后在后缘形成 4 cm 的张拉裂缝。

3) 阶段 3: $V_d=8V_s$ 。由图 6c 可知:水位下降过程中,裂缝 1 破坏明显加深,破坏区域随裂缝 1 从坡脚向坡腰发展,横向裂纹从两侧向中间发展,而张拉裂纹 2 沿纵向向下延伸。后缘的张拉裂纹明显延伸,裂纹最大宽度达 3 cm。在第 3 个水位波动循环中,由于坡脚部分滑动,坡体变脆弱,导致支撑体积减小。

4) 阶段 4: $V_d=12V_s$ 。由图 6d 可知:经过 3 次水位波动后,坡体出现明显裂缝,但尚未发生整体滑动。在第 4 阶段水位上升过程中,坡腰的横向裂纹由两侧延伸至贯通,相邻的张拉裂纹呈“Y”形分布,坡脚完全破坏,后缘局部拉裂缝继续发展。坡腰岩体继续滑落,边坡前部的软岩碎片不断掉落,完全失去稳定性和承载力,进一步扩大坡底堆积体范围。

3.3 变形破坏机制分析

基于水位升降循环、水位速率变化等多工况模型试验结果,从以下不同方面,系统分析蓄水废弃露天矿岩质边坡在干湿循环作用下的失稳机制。

1) 水岩相互作用机制。水位的周期性升降导致边坡岩体反复经历饱和-非饱和状态转换,从而引发物理力学响应,见表 4。

2) 变形累积与裂纹发展特征。试验表明:边坡变形与裂纹发展可分为 3 个阶段,见表 5。

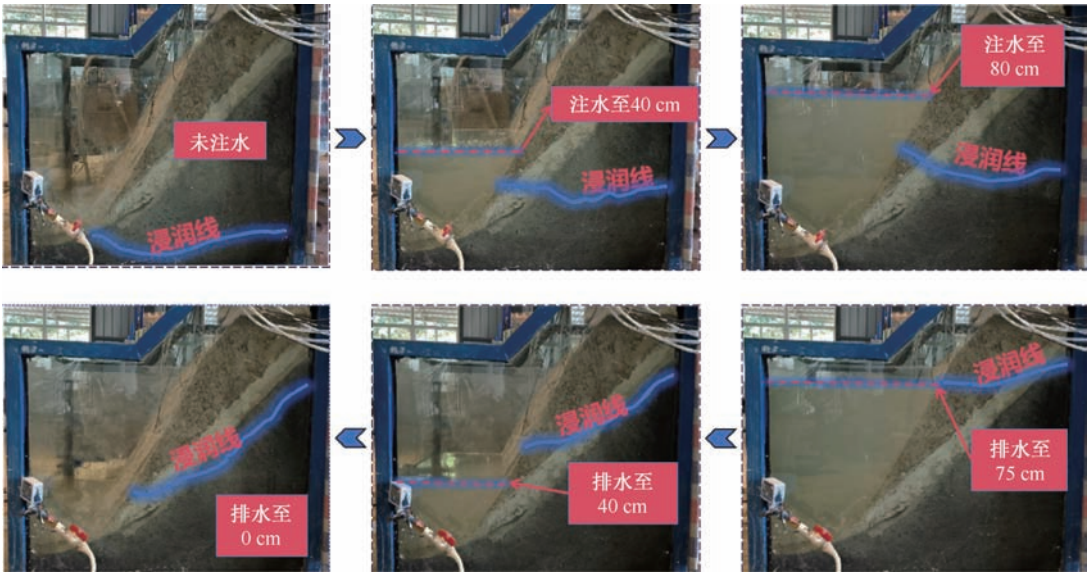


图 5 边坡浸润线变化情况
Fig. 5 Changes in slope infiltration line

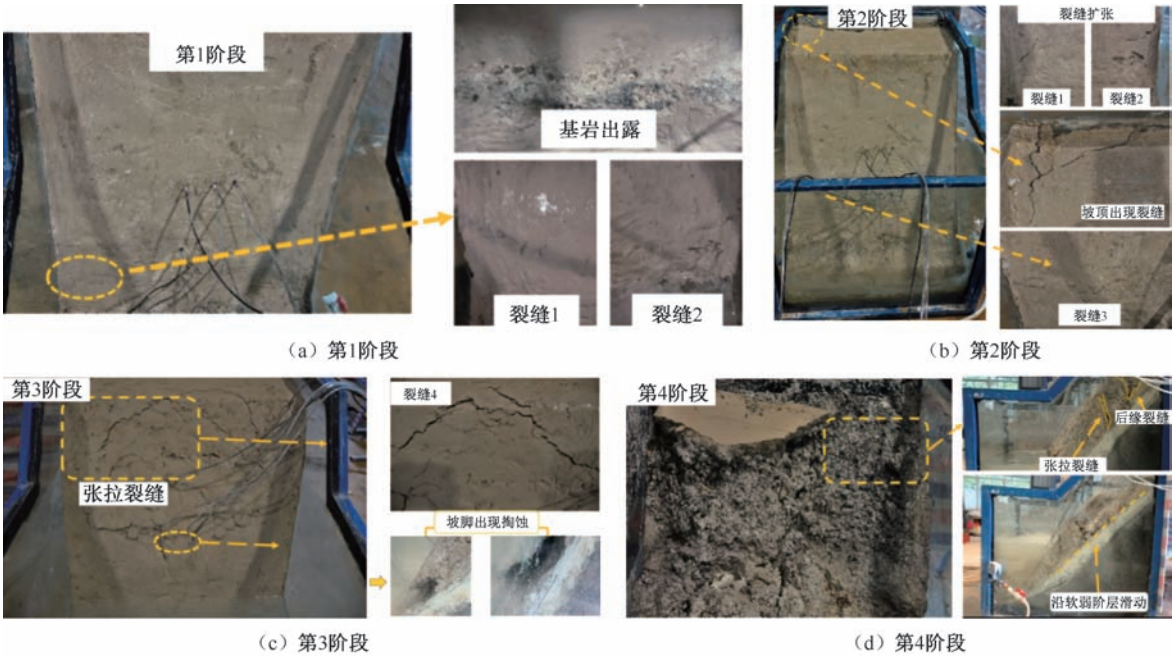


图 6 4 个阶段坡体变形
Fig. 6 Slope deformation in four stages

3) 水位升降循环的长期效应分析。多次循环虽未立即引发破坏,但会累积损伤,导致岩体抗剪强度持续衰减,渗透通道逐渐贯通,最终在某一临界循环次数或水位变化速率下触发突发性破坏。

综上,库岸岩质边坡在水位升降循环作用下的破坏是一个由水岩相互作用引发材料软化、渗透压力变化导致应力重分布、裂纹逐步发展并最终贯通的损伤累计过程。水位变化速率是影响破坏进程的关键因素,水位的快速下降更易引发失稳。

4 结 论

1) 边坡的滑动主要是由内部劣化引起的宏观现象。多次水位升降引发的冲刷效应对边坡表面产生一定程度的破坏,但内部结构损伤较小,说明单一的水位缓速升降对整体稳定性影响不大。

2) 水位的升降速率对边坡影响较为显著,水位下降速率与坡体位移增速趋势成正相关,指向坡体外侧的孔隙水压力越大,孔隙水压力和土压力受滞

表 4 水位升降引发的物理力学响应

Table 4 Physical and mechanical response caused by water level rise and fall

物理力学响应	试验分析	水岩相互作用机制
材料软化与强度衰减	经过 4 次循环后,坡体表面岩土体的抗剪强度有所衰减,其中,黏聚力下降更为明显	水分入渗使岩土体颗粒间的胶结物质溶解、迁移,导致黏聚力下降;同时水分在矿物表面形成水膜,降低内摩擦角
渗透压力作用	当排水速率达到蓄水速率的 8 倍时($V_d=8V_s$),坡脚处最大位移量达到 0.66 mm,表明渗透压力对坡体稳定性影响显著	水位上升阶段,形成指向坡内的渗透压力,推动坡体向前位移;水位下降阶段,坡体内外形成水头差,产生指向坡外的渗透压力(动水压力)
孔隙水压力变化与有效应力原理	在高速排水工况下($n=12$),孔隙水压力下降幅度最大达 0.09 kPa,且消散缓慢	水位上升时,孔隙水压力增大,岩土体有效应力减小,抗剪强度降低;水位下降时,孔隙水压力消散滞后于外部水位变化,导致坡体内仍保持较高孔隙水压力
润滑与渗流侵蚀作用	循环作用促进坡体内微裂隙的扩展与连通,从而改变其渗流特性,加速水岩相互作用的进程	水分在岩体裂隙中流动,不仅起润滑作用降低滑面抗滑力,还对细小颗粒进行迁移和冲刷,逐渐扩大渗流通道,改变岩体渗透特性

表 5 变形累积与裂纹发展规律

Table 5 Law of deformation accumulation and crack development

发展阶段	试验分析	变形累积与裂纹发展规律
初始均匀变形阶段	循环次数较少(1~2 次)或水位变化速率较低($n=2$)时,该阶段位移-时间曲线呈可恢复性波动,坡体处于弹性变形阶段	位移、孔隙水压力等参数变化微弱,边坡整体稳定性良好。此时岩土体以压缩变形为主,无明显裂纹产生
局部损伤与裂纹萌生阶段	当排水速率提高至 4 倍蓄水速率时,坡脚处出现长度约 2 cm 的剪切裂缝,坡顶出现细长张拉裂纹	随循环次数增加或水位变化速率提高,应力集中区域开始出现微裂纹。裂纹主要沿岩层分界面和节理面扩展,表现出明显的方向性
裂纹贯通与变形局部化阶段	D2 位置(坡腰)位移量在高水位变化速率作用下,从 0.25 mm 快速增至 0.521 mm,表明变形由均匀分布向局部集中转变	在多次干湿循环或高水位变化速率作用下,微裂纹逐渐扩展并相互连接,形成贯通的潜在滑面。边坡进入塑性变形阶段,整体稳定性显著降低

后效应影响越明显,边坡越有失稳可能。

3) 边坡变形表现出明显阶段性特征,坡脚出现颗粒掉落,基岩出露,坡面出现剪切裂缝,坡顶出现多条张拉裂缝。其中, $V_d=8V_s$ 工况时坡体开始产生明显破坏,产生层间冲切裂缝,最后由于坡顶岩体的

倾倒,坡体沿节理层交界面发生滑动。

4) 通过物理模型试验初步揭示水位升降循环作用下岩质边坡的变形破坏机制,未来将结合离散元/有限元数值模拟,并通过现场监测数据验证模型可靠性,以提高研究成果的工程适用性。

参 考 文 献

[1] YIN Yueping, HUANG Bolin, WANG Wenpei, et al. Reservoir induced landslides and risk control in Three Gorges project on Yangtze river, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 577-595.

[2] 李长冬, 龙晶晶, 姜茜慧, 等. 水库滑坡成因机制研究进展与展望[J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 67-77.
LI Changdong, LONG Jingjing, JIANG Xihui, et al. Advance and prospect of formation mechanism for reservoir landslides[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 67-77.

[3] 闫国强, 黄波林, 殷跃平, 等. 三峡库区岸坡消落带岩体劣化分形特征与演化预测研究[J]. 地质学报, 2023, 97(7): 2 399-2 407.
YAN Guoqiang, HUANG Bolin, YIN Yueping, et al. Research on fractal characteristics and evolution prediction of rock mass deteriorating in bank slope drawdown zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(7): 2 399-2 407.

- [4] 殷跃平, 黄波林, 李滨, 等. 三峡库区消落带溶蚀岩体劣化指标研究[J]. 地质学报, 2021, 95(8): 2 590–2 600.
YIN Yueping, HUANG Bolin, LI Bin, et al. Research on the deterioration index of karst rock mass in the fluctuating water level zone of Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(8): 2 590–2 600.
- [5] 刘新荣, 郭雪岩, 许彬, 等. 含消落带劣化岩体的危岩边坡动力累积损伤机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 637–648.
LIU Xinrong, GUO Xueyan, XU Bin, et al. Investigation on dynamic cumulative damage mechanism of the dangerous rock slope including deteriorated rock mass in hydro-fluctuation belt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 637–648.
- [6] 雷卫佳, 刘伟煌, 郭生根, 等. 水位升降对库坡渗流场及稳定性影响[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(4): 27–32, 40.
LEI Weijia, LIU Weihuang, GUO Shenggen, et al. Analysis of influence of water level rise and fall on seepage field and stability of reservoir slope[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 27–32, 40.
- [7] 刘新荣, 王葵, 许彬, 等. 消落带劣化下含锯齿状结构面岩质边坡动力响应机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2 377–2 388.
LIU Xinrong, WANG Yan, XU Bin, et al. Investigation on dynamic response mechanism of slopes with serrated structural planes under degradation of rock mass in hydro-fluctuation belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2 377–2 388.
- [8] 汪发武, 宋琨. 库水位涨落条件下不同结构边坡的变形破坏机制分析: 以干将坪滑坡和树坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 575–582.
WANG Fawu, SONG Kun. Analysis of deformation and failure mechanism of bank slopes with different structures under reservoir water level fluctuation: taking Qianjiangping landslide and Shuping landslide as examples[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 575–582.
- [9] 黄波林, 王健, 殷跃平, 等. 基于裂隙网络的消落带岩体劣化区域分布研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1 901–1 908.
HUANG Bolin, WANG Jian, YIN Yueping, et al. Spatial distribution analysis of degraded karst rock mass in fluctuation zone based on fracture network[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1 901–1 908.
- [10] 刘新荣, 景端, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再造模式及典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1 321–1 332.
LIU Xinrong, JING Rui, MIAO Luli, et al. Reconstruction models and typical case analysis of the fluctuation belt of reservoir bank slopes in Wushan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1 321–1 332.
- [11] CHENG L, LIU Y R, YANG Q, et al. Mechanism and numerical simulation of reservoir slope deformation during impounding of high arch dams based on nonlinear FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81: 143–154.
- [12] XU Wenjie, WANG Shi, BILAL M. LEM-DEM coupling for slope stability analysis[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(2): 329–340.
- [13] CHEN Mingliang, QI Shunchao, LIU Pengfei, et al. Hydraulic response and stability of a reservoir slope with landslide potential under the combined effect of rainfall and water level fluctuation[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(1): 1–19.
- [14] 杨忠平, 李绪勇, 赵茜, 等. 关键影响因子作用下三峡库区堆积层滑坡分布规律及变形破坏响应特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 617–627.
YANG Zhongping, LI Xuyong, ZHAO Qian, et al. Key influencing factors based distribution regularity and deformation and failure response of colluvial landslides in Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 617–627.
- [15] LIAO Kang, WU Yiping, MIAO Fasheng, et al. Time-varying reliability analysis of Majiagou landslide based on weakening of hydro-fluctuation belt under wetting-drying cycles[J]. Landslides, 2021, 18(1): 267–280.
- [16] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 717–725.
ZENG Hao, TANG Chaosheng, LIU Changli, et al. Measurement and analysis of shrinkage stress of expansive soils

during drying process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 717–725.

- [17] MIAO Fasheng, WU Yiping, LI Linwei, et al. Weakening laws of slip zone soils during wetting-drying cycles based on fractal theory: a case study in the Three Gorges reservoir (China)[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(7): 1 909–1 923.
- [18] LUO Shilin, HUANG Da. Deformation characteristics and reactivation mechanisms of the Outang ancient landslide in the Three Gorges reservoir, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8): 3 943–3 958.
- [19] 刘永莉, 周文佐, 郭斌, 等. 相似模型实验中泥灰岩相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增1): 2 795–2 803.
- LIU Yongli, ZHOU Wenzuo, GUO Bin, et al. Study on marl similar materials in similar simulation test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 2 795–2 803.
- [20] 赵立春, 刘永杰, 宗赫, 等. 同一边坡角下不同边坡形态及稳定性研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增1): 140–144.
- ZHAO Lichun, LIU Yongjie, ZONG He, et al. Study on different slope shapes and stability under same slope angle[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1): 140–144.
- [21] 程刚, 张昊宇, 王晔, 等. 土钉支护边坡物理模型试验研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 111–121.
- CHENG Gang, ZHANG Haoyu, WANG Ye, et al. Development on physical model test study on soil nailing supporting slope[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 111–121.
- [22] ZHAO Bingchao, MA Yunxiang, GUO Yaxin, et al. Study and application of similar material ratio in collapsible loess[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021; DOI: 10.1155/2021/9736900.
- [23] 陈帆, 王迎超, 郑顺华. 地铁隧道涌水涌砂诱发地面塌陷的大型模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(11): 174–183.
- CHEN Fan, WANG Yingchao, ZHENG Shunhua. Large-scale model experiment of ground collapse induced by water and sand gushing in subway tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(11): 174–183.
- [24] 冷先伦, 王川, 盛谦, 等. 基于透明相似模型试验的主控裂隙边坡变形破坏演化机制研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1 283–1 294, 1 308.
- LENG Xianlun, WANG Chuan, SHENG Qian, et al. Evolution mechanism of deformation and failure of rock slope with controlling fissure through transparent physical model experiments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1 283–1 294, 1 308.
- [25] 安彩龙, 王亮清, 田建林, 等. 水库型岩质边坡模型试验固-液两相相似材料研制与应用[J]. 地球科学, 2025, 50(6): 2 372–2 386.
- AN Cailong, WANG Liangqing, TIAN Jianlin, et al. Development and application of solid-liquid two-phase similar material for reservoir rock slope model test[J]. Earth Science, 2025, 50(6): 2 372–2 386.

作者简介: 孙祚 (1990—), 男, 山东枣庄人, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为矿山灾害风险评估与预警、矿山安全标准。E-mail: sun_zuo6@163.com。