

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

王 平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑 涛, 吴坤达, 毛 博

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

WANG Ping, HU Mingjun, HUANG Bolin, ZHANG Zhihua, ZHENG Tao, WU Kunda, and MAO Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-06>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

王玉川, 郭其峰, 周延国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 17-23

破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

吴兵, 梁瑶, 赵晓彦, 唐晓波, 吴晓春, 罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27-35

基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析

Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation

李军, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 42-50



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-06

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

王 平¹, 胡明军¹, 黄波林², 张枝华¹, 郑 涛¹, 吴坤达¹, 毛 博¹

(1. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400700;

2. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要:剪刀峰岸坡位于三峡库区巫山县巫峡左岸, 全长 2.1 km。受北侧神女峰箱状背斜及南侧神女溪—官渡口向斜影响, 岸坡为陡倾顺层岩质岸坡。岸坡坡度 45°~89°, 整体为陡坡与的陡崖复合地貌; 岸坡出露的第四系地层主要为崩坡积碎块石土, 出露的基岩含三叠系大冶组三段、四段及嘉陵江组一段至四段地层, 地层多元化; 岩组类别主要为大冶组及嘉陵江组碳酸盐溶岩组成的坚硬岩组及嘉陵江组二段岩溶角砾岩组成的较软岩组; 岩体结构从极薄层至巨厚层状, 岸坡地形、地层、岩组及结构复杂。岸坡上游至下游, 2.1 km 范围内, 坡体结构变化大, 岸坡变形破坏特征差异大, 成因机制及破坏模式差异大。根据岸坡不同的地质条件及特征, 划分为 6 个大段、6 个亚段。研究从岸坡宏观变形、破坏特征出发, 将岸坡目前的变形、破坏总结为“构造切割及卸荷”“局部压裂、滑移”“地表溶蚀”“消落区岩体劣化”四个方面, 并从岸坡成因机制上分析了各段的破坏模式。此外, 本次研究还分析了库水位以上岸坡及库水位消落区的岩体劣化特征, 从岩体劣化的角度提出了沿层面渐进式松脱滑移、沿软弱夹层溃屈滑移、沿“X 型”节理滑移、沿层面倾倒溃屈四种岩体劣化及破坏类型。

关键词:陡倾顺层岩质岸坡; 成因机制; 破坏模式; 岩体劣化; 三峡库区

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)05-0052-10

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

WANG Ping¹, HU Mingjun¹, HUANG Bolin², ZHANG Zhihua¹, ZHENG Tao¹, WU Kunda¹, MAO Bo¹

(1. Chongqing 208 Institute of Geological Environment Co. Ltd., Chongqing 400700, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University,

Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Scissors peak bank slope is located in the left bank of Wushan gorge in the Three Gorges Reservoir area, with a total length of 2.1 km. Influenced by Shennv peak box anticline in the north and Shennv Xi-Guandukou syncline in the south, the bank slope is steeply sloping bedding rock bank slope. The slope of the bank is 45°~89°, and the whole is a composite landform of steep slope and steep cliff. The quaternary strata exposed on the bank slope are mainly cluvial gravel soil, and the exposed bedrock contains the strata of the 3rd and 4th members of the Triassic daye formation and the 1st to 4th members of the Jialingjiang formation. The strata are diversified. The rock groups are mainly hard rock group composed of carbonate lute of Daye formation and Jialingjiang formation and soft rock group composed of karst breccia of the second member of Jialingjiang formation. The rock mass structure ranges from very thin layer to very thick layer, and the slope topography, stratum, rock group and structure are complex. Within a range of 2.1 km from upstream to downstream of the bank slope, the slope structure changes greatly, the deformation and failure characteristics of the bank slope vary greatly, and the formation mechanism and failure modes differ greatly. According to the different geological conditions and characteristics of the slope, it can be divided

收稿日期: 2021-05-12; 修订日期: 2021-08-14

基金项目: 三峡库区后续地质灾害防治专项资金项目(2020KY06C-015Z); 三峡后续地质灾害防治专项资金项目(2018102849)

第一作者: 王 平(1988-), 男, 学士, 工程师, 主要从事地质灾害防治, 地质环境调查评价。E-mail: 276824228@qq.com

通讯作者: 胡明军(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治。E-mail: 16033464@qq.com

into 6 large sections and 6 sub-sections. Based on the characteristics of the macroscopic deformation and failure of the bank slope, the current deformation and failure of the bank slope are summarized into four aspects: "structural cutting and unloading", "local fracturing, sliding", "surface dissolution", and "rock mass deterioration in the subsidence zone", and the failure modes of each section are analyzed from the perspective of the formation mechanism of the bank slope. In addition, this study also analyzed the deterioration characteristics of rock mass in the bank slope above the reservoir water level and the reservoir water level fluctuation area, and proposed four types of rock mass deterioration and failure types from the perspective of rock mass deterioration: progressive release slip along the plane, collapse slip along the weak interlayer, X-type joint slip, and toppling collapse along the plane.

Keywords: steeply dipping bedding rocky bank slope; genetic mechanism; failure mode; rock mass degradation; the Three-Gorges Reservoir area

0 引言

三峡库区顺层岩质岸坡较常见,地质构造及河流下切等地质作用导致岸坡顺向临空,其成灾隐患大。常具有大体积、高势能、运动速度快、滑动距离远、破坏性强等特点。斜坡失稳受控于坡体结构与岩体力学特性,成因复杂多样,失稳模式或单一或复合。岸坡内往往发育有优势结构面,在地质构造、地下水、降雨、库水波动及人为工程活动等因素影响下,在层面和软弱夹层压缩、张裂和剪切作用下,结构面逐渐演化为岸坡失稳的滑动面,从变形到失稳表现出累进破坏的过程。

1950 年美国学者 TERZAGHI K 发表了一篇名为《滑坡机理》的文章,系统分析了岩质滑坡产生的原因、变形过程以及稳定性的评价方法。他指出层状岩体中网络组合关系复杂的结构面使岩体内部的连续性被极大破坏,使岩体的强度远小于完整岩块的强度。TERZAGHI K^[1]认为层状斜坡破坏的主要原因是岩体内部结构面网络发生变形、错动,岩桥扩展贯通,切割分解了岩体的完整性,使岩体强度丧失,进而导致斜坡失稳破坏。孙广忠^[2]在《岩体结构力学》中,将层状岩质斜坡的失稳模式总结为“弯折-倾倒”“弯曲-溃屈”“直立边

坡弯折”“溃屈”四种。陈沅江^[3]在勘察科学技术杂志发表的“层状岩质边坡蠕变破坏及其影响因素分析”论文中,将层状岩质边坡的蠕变破坏模式分为水平层状边坡座落式剪切蠕变破坏、缓倾层状边坡顺层剪切蠕变破坏、陡倾层状边坡顺层逆向剪切蠕变倾倒破坏、反倾层状边坡逆向剪切蠕变倾倒破坏以及复杂层状结构边坡采动沉陷蠕滑组合失稳破坏五种类型。

本次研究工作基于区内前期长江干流地质灾害调查^[4-5]、巫峡剪刀峰顺向岸坡专项调(勘)查^[6]、三峡库区巫峡高陡峡谷岸坡典型破坏机理^[7-12]、三峡库区消落区岩体劣化^[13-17]等相关地质及研究工作。对三峡库区巫山县巫峡剪刀峰顺向岸坡变形、破坏特征进行了总结,对岸坡破坏类型及岩体劣化和破坏类型进行了分析和研究。剪刀峰顺向岸坡成灾风险大,危害性大,通过本次对剪刀峰顺向岸坡变形破坏模式的分析及总结,对下步岸坡的风险评价、稳定性判断及后续防治工作提供了很好的支撑。

1 岸坡基本概况

剪刀峰顺向岸坡位于三峡库区重庆市巫山县长江干流巫峡左岸(图 1),航道里程编号为 K153+500~

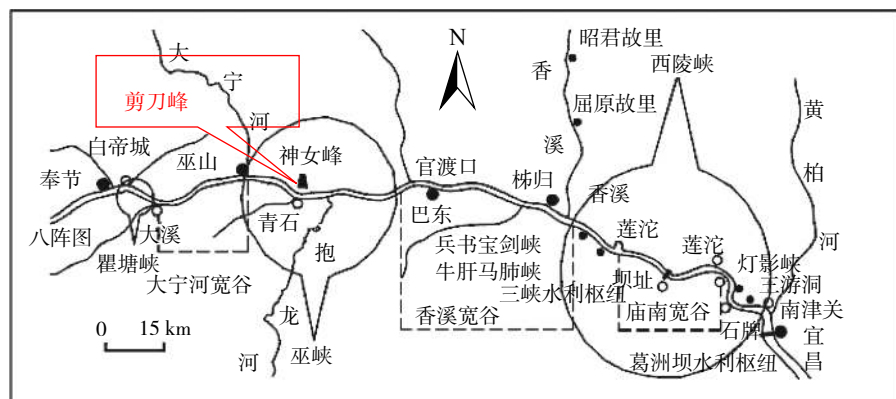


图 1 剪刀峰顺层岩质岸坡位置分布图

Fig. 1 Scissor peak along the bank slope location distribution

K155+600, 上起神女峰景区出口下游侧, 下至游孔明碑, 涉及库岸总长 2.1 km。岸坡整体地形陡峭, 坡角 45° ~ 75°, 局部可达 82° ~ 89°, 为陡坡+陡崖地形; 受神女峰背斜及神女溪—官渡口向斜影响, 岸坡属陡倾顺层岩质岸坡; 岸坡地层岩组主要由三叠系碳酸盐溶岩组成的坚硬岩组及岩溶角砾岩组成的较软岩组构成; 岸坡主要致灾隐患为危岩、外倾临空结构面或软弱夹层控制的潜在不稳定斜坡(图 2)。

岸坡上游至下游, 全长 2.1 km 范围内, 岸坡坡体结构变化大, 岸坡变形破坏特征差异大, 成因机制及破坏模差异大。根据岸坡地形地貌、地质构造、地层岩性及变形破坏特征等将剪刀峰 2.1 km 的顺向岸坡划分为 6 个大段, 6 个亚段。其岸坡分段示意图及各段岸坡地质特征详见表 1 及图 3。

2 岸坡变形破坏特征

(1) 坡体构造切割及卸荷

剪刀峰顺向岸坡位于神女峰背斜南翼近核部区域,



图 2 剪刀峰顺向岸坡全貌图

Fig. 2 Scissor peak along the bank slope view

纵张裂隙较发育, 岩体结构疏松, 构造卸荷作用强烈。岸坡受前期地质作用形成了多级陡坎及陡崖, 受地貌特征影响, 岸坡岩体局部顺向临空, 该区域岸坡地质构造及卸荷作用尤为强烈。岸坡在近 NNE、NNW 两组构造裂隙切割下(图 4), 岸坡表层岩体完整性较差。岸坡临

表 1 岸坡分段及特征表
Table 1 Sectional characteristics of downstream bank slope

分段	航道里程编号	长度/m	主要分段依据	主要地质特征
第 I 段	155 km+500 m ~ 155 km+600 m	100	地形地貌、地层岩性、坡体结构及破坏模式	岸坡主要为大冶组 4 段及嘉陵江组一段中厚至厚层状灰岩, 岸坡坡体相对较完整, 破坏模式为表层岩体沿临空区域进行渐进式松脱-滑移破坏。
	II -1 段 155 km+265 m ~ 155 km+500 m	235	地层岩性、坡体结构及破坏模式	岸坡主要为嘉陵江组一段中厚至厚层泥质灰岩, 除消落带劣化严重外, 其余坡体结构相对较完整, 破坏模式为表层岩体沿临空区域崩塌-坠落。
第 II 段	II -2 段 155 km+086 m ~ 155 km+265 m	179	地层岩性、坡体结构及破坏模式	该区域为轿顶峰 1 号斜坡区域, 临江侧岸坡含嘉陵江组二段的岩溶角砾岩, 此外主要岩体为薄至中厚层泥质灰岩, 岸坡表层岩体劣化严重, 局部呈碎裂状。岸坡除岩临空区域崩塌坠落外, 后期局部区域还可能受软弱夹层及岩体劣化影响, 出现滑移-溃屈破坏。
	第 III 段 154 km+783 m ~ 155 km+086 m	303	地形地貌、地层岩性、坡体结构及破坏模式	该区域为轿顶峰 2 号斜坡区域, 临江侧岸坡由嘉陵江组二段、三段地层组成, 其中二段岩溶角砾岩呈连续分布, 走向下游侧倾坡内。该段上游侧二段为薄至中厚层泥质灰岩及岩溶角砾岩, 劣化较严重; 下游为嘉陵江组薄至中厚层泥质灰岩及燧石灰岩, 劣化相对上游较好。岸坡目前主要的变形破坏为临空区域以及浅表层的崩塌及滑移破坏后期局部区域还可能受软弱夹层及岩体劣化影响, 出现滑移-溃屈破坏。
第 IV 段	154 km+527 m ~ 154 km+783 m	256	地形地貌、地层岩性、坡体结构及破坏模式	临江面岸坡主要为嘉陵江组三段中厚至厚层燧石灰岩及泥质灰岩, 后侧为嘉陵江组二段薄至中厚层泥质灰岩及岩溶角砾岩, 但二段角砾岩发育在冲沟内侧至坡顶区域, 对坡体整体稳定性影响小, 岸坡主要的变形破坏为消落带区域的劣化以及上部局部区域的崩塌坠落。
第 V 段	V -1 段 154 km+185 m ~ 154 km+527 m	342	地形地貌、坡体结构及破坏模式	岸坡主要地层为嘉陵江组三段薄-中厚层泥质灰岩夹中厚层白云质灰岩, 岸坡倾角变陡, 主要发育的两组构造裂隙呈“X”型节理, 岩体较破碎~较完整, 前期差异劣化-崩塌形成了较多浅表层的凹岩腔。该区域岸坡主要变形为构造节理的切割及差异劣化后导致的浅表层崩塌。
	V -2 段 153 km+885 m ~ 154 km+185 m	300	地层岩性、坡体结构及破坏模式	临江面岸坡主要为嘉陵江组三段中厚层灰岩, 局部夹中厚层白云质灰岩, 岸坡倾角变陡, 主要发育的两组构造裂隙呈“X”型节理, 岩体相对较完整。该区域岸坡主要变形为构造节理的切割及差异劣化后导致的浅表层崩塌, 下游侧边界受地形及构造切割影响易形成危岩发生滑移破坏。
第 VI 段	VI -1 段 153 km+629 m ~ 153 km+885 m	256	地形地貌、地层岩性、坡体结构及破坏模式	该段岸坡岩体主要为嘉陵江组三段中厚至厚层的灰岩夹中厚层状白云质灰岩, 岩层层厚较厚, 整体完整性较高, 临江面岩体易发生卸荷, 主要破坏模式为岩体卸荷、构造切割、差异劣化等导致岸坡浅表层局部发生崩塌坠落。
	VI -2 段 153 km+500 m ~ 153 km+629 m	129	地层岩性、坡体结构及破坏模式	该段岸坡岩体主要为嘉陵江组三段厚层的灰岩, 岩层层厚较厚, 质地硬, 整体完整性较高, 临江面岩体卸荷程度高。该段岩体近直立, 局部呈反倾状, 其可能出现倾倒式-溃屈破坏。



图 3 剪刀峰岸坡分段示意图
Fig. 3 Scissor peak slope section schematic diagram

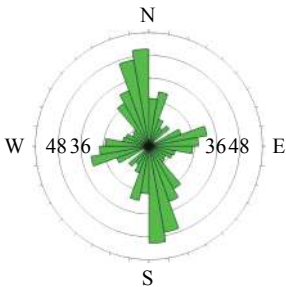


图 4 岸坡构造节理特征图
Fig. 4 Bank slope structural joint feature map

空区构造裂隙与层面切割组合,在地质构造与岩体卸荷耦合作用下,临空陡崖面形成多处薄板状或不规则状危岩体。临空区岸坡岩体沿岩层层面的卸荷-松弛(图 5),层面抗剪强度逐步衰减,在构造切割、岩体卸荷等地质耦合作用下,临空区岩体呈渐进式破坏。

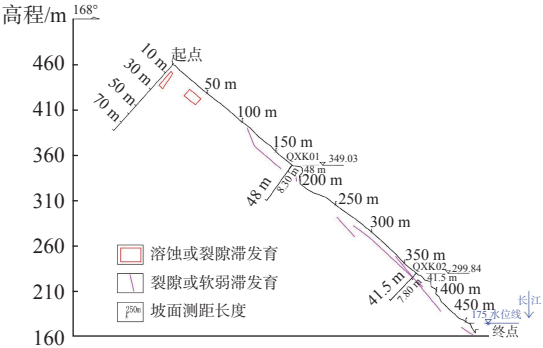


图 5 岸坡坡体卸荷地质雷达解译图
Fig. 5 GPR interpretation map of bank slope unloading

(2)局部压裂、滑移

岸坡陡崖或其余临空面在长期高应力作用下,在构造、卸荷等地质耦合作用下,在崖底或临空区底部局部可见岩体呈薄壳或薄板状鼓胀、压裂,用地质锤锤击易出现开裂掉块(图 6)。其中第一段岸坡三级陡崖崖脚泥质灰岩地层中可见,其发育深度约 0.6 m;岸坡上游陡崖面中段,在大冶组三段泥质灰岩中也发现鼓胀、压裂迹象,岩体呈碎裂状。此外,岸坡局部滑移后擦痕明显,其中第 I 段岸坡陡崖可见早期滑痕,方向约 180°,与斜坡坡向呈小角度相交。第 II 段岸坡发育有嘉陵江组二段岩溶角砾岩夹层,其质地相对较软,且夹层控制的区域在水下局部临空,该区域后期可能沿软弱面出现滑移-溃曲破坏(图 7)。



图 6 岸坡局部鼓胀、压裂及岸坡早期滑痕
Fig. 6 Local bulging, fracturing and early slippage of bank slope

(3)地表溶蚀

剪刀峰顺向岸坡属碳酸盐溶岩区域,地表岩溶发育较明显,其中在陡崖区域以大型的溶蚀裂缝为主,其发育程度较高,如神女峰陡崖及岸坡上游侧断面区域可见发育明显的溶蚀裂缝,沿竖向最大切割深度约 226 m,局部区域因溶蚀崩塌形成岩腔(图 8)。岸坡其余区段

地表溶蚀以小型溶蚀裂缝、溶洞及溶蚀孔洞为主。溶蚀裂缝多沿构造及卸荷裂缝发育,其中与构造作用耦合发育的构造溶蚀裂缝有 6 处,裂面因溶蚀作用呈不规则状,钙化严重。溶洞集中发育在第 I 段岸坡陡崖区域,其中最大溶洞洞口宽 2.1 m,高 2.5 m,洞内最大高度约 10 m,最大宽度约 3.7 m,可见深度约 6.5 m。岸坡溶蚀

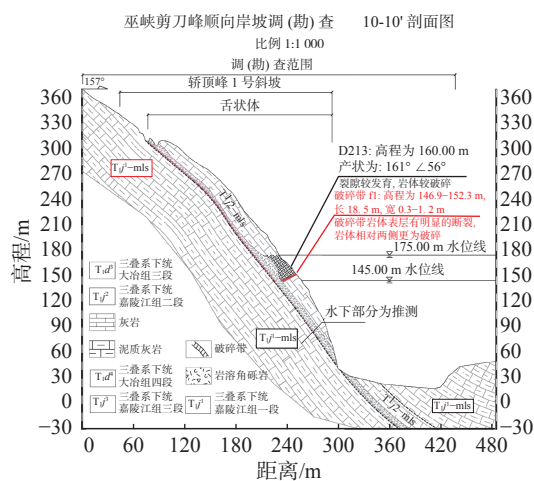


图 7 软弱夹层区岸坡地质剖面图

Fig. 7 Geological profile of bank slope in weak interlayer area

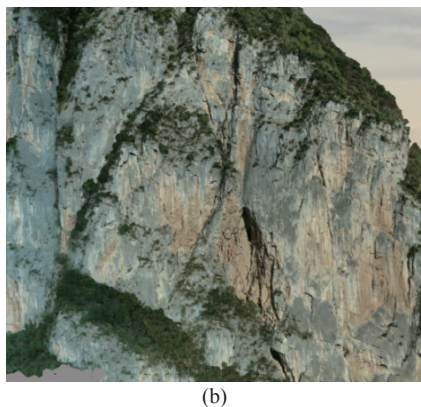
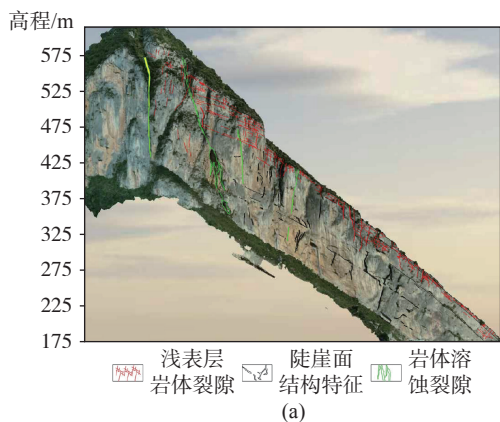


图 8 第一段岸坡上游断面溶蚀裂缝发育特征图

Fig. 8 Dissolution fracture development characteristic map of upstream section of the first section of bank slope

孔洞在岸坡坡表大范围可见, 其孔洞直径约 0.5 ~ 3 cm, 发育深度较浅, 约 0.5 ~ 4 cm。

(4) 消落区岩体劣化

岸坡 145 ~ 175 m 区域受库水位涨落影响, 岩体不断干湿循环, 劣化严重, 其主要表现形式如下: 1) 受两组

构造裂隙的切割, 岩体多被切割成不规则板状或块状, 裂隙发育间距 0.5 ~ 3.2 m, 张开度 0.1 ~ 7 cm, 延伸长度约 2.0 ~ 26.5 m, 局部碎块石充填。2) 岸坡临空岩体在裂隙切割下, 随着岩体强度不断衰减, 出现从下至上的小范围、小规模、小规模的滑移、坠落。3) 消落带岸坡表层破碎岩体受库水冲刷严重, 库水的流通和涨落将破碎岩体逐步搬运, 导致新临空面形成及裂隙面的进一步扩张。4) 劣化带局部区域岩溶较发育, 主要为小规模溶蚀孔洞及溶蚀裂隙, 其溶蚀及切割影响岸坡的整体性。5) 岸坡岩体劣化差异, 局部拉裂、扭转破坏(图 9)。



图 9 岸坡消落区岩体劣化特征图

Fig. 9 Rock mass deterioration characteristic map of bank slope fluctuation zone

3 岸坡破坏类型及机制

(1) 第 I 段斜坡

该段岸坡浅表层顺向临空, 主要发生滑移式失稳模式(图 10), 岸坡在顺向层面及节理裂隙的共同作用下, 将岩体切割成规模较小的块状或板状, 在自重应力及外营力下, 岩体沿裂隙面及层面卸荷、应力松弛, 切割裂隙一旦贯通, 破坏块体便与母岩脱离, 块体沿层面向下滑动失稳。该段岸坡临空段厚度相对较薄, 受裂隙切割后可能发生顺层块体的滑移, 但破坏模式为在地质构造、卸荷及溶蚀等作用下, 岸坡发生渐进式、逐层松脱-滑移破坏(图 11), 引用《三峡库区高陡岸坡成灾机理研究》(黄波林、刘广宁、王世昌等)文献插图)[8]。

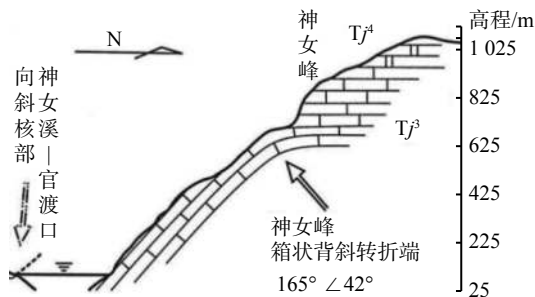


图 10 第 I 段斜坡结构特征

Fig. 10 Structural characteristics of slope in the I section

(2) 第 II 段斜坡

该段岸坡受水下地形影响, 岸坡临江面大范围临

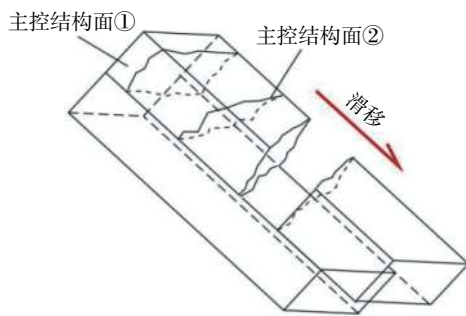


图 11 松脱式滑移破坏模式

Fig. 11 Release slip failure mode

空;同时,岸坡发育了相对软弱夹层岩溶角砾岩,该层在江底水下也是临空。因此,岸坡除受地质构造及微地貌等影响下的局部滑移-崩塌以外,岸坡临空区在沿软弱夹层及临空面长期卸荷、应力释放、岩体强度不断衰变。

(3)第Ⅲ-第Ⅴ段斜坡

该段斜坡岩层产状变较大,其破坏成灾模式随产状的变化而发生了变化。上游段(Ⅲ段、Ⅳ段斜坡)岩层倾角及地形坡角略缓,一般岩层倾角 $42^{\circ} \sim 57^{\circ}$,局部小面积的临空,易顺层发生滑移,斜坡底部受到江水冲刷,淘蚀,斜坡坡以垂直河道方向的临空面向下游不断发生“渐进式松脱”破坏失稳(图 12)。下游(Ⅵ段斜坡)随着岩层产状倾角的进一步扩大,破坏类型由顺层滑移型变成顺层剥落型。且岩体被“X”节理和层面裂隙切割成菱形结构体,在脱离母体后向长江方向和两侧冲沟崩塌。

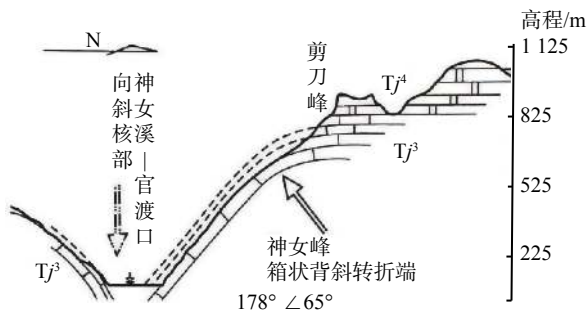


图 12 第Ⅱ段—Ⅴ段斜坡结构特征

Fig. 12 Structural characteristics of the II—V section slope

(4)第Ⅵ段斜坡

该段斜坡岩层陡立甚至局部出现反倾,失稳模式转变为溃屈-倾倒型(图 13、图 14)。当岩层倾角大于 75° 时,坚硬的嘉陵江组三段灰岩构成板裂结构岩体,并形成向外张开的竖直板梁式的危岩体,由于受剖面“X”型及斜交层面倾向坡内的结构面切割的影响,直立板梁的完整性受到破坏,在重力及板梁之间充填碎石土的楔劈作用下,在消落带岩体不断劣化的耦合作用下,岸坡破裂的直立板梁易发生破坏。

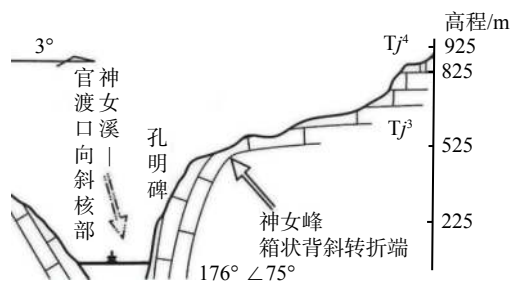


图 13 第Ⅵ段斜坡结构特征

Fig. 13 Structural features of the VI section slope

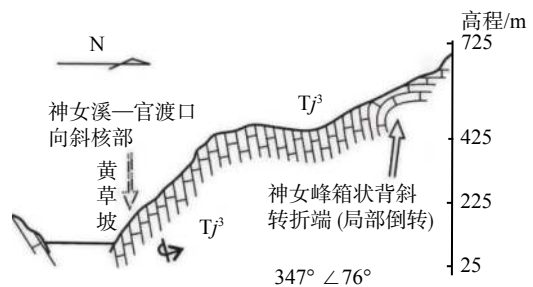


图 14 第Ⅵ段斜坡下游坡体结构特征

Fig. 14 Structural characteristics of downstream slope

4 岸坡岩体劣化特征

4.1 岩体劣化特征

(1)岸坡整体劣化规律

根据对岸坡的调查及分析,剪刀峰顺向岸坡在内外地质作用下,其岩体的劣化主要变现为岸坡岩体的完整性变差及岩体的强度衰减两个方面。岩体的完整性变化主要是受地质构造、地表溶蚀、坡体卸荷作用及其因子的耦合;岩体强度的衰减主要是在岩体完整性变差的同时,岩体及其结构面的强度变差。岸坡岩体的完整性及强度衰减变化呈逐层、逐级劣化。

岸坡岩体劣化深度主要受地层岩性、坡体结构、库水位等因素控制。岸坡在坚硬岩组区劣化程度比软弱夹层区劣化程度低;岸坡完整性好、临空厚度较薄的区域其劣化深度相对较浅;岸坡库水位以上区域较消落带区域岩体更完整,劣化深度更浅。根据调勘测数据综合分析,岸坡消落带区域劣化深度主要在 20 m 范围内,其中 10 m 范围内为强劣化区;消落带以上区域劣化厚度主要受岩体临空厚度、构造切割及坡体卸荷等控制。

(2)岸坡消落带劣化特征

岸坡劣化最集中、最严重的区域为 145 ~ 175 m 库水位变动区域,其岸坡的劣化特征主要为以下几个方面:1)表层岩体在构造切割及库水影响下,岩体较破碎,局部呈碎裂状、散体堆积在坡表。在库水位涨落及冲

剥蚀作用下,岩体逐步解体,坡表松散堆积岩体被逐步携带,形成新的劣化面。2)岩体差异劣化,在消落带及附近主要形成 10 处大小不等的拓空区,拓空区导致局部岩体临空,为其周边岩体破坏提供了空间条件。3)岸坡在构造裂隙切割及差异劣化形成下,局部重心发生偏移,出现侧向拉裂、扭转。4)受地质构造影响,岸坡消落带区域发育了 3 处构造破碎带,破碎带上岩体相对较破碎,局部层面扭转,切割坡体。5)岸坡沿构造裂隙溶蚀,切割坡体,整个岸坡共发育了大小不等的 6 处构造溶蚀裂隙,影响岸坡岩体的整体性。

4.2 岩体劣化及失稳模式

(1)沿层面渐进式松脱滑移

神女峰至剪刀峰顺向岸坡段,岸坡坡度较陡,在 NNE、NNW 两组构造裂隙切割下岸坡浅表层岩体被切割解体;同时,受地形条件影响,岸坡在水下或水上陡坎或陡崖顺向临空,临空区域岩体长期沿构造裂隙及临空面卸荷,岩体强度不断劣化,将在临空区域出现逐层、逐级的松脱滑移破坏(图 15)。

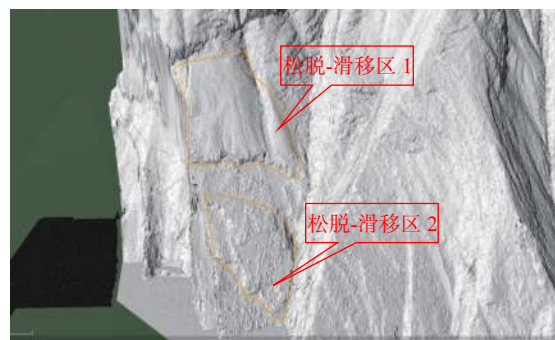


图 15 岸坡松脱-滑移典型破坏区

Fig. 15 Typical failure zone of bank slope loosening and slip

消落带区域,岸坡还受库水位变动影响,岩体不断干湿循环,强度逐层折减;同时,库水的冲刷导致层面间和裂隙间的充填物流失,裂缝逐步扩展,层面抗剪强度由表及里逐层衰减,最终局部区域岩体在自重作用下,沿层面发生松脱式滑移(图 16)。该类岩体劣化导致岸坡失稳为渐进式、小规模变形破坏,其破坏导致岸坡上游段多级陡坎及陡崖的地貌特征。

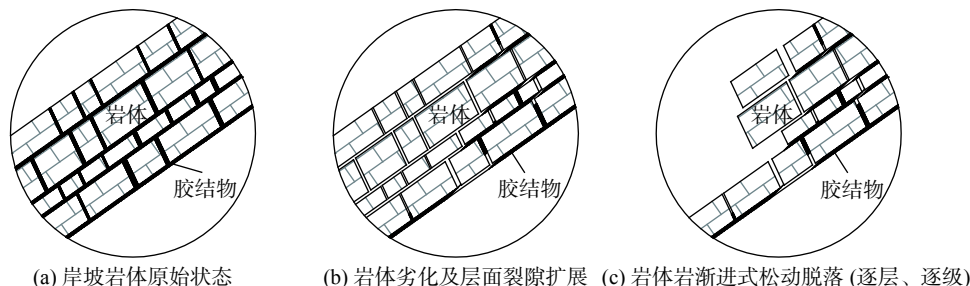


图 16 顺层松脱式-滑移破坏机理图

Fig. 16 Failure mechanism diagram of bedding release - slip

(2)沿软弱夹层溃屈滑移

受嘉陵江组二段岩溶角砾岩及岸坡地形的影响,第二段岸坡下游侧(轿顶峰 1 号斜坡)软弱夹层区在水下外倾临空,该段岸坡的破坏主要受软弱层控制。同时,结合岸坡岩体劣化特征,岸坡库水位变动区岩体劣化程

度要大于其余区域,在长期的干湿循环、岩体强度劣化的情况下,该段岸坡可能出现中后部沿软弱夹层,前部沿水下临空面滑移或消落带强度薄弱区域溃屈滑移(图 17)。该类型的破坏体积较大,破坏后果及影响较大。

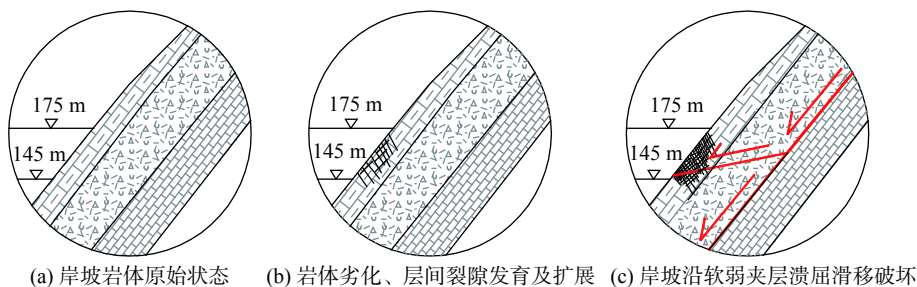


图 17 沿软弱夹层滑移溃屈破坏机理图

Fig. 17 Failure mechanism diagram of slip and collapse along weak interlayer

(3)沿“X 型”节理滑移

神女峰至剪刀峰、孔明碑一带, 顺向岩层倾角逐渐加大, 坡体发育陡倾乃至陡立结构同倾坡, 岸坡稳定性状况和失稳模式逐渐发生显著的变化并形成各自独特的地貌特征(图 18)。

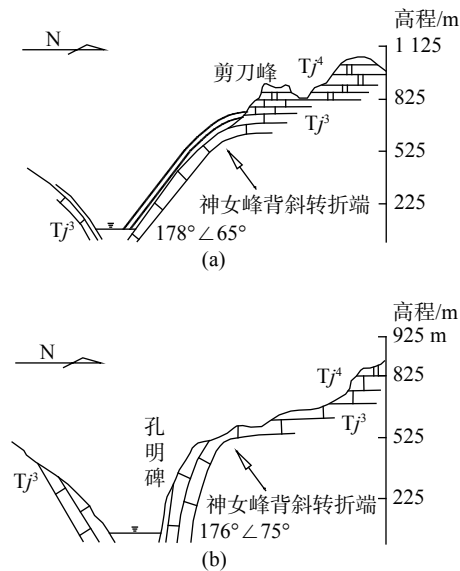


图 18 剪刀峰—孔明碑一带工程地质剖面图
Fig. 18 An engineering geological section in the area of Kong ming, scissor peak

孔明碑一带位于神女溪—官渡口向斜北翼近核部, 由三叠系嘉陵江组三段灰岩够成顺向结构同倾坡。坡面“X”型节理发育, 坡表岩体多被切割成菱形结构体, 岩体呈“X”型节理破坏。破坏方式为沿层面向下剥落至长江或沿节理面向两侧滑移、崩塌入两侧冲沟, 对过往船只构成威胁。这类失稳模式形成的典型地貌为三角面和 V 型沟(图 19)。第 V 段岸坡(剪刀峰危岩带)即是这一变形失稳类型的典型代表。

消落带区域岸坡岩体 X 形节理数量和规模较蓄水前均有较大幅度的增长, 同时基于测窗内的裂隙对比, 可以显见裂隙的发育呈增长增多态势。库岸岩体质量较好, 本体强度和变形参数均较高, 引起库岸失稳关键因素为贯通性结构面的发育情况。位于水位变动带内的岩体 X 裂隙发育速度远远领先于其它位置, 由裂隙切割的菱形岩体将从水位变动带开始逐渐松脱解体, 最终自下而上形成凹腔, 上部岩体在失去支撑情况下发生局部乃至整体失稳。该类破坏实质上是岸坡坡体逐层节理、劣化引发的变形失稳。岸坡目前临江面主要呈浅表层的节理及劣化, 体积较小, 危害性较小; 冲沟侧潜在失稳体积较大, 但其主要朝冲沟内破坏, 其岩体劣化及破坏的体积较大, 但危害性仍较小。

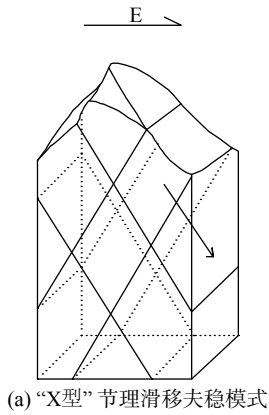


图 19 剪刀峰一带崩塌失稳模式及形成的三角面和 V 形沟
Fig. 19 Collapse mode and V-shaped gully in the vicinity of scissor peak

(4)沿层面倾倒溃屈

下游第 VI 段(孔明碑一带)由三叠系嘉陵江组三段(Tj³)中薄层含燧石结核灰岩、白云质灰岩构成。受神女溪-官渡口向斜影响, 该区域岩层呈陡倾乃至局部倒转, 岸坡结构由上游剪刀峰段的“X”型节理转变为以竖向节理为主的板裂状岩体结构; 破坏模式由“X 型节理滑移破坏”向“陡立倾倒失稳模式”转变(图 20)。同时, 岸坡临江面岩体不断卸荷, 后缘裂缝扩张, 加之在水位

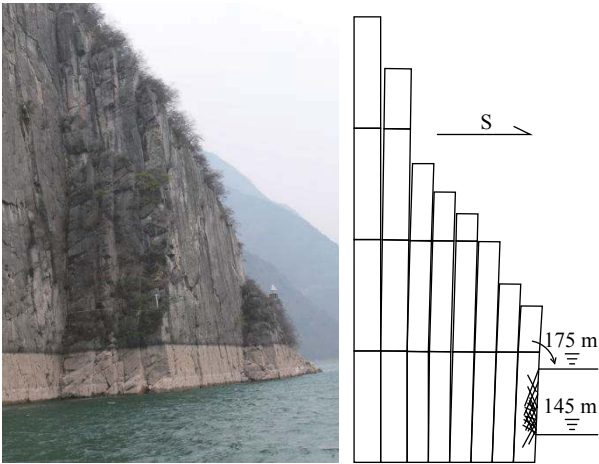


图 20 孔明碑一带顺向岸坡结构及沿层面倾倒溃层失稳模式
Fig. 20 Structure and failure mode of consequent bank slope along Kong ming monument

变动条件下,临水面的板状岩体裂隙发育数目和发育速度远领先于其它部位,水位变动带应变集中,随着岩体强度不断劣化,岩体下部出现低强度、薄弱带使上部岩体的重心发生偏移,上部直立板梁易发育溃屈—倾倒失稳。该类破坏实质上是岸坡坡体逐级及逐层卸荷、劣化引发的变形失稳,岸坡溃屈倾倒破坏易引发涌浪,对长江航道及过往船只危害性较大。

5 结论

(1)剪刀峰顺向岸坡位于重庆市三峡库区长江干流巫山县巫峡左岸,航道里程编号为 K153+500~K155+600,上起神女峰景区出口下游侧,下至游孔明碑,涉及库岸总长 2.1 km。岸坡整体地形陡峭,坡角 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$,局部可达 $82^{\circ} \sim 89^{\circ}$,为陡倾顺层岩质岸坡,岸坡地质环境条件复杂。

(2)剪刀峰岸坡受神女峰背斜及神女溪—官渡口向斜影响,呈顺向岸坡结构,岸坡在水下及水上陡崖或陡坎区域局部临空,岸坡岩体结构主要为薄至中厚层泥质灰岩、灰岩,局部夹岩溶角砾岩及白云质灰岩等,属碳酸盐溶岩岸坡。岸坡目前的变形主要为坡体构造切割及卸荷、局部压裂、滑移、地表溶蚀、消落带劣化几个方面。

(3)岸坡消落带区域劣化深度在 20 m 范围内,其中 10 m 范围内为强劣化区;岸坡沿坡面竖向主要受临空区域的厚度及构造切割、坡体卸荷的控制,岸坡受库水位影响的消落带区域劣化程度远大于库水位以上的岸坡区域。岸坡岩体劣化后导致的坡体破坏主要分为沿层面渐进式松脱滑移、沿软弱夹层溃屈滑移、沿“X 型”节理滑移、沿层面倾倒溃屈破坏四种破坏类型。

参考文献 (References):

- [1] TERZAGHI K. Measurement of Stresses in Rock [J]. Géotechnique, 1962: 105–124.
- [2] 孙广忠. 岩体结构力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. [SUN Guangzhong. Rock mass structural mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)]
- [3] 陈沅江, 潘长良, 曹平, 等. 层状岩质边坡蠕变破坏及其影响因素分析 [J]. 勘察科学技术, 2001(6): 43–48. [CHEN Yuanjiang, PAN Changliang, CAO Ping, et al. Creep failure of layered rock slope and its influencing factors [J]. Investigation Science and Technology, 2001(6): 43–48. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张天贵, 李德均, 唐俊刚, 等. 重庆三峡库区长江干流库岸(巫山段左岸)地质灾害调查报告 [R]. 重庆: 重庆市地质矿产勘查开发局 107 地质队, 2017. [ZHANG Tianguai, LI Dejun, TANG Jungang, et al. Geological disaster investigation report on the left bank of the main stream of Wushan section of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing [R]. Chongqing: Geology No. 107 of Chongqing, 2017. (in Chinese)]
- [5] 张枝华, 胡明军, 王平, 等. 重庆三峡库区长江干流库岸(巫山段右岸)地质灾害调查报告 [R]. 重庆: 重庆市地质灾害防治工程勘察设计院, 2017. [ZHANG Zhihua, HU Mingjun, WANG Ping, et al. Geological disaster investigation report on the right bank of the main stream of Wushan section of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir area of Chongqing [R]. Chongqing: Chongqing Exploration & Design Institute of Geological Hazard Control Engineering, 2017. (in Chinese)]
- [6] 王平, 胡明军, 吴坤达, 等. 重庆市三峡库区巫山县巫峡剪刀峰顺向岸坡调(勘)查 [R]. 重庆: 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 2021. [WANG Ping, HU Mingjun, WU Kunda, et al. Survey along bank slope of scissors peak in Wushan County, Three Gorges Reservoir Area, Chongqing municipality [R]. Chongqing: Chongqing 208 Institute of Geological Environment Co. Ltd., 2021. (in Chinese)]
- [7] 王平, 郑涛, 黄波林, 等. 高陡峡谷岸坡变形破坏机理及预测预报研究—以长江三峡巫峡(重庆段)为例 [R]. 重庆: 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队, 2019. [WANG Ping, ZHEGN Tao, HUANG Bolin, et al. Study on deformation and failure mechanism and Forecast of high and steep canyon bank slope: A case study of Wuxia (Chongqing Section) in the Three Gorges of Yangtze River [R]. Chongqing: 208 Hydrogeology Engineering Geology Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2019. (in Chinese)]
- [8] 黄波林, 刘广宁, 王世昌, 等. 三峡库区高陡岸坡成灾机理研究 [R]. 北京: 科学出版社, 2015. [HUANG Bolin, LIU Guangning, WANG Shichang, et al. Study on disaster mechanism of high and steep slope in Three Gorges Reservoir area [R]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)]
- [9] 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等. 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, 2017, 39(10): 1851–1858. [ZHANG Jingyu, WAN Liangpeng, PAN Hongyue, et al. Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1851–1858. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 余姝, 张枝华, 黄波林, 等. 三峡库区青石-抱龙段顺层灰岩库岸坡变形破坏机理 [J]. 中国地质灾害与防治学

- 报, 2019, 30(3): 18–23. [YU Shu, ZHANG Zhihua, HUANG Bolin, et al. Deformation mechanism of bedding limestone bank slope from Qingshi to Baolong, the Three Gorges area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 18–23. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 梁德明, 李长冬, 雍睿, 等. 基于参数劣化的软硬相间顺层边坡稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊1): 195–202. [LIANG Deming, LI Changdong, YONG Rui, et al. Study of stability of soft-hard interbedded slope based on degradation of strength parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup1): 195–202. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈小婷, 黄波林, 刘广宁, 等. 三峡库区平缓层状软硬相间斜坡变形模式变化分析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(2): 57–61. [CHEN Xiaoting, HUANG Bolin, LIU Guangning, et al. Analysising on deforming mode transforming of gentle soft-hard interbed slopes in Three Gorges reservoir [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(2): 57–61. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 胡明军, 张枝华, 黄波林, 等. 三峡工程重庆库区长江干流水位变动带岸坡长期强度弱化规律及防护措施示范研究[R]. 重庆: 重庆市地质矿产勘查开发局208水文地质工程地质队, 2021. [HU Mingjun, ZHANG Zhihua, HUANG Bolin, et al. A demonstration study on the long-term strength weakening law and protective measures of the Yangtze River slope in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Project in Chongqing reservoir area [R]. Chongqing: 208 Hydrogeology Engineering Geology Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2021. (in Chinese)]
- [14] 黄波林, 殷跃平, 张枝华, 等. 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, 2019, 38(9): 1786–1796. [HUANG Bolin, YIN Yueping, ZHANG Zhihua, et al. 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, 2019, 38(9): 1786–1796. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘广宁, 齐信, 黄波林, 等. 库水波动带岸坡原位声波测试及劣化特性研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 367–375. [LIU Guangning, QI Xin, HUANG Bolin, et al. Sonic wave test and degradation characteristics of reservoir bank slope within water fluctuation belt [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 367–375. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 殷跃平, 闫国强, 黄波林, 等. 三峡水库消落带斜坡岩体劣化过程地质强度指标研究 [J]. 水利学报, 2020, 51(8): 883–896. [YIN Yueping, YAN Guoqiang, HUANG Bolin, et al. Geological strength index of the slope rock mass deterioration process of the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(8): 883–896. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 蒋明镜, 刘蔚, 孙亚, 等. 考虑环境劣化非贯通节理岩体的直剪试验离散元模拟 [J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2728–2736. [JIANG Mingjing, LIU Wei, SUN Ya, et al. Discrete element simulation of direct shear test on rock mass containing discontinuous joints with environmental degradation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2728–2736. (in Chinese with English abstract)]