

**引用格式:** 陈云飞, 张鹏, 黄波林, 等, 2022. 考虑岩体劣化的库岸典型危岩体破坏过程与长期稳定性分析 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 938–947. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.20222821

**Citation:** CHEN Y F, ZHANG P, HUANG B L, et al., 2022. Failure process and long-term stability analysis of typical unstable rock mass in the Three Gorges Reservoir area considering rock mass deterioration [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 938–947. DOI: 10.12090/j.issn.1006–6616.20222821

# 考虑岩体劣化的库岸典型危岩体破坏过程与长期稳定性分析

陈云飞<sup>1,2</sup>, 张 鹏<sup>1,2</sup>, 黄波林<sup>1,2</sup>, 秦盼盼<sup>1,2</sup>, 李秋旺<sup>1,2</sup>  
CHEN Yunfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, HUANG Bolin<sup>1,2</sup>, QIN Panpan<sup>1,2</sup>, LI Qiuwang<sup>1,2</sup>

1. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;  
2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002
1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;  
2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

## Failure process and long-term stability analysis of typical unstable rock mass in the Three Gorges Reservoir area considering rock mass deterioration

**Abstract:** Since the Three Gorges Reservoir went into service, the rock mass in the hydro-fluctuation belt of the bank slope has obviously deteriorated, which accelerates the instability of the bank slope. The potential debris avalanche threatens the safety of the Yangtze River waterway. The Banbiyan unstable rock mass in the Three Gorges Reservoir area was studied using the shear strength reduction method to analyze the failure process and long-term stability of the unstable rock mass under rock deterioration. The results show that the Banbiyan unstable rock mass is stable under natural working conditions. Under reservoir water and rock mass deterioration, the tensile stress is concentrated at the central section. The tensile cracks gradually penetrate up and down, extending to the prominent controlling cracks at the top and the bottom base fracture zone. Slip-shear failure may occur. Under the condition of reservoir water combined with rock mass deterioration and heavy rainfall, the strength of the rock mass decreases by 30% after about 40 hydrological cycles, and the stability coefficient of the Banbiyan unstable rock mass decreased to about 1.14, which is an under-stable state. It is suggested to carry out engineering prevention and control to improve the stability of dangerous rock mass to ensure the safety of the waterway. The research results can provide a scientific and reasonable basis for disaster prevention and mitigation of the Banbiyan and similar unstable rock masses in the Three Gorges Reservoir area.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir area; Banbiyan; unstable rock mass; rock mass deterioration; long-term stability

**摘 要:** 自三峡库区蓄水以来, 岸坡消落带岩体劣化趋势明显, 加速了岩质岸坡向欠稳定和不稳定发展, 潜在崩塌涌浪灾害威胁长江航道安全。以三峡库区板壁岩为例, 采用抗剪强度折减法分析在岩体劣化工况下危岩体的破坏过程与长期稳定性。结果表明: 在自然工况下, 板壁岩危岩体处于稳定状态; 在库水+岩体劣化工况下, 中部锁固段处拉应力集中, 拉张裂缝逐步向顶部主控裂缝及底部基破碎带延展并相互贯通, 可能发生滑移-剪切破坏; 在库水+岩体劣化+强降雨极端工况下, 约 40 个水文周期后, 岩体强度

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (42077234); 重庆市地质灾害防治中心科研项目 (KJ-2021047)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.42077234), and the Research Project of Chongqing Geological Disaster Prevention Center (Grant KJ-2021047)

**第一作者简介:** 陈云飞 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害及涌浪灾害方面的研究。E-mail: 2500672124@qq.com

**通讯作者:** 张鹏 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害成灾机理与风险分析方面的研究。E-mail: pzhang@ctgu.edu.cn

**收稿日期:** 2022-06-14; **修回日期:** 2022-09-27; **责任编辑:** 王婧

下降 30%，板壁岩危岩体的稳定性系数降至约 1.14，处于欠稳定状态，建议进行工程防治，提高危岩体稳定性，以保障航道安全。研究结果可为三峡库区板壁岩及类似危岩体的防灾减灾工作提供科学合理的依据。

**关键词：**三峡库区；板壁岩；危岩体；岩体劣化；长期稳定性

**中图分类号：**P642.2      **文献标识码：**A      **文章编号：**1006-6616 (2022) 06-0938-10

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20222821

# 0 引言

三峡库区自 2008 年蓄水以来，库水位长期在 145~175 m 间波动，形成了高差 30 m 的水位变动带 (Yin et al., 2016)，即岸坡消落带。岸坡消落带的岩土体长期处于“饱水-风干”的化学-水-应力耦合作用中 (汤连生等, 2002a, 2002b; 刘新荣等, 2009; Dochez et al., 2014)，受到极大损伤，从而产生了岩体劣化现象。库水位周期变动导致了岩体结构碎裂化、岩体强度持续下降，加速了岸坡岩体劣化与变形破坏的演化进程，影响了危岩体的长期稳定性，如箭穿洞危岩体 (张枝华等, 2018) 和冠木岭危岩体 (胡刘洋等, 2022)。危岩体的长期稳定性往往取决于岩体的强度参数，因此部分学者通过室内试验的方式，对库水位变动范围内的岩体展开研究，如邓华锋等 (2021) 研究了泥质粉砂岩和砂岩在干湿循环作用后的强度变化规律；杨何等 (2020) 和 Zhang et al. (2021) 通过室内试验获取了泥灰岩、灰岩在干湿循环后的物理力学参数。研究表明，随着干湿循环次数增加，岩体强度指标逐渐降低，且表现出明显的规律性 (傅晏等, 2010; 黄波林等; 2019; 孟伟超, 2021; 胡明军等, 2021; 周济芳, 2021; 任意等, 2022)，如胡明军等 (2021) 选取巫峡碳酸盐岩岸坡进行原位试验与室内试验结合，得出巫峡段碳酸盐岩岩石在 50 次干湿循环后岩体强度弱化率为 16.4%~23.9%；黄波林等 (2019) 选取巫山典型岸坡灰岩试样进行浸泡-风干循环试验，得出其物理力学参数平均每循环下降率约为 0.7%。

基于岩体劣化规律，通过数值模拟的方式，可更为便捷地研究危岩体的破坏过程 (黄波林等, 2020) 与长期稳定性 (王如宾等, 2014; 邓成进等, 2015; 罗雲丰, 2015; 张景昱等, 2017; 刘康琦等, 2020; 闫金凯等, 2020; 闫国强等; 2021)。

邓成进等 (2015) 基于岩体 RMR 法推算出岩体“浸泡-风干”循环演化过程的参数变化，利用 FLAC<sup>3D</sup> 对典型挤压-推移-剪切破坏类型的顺层滑坡进行破坏过程与长期稳定性分析。罗雲丰 (2015) 基于 GeoStudio 的 Seep 和 Sigma 板块，对陡倾倒式岸坡进行流固耦合分析，得出其在库水长期作用下的稳定性结果。张景昱等 (2017) 考虑库水长期作用下的水-岩劣化效应，建立了岩体强度劣化模型，对典型边坡进行了长期稳定性分析。闫金凯等 (2020) 基于 GeoStudio 软件，研究了在降雨条件下裂隙坡体中暂态非饱和渗流场的变化与斜坡稳定性的影响关系。闫国强等 (2021) 以青石 6 号坡为例计算了其在岩体劣化影响下的稳定性。

上述研究大多没有考虑到恶劣工况对危岩体长期稳定性的影响，因此，文章以三峡库区巫峡板壁岩危岩体为研究对象，以伪时间步的方式对岩体强度进行折减，并分别展开自然工况、岩体劣化工况及强降雨工况条件下的危岩体长期稳定性分析，为三峡库区板壁岩及类似危岩体的防灾减灾工作提供参考。

# 1 板壁岩危岩体概况

## 1.1 工程地质条件

板壁岩危岩体位于重庆市巫山县培石乡，距抱龙河口约 2.8 km，发育于三峡库区巫峡南侧临江陡崖面。交通主要靠水运，长江航道在岸坡坡脚呈东西向穿过 (图 1)。

板壁岩危岩体临江侧地形为陡崖，总体倾向北，东西走向，位于青石背斜南翼近核部，属中低山峡谷地貌。利用多波速水下测量对水下地形进行扫描分析，板壁岩水下岸坡高程 88.50~109.67 m 至 145 m 水崖线区域为陡崖地貌，倾角约 75°~85°；88.50~109.67 m 至江底为 30°~60° 的斜坡地貌，局部呈陡坎状地形。

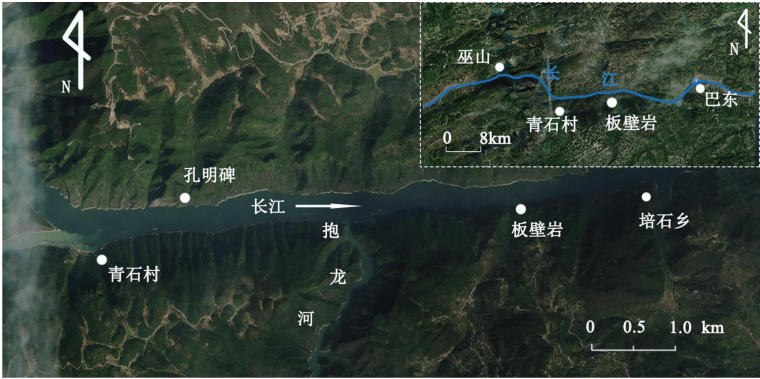


图 1 巫山板壁岩危岩体位置图

Fig. 1 Location map of the Banbiyan dangerous rock mass

岸坡受地貌、地质构造及岩体卸荷共同影响，临江面陡崖区主要形成多条比较明显的破碎带（图 2）。其中，基座破碎带 I 处于 175 m 水位以上，上下未发育成贯通裂缝，且无其他明显变形破坏迹象，对危岩体整体稳定性影响相对较小。基座破碎带 II—VI 长期处于消落带上，局部可见泥质条带及团块分布，部分岩体呈碎块状，块径约 8~65 cm 不等；局部岩块崩落入江，形成小岩腔，不利于岩体稳定。

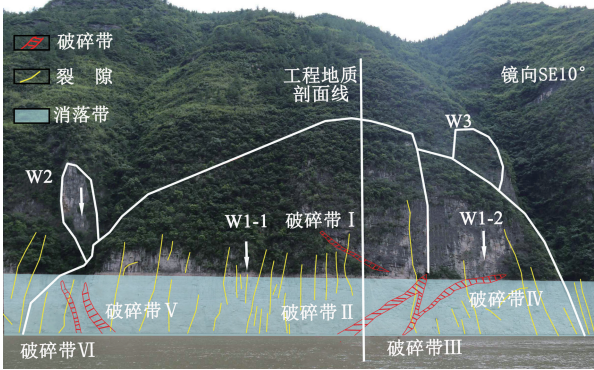


图 2 板壁岩危岩体破碎带及裂隙分布图

Fig. 2 Map showing the fracture zones and fissures in the Banbiyan unstable rock mass

岸坡中后部主要由三叠系嘉陵江组三段  $T_3j^3$  的泥质白云岩、泥灰岩组成；岸坡中前部主要由三叠系嘉陵江组二段  $T_3j^2$  的灰岩、泥灰岩、泥质灰岩组成。岸坡前缘临江面危岩带分布区主要为三叠系嘉陵江组二段  $T_3j^2$  的薄—中厚层灰岩。板壁岩岸坡岩层产状  $145^\circ\sim195^\circ\angle2^\circ\sim24^\circ$ ，为反向岩质岸坡。危岩体主崩方向与陡崖倾向基本一致，约  $345^\circ$ （图 3）。

顶部主要发育两组构造裂隙  $70^\circ\sim90^\circ\angle68^\circ\sim88^\circ$  和  $320^\circ\sim355^\circ\angle60^\circ\sim85^\circ$ ，其延伸长度较长，贯

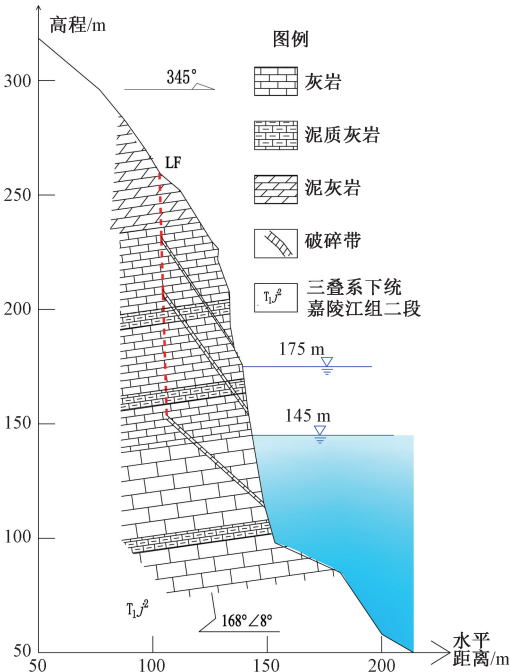


图 3 板壁岩危岩体工程地质剖面图

Fig. 3 Engineering geological profile of the Banbiyan unstable rock mass

通性较好，与破碎带共同作用，将岸坡切割成 3 个主要危岩体，其中 W1 方量最大（图 2，表 1）。

岩体力学性质影响和控制着危岩体的稳定性和变形破坏方式，对代表性地质单元和控制性层位进行相应的不同内容的物理力学试验，求得危岩区灰岩岩体物理力学指标标准值（表 2）。

### 1.2 水文地质条件

板壁岩危岩体主要为嘉陵江组灰岩，属碳酸盐岩，其地下水主要为裂隙岩溶水，靠长江及大气降雨补给，水位受到长江水位变动的影响；其构造裂隙较发育，且贯通性好，有利于地下水的补给、迳流和排泄，但在侵蚀基准面以下不利于



表 1 板壁岩单体危岩体特征表

Table 1 Characteristics of the Banbiyan unstable rock mass

| 危岩体<br>编号 | 是否<br>涉水 | 整体发育<br>形态 | 最低基底<br>高程/m | 危岩体顶部与<br>基底相对高差/m | 破坏方向/<br>(°) | 方量/<br>m <sup>3</sup> |
|-----------|----------|------------|--------------|--------------------|--------------|-----------------------|
| W1        | 涉水       | 呈不规则板柱状    | ~97          | ~162               | 348          | 71.78×10 <sup>4</sup> |
| W2        | 未涉水      | 呈不规则棱柱体    | ~194         | ~60                | 348          | 1.69×10 <sup>4</sup>  |
| W3        | 未涉水      | 呈薄板状       | ~234         | ~23                | 330          | 685                   |

表 2 板壁岩危岩体灰岩物理力学指标标准值

Table 2 Standard values of physical and mechanical indexes of the limestone from the Banbiyan unstable rock mass

|    | 状态 | 重度/<br>( kN/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量/<br>×10 <sup>4</sup> MPa | 泊松比  | 抗压强度/<br>MPa | 抗拉强度/<br>MPa | 黏聚力/<br>MPa | 内摩擦角/<br>( ° ) |
|----|----|------------------------------|-------------------------------|------|--------------|--------------|-------------|----------------|
| 灰岩 | 天然 | 0.0268                       | 0.69                          | 0.22 | 21.71        | 0.46         | 1.35        | 37.49          |
| 岩体 | 饱和 | 0.0269                       |                               |      | 18.21        | 0.40         | 1.08        | 35.69          |

地下水的储存, 赋水性差; 其地形坡度陡, 降雨时, 大部分雨水迅速向危岩体左右边界冲沟汇集后向长江排泄, 少部分雨水沿基岩的的裂隙下渗, 顺裂隙通道向长江径流排泄。板壁岩危岩体顶部裂缝、侧边界裂缝和基座均未见泉点或暗河, 只是临江面崖壁局部有滴水痕迹和石灰化等钙化现象, 局部发育有 0.1~1.5 m 的溶蚀孔洞及小的溶蚀裂隙。

2 板壁岩危岩体变形特征

板壁岩 W1 危岩体, 受多条构造破碎带切割, 边界清晰, 研究其变形特征非常重要。根据瞬变电磁物探测线法得出的物探测试结果显示 (图 4), 危岩体所在岸坡裂缝发育程度较高, 裂缝在岩体内部延伸程度较好。W1 危岩体顶部主控裂隙为一条张开大裂隙 LF, 产状 340°~350°∠82°~87°, 纵向贯通性好, 最大贯通长度约 78.8 m, 张开度 6~65 cm, 切割深度约 60~90 m。

LF 裂缝在上下游边界均有出露 (图 5)。下游侧的产状为 318°∠86°, 张开度 35~65 cm, 可见深度 4~6 m, 向上游方向贯通且呈闭合收敛趋势, 裂面较平整, 局部可见早期溶蚀迹象, 裂缝多由块石充填; 上游测的产状为 355°∠63°, 张开度 2~10 cm, 可见深度 0.5~1.2 m, 局部块石充填。

W1 危岩体中部贯通裂缝, 产状 32°∠71°, 张开度 4~23 cm, 该裂缝上贯穿至危岩顶部, 下与破碎带相连, 将 W1 危岩体切割成上、下游两处危岩单体。上游基座破碎带Ⅱ延伸至 155 m 处, 与破碎带Ⅲ相连, 相对其余破碎带较完整, 发育程度不高, 仅局部呈碎块状 (图 6a); 下游侧基座破碎带Ⅴ、Ⅵ局部演化出向上延展的裂缝, 可见“流线型”褶曲, 压弯现象比较明显 (图 6b)。

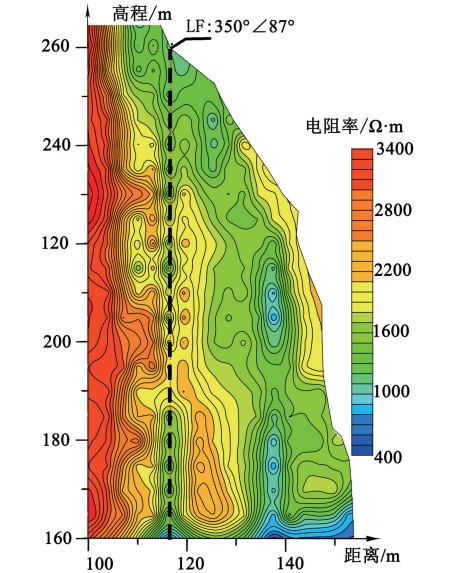
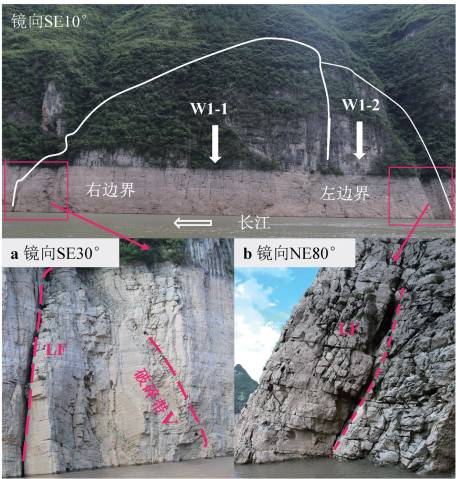


图 4 瞬变电磁物探剖面图  
Fig. 4 Transient electromagnetic geophysical profile



a—右边界; b—左边界  
图 5 W1 危岩体边界  
Fig. 5 Boundary of the W1 unstable rock mass  
(a) Right boundary; (b) Left boundary



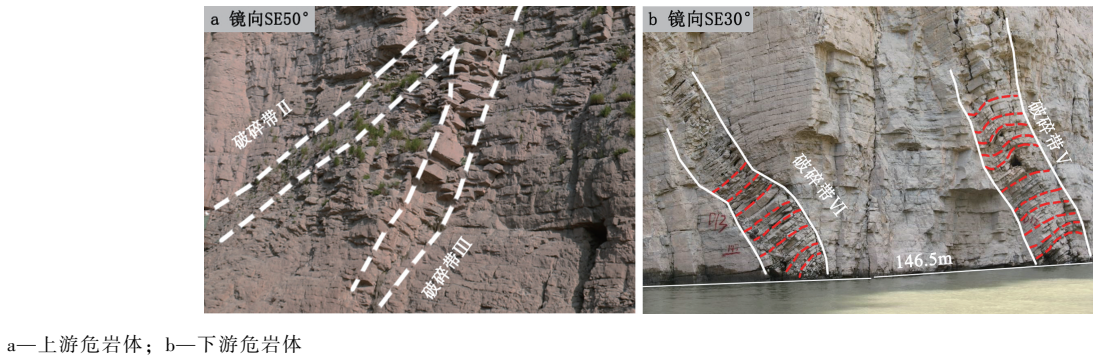


图 6 基座破碎带特征照片

Fig. 6 Field photos showing the features of the foundational fracture zones

(a) Unstable rock mass on the upstream side; (b) Unstable rock mass on the downstream side

板壁岩危岩体底部缘消落带岩体受构造、风化及库水位影响，岩体劣化强烈，裂缝发育。根据崖壁面裂隙统计分析，消落带岩体裂缝发育线密度为 1.11 条/10 m，面密度为 0.37 条/100 m<sup>2</sup>；消落带以上岩体裂缝发育线密度为 0.79 条/10 m，面密度为 0.15 条/100 m<sup>2</sup>（图 2）。消落带岩体裂缝发育程度高于消落带以上岩体区域，表明在周期性库水变动下，消落带岩体劣化加剧，基座岩体强度持续降低，板壁岩危岩体有可能进一步发生破坏。因此，分析板壁岩危岩体的破坏过程与长期稳定性具有重要意义。

### 3 板壁岩危岩体长期稳定性分析

#### 3.1 数值模型的构建

根据板壁岩危岩体的工程地质剖面，构建二维数值模型（图 7）。模型主要由基岩岩体、顶部主控裂缝、3 条破碎带与 3 个块体 4 个部分组成；模型网格为非均匀三角单元，共有 633 个单元，1090 个网格；左边界只约束  $x$  方向位移，底边界约束  $x$  和  $y$  方向位移；在有强降雨的条件下，顶部主控裂缝额外增加梯度水压力的边界条件；其单元采用 Morh-Coulomb 本构。

强降雨采用 1/2 裂隙充水的静水压力方式实现（刘才华等，2005；胡其志等，2010），最大静水压力为 0.4 MPa，压力呈三角形垂直裂隙分布；岩体劣化强度参照黄波林等（2019）的研究成果，取灰岩平均每次水文年后力学强度下降约 0.75%。板壁岩岩体、结构面的相关物理力学参数选取见表 2。

根据板壁岩危岩体的实际情况，参考三峡库区地质灾害防治工作指挥部（2014）的基本计算

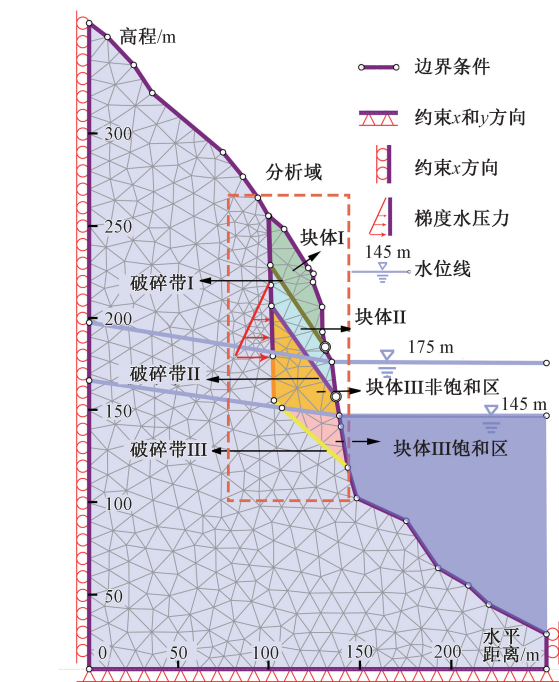


图 7 板壁岩危岩体连续-非连续数值模型

Fig. 7 Continuous-discontinuous numerical model for the Banbiyan unstable rock mass

工况，选取板壁岩危岩体计算工况 3 组（表 3），每个小劣化工况均计算 15 个子工况，每一个子工况代表 4 个水文年，岩体强度下降 3%。

#### 3.2 数值模拟及长期稳定性分析

通过数值模拟，利用抗剪强度折减法分析板壁岩危岩体在不同工况下的破坏过程与长期稳定性。

##### 3.2.1 工况 1：自然工况

由工况 1-1 条件计算可得，板壁岩危岩体主要沿着破碎带 III 发生位移，整体呈现向下挤压再沿滑移面向前滑移的趋势，在破碎带 II 附近位移相

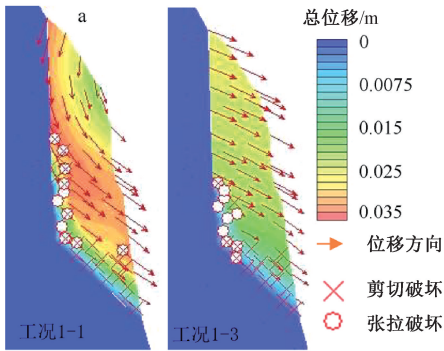
表 3 板壁岩危岩体稳定性系数计算工况

Table 3 Working conditions for calculating the stability coefficient of the Banbiyan unstable rock mass

| 工况 1                 | 工况 2                    | 工况 3                    |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 自然工况                 | 库水+岩体劣化工况               | 库水+强降雨+岩体劣化工况           |
| 1-1: 自重+145 m 水位     | 2-1: 自重+145 m 水位+岩体劣化   | 自重+强降雨+175m 水位+岩体劣化     |
| 1-2: 自重+175 m 水位     | 2-2: 自重+175 m 水位+岩体劣化   | 15 个子工况, 每个子工况岩体强度下降 3% |
| 1-3: 自重+175 m 水位+强降雨 | 15 个子工况, 每个子工况岩体强度下降 3% |                         |

对较大, 最大位移为 0.019 m (图 8a); 在破碎带Ⅲ与中部裂缝转角的锁固点附近有比较集中的剪应力和拉应力。

工况 1-2 在工况 1-1 的基础之上增加 30 m 水位, 整体位移趋势未发生变化, 但其最大位移量增加。



a—工况 1; b—工况 2-1

图 8 位移及屈服单元云图

Fig. 8 Cloud diagram showing the displacement and yield element (a) Under working condition 1; (b) Under working condition 2-1

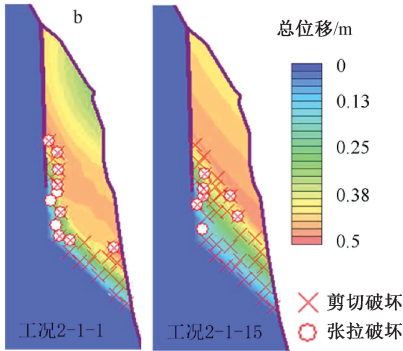
由工况 1 可知, 高水位对板壁岩危岩体的影响略大于低水位, 强降雨进一步加剧其变形破坏, 破坏模式基本一致。从屈服单元和位移两个角度来看, 危岩体整体倾角较陡, 在高自重应力作用下, 有向下挤压变形的趋势; 中部锁固段处拉应力集中且不断生成与滑移面近于垂直的拉张裂缝, 底部破碎带不断受压剪作用, 可能会与顶部裂缝贯通, 从而形成滑移-剪切的破坏模式。

3.2.2 工况 2: 库水+岩体劣化工况

工况 2-1, 从位移、屈服单元、稳定性系数三个方面, 观察消落带岩体强度劣化对板壁岩危岩体的影响, 经过约 60 个水文年, 其最大位移由 18 mm 增加到 500 mm, 并且位移集中在危岩体中下部 (图 8b); 其早期拉、剪应力分布于顶部裂缝和基座破碎带Ⅲ, 随着岩体劣化程度加剧, 拉、剪应力逐步向上扩展, 使得破碎带Ⅱ与破碎带Ⅲ之间的整个区域都受到拉、剪应力作用。

从图 9 工况 2-1 的塑性区分布过程来看, 早期

工况 1-3 在工况 1-2 的基础上叠加了强降雨, 最大位移量进一步增加, 为 0.035 m (图 8a); 危岩体顶部变形趋势转变为整体沿滑移面方向变形, 且上部整体位移大于下部; 屈服单元向破碎带Ⅲ锁固点附近集中, 屈服面积相对前两个工况略有增加。



塑性屈服单元主要分布于中部锁固段附近, 且屈服单元较少; 中期逐步向底部破碎带Ⅲ延伸, 形成一个相互贯通的屈服带, 沿裂缝区域屈服程度相对较高; 后期屈服单元逐步向破碎带Ⅱ与破碎带Ⅲ之间的整个区域扩展延伸, 且屈服程度逐步加深, 使整个危岩体屈服失稳。

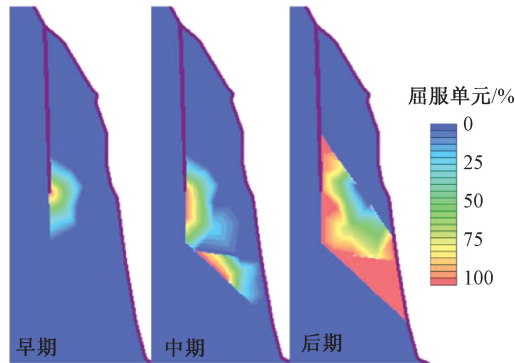
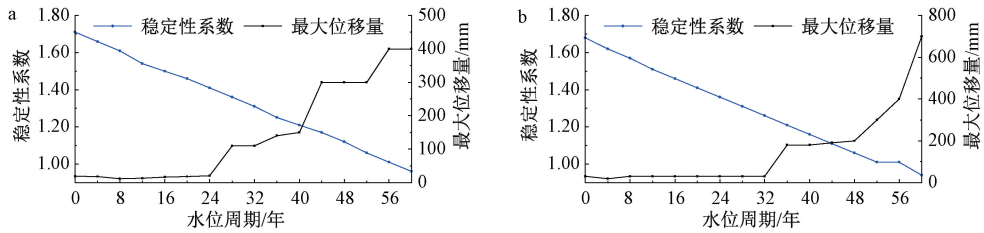


图 9 塑性区分布过程图 (工况 2-1)

Fig. 9 Diagram showing the extension of the plastic zone (Under working condition 2-1)

通过最大剪应变和塑性区分布以及抗剪强度折减法判断工况 2 中各子工况的危岩体整体稳定性系数 (图 10)。长期周期性库水变动, 导致其整体稳定性系

数呈直线下降趋势, 50 个循环周期后将达到临界破坏阶段; 危岩体前期整体变形缓慢, 当到达一个临界点时, 变形加快, 最大位移加倍增长, 危险性极大。



a—工况 2-1; b—工况 2-2

图 10 工况 2 稳定性系数与最大位移量随时间的关系

Fig. 10 Stability coefficient versus maximum displacement as a function of time under working condition 2

(a) Under working condition 2-1; (b) Under working condition 2-2

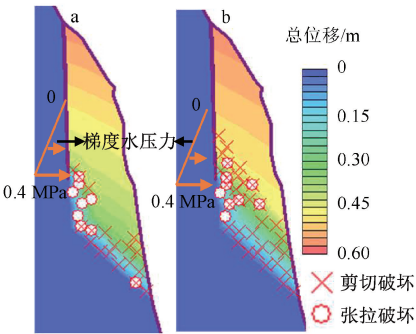
由工况 2 得知, 板壁岩危岩体早期应力集中在中部锁固段处, 导致早期最先发生屈服的区域也在此处, 随着劣化时间的推进, 其屈服单元不断向顶部的开张裂缝及基座破碎带Ⅲ延伸; 早期危岩体整体有向下后发生位移的趋势, 最大位移区呈现圆弧状, 随着岩体劣化的不断加剧, 其变形进入累进性破坏阶段, 其最大位移由早期的 30 mm 左右逐步升至 700 mm, 形成顶、中部拉裂, 底部滑移的滑移-剪切破坏模式。且由图 10 可见, 当稳定性系数低于 1.40 时, 其最大位移将发生较大突变, 随着岩体劣化继续加剧, 最大位移量也持续发生较大变化, 表明当危岩体整体稳定性低于 1.40 时, 板壁岩危岩体处于亚失稳状态。

3.2.3 工况 3: 库水+强降雨+岩体劣化工况

由于裂隙充水实际发生在危岩体的中部, 且作用方式是垂直作用于裂隙面, 因此增加了危岩体的向临空面的水平推力, 有利于危岩体沿破碎带发生滑移变形。强降雨形成的压力导致危岩体水平位移进一步增加, 早期中部屈服单元也相对工况 2 向下挪动, 而底部基座破碎带处屈服区没有发生明显变化 (图 11)。在劣化叠加持续暴雨的进程中, 强降雨的作用导致危岩体的稳定性进一步变差, 危岩体发生大变形的突发性增加 (图 12)。

4 讨论

在三种系列工况下, 工况 3 是最不利工况。根据各工况长期稳定性计算结果显示, 当前自然状态的板壁岩危岩体整体处于稳定状态, 其稳定性系数在 145 m 水位时为 1.71, 175 m 水位时为 1.68



a—工况 3-1; b—工况 3-15

图 11 位移及屈服单元云图

Fig. 11 Cloud diagram showing the displacement and yield element

(a) Under working condition 3-1; (b) Under working condition 3-15

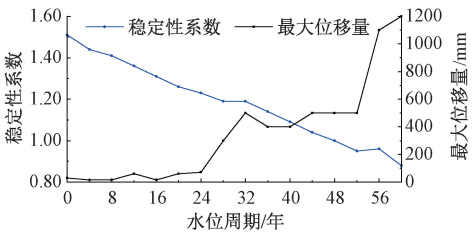


图 12 工况 3 稳定性系数与最大位移量随时间的关系

Fig. 12 Stability coefficient versus maximum displacement as a function of time under working condition 3

(图 13)。

工况 2 和工况 3, 揭示了岩体劣化及暴雨对板壁岩稳定性系数的影响, 同一劣化条件下叠加暴雨与不叠加暴雨的稳定性系数相差约 0.16。在库水+岩体劣化工况 (常态化工况) 下, 随着消落带岩体劣化, 基座破碎带岩体强度降低, 板壁岩危岩体稳定性系数逐步降低, 参考三峡库区地质灾



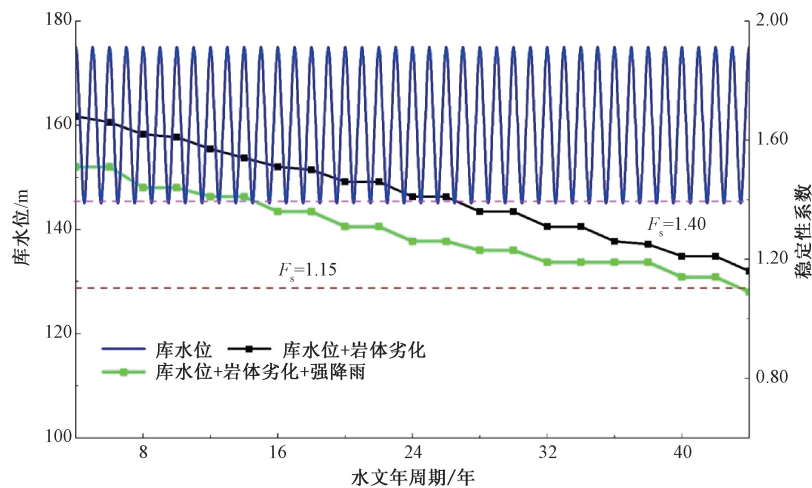


图 13 板壁岩危岩体稳定系数-时间过程曲线

Fig. 13 Stability coefficient-time course curves of the Banbian unstable rock mass

害防治工作指挥部（2014）对危岩体所处状态进行划分，当稳定性系数  $F_s > 1.40$  时，为稳定状态， $1.15 < F_s < 1.40$  时为基本稳定状态，而  $F_s < 1.15$  时则认为危岩体处于欠稳定状态。

计算结果显示，第 0、24、46、56 个水文周期，板壁岩危岩体稳定性系数分别为 1.71、1.41、1.16、1.01，在第 46 个水文周期处于欠稳定状态。在库水+岩体劣化+暴雨极端工况下，第 0、14、40、48 个水文周期，板壁岩危岩体稳定性系数分别为 1.71、1.41、1.14、1.01，第 14 个水文周期板壁岩危岩体从稳定状态向基本稳定状态发生转变；在第 40 个水文周期从基本稳定状态向欠稳定状态发生转变，在第 48 个水文周期时稳定性系数降为 1.01，处于极限平衡状态。可见极端条件下板壁岩会比常态化工况下早近 6 个水文年进入欠稳定状态，极端暴雨条件加速了板壁岩危岩体的破坏进程。从累积位移与稳定性关系的角度看，在稳定—基本稳定—欠稳定等状态转变时，其位移会发生突增，且极端工况下的突变是常态化工况的 2~3 倍，因此在稳定性状态发生转变时刻应加强专业监测，防止危险发生。从应力应变、最大剪应变和塑性区来看，板壁岩危岩体后缘向后下方挤压，重心向下偏移，其后缘裂缝进一步发育，危岩体前缘进一步受压沿破碎带滑移剪出，可能发生滑移-剪切破坏。

## 5 结语

在工程地质调查和数值计算分析基础上，对

板壁岩危岩体进行多工况的综合分析，得出以下结论及建议。

（1）板壁岩危岩体被已有的侧壁边界、主控裂缝及基座破碎带分割成三大块危岩，其中涉水的 W1 危岩体， $71.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，呈不规则板柱状；其主控裂缝下切较深，约 60~90 m，延伸程度较好且逐渐显化；其消落带岩体裂缝发育，线密度 1.11 条/10 m，非消落带线密度 0.79 条/10 m。

（2）数值分析结果显示板壁岩危岩体破坏过程为：随着库水长期周期性循环，岩体不断劣化，板壁岩危岩体早期拉应力集中分布于中部锁固点处，中期向主控裂缝及基破碎带延展，且基座破碎带不断被压剪破坏，使左右破碎带边界相互连通，后期顶部主控裂缝与底部基座破碎带逐步形成相互贯通的滑移面，形成滑移-剪切破坏。

（3）在自然状态下，板壁岩危岩体处于稳定性状态；在库水+岩体劣化工况下，库水循环 46 个周期，其稳定性系数从 1.71 下降至 1.16；在库水+岩体劣化+暴雨极端工况下，约 40 个水文周期后，岩体强度下降 30%，板壁岩危岩体的稳定性系数约为 1.14，处于欠稳定状态，在第 48 个水文周期时稳定性系数降为 1.01，处于极限平衡状态。

（4）板壁岩危岩体在库水循环约 46 周期后，从基本稳定状态转变为欠稳定状态，建议启动板壁岩危岩体的治理工程，对板壁岩危岩消落带进行素喷混凝土防止岩体劣化，并对后缘拉张裂缝进行锚索锚固。

## References

- DENG C J, WANG K W, YUAN Q S, et al., 2015. Stability of reservoir slope under repetitive variation of reservoir water level [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 32 (4): 96-100. (in Chinese with English abstract)
- DENG H F, FANG J C, LI J L, et al., 2021. Damage evolution of dynamic characteristics of sandstone under the sequential action of water-rock interaction and cyclic loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 42 (2): 343-351. (in Chinese with English abstract)
- DOCHEZ S, LAOUAFA F, FRANCK C, et al., 2014. Multi-scale analysis of water alteration on the rock slope stability framework [J]. Acta Geophysical, 62 (5): 1025-1048.
- FU Y, 2010. Study on water-rock interaction with the cyclic drying-wetting effect on rock [D]. Chongqing: Chongqing University. (in Chinese with English abstract)
- HU L Y, ZHANG P, HUANG B L, 2022. Long-term deformation and failure mechanism of dangerous rock mass in water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir area: a case study of Guanmuling [J/OL]. Journal of Engineering Geology, 1-11. [2022-6-19] [https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20221009000&uniplatform=NZKPT&v=9u6\\_tlouPxa4lAU2YcVmGRdoK6VK6205M\\_F5Ctg4vW0dyQCGTaZWAUVleKzwiGou](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20221009000&uniplatform=NZKPT&v=9u6_tlouPxa4lAU2YcVmGRdoK6VK6205M_F5Ctg4vW0dyQCGTaZWAUVleKzwiGou). (in Chinese with English abstract)
- HU M J, ZHANG Z H, YIN Y P, 2021. Study on strength weakening of carbonate rocks with water level fluctuating in Wuxia of three gorges reservoir area [J/OL]. Journal of Engineering Geology, 1-14. [2022-6-19] <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20210717009>. (in Chinese with English abstract)
- HU Q Z, ZHOU H, XIAO B L, et al., 2010. Analysis of stability of rock bedded slope under hydraulic pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 31 (11): 3594-3598. (in Chinese with English abstract)
- HUANG B L, YIN Y P, ZHANG Z H, et al., 2019. Study on deterioration characteristics of shallow rock mass in water the level fluctuation zone of karst bank slopes in Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38 (9): 1786-1796. (in Chinese with English abstract)
- HUANG B L, YIN Y P, LI B, et al., 2020. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 47 (4): 51-61. (in Chinese with English abstract)
- LIU C H, XU J, CAO C L, et al., 2005. Analysis of bedding-slip failure mechanism of rock slope due to hydraulic drive [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24 (19): 3529-3533. (in Chinese with English abstract)
- LIU K Q, LIU H Y, QI X B, 2020. Numerical study on long-term stability of soil-rock mixture slope using strength reduction technique [J]. Journal of Engineering Geology, 28 (2): 327-334. (in Chinese with English abstract)
- LIU X R, FU Y, WANG Y X, et al., 2009. Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 30 (3): 613-616, 627. (in Chinese with English abstract)
- LUO Y F, 2015. The evaluation of long-term stability at right dam abutment slope of Miaowei hydro power station in Lancang river [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- MENG W C, 2021. Effect of dry-wet cycle on expansive force and shear strength of expansive soil [J]. Railway Investigation and Surveying, 47 (6): 55-60. (in Chinese with English abstract)
- REN Y, JIANG X Y, WU C H, et al., 2022. Experimental study on fissure properties and soil-water response of red clay slope under dry-wet cycle [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 53 (4): 172-179. (in Chinese with English abstract)
- TANG L S, ZHANG P C, WANG S J, 2002a. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21 (4): 526-531. (in Chinese with English abstract)
- TANG L S, ZHANG P C, WANG S J, 2002b. Testing study on effects of chemical action of aqueous solution on crack propagation in rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21 (6): 822-827. (in Chinese with English abstract)
- Three Gorges Reservoir Area Geological Disaster Prevention and Control Work Headquarters, 2014. Technical requirements for the geological exploration in the Three Gorges Reservoir area for geological disaster prevention and control [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 0-119. (in Chinese)
- WANG R B, XU W Y, MENG Y D, et al., 2014. Numerical analysis of long-term stability of left bank abutment high slope at Jinping I hydropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33 (S1): 3105-3113. (in Chinese with English abstract)
- YAN G Q, HUANG B L, WANG X, et al., 2021. Sliding-bending failure mechanism and evaluation of bedding limestone bank slope based on rock mass deterioration in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Engineering Geology, 29 (3): 668-679. (in Chinese with English abstract)
- YAN J K, HUANG J B, LI H L, et al., 2020. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 481-491. (in Chinese with English abstract)
- YANG H, TANG M G, XU Q, et al., 2020. Deterioration characteristic test and quality evaluation of bank slope rock mass in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 51 (11): 1360-1371. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al., 2016. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8 (5): 577-595.
- ZHANG W G, GAO X CH, GU D M, et al., 2021. Influence of cyclic

wetting-drying on the shear strength of limestone with a soft interlayer [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54 (8): 4369-4378.

ZHANG J Y, WAN L P, PAN H Y, et al. , 2017. Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 39 (10): 1851-1858. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z H, DU C L, YU S, et al. , 2018. Stability analysis and design of control works on Jianchuandong dangerous rock mass in Wuxia Gorge, the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 29 (2): 48-54. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J F, 2021. Study on prediction model for rock immersion time scale and deterioration under effect of acidic solution [J] Water Resources and Hydropower Engineering, 52 (8): 162-171. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

邓成进, 王孔伟, 袁秋霜, 等, 2015. 库水长期升降作用下库岸边坡稳定性研究 [J]. 长江科学院院报, 32 (4): 96-100.

邓华锋, 方景成, 李建林, 等, 2021. 水-岩和循环加卸载次序作用下砂岩动力特性损伤演化规律 [J]. 岩土力学, 42 (2): 343-351.

傅晏, 2010. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学.

胡刘洋, 张鹏, 黄波林, 2022. 三峡库区消落带岩体劣化下危岩体长期变形破坏机理: 以冠木岭为例 [J/OL]. 工程地质学报, 1-11. [ 2022-06-14 ]. [https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20221009000&uniplatform=NZKPT&v=9u6\\_tlouPxa4lAU2YcVmGRdoK6VK6205M\\_F5Ctg4vW0dyQCGTaZWAUVleKzwiGou](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20221009000&uniplatform=NZKPT&v=9u6_tlouPxa4lAU2YcVmGRdoK6VK6205M_F5Ctg4vW0dyQCGTaZWAUVleKzwiGou).

胡明军, 张枝华, 殷跃平, 等, 2021. 三峡库区巫峡段消落带碳酸盐岩强度弱化研究 [J/OL]. 工程地质学报, [ 2022-06-14 ]. 1-14. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ20210717009>.

胡其志, 周辉, 肖本林, 等, 2010. 水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学, 31 (11): 3594-3598.

黄波林, 殷跃平, 张枝华, 等, 2019. 三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 38 (9): 1786-1796.

黄波林, 殷跃平, 李滨, 等, 2020. 三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应 [J]. 水文地质工程地质, 47 (4): 51-61.

刘才华, 徐健, 曹传林, 等, 2005. 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 24 (19): 3529-3533.

刘康琦, 刘红岩, 祁小博, 2020. 基于强度折减法的土石混合体边坡长期稳定性研究 [J]. 工程地质学报, 28 (2): 327-334.

刘新荣, 傅晏, 王永新, 等, 2009. 水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究 [J]. 岩土力学, 30 (3): 613-616, 627.

罗雲丰, 2015. 澜沧江苗尾水电站右岸坝肩边坡长期稳定性评价 [D]. 成都: 成都理工大学.

孟伟超, 2021. 膨胀土干湿循环对膨胀力和抗剪强度的影响 [J]. 铁道勘察, 47 (6): 55-60.

任意, 江兴元, 吴长虹, 等, 2022. 干湿循环下红黏土斜坡裂隙性和水土响应试验研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 53 (4): 172-179.

三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2014. 三峡库区地质灾害防治工程地质勘查技术要求 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 0-119.

汤连生, 张鹏程, 王思敬, 2002a. 水-岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 21 (4): 526-531.

汤连生, 张鹏程, 王思敬, 2002b. 水-岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 21 (6): 822-827.

王如宾, 徐卫亚, 孟永东, 等, 2014. 锦屏一级水电站左岸坝肩高边坡长期稳定性数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 33 (S1): 3105-3113.

闫国强, 黄波林, 王勋, 等, 2021. 基于岩体劣化顺层灰岩岸坡滑移-弯曲失稳机理和评价 [J]. 工程地质学报, 29 (3): 668-679.

闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等, 2020. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 481-491.

杨何, 汤明高, 许强, 等, 2020. 三峡库区消落带岸坡岩体劣化特性测试及质量评价 [J]. 水利学报, 51 (11): 1360-1371.

张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等, 2017. 考虑水-岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 39 (10): 1851-1858.

张枝华, 杜春兰, 余姝, 等, 2018. 三峡库区巫峡箭穿洞危岩体稳定性分析及防治工程设计 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 29 (2): 48-54.

周济芳, 2021. 酸性溶液作用下岩石浸泡时间尺度及劣化预测模型研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 52 (8): 162-171.