

三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究

黄波林¹, 殷跃平², 张枝华³, 王健¹, 秦臻¹, 闫国强^{3, 4}

(1. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测站, 湖北 宜昌 443002; 2. 自然资源部地质灾害技术指导中心, 北京 100081;
3. 重庆市地质灾害防治工程勘查设计院, 重庆 400700; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 433000)

摘要: 三峡工程 175 m 蓄水后, 峡谷区内多次发生新生地质灾害事件, 岩溶岸坡消落带岩体劣化引起广泛关注。通过野外调查、原位测试和室内试验等大量工作, 首次系统阐述三峡库区岩溶岸坡消落带浅层岩体劣化特征。从岩体宏观劣化现象来看, 不同岩体结构和岸坡结构的岩体劣化宏观表现有非常大的差异, 包括溶蚀/溶解、裂缝显化与扩展和机械淘蚀等现象。浸泡-风干循环后的灰岩样品力学参数平均每循环下降率约为 0.7%; 随着循环次数的增加, 岩样强度下降可用指数函数形式拟合, 相关性系数大于 0.84。箭穿洞地表破碎灰岩岩体声波年下降率为 11.23%。青石岩溶岸坡浅层岩体多期钻孔声波对穿试验测试明显表明: 地下岩体的劣化以结构面的劣化为主, 其声波年下降率为 10%~60%。这些认识和数据从不同角度展示出岩溶岸坡消落带浅层岩体劣化的独特特征: 岩石的低劣化率夹杂结构面的高劣化率, 具有不均一性; 根据风化界线或岩体裂隙分带, 在区内或带内则有相近的劣化率, 具有分带性。根据这一特征, 建立等效连续模式和结构面模式的岩体劣化力学模型。本研究工作指引了库区岩体劣化方向上未来研究重点, 将为三峡库区水位变动带地质灾害隐患点防灾减灾工作提供重要支撑。

关键词: 岩石力学; 三峡库区消落带; 岩溶岸坡; 浅层岩体劣化特征; 劣化率; 岩体劣化力学模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2019)09-1786-11

Study on deterioration characteristics of shallow rock mass in water the level fluctuation zone of karst bank slopes in Three Gorges Reservoir area

HUANG Bolin¹, YIN Yueping², ZHANG Zhihua³, WANG Jian¹, QIN Zhen¹, YAN Guoqiang^{3, 4}

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Guidance Center for Geological Disaster Prevention and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Chongqing Institute of Geological Disaster Prevention and Control Engineering Exploration and Design, Chongqing 400700, China; 4. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 433000, China)

Abstract: After the impoundment of 175 m above the sea level of the Three Gorges Reservoir, several geo-hazards happened in gorge areas, resulting in wide attention to the deterioration of rock mass in the water level fluctuation zone of karst bank slopes. Based on field investigations as well as in-situ and laboratory tests, the deterioration characteristics of shallow rock mass in the zone were systematically summarized for the first time in this paper. From the perspective of macro-deterioration phenomena of rock mass including dissolution, crack manifestation and propagation, and mechanical erosion, the macro-deterioration performance of karst rock masses

收稿日期: 2018-12-27; **修回日期:** 2019-03-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504803); 湖北长江三峡滑坡国家野外观测站(2018KTL06); 重庆市科研项目(2018102849)

Supported by the National Key R&D Program of China(Grant No. 2018YFC1504803), National Field Observation and Research Station of Landslides in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River(Grant No. 2018KTL06) and Project from Chongqing(Grant No. 2018102849)

作者简介: 黄波林(1979-), 男, 2001年毕业于吉林大学岩土工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事水库地质灾害及涌浪灾害方面的教学与研究。E-mail: bolinhuang@aliyun.com。通讯作者: 殷跃平(1960-), 男, 现任研究员、博士生导师。E-mail: yyueping@mail.cgs.gov.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1535

with different structures is very different. The mechanical parameters of limestone samples averagely decrease by about 0.7% after an immersion-air drying cycle, and the strength of the samples decreases with rising the number of cycles in an exponential function with a correlation coefficient larger than 0.84. The annual decline rate of the acoustic wave in fractured limestone of Jianchuandong is 11.23%. Borehole multi-period acoustic penetration test results show that the deterioration of underground karst rock mass is mainly deterioration of structure planes and the annual decline rate is about 10% - 60%. These works show the unique deterioration characteristics of shallow karst rock mass such as a low deterioration rate of rock accompanied with a high deterioration rate of structural planes, non-uniformity, and zonation of the deterioration rate according to the weathering or fracture zones of rock mass. Based on these characteristics, two deterioration models of rock mass respectively corresponding to equivalent continuous mode and structural plane mode were established. This research points out the future research focus of deterioration properties of rock mass in reservoirs and provides an important support for the prevention and mitigation of potential geological hazards in the water level fluctuation zone in Three Gorges Reservoir area.

Key words: rock mechanics; water level fluctuation zone in Three Gorges Reservoir area; karst bank slope; deterioration characteristics of shallow rock mass; deterioration ratio; mechanical models of rock mass deterioration

1 引言

三峡库区 3 个干流峡谷区和较多支流河谷是以碳酸盐类为主的可溶性岩石分布区, 岩溶非常发育。由于坡体内节理、裂隙与岩溶管道 - 溶隙 - 孔隙发育, 库水/地下水与岩溶岸坡的相互作用活跃, 加速了岩溶岸坡变形破坏演化进程^[1-2]。由于三峡工程库区水位周期性涨落在高程 145~175 m 范围, 库区消落带岩溶岸坡岩体遭受的应力和环境条件(如温度、水位)周期性变化, 其岸坡岩体质量和物理力学性能会快速劣化, 可称之为岩溶岸坡岩体劣化效应。岩溶岸坡岩体劣化会新生地质灾害, 例如 2008 年 175 m 试验性蓄水时在巫峡灰岩岸坡区发生的龚家方崩滑^[3]。

国内外大量学者开展过类似的岩溶岩体劣化研究^[4-11]。Z. A. Erguler 和 R. Ulusay^[12]对不同含水量的泥灰岩进行了针贯入和单轴抗压试验, 建立了含水量、针贯入和单轴抗压强度的关系。F. Corvo 等^[13]分析了空气污染和水汽对热带潮湿气候区历史建筑中大型灰岩材料造成的劣化现象, 水的溶解作用被认为是最重要的劣化机制。S. Dochez 等^[14]采用原位测试和室内试验研究了雨水 - 灰岩岩体化学作用机制和水蚀改造的不连续面力学响应。R. M. Ion 等^[15]提出 Basarabi-Murfatlar 教堂的碳酸岩纪念碑劣化与水汽、霜冻和 Chalk 湖的盐分迁移有非常紧密的联系。B. L. Huang 等^[16]连续观测了多年柱状厚层灰岩

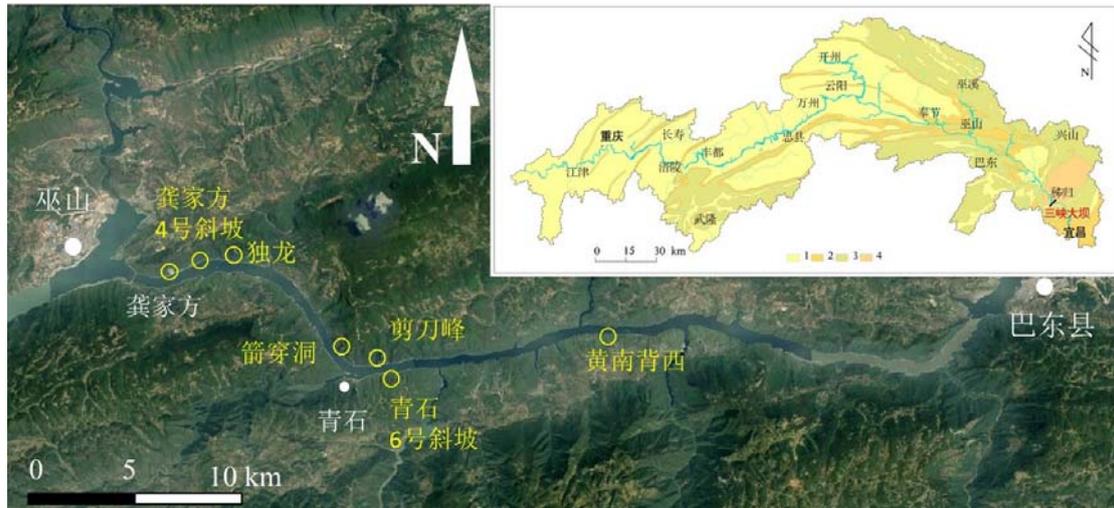
危岩体的基座变化, 认为库水波动造成了基座岩体劣化, 加速了危岩体破坏过程。B. D. Collins 和 G. M. Stock^[17]通过精细观测发现, 由于温差循环产生的微小应力改变也能加速岩体裂隙扩展与分离。何叶等^[18-19]展开了系统的力学试验, 分析了周期性饱水对灰岩岩石力学特性的影响规律, 建立了岩石损伤动态演化方程。

以上研究提出了岩溶岩体劣化的可能机制。但消落带岩溶岸坡地表岩体劣化现象是什么, 浅层岩体及其结构面的劣化情况如何, 当前解答类似问题的岩溶岸坡岩体劣化特征研究甚少, 它却是影响库岸岩体(长期)稳定的关键。同时, 三峡工程库区消落带岩溶岸坡岩体劣化带来的影响已经显现。除了龚家方附近类似的不稳定斜坡外, 在巫峡、西陵峡都发现了岩体劣化形成的潜在崩滑体, 例如板壁岩和棺木岭危岩体等^[20-22]。这些都是开展岩溶岸坡岩体劣化研究的源动力。

基于大量野外调查、室内试验和原位测试工作, 本文首先总结三峡库区岩溶岸坡岩体劣化宏观现象, 建立岩石强度劣化函数, 分析原位浅表层岩溶岩体在深度方向上的劣化特征, 为三峡库区岩体劣化带斜坡防治提供技术支撑。

2 岩溶岸坡岩体宏观劣化现象

2008~2018 年间对三峡库区峡谷岩溶岸坡进行了长期跟踪调查。以巫峡段为例, 岩溶岸坡的主



1—砂岩、粉砂岩、页岩及煤系地层；2—泥岩夹砂岩、页岩；3—灰岩、白云岩夹页岩；4—花岗岩

图1 三峡库区岩性分布图及巫峡段岩体劣化重点调查区图

Fig.1 Lithological distribution map of Three Gorges Reservoir area and major investigation locations of rock mass deterioration in Wu Gorge

要地层层位为二叠系和三叠系，其中又以三叠系大冶组和嘉陵江组最为发育。最开始的岩溶岸坡岩体劣化宏观现象在龚家方附近(龚家方—独龙一带)发现，而后多样化的岩体劣化现象在许多岩溶岸坡中被发现。在巫峡消落带，不同岩溶岸坡结构和岩体结构中岩体劣化表现有非常大的差异性，具体包括机械淘蚀现象、溶蚀/潜蚀现象和裂缝显化/扩展现象。这些现象显然是岩溶(水-岩)作用、水力侵蚀作用、应力和环境周期性作用共同形成的，有些具有较高的辨识度，有些则较为细微。同时，这些现象实质上是岩体内部损伤、结构面松动和断裂破坏等岩体劣化的具体表现。

(1) 溶蚀/潜蚀现象

由于三峡库区的水位一直处于变动中，消落带附近成为地表水、地下水极其活跃区域；这些造成了节理、裂隙发育的浅表层碳酸盐岩岸坡极具溶蚀/潜蚀条件^[1-2]。在大量平缓层状的白云质灰岩、灰岩和泥灰岩构成的消落带岩体中发现了沿节理、裂隙和层面发育的溶隙、溶槽。例如在箭穿洞上游库岸可见水位 175 m 之下的垂直裂隙明显要多于水位线之上的(见图 2)。同时，沿垂直裂隙极度发育大量的长条状溶隙和溶槽。溶隙、溶槽内的岩溶碎屑有些仍然填充在其中，有些已经被淘蚀。大的溶槽宽度和高度都能容纳成人进入。175 m 高程水位线成了溶隙/溶槽发育的分界线，这显然与水位波动有关。在黄南背西岸坡附近则是溶孔非常发育。溶隙、溶槽、溶孔的大量发育造成岩体空洞及结构面急剧增多，岩体质量严重下降，是岩溶岸坡岩体劣化的重要标志之一。



图2 水平厚层岩体裂隙潜蚀劣化现象(箭穿洞上游, 2017年7月)

Fig.2 Dissolution erosion along fractures in horizontal thick rock mass(Jianchuandong, July, 2017)

(2) 裂缝显化与扩展现象

在灰岩、白云质灰岩和白云岩等硬质岩构成的中陡倾角顺层消落带岩体中，浅表层岩体结构面发育，经常会出现结构面或裂缝变宽、变深或裂缝出现张开延展。以剪刀峰水位变动带岩体(范围约 6.7 m×8 m)为例，2012 年与 2017 年的对比素描显示新显现了大量裂隙(图 3 中灰线)。该区岩性为三叠系嘉陵江组灰白色中薄层白云岩、泥质灰岩和白云质灰岩组成。主要发育 3 组结构面，产状分别为 290°~300°∠60°~70°，40°~70°∠45°~60°，250°~270°∠45°~70°。

从新显现裂缝的产状来看以第一组和第三组节理发育居多。有的新显化节理是沿老的节理延伸，沟通已存的节理；有的则是原有闭合裂缝的张开，产状大多与构造节理类似。在素描区(面积 53.6 m²)，

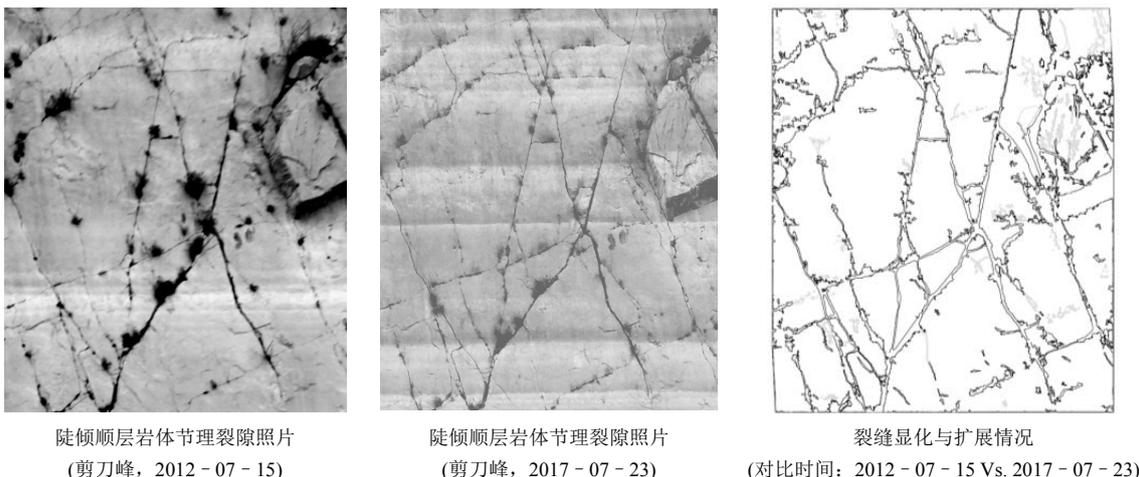


图 3 陡倾顺层岩体劣化之节理裂隙扩展与新生现象

Fig.3 Joints/fractures expansion and newborn phenomena in steep inclined bedding rock mass

红色的显化或延展裂缝条数为 52 条，最长的新增裂缝长度为 0.78 m，平均长度约为 0.4 m。假定这些裂缝为连续持续延展，年最大延伸率约为 0.15 m/a，年平均延伸率约为 0.08 m/a。

原节理、裂隙系统基本以构造配套为主；显化或扩展裂隙系统当前来看，仍以构造配套为主。显化或扩展裂隙是追踪或者显化了原有封闭的构造节理、裂隙。裂缝显化与扩展的机制非常复杂，譬如水 - 岩相互作用造成结构面填充物的溶蚀或潜蚀^[14]，水化学环境会影响岩石断裂韧度^[23]，温差会导致硬质岩体裂缝扩展与新生^[24]，水 - 力耦合作用下裂隙也会进一步破裂与张开^[25]。

(3) 机械侵蚀现象

机械侵蚀现象在库区是非常常见的，它使得消落带软弱层或裂隙带形成小的凹腔，岩体结构面内部充填物被显著淘蚀；同时机械冲刷会造成已有节理、裂隙进一步加宽、变深。在碳酸盐岩碎裂岩体岸坡中，还可能由于流水冲力侵蚀、降雨冲刷侵蚀、地下水流潜蚀或携沙水体磨蚀等机械力侵蚀，造成了碎裂岩体岸坡发生了巨大形貌上的变化。巫山龚家方一独龙一带为碎裂结构灰岩为主的逆向岸坡，在龚家方 1 号斜坡、茅草坡、龚家方 4 号斜坡等一系列斜坡水位变动带上都发现了大量的侧向侵蚀和坡面侵蚀现象(见图 4)。

机械侵蚀与塌岸造成的岩土体流失有着明显区别，机械侵蚀主要由水流的冲击力和拖拽力造成^[26]，主要对表层松动的碎裂岩体起作用。年侵蚀量或侵蚀速率可以表征库水对这类斜坡的侵蚀程度。2015 年对巫山县三叠系大冶组碎裂岩体机械侵蚀深度进行了测量(见表 1)，对比旁侧未侵蚀区域，利用高精



图 4 碎裂岩体斜坡坡面侵蚀及侧向侵蚀劣化现象(龚家方 4#斜坡, 2015 年 3 月)

Fig.4 Slope erosion and lateral erosion deterioration of cataclastic rock mass(Gongjiafang #4 slope, March, 2015)

表 1 测量的岩体侵蚀深度

Table 1 Erosion depths of the rock mass based on field measurement

序号	测量地点	测量的岩性	侵蚀深度/m	平均侵蚀速率/(m · a ⁻¹)
1	茅草坡	碎裂结构灰岩	3.5	0.29
2	龚家方 4#	碎裂结构灰岩	2.2	0.18
3	龚家方上游	碎裂结构灰岩	2.4	0.20

度激光测距仪获得了 2003~2015 年以来的各岩体最大侵蚀深度(厚度)。

在自然状态的降雨或风化作用下，灰岩这种硬质岩石的机械侵蚀量非常小，可忽略不计。但在三峡库区碎屑岩体岸坡中，机械侵蚀作用造成碎裂岩体浅表层被淘蚀深度超过 2 m。假定连续同等强度侵蚀，侵蚀的平均速度为 0.2~0.3 m/a。这一作用形

成了大量的凹槽和空洞，破坏了浅表层原有的岩体结构，是明显的宏观岩体劣化现象。

3 岩石强度劣化特征

在巫峡岩溶岸坡中，三叠系大冶组和嘉陵江组是岩体劣化宏观现象最为发育的层位。由于含泥质条带，三叠系大冶组岸坡岩体劣化现象强烈，这一点较易理解。因此，在巫峡青石6#斜坡附近采集三叠系嘉陵江组中厚层灰岩制作岩芯试样，以研究岩溶岩石强度劣化特征。

按照相关试验规程要求^[27]，将室温冷却的岩石试样放入吸水箱中自由吸水 48 h 后，放入真空泵中进行真空饱和抽气时间 4 h，大气压下水中静置 4 h。然后，将试样取出擦干，将试样放在 105 °C ~ 107 °C 的恒温烘箱中烘 24 h 后室温冷却。将岩石样品进行上述多周期浸泡 - 风干循环试验，对不同循环次数的试样进行力学性质试验。单轴抗压强度试验和单轴压缩变形试验均在 RMT - 150 岩石刚性伺服试验系统上按照相关规程进行。每组一般取 5 块试样，取平均值为该组的测试值。利用风化程度类似的 330 块三叠系嘉陵江组灰岩样品进行了 0~50 次浸泡 - 风干循环下的各种力学强度试验(见表 2)。经过 50 次循环后，岩样干燥单轴抗压强度总体下降约 28.5%，平均每循环的下降率为 0.6%。同时，饱和抗压强度下降率略低于干燥抗压强度。在 50 次循环中，变形模量下降约 33.3%，泊松比上升 34.3%。尽管平均每循环变化率较小，最大也仅 0.7%，但近 50 个循环累计下降率大，造成了岩体的强烈劣化。

表 2 2 组三叠系嘉陵江组灰岩样品力学测试结果表
Table 2 Two groups of mechanics test results of limestone samples from Triassic Jialingjiang Formation

循环周期	干燥抗压强度/MPa		饱和抗压强度/MPa		弹性模量 E/(10 ⁴ MPa)		泊松比 μ	
0	76.0	81.5	76.1	71.0	6.18	6.83	0.16	0.19
5	78.8	77.4	72.9	70.7	6.43	6.65	0.20	0.18
10	79.0	75.5	72.8	69.0	6.17	6.63	0.17	0.20
15	73.2	74.7	67.9	68.8	5.87	6.23	0.18	0.19
20	74.4	69.9	68.3	63.9	5.76	5.94	0.17	0.20
25	75.4	69.7	69.4	63.9	5.42	5.54	0.21	0.22
30	71.7	65.1	66.3	59.9	5.17	5.49	0.20	0.23
35	70.4	64.7	59.1	64.1	5.00	5.31	0.22	0.23
40	66.1	62.8	60.0	55.9	4.65	5.13	0.22	0.20
45	62.0	58.2	55.0	50.9	4.46	4.80	0.20	0.23
50	58.2	54.4	50.7	46.6	3.98	4.70	0.22	0.25
总下降率	28.5%		33.9%		33.3%		-34.3%	
平均每周期下降率	0.6%		0.7%		0.7%		-0.7%	

利用碳酸岩进行浸泡 - 风干循环下岩石力学性质劣化的研究并不多，可用于参考对比的非常少。利用预应力约束过的泥质白云岩岩样，朱珩^[28]测试了浸泡 - 风干循环后的岩样力学性质，每循环的抗压强度平均下降率约为 2.6%。抗压强度、变形参数随循环次数 N 的衰减规律以二元一次方程拟合较为合理。王伟等^[29]以锦屏水库岸坡的大理岩为研究对象，开展了浸泡 - 风干循环后岩石力学试验。单轴抗压和抗剪强度参数每循环的下降率为 0.3%~0.7%，其弹性模量随浸泡 - 风干循环次数 N 的衰减以指数函数拟合较为合理。本文所得抗压强度平均每循环的下降率与王伟等^[29]所得较类似，但与朱珩^[28]相差较大，其原因可能与其试验早期的预应力约束有关。

在三峡库区，浸泡 - 风干循环下砂岩的力学性质研究成果非常多^[4-8, 30-31]。已有的砂岩岩样测试成果中，有的认为拟合函数形式为指数或对数形式^[30-31]，有的则回归为线性方程^[32]。从函数形式来看，线性函数意味着力学性质随着循环次数 N 的增加而以一定速率下降或增加，那么，当 N 为某一值时，一些力学强度值会低至 0。对数或指数函数则意味着，随着循环次数 N 的增加，力学性质下降或增加的速率会趋缓。从自然演化来看，即便长期的劣化使得微风化灰岩岩体转化为全强风化的岩体，它也具有一定的力学强度。因此，指数或对数函数的岩石强度劣化控制函数更具合理性。

将表 2 力学性质参数 E, μ, σ_{cs} 和 σ_{cd} 与循环次数 N 进行了回归分析，得到了如下函数关系式：

$$\sigma_{cd} = 1.035\sigma_{cd0}e^{-0.006N} \quad (1)$$

$$\sigma_{cs} = 1.039\sigma_{cs0}e^{-0.008N} \quad (2)$$

$$E = 1.045E_0e^{-0.008N} \quad (3)$$

$$\mu = 1.011\mu_0e^{0.0053N} \quad (4)$$

式中：E₀, μ₀, σ_{cs0} 和 σ_{cd0} 分别为本次灰岩岩样初始状态时的弹性模量、泊松比、饱和抗压强度和干燥抗压强度；E, μ, σ_{cs} 和 σ_{cd} 分别为 N 次浸泡 - 风干循环下的弹性模量、泊松比、饱和抗压强度和干燥抗压强度。这些函数关系式均为指数形式，其预测值与试验值的相关性高，相关性系数在 0.84~0.89。

4 基于无损探测的表层岩体质量劣化特征

尽管岩样强度的劣化可以说明多周期性水位变动确实会造成岩石强度的下降，但还不足以表征原

位具有节理、裂隙的表层岩体质量的变化情况。在节理、裂隙清晰的灰岩岸坡箭穿洞和青石区域进行了表层岩体质量探测(见图 1)。采用了野外易操作、无损探测的超声波仪和回弹仪，探测时间分别为 2017 年 8 月和 2018 年 6 月。超声波波速和回弹值都与岩体质量正相关，波速越大、回弹值越高，说明岩体完整性越好、强度越大。

在岩壁上，跨越小型裂缝或结构面，利用近似平测的方法来实现发射端和接收端间岩体的超声波测速。由于岩壁起伏，不平直；因此不能算完全意义上的超声波平测或对测。根据相关原位测试规范要求，超声测速 3 次，取其平均值为 2 点间岩体的波速值；回弹法一般在测区内测 16 个点，去掉 3 个最大值和 3 个最小值，取剩下 10 个回弹值的平均值为测区的回弹值。

箭穿洞岩体测试在三叠系大冶组泥质条带灰岩(高程 158 m)中进行。测试区长约 10 m，探测 23 个测区(发射端和接收端之间为测区)。测区多跨越微小裂缝、紧闭裂缝或紧邻大裂缝。从声波测试数据与对应测试的岩体来看，破碎岩体波速数据明显低于较为完整岩体的波速数据(见图 5)。破碎岩体中测试数据有起伏的原因是有些测点在大型裂缝边而不是跨越了微小裂隙。2018 年 6 月与 2017 年 8 月在箭穿洞水位变动带岩体测得的两期波速数据对比显示，2018 年测得的声波数据较上年同期数据有明显的下降趋势，下降率约 10.72%。而在破碎岩体区域上所测数据比上年同期数据下降约为 11.23%(见图 5)。回弹数据显示，破碎岩体部分回弹值下降了 7.17%，较完整岩体的回弹值下降 4.79%(见图 6)。

青石斜坡发育的地层岩性为三叠系嘉陵江组中厚层灰岩，结构面间距大而稀少，深度也较浅，岩体较完整(见图 7)。测区高程为 148~153 m，以“田”字型进行布置，每 30 cm 一个测区，横向上 9 个测区，纵向上 16 个测区，共 144 测区(见图 7)。这一布

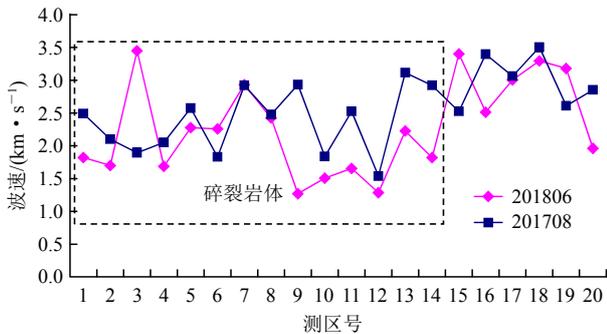


图 5 裂隙岩体波速值下降图(箭穿洞)

Fig.5 Declination diagram of wave velocity in fractural rock mass(Jianchuandong)

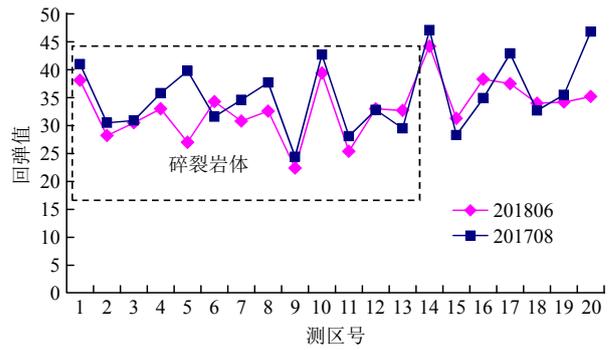


图 6 裂隙岩体回弹值下降图(箭穿洞)

Fig.6 Declination diagram of rebound value in fractural rock mass(Jianchuandong)



图 7 青石库岸岩体测区图

Fig.7 Rock mass surveying area in Qingshi

置有利于测试近 12.96 m² 区域岩体质量问题。2018 年 6 月与 2017 年 8 月在青石库岸测得的两期回弹数据如图 8 所示。两期数据吻合性较好，第二期的回弹数据较第一期回弹数据有小的下降，整体的下降率约为 1.65%。这一数据非常小于箭穿洞破碎岩体的测试数据，这说明较完整岩体的劣化要远小于破碎岩体的。2018 年 6 月~2017 年 8 月间，测区经过 2 次完全的浸泡与风干。按平均每循环来计算，该区域的平均每循环下降率约为 0.83%，比上述实验室中得到的灰岩抗压强度的平均每循环下降率 0.7%略大。野外环境中，每循环下降率略大的原因可能在于野外的环境复杂度高、野外测试中包含微小裂缝和野外每循环的时间远大于室内每循环时间。

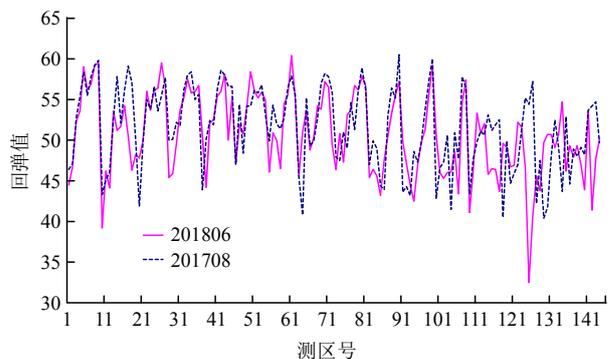


图 8 较完整岩体回弹值下降图(青石)

Fig.8 Declination of rebound values in intact rock mass(Qingshi)

5 基于声波波速的浅层岩体质量劣化特征

针对浅层岩体劣化对岩质岸坡的长期稳定性问题，一些研究者假定均一的强度下降率或函数下降等来考虑深度方向上岩体劣化^[33]。为了揭示周期性水位变动下真实的地下岩体质量变化情况，本文开展了多期钻孔声波对穿试验测试。尽管声波波速只是一个综合指标，对孔间岩体结构面的充填程度、张开度不能定量刻画；但它反映了测速区岩体的完整程度。因此，假如同一位置多次测量的声波波速呈下降趋势，则说明测速区该位置内岩体完整程度在下降，亦即岩体质量出现了劣化。

钻孔布置在巫山县青石 6#斜坡(见图 1)。该斜坡出露三叠系下统嘉陵江组地层，岩性主要为浅灰色薄层夹中厚层泥质灰岩、泥粒灰岩及中薄层白云岩夹泥质灰岩。该斜坡为顺向斜坡，坡度在 34°左右。斜坡上布设了 6 对共 12 个钻孔，高程分布在 150, 165, 181 m 附近，呈 2 条纵剖面布置。上游侧纵剖面上钻孔对高程从低到高编号依次为 ZK01A/B, ZK02A/B, ZK03A/B, 下游侧纵剖面上钻孔对高程从低到高编号依次为 ZK04A/B, ZK05A/B, ZK06A/B。每对钻孔相隔距离 2 m，垂直进尺分别为 20, 33 和 43 m，总进尺为 384 m。钻孔孔内下套管或花管保护孔壁。护孔后，利用非金属超声波仪在 6 对孔中进行了多期跨孔声波测试。

由于水位波动，每对钻孔跨孔声波测试时间不一致，测试的期次也有差异。高程 165 m 的 2 对钻孔测试 4 次。ZK05A/B 间岩体较破碎，深度 30 m 以下仍有大型结构面发育。图 9 中 7 个被箭头标注的区域是跨孔岩体中 7 个典型结构面的累积下降值，表 3 显示了 ZK05A/B 的主要结构面声波波速历次下降情况，其总下降率从 66.2%至 14.1%不等(见表 3)。根据多期测试的结果来看(见图 9)，结构面附近岩体劣化强烈；而岩体较完整段则波速下降并不明显，为 1.5%~3.6%。

根据声波波速，不同区段或部位下降情况完全不同。在深度方向上岩体结构面是岩体质量下降的“主力军”，而岩体结构面也是水能够深入坡体内部的重要原因。因此，从整体来看，由于尺度问题，孔间岩体声波波速下降规律与浸泡 - 风干循环得到的岩石强度下降规律基本不具有可比性。后者关注了岩石整体强度，孔间岩体声波波速测量则反映了

表 3 典型结构面钻孔声波对穿数据统计

Table 3 Statistical data of typical structure planes in borehole multi-period acoustic penetration tests

时间	声波波速/(km·s ⁻¹)							
	深度 6.2 m	深度 8.4 m	深度 12.6 m	深度 14.2 m	深度 17.6 m	深度 23.2 m	深度 27 m	深度 30.8 m
20170916	6.527	5.826	6.617	6.602	6.329	5.665	6.37	6.209
20180309	5.556	5.848	6.198	6.608	6.667	4.934	5.837	5.952
20180507	4.054	4.348	5.435	6.048	5.357	5.051	5.792	4.747
20180926	2.206	3.488	5.682	5.660	5.357	4.451	5.245	4.870
年总下降率	66.2%	40.1%	14.1%	14.3%	15.4%	21.4%	17.7%	21.6%

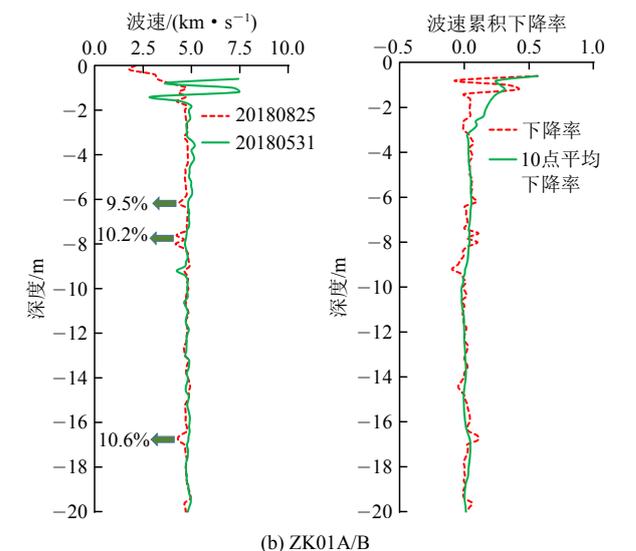
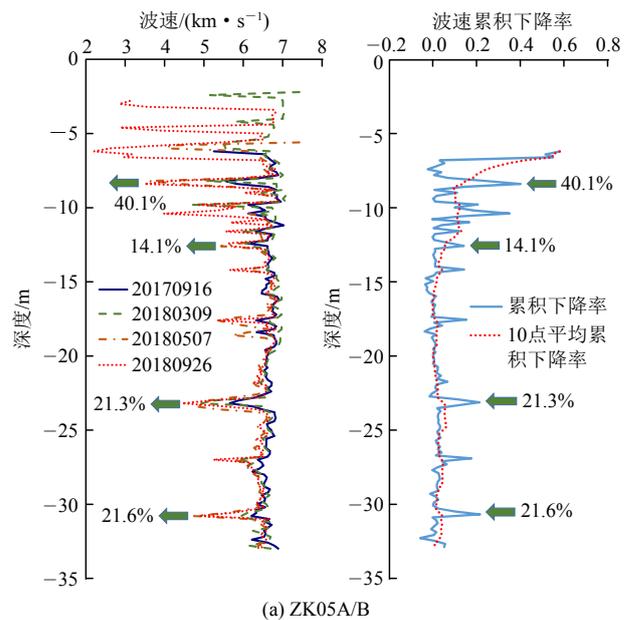


图 9 斜坡岩体波速和累积下降率曲线图

Fig.9 Diagram of acoustic wave velocity and decline rate

更多岩体内部细节的质量变化。分解来看，岩体较完整段每循环波速下降率为 0.75%~1.8%，比岩石强度下降率稍高，这是因为岩体较完整段也包含着裂隙。

上述岩体波速下降率描述是一种“连续 + 非连续”的描述，是岩体这种连续 + 非连续介质的客观实际反映。在水位周期性变化下，当为较完整岩体时，声波波速略下降，采用平均下降率描述；当非连续的结构面出现，则深部会出现尖锐的声波下降区，采用单个结构面的波速下降率进行精准描述。不同岸坡或岸坡不同区域深部结构面的出现具有随机性，则深部岩体质量下降区具有随机性。显然，这种“连续 + 非连续”造成岸坡深部岩体质量劣化千变万化，不利于统一描述和概化深部岩体质量劣化情况。因此，本文尝试采用“全连续模型”来刻画深部岩体质量下降情况。由于结构面的发育程度与深度近似负相关，因此，可以将非连续的高下降率平均到较完整区域中，形成类似的“等效连续劣化岩体介质”。钻孔声波对穿测试时测点间距为 0.3 m，采用 3 m(10 个测点)窗口进行连续平均。连续平均后可见，声波下降曲线类似阶段函数。8 m 以浅的岩体声波下降率平均大于 30%，且越接近表层，下降率越大。深度 8~15 m 岩体声波总下降率平均约 11.5%；深度 15 m 以上岩体声波种下降率平均 1%~5%(见图 9(a))。

岩体声波下降率分布类似阶梯函数形式也表现在其他钻孔声波测试中，如 ZK01A/B。与 ZK05A/B 不同，ZK01A/B 间深部大型结构面不甚发育。由于水位问题，ZK01A/B 仅仅测到 2 期数据。2018 年 2 次测量后，深度方向上没有声波下降非常明显的区域。在 10 m 以下深度劣化率平均约 1%，波速曲线吻合性也较好；除了深度 16.8 m 附近，波速下降约 4%。在深度 3~10 m 岩体声波有近乎相近的下降，下降率平均约为 4%。3 m 以浅岩体声波下降急剧增加，下降率平均大于 20%。

从 6 对孔间岩体声波随水位变化的下降率来看，孔间岩体质量随水位周期变动而下降。不论岩体裂隙发育程度，深部岩体质量下降情况大致可以采用三段式的阶段性函数描述，阶段性内具有较相近或相同的声波下降率。如果深部岩体大型结构面不甚发育，深部的岩体劣化率非常低。这也说明深部岩体的劣化与结构面发育息息相关。岩体质量下降率阶段性函数的深度位置应与裂隙/结构面的密集度、分带及岩体风化界线有关。

6 岩体劣化力学模型与讨论

上述一系列研究从不同方面说明了库水周期性

变动造成了三叠系岩溶岸坡岩体劣化。由于水库环境下碳酸盐岩劣化机制类似，寒武系、奥陶系等其他层位岩溶岸坡也会发生与三叠系岩溶岸坡类似的岩体质量劣化现象。事实上也是如此，三峡库区九畹溪支流的棺木岭危岩体(寒武系三游洞组白云质灰岩岸坡)劣化现象与巫峡箭穿洞危岩体的劣化现象非常类似^[16, 22]。因此，上述岩体劣化规律应在水库区岩溶岸坡中具有一定的普遍性。

同时，浅表层岩体劣化因岩性、岸坡结构、岩体结构等差异而存在较大差异。从岩石强度、表层岩体波速和浅层岩体波速的数据对比来看，岩样强度的每循环平均下降率与表层、浅层较完整岩体声波平均下降率相近，含结构面岩体声波年下降率是岩样声波每循环平均下降率的 10~60 倍以上。显然，在岩溶岩体质量劣化方面，岩体中的结构面是关键，它有着很高的劣化率。浅层岩溶岩体质量下降的原因应该与地表岩体劣化现象类似，来源于地下岩体内部裂隙扩展/增多、岩体内部孔洞变多和裂缝或孔洞填充物减少等。总结来看，水位周期性变动下，岩溶岸坡浅层岩体会发生劣化；岩石的低劣化率夹杂结构面的高劣化率，岩体劣化具有不均一性；不同的风化界线或岩体裂隙分带内是阶梯形式、相近的劣化率，岩体劣化具有分带性；岩体劣化与原始岩体结构紧密相关。这些是岩溶岸坡浅层岩体具有的劣化特征。

根据这一劣化特征可以探索构建岩体劣化力学模型。从力学层面来看，可将浅表层岩体力学性状劣化过程认为是岩体弹性模型 E 、泊松比 μ 、抗压强度 σ_c 、抗拉强度 σ_t 、黏聚力 c 和摩擦角 φ 等发生改变的过程。因此，岩体劣化力学模型应能够准确地反映岩体力学参数随水位周期性变动而改变这个基本特征。浸泡 - 风干次数 N 能很好刻画岩体劣化进程。

为反映岩体劣化力学参数的动态变化过程，可假定 E 、 μ 和 σ_c 都是 N 的函数，即

$$E(N) = E_0 f_E(N) \quad (5)$$

$$\mu(N) = \mu_0 f_\mu(N) \quad (6)$$

$$\sigma_c(N) = \sigma_{c0} f_{\sigma_c}(N) \quad (7)$$

式中： E_0 、 μ_0 、 σ_{c0} 、 σ_{t0} 、 c_0 和 φ_0 分别为岩体初始状态时的弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角； $E(N)$ 、 $\mu(N)$ 、 $\sigma_c(N)$ 、 $\sigma_t(N)$ 、 $C(N)$ 和 $\varphi(N)$ 分别为一定水位周期下岩体的弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角； $f_E(N)$ 、 $f_\mu(N)$ 、 $f_{\sigma_c}(N)$ 、 $f_{\sigma_t}(N)$ 、 $f_c(N)$

和 $f_\phi(N)$ 分别为弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角的变化函数。值得注意的是,岩体强度显然与岩石强度不同,且孔间岩体声波波速不等同于岩体强度,需要进行转化。根据标准^[34],岩体基本质量指标 BQ 有着定量的表达式:

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (8)$$

式中: R_c 为岩石单轴抗压强度; K_v 为岩石完整性系数,为岩体与岩石的纵波速度比。利用声波波速可以计算得到 K_v ,从而得到 BQ 值。根据 BQ 与岩体地质力学分类 RMR 和地质强度指标 GSI 的函数关系,可获得满足 Heok-Brown 准则的岩体力学参数^[35-36]。从而可以获得岩体强度的下降函数。

当岩溶岸坡岩体裂隙较为发育,可利用等效连续介质时(见图 10 左图),深度方向上的岩体劣化率以风化界线或岩体分带为界进行变化(见图 10 右图),可参考图 9 的波速平均下降率图;力学性质动态函数参考式(5)~(7)。龚家方—独龙消落带的碎裂岩体和箭穿洞基座溶蚀—碎裂岩体的岩体劣化力学模型均可采用连续等效模式进行构建。当岩溶岸坡岩体由大型而少量的结构面控制时(见图 11 左图),相对结构面的劣化而言,岩石的劣化可忽略不计,仅需对结构面进行力学性质函数动态变化(见图 11 右图)。青石顺向岸坡区消落带岩体的岩体劣化力学模型可采用结构面模式。现实情况中很多消落带岩溶岸坡可能需要同时应用 2 种模式。

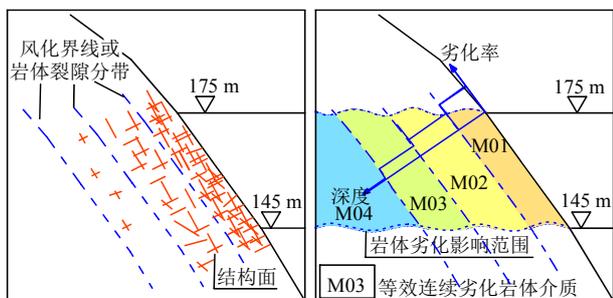


图 10 岩体劣化力学模型的等效连续模式示意图

Fig.10 Sketch map of REV mode for mechanical models of rock mass deterioration

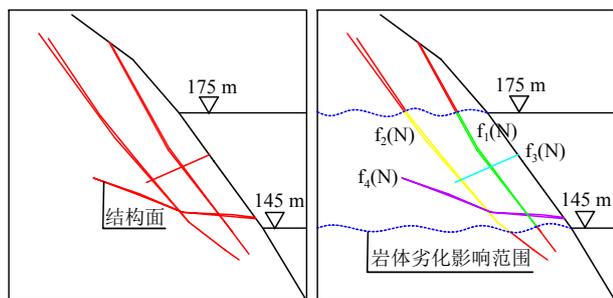


图 11 岩体劣化力学模型的结构面模式示意图

Fig.11 Sketch map of structural plane mode for mechanical models of rock mass deterioration

本文中岩样测试经历了 50 次室内浸泡 - 风干循环,但许多现场原位测试仅有 2 次数据,这些数据可用来说明岩体劣化的空间分布特征,但用它们来说明岩体劣化的发展趋势显然还是不够的。尚需要开展多时段多层位不同岩溶岸坡浅表层的长期岩体劣化监测,为岩体劣化力学本构模型的推导提供原位观测数据。同时,岩溶岸坡地下岩体劣化情况显然与库水 - 地下水的波动有关,地下岩体劣化趋势的研究也需要结合水文地质方面的调查以明确影响范围。

7 结论与建议

本文首次系统从岩体宏观劣化现象、岩石强度劣化和浅表层岩体质量劣化等多个方面进行了三峡库区浅层岩体劣化研究,得到了以下结论与建议:

(1) 在水位变动带中,不同岩体结构和岸坡结构的岩体劣化表现有非常大的差异性,岩体宏观劣化现象包括溶蚀/溶解、裂缝显化与扩展和机械淘蚀等现象。岩体宏观劣化现象加剧了潜在地质灾害体的演化进程。

(2) 大量室内岩样浸泡 - 风干循环后的物理力学性质测试显示,灰岩抗压强度、变形参数等参数的平均每循环下降率约为 0.7%。随着循环次数的增加,岩样强度下降可采用指数函数形式拟合,相关性系数为 0.84~0.89。表层岩体的声波和回弹原位测试表明,箭穿洞破碎灰岩岩体声波年下降率为 11.23%,青石较完整灰岩岩体回弹值平均每循环下降率约为 0.83%。

(3) 青石岩溶岸坡岩体多期钻孔声波对穿试验测试显著表明,地下岩体的劣化以结构面的劣化为主,其声波年下降率为 10%~60%。如果深部岩体结构面不甚发育,地下岩体的劣化率将非常低。6 对钻孔的多点平均下降率来看,浅层岩体质量下降情况可以采用阶段性函数描述。

(4) 岩溶岸坡浅表层岩体具有的劣化特征为:岩石的低劣化率夹杂结构面的高劣化率,岩体劣化具有不均一性;不同的风化界线内或岩体分带内则会形成阶段性的相近的劣化率分带,岩体劣化具有分带性。根据这一特征,建立了等效连续模式和结构面模式的岩体劣化力学模型。

(5) 建议加强浅表层岩体原位测试与监测工作,进一步研究地下岩体劣化规律,进一步分析多期次水压力作用、溶蚀/潜蚀作用等等岩溶岩体质量劣化

机制, 支撑三峡库区地质灾害隐患点防灾减灾工作。

参考文献(References):

- [1] DEREK F, PAUL W. Karst hydrogeology and geomorphology[M]. Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd., 2007: 135.
- [2] 张倬元, 王兰生, 王士天. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 483.(ZHANG Zhuoyuan, WANG Lansheng, WANG Shitian. Principles of engineering geology analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 483.(in Chinese))
- [3] HUANG B L, YIN Y P, LIU G N, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, Three Gorges reservoir, on November 23, 2008[J]. Landslides, 2012, 9(3): 395 - 405.
- [4] 胡玉, 邓华锋, 李建林, 等. 水-岩作用下砂岩微观结构变化特性及机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 265 - 273. (HU Yu, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Study on the characteristics and mechanism of sandstone microscopic structure under water-rock interaction[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 265 - 273.(in Chinese))
- [5] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3 481 - 3 491. (DENG Huafeng, ZHOU Meiling, LI Jianlin, et al. Study on deterioration of mechanical properties of red bed soft rock under water-rock action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 3 481 - 3 491.(in Chinese))
- [6] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 浸泡作用下砂岩断裂力学特性及劣化机理[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2014, 39(1): 108 - 114. (DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Mechanical characteristics and degradation mechanism of sandstone fracture under immersion[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(1): 108 - 114.(in Chinese))
- [7] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 527 - 532.(LIU Xinrong, YUAN Wen, FU Wei, et al. Porosion evolution law of sandstone dissolution under dry-wet cycle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 527 - 532.(in Chinese))
- [8] 刘新荣, 李栋梁, 王震, 等. 酸性干湿循环对泥质砂岩强度特性劣化影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1 543 - 1 554. (LIU Xinrong, LI Dongliang, WANG Zhen, et al. Study on the influence of acid dry-wet cycle on the strength degradation of argillaceous sandstone[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1 543 - 1 554.(in Chinese))
- [9] APOLLARO C, MARINI L, CRITELLI T, et al. The standard thermodynamic properties of vermiculites and prediction of their occurrence during water-rock interaction[J]. Applied Geochemistry, 2013, 35: 264 - 278.
- [10] TALLINI M, PARISSÉ B, PETITTA M, et al. Long-term spatio-temporal hydro chemical and Rn - 222 tracing to investigate groundwater flow and water-rock interaction in the Gran Sasso (central Italy) carbonate aquifer[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(7): 1 447 - 1 467.
- [11] ALT-EPPING P, DIAMOND L W, HARING M O, et al. Prediction of water-rock interaction and porosity evolution in a granitoid-hosted enhanced geothermal system, using constraints from the 5 km Basel - 1 well[J]. Applied Geochemistry, 2013, 38: 121 - 133.
- [12] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 355 - 370.
- [13] CORVO F, REYES J, VALDES C, et al. Influence of air pollution and humidity on limestone materials degradation in historical buildings located in cities under tropical coastal climates[J]. Water Air and Soil Pollution, 2010, 205(1/4): 359 - 375.
- [14] DOCHEZ S, LAOUAFA F, FRANCK C, et al. Multi-scale analysis of water alteration on the rockslope stability framework[J]. Acta Geophysica, 2014, 62(5): 1 025 - 1 048.
- [15] ION R M, FIERASCU R C, FIERASCU I, et al. Influence of Fantanița Lake(Chalk Lake) water on the degradation of Basarabi-Murfatlar churches[C]// Engineering Geology for Society and Territory. [S. l.]: [s. n.], 2014: 543.
- [16] HUANG B L, ZHANG Z H, YIN Y P, et al. A case study of pillar-shaped rock mass failure in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2016, 49(3): 195 - 202.
- [17] COLLINS B D, STOCK G M. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures[J]. Nature Geoscience, 2016, 9: 395 - 400.
- [18] 何叶. 周期性饱水对岩石力学性能的影响研究及工程应用[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.(HE Ye. Research on the influence of periodic saturated water on rock mechanical properties and engineering application[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.(in Chinese))
- [19] 夏冬. 浸水岩石损伤演化过程试验研究及在大水矿山中的应用[博士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2014.(XIA Dong. Experimental study on the evolution process of water-immersed rock damage and its application in large water mines[Ph. D. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.(in Chinese))
- [20] 黄波林, 殷跃平. 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 621 - 629.(HUANG Bolin, YIN Yueping. Study on risk assessment technology of landslide surge in reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 621 - 629.(in Chinese))

- [21] 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 Geological Disaster Prevention and Control Engineering Exploration and Design Institute, 2017.(in Chinese))
- [22] 黄波林, 谭建民. 三峡库区秭归县棺木岭崩塌隐患点应急地质调查及潜在涌浪风险评价报告[R]. 武汉: 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2017.(HUANG Bolin, TAN Jianmin. Emergency geological survey and surge risk assessment report on the potential collapse of Guanmuling in Zigui county, Three Gorges Reservoir Area[R]. Wuhan: Wuhan Center of China Geological Survey, 2017.(in Chinese))
- [23] 曾庆森. 水化学环境对砂岩断裂韧度影响的试验研究[硕士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2015.(ZENG Qingsen. Experimental study on water chemical environment effect on the fracture toughness of sandstone[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.(in Chinese))
- [24] GISCHIG V. Natural hazards: cracking cliffs feel the heat[J]. Nature Geoscience, 2016, 9: 344 - 345.
- [25] 杨红伟. 循环荷载作用下岩石与孔隙水耦合作用机理研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2011.(YANG Hongwei. Study on coupling mechanism of rock and pore water under cyclic loading[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.(in Chinese))
- [26] 许强, 刘天翔, 汤明高, 等. 三峡库区塌岸预测新方法——岸坡结构法[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 110 - 115.(XU Qiang, LIU Tianxiang, TANG Minggao, et al. A new method for bank collapse prediction in the Three Gorges Reservoir area—bank slope structure method[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(3): 110 - 115.(in Chinese))
- [27] 中华人民共和国国家标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [28] 朱珩. 干湿循环作用下约束泥质白云岩力学特性试验研究[硕士学位论文][D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.(ZHU Wei. Experimental study on mechanical properties of constrained argillaceous dolomite under the action of dry-wet cycle[M. S. Thesis][D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.(in Chinese))
- [29] 王伟, 龚传根, 朱鹏辉, 等. 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2017, (10): 1 175 - 1 185.(WANG Wei, GONG Chuen, ZHU Penghui, et al. Experimental study on mechanical properties of marble wet and dry cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, (10): 1 175 - 1 185.(in Chinese))
- [30] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 化学溶液和干湿循环作用下砂岩抗剪强度劣化试验及化学热力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2 534 - 2 541.(LIU Xinrong, YUAN Wen, FU Yan, et al. Study on shear strength degradation and chemical thermodynamics of sandstone under chemical solution and dry-wet cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2 534 - 2 541.(in Chinese))
- [31] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 饱水-风干循环作用下砂岩强度劣化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 31(11): 3 306 - 3 313.(DENG Huafeng, LI Jianlin, ZHU Min, et al. Experiment research on strength deterioration rules of sandstone under "saturation-air dry" circulation function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 31(11): 3 306 - 3 313.(in Chinese))
- [32] 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, (2): 367 - 376.(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, (2): 367 - 376.(in Chinese))
- [33] 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): 1 851 - 1 858.(ZHANG Jingwei, WAN Liangpeng, PAN Hongyue, et al. Analysis of long-term stability of typical bank slopes considering the characteristics of water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1 851 - 1 858.(in Chinese))
- [34] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.(The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB/T50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.(in Chinese))
- [35] 宋彦辉, 巨广宏. 基于原位试验和规范的岩体抗剪强度与Hoek-Brown准则估值比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1 000 - 1 006.(SONG Yanhui, JU Guanghong. Determination of rock mass shear strength base on in-situ tests and codes and comparison with estimation by Hoek-Brown criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1 000 - 1 006.(in Chinese))
- [36] 朱合华, 张琦, 章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1 945 - 1 963.(ZHU Hehua, ZHANG Qi, ZHANG Lianyang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1 945 - 1 963.(in Chinese))