

引用格式: 张国栋, 夏文中, 何钰铭, 危灿. 三峡库区碳酸岩岸坡消落带岩体劣化特性[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 70-80.

ZHANG Guodong, XIA Wenzhong, HE Yuming, WEI Can. Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of carbonate riverside in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 70-80.

三峡库区碳酸岩岸坡消落带岩体劣化特性

张国栋¹, 夏文中¹, 何钰铭², 危灿¹

(1. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;

2. 湖北省水文地质工程地质勘察院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 岸坡消落带是库水位升降形成的干湿交替作用区域。与岸坡其他地段相比, 岸坡消落带水岩作用强烈, 不断改造库岸的形貌特征, 影响岸坡的整体或局部稳定性。消落带岩体劣化研究在劣化特征、劣化分类, 以及劣化评价方法、指标研究方面存在不足。本文以三峡库区秭归和巴东干(支)流碳酸岩岸坡消落带岩体为研究对象, 采取调(勘)查与试验、“比拟法”等综合分析方法, 对碳酸岩消落区岩体劣化特征、过程及机制进行了系统研究, 得到以下结论。(1) 基于岸坡消落区岩体劣化的宏观效应, 可划分为4种劣化类型; 库水和地下水联动作用影响消落区岩体劣化的范围, 沿深度方向呈现逐渐减弱的趋势, 根据岩体劣化程度, 可划分为3个区。(2) 岩体各类结构面劣化最为严重, 尤其是裂隙结构面, 控制着岩体劣化的主要特征和类型。(3) 库水作用方式和水的溶蚀性强弱影响岩体劣化的进展和演化发展模式。(4) 根据库水与岸坡地下水联动程度, 结合工程应用, 提出了碳酸岩岸坡消落带岩体劣化的评价指标和评价方法。研究成果对消落带岩体劣化评价及岸坡稳定性演化评价具有一定的参考意义。

关键词: 消落带; 碳酸岩岸坡; 水岩作用; 岩体劣化; 三峡库区

中图分类号: P694

文献标志码: A

岸坡由自然风化区、消落带和水下区三部分组成。消落带是受水岩干湿循环作用影响的坡带, 其赋存环境与库岸其他部位具有显著的差异性。消落带岩体劣化削弱岩体强度, 破坏岩体的完整性, 导致局部塌陷或岸坡整体失稳, 威胁库区航运、库岸基础设施等安全。

三峡库区消落带岩体存在普遍的劣化现象, 劣化现象与程度因赋存环境不同在时空上具有差异性^[1]。三峡库区库岸主要由碎屑岩和碳酸岩建造, 局部库岸段由结晶岩建造。碳酸岩建造的岸坡大都为高陡库岸, 岩性主要是灰岩、泥灰岩、白云岩, 呈厚层状、中-厚层状、薄层状, 局部夹泥质条带或页岩层等, 受河谷下切、岩体卸荷、区域构造作用、自然风化

和库水作用等, 岸坡岩体裂隙较为发育, 水岩作用较为强烈。

三峡库区消落带岩体劣化现象引起了重视。研究表明^[2-4], 三峡库区泥灰岩在溶蚀和风化作用下, 岩石矿物成分变化, 岩体结构改变, 岩石的力学强度呈降低趋势, 岩性发生改变, 有的已演化为较软岩; 水的溶蚀性不仅影响灰岩矿物成分的改变, 同时也影响岩体结构特性的改变。三峡库区巫山段常见泥灰岩^[5], 在酸性加强、干湿循环次数增多的条件下, 泥灰岩破碎程度越大, 破坏时的完整性降低越显著。在酸性环境条件下, 碳酸岩的溶解导致岩石的孔隙度增加、重量减轻、渗透性增强^[6]。在干湿循环条件下, 裂隙试样在不同溶液中浸泡并经历干湿循环

收稿日期(Received date): 2023-02-04; 改回日期(Accepted date): 2023-12-23

基金项目(Foundation item): 国家科技部湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测专项(Z2022106)。[Special Research Funds for National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Ministry of Science and Technology of China](Z2022106)]

作者简介(Biography): 张国栋(1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 地质灾害机理与监测预警。[ZHANG Guodong (1968-), male, Ph. D., professor, research on the geological disaster mechanism and monitoring and early warning] E-mail: zg@ctgu.edu.cn

作用后呈现出不同的破坏模式,其破坏特征与裂隙倾角有关^[7]。

关于岩质消落带岸坡的野外调查研究^[8-10]总结了库岸消落带岩体致灾工程地质特性、岩体劣化和变形特性及现象。有学者^[1,11]以三峡库区典型的碎屑岩和碳酸岩库岸段为研究对象,总结了岩体劣化特性和劣化模式,分析了劣化过程的影响因素,提出了劣化评价方法与指标体系。针对碳酸岩岸坡岩体的劣化问题也开展了大量研究工作^[12-15]。其中,殷跃平^[16-17]等针对溶蚀岩体,提出了劣化指标;考虑岩体劣化的时效性,提出了基于地质强度指标的岩体劣化评价方法。

消落带岩体劣化是一个复杂的水岩作用过程,是多过程多场综合作用的结果,同时受岩体结构控制,目前的研究仍然存在不足之处。例如,对劣化宏观特征掌握不全面,劣化分类未能充分体现库水水动力作用特性;劣化评价体系不够完善。本研究以三峡库区秭归和巴东干(支)流碳酸岩库岸段为研究对象,采用野外调(勘)查、原位取样,室内试验与理论分析等研究手段,比对消落带与非消落区岩体劣化特性,定性描述消落带岩体劣化特征,分析消落带岩体劣化过程和影响因素,研究成果对完善消落带岩体劣化试验及测试技术体系、劣化评价及岸坡稳定性演化评价等具有一定的参考意义。

1 研究区概况

碳酸岩在三峡库区广泛分布,如图1所示^[18]。研究区域是三峡库区秭归和巴东干(支)流岸坡,以碳酸岩岸坡消落带为调(勘)查对象,该区域出露的



图1 三峡库区碳酸岩主要分布区及调查区域^[18]

Fig. 1 Distribution area of carbonate rock and survey area in the Three Gorges reservoir in China^[18]

主要有三叠系中下统、二叠系上下统和寒武系地层,出露的岩性包括灰岩、白云岩等,岸坡结构由厚层、中厚层、薄层等构成,部分区域出露有页岩层。岸坡结构包括斜(顺)向岸坡、平缓近水平层状横向岸坡、反向岸坡等。消落区位于岸坡高程145~175 m,属于三峡库水位调度范围,长期处于周期性变化状态,该区域岩体处于长期干湿交替水岩作用环境,高程145 m以下处于库水长期浸泡环境,高程175 m以上为自然风化区,如图2所示。



图2 三峡库区岸坡消落带

Fig. 2 Hydro-fluctuation belt of shore slope in the Three Gorges reservoir

2 岸坡消落带岩体劣化特征

碳酸岩岸坡消落带岩体劣化与其赋存地质环境条件密切相关,不同的工程地质岩组和岸坡类型劣化特性具有明显的差异性。分析调查区域劣化现象,总结库水对岸坡岩体劣化的作用方式和途径,分析劣化发生部位及劣化程度,并对碳酸岩岸坡消落带岩体劣化进行分类(表1)。

2.1 岸坡岩体溶蚀劣化

在秭归和巴东干(支)流岸坡调查中发现,不同岸坡结构类型和工程地质岩组中岩体劣化呈现明显的差异性。在厚层状灰岩和泥灰岩岸坡中,主要劣化现象为溶隙、溶孔和溶槽,劣化主要沿层(理)面和裂隙面发展。在近水平层状结构岸坡中,岸坡浅表层裂隙结构面和层理面较为发育,易形成水流通道,溶蚀作用有效接触面积较大,在库水位周期性升降水动力作用下,消落带岸坡岩体沿结构面和层(理)面不断经历溶蚀作用。同时,在岩石孔隙和微裂隙中也发生溶蚀作用,受溶蚀的矿物不断被水流带走,规模较小的形成溶孔和小裂隙,规模大的形成大长裂隙,不同尺度的孔隙裂隙逐渐联通,不断地破

表 1 碳酸岩岸坡消落带岩体劣化分类

Tab. 1 Deterioration classification of rock mass in the hydro-fluctuation belt of carbonate riverside

劣化类型	岸坡类型	工程地质岩组	劣化特征
溶蚀型	近水平岸坡、顺向坡等	厚层状灰岩、泥灰岩、白云质灰岩等	沿节理裂隙面形成溶隙、溶孔、溶槽等；形成规模不等的溶洞
剥蚀型	顺向坡、斜顺向坡等	薄层状灰岩、中厚层状灰岩等	沿层面、层理面、节理裂隙面剥落
侵蚀型	近水平岸坡、横向坡等	中-厚层状泥灰岩、白云岩夹泥质条带或页岩层等	形成凹腔或裂隙带
断层型	斜顺向坡	中-厚层灰岩、泥灰岩不等厚互层	岩体沿断裂面挤压破碎、软化泥化，形成断裂破碎带

坏岩体的完整性,如图 3 所示。黄波林^[9]等调查了巫峡岸坡段消落带,发现有同样的劣化现象,消落带岩体垂直于层面的裂隙较为发育,裂隙结构面水岩溶蚀作用较为强烈,在库水位周期性升降的水动力作用下,沿裂隙结构面逐渐形成规模不等的溶隙溶槽,如图 4 所示。在巴东干流厚层状灰岩岸坡调查中也发现有比较大的溶洞,通过对溶洞内部岩层观察发现,岩体层(理)面和裂隙较为发育,溶蚀作用诱发裂隙与层(理)面贯通,发生重力垮塌,形成规模较大的溶洞,如图 5 所示。

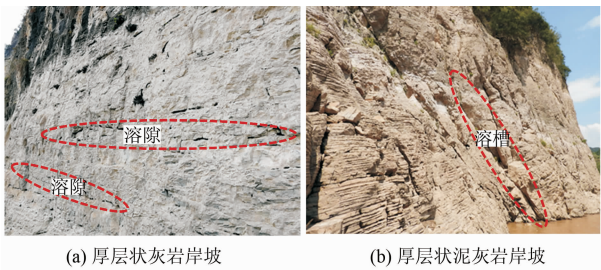


图 3 溶蚀岸坡消落带岩体劣化
Fig. 3 Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of karst riverside

2.2 库岸岩体剥蚀劣化

在对岸坡岩体劣化调查中发现,在薄层状和中厚层状灰岩顺向岸坡中,岩体表现为板裂状、龟裂状、块裂和台阶状劣化特征,如图 6 所示。三峡库区出露有三叠系下统嘉陵江组第一段(T_2j^1)和大冶组(T_1d)、石炭系中统黄龙组(C_2h)薄层-中厚层灰岩,在库水位周期性升降水动力作用下,岸坡岩体长期处于干湿交替作用环境,岩体裂隙、层(理)面发育,由于沉积条件和环境改变,层(理)面处非碳酸岩矿物富集,水沿层理面易入渗,层理面易发生软化泥

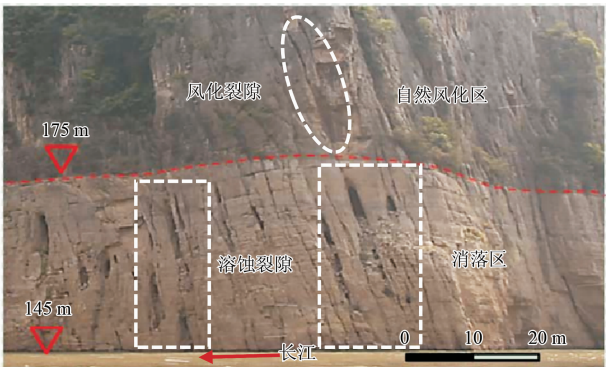


图 4 近水平厚层状泥灰岩岸坡消落带岩体劣化^[9]
Fig. 4 Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of shore slope of the near horizontal thick layered muddy limestone

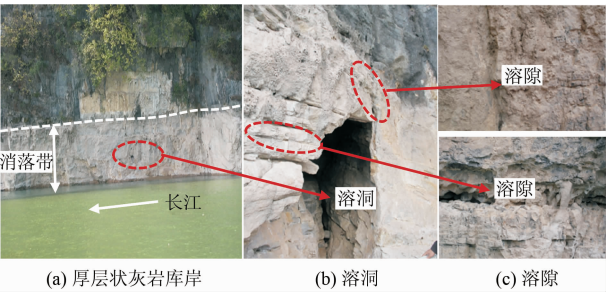


图 5 厚层状灰岩岸坡消落带岩体劣化
Fig. 5 Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of shore slope of the thick layered limestone

化,在干湿交替水岩作用下,黏土矿物吸水膨胀和失水收缩,同时,岩体受不规则裂隙切割并延伸到层(理)面,与层(理)面联通,劣化沿层(理)面和裂隙面不断发展。由于库水位升降水动力作用在岸坡浅表层最为强烈,以浅表层劣化最为严重,在水流、波浪及重力作用下逐层剥蚀岩体。岩体劣化是岩体由表及里渐进发展的动态演化过程,表现为具有明显的时效性。

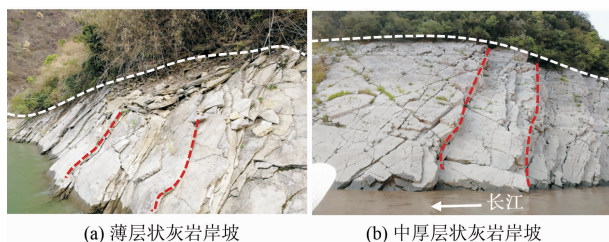


图6 薄层-中厚层岸坡消落带岩体劣化

Fig. 6 Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of thin-medium thickness layered riverside

2.3 岸坡岩体侵蚀劣化

在对三峡库区干(支)流岸坡岩体劣化调查中发现,灰岩或白云岩夹泥质条带或页岩岩组易发生侵蚀性劣化。图7为三峡库区支流九畹溪棺木岭危岩体,高程160 m以上,为厚层状白云岩,除坡顶部分裂隙切割岩体形成的掉块外,岩体较为完整,高程146~160 m为薄层状白云岩夹泥质条带区域,该区域节理裂隙发育,库水作用在软弱条带、岩层层面和裂隙面等部位不断诱发岩体劣化,岩体的完整性下降,由劣化引起的岩体强度逐渐降低,对岩体的整体稳定性产生不利影响。图8为巴东干流梨子坪-稻草坪库岸,岸坡具有二元结构,上部为厚层状灰岩,下部岩性为薄层状灰岩夹页岩,页岩构成岩体的软弱结构面,受库水波动和浸泡作用,形成凹腔,劣化的软弱结构面与上部裂隙共同作用,不断切割岩体,有的部位已形成孤立的危岩体。由于泥质岩和页岩均属于软岩,主要矿物为黏土矿物,水敏感性强,遇水极易软化泥化,在库水升降及浸泡作用下发生软

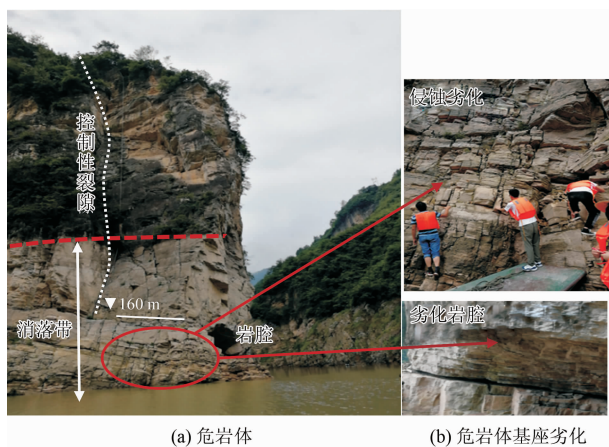


图7 三峡库区棺木岭危岩体消落带岩体劣化

Fig. 7 Deterioration of Guangmu Ling dangerous rock mass in the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges reservoir

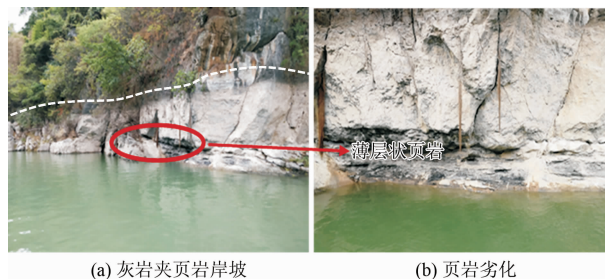


图8 厚层状灰岩夹页岩岸坡消落带岩体劣化

Fig. 8 Rock mass deterioration in the hydro-fluctuation belt of shore slope of thick layered limestone with the shale

化泥化,同时受到水流和降雨冲刷、波浪等作用被淘蚀和冲蚀。

2.4 断层型岩体劣化

在对岸坡岩体劣化调查中发现,厚层状灰岩泥灰岩不等厚互层岸坡出现了由岩体劣化形成的断层。图9为巴东长江干流火焰石岸坡,为斜顺向坡,由中厚层灰岩、泥灰岩及含燧石结核灰岩组成,节理裂隙、层(理)面较为发育,断层发育于中厚层泥灰岩地层,切穿层面形成正断层,受长期的地质演化及库水位升降水动力作用,裂隙水在结构面处富集,沿裂隙结构面演化为泥化层。张加桂^[19]等认为溶蚀型断层是节理岩体溶蚀作用的结果。罗元华^[20]等研究认为泥质灰岩中存在中等外倾节理裂隙时可能发生重力滑坡破坏。断层型劣化受控于节理裂隙结构面强度和溶蚀作用程度,当断层结构面陡倾时,主要由强度控制,库水提供了水环境条件,而矿物的溶蚀溶解进一步促进岩体劣化发生,断层型劣化具有裂隙结构面和溶蚀型劣化的复合劣化特征。

2.5 岸坡岩体劣化的深度变化特征

对巴东长江干流火焰石库岸,开展水平钻孔测试,采用单孔声波测试法,开展原位水平钻孔声波及成像测试,如图10所示。钻孔高程为155.02 m,位于消落区,水平钻孔深度15.1 m,根据钻孔波速测



图9 断层型消落带岩体劣化

Fig. 9 Deterioration of fault rock mass in the hydro-fluctuation belt

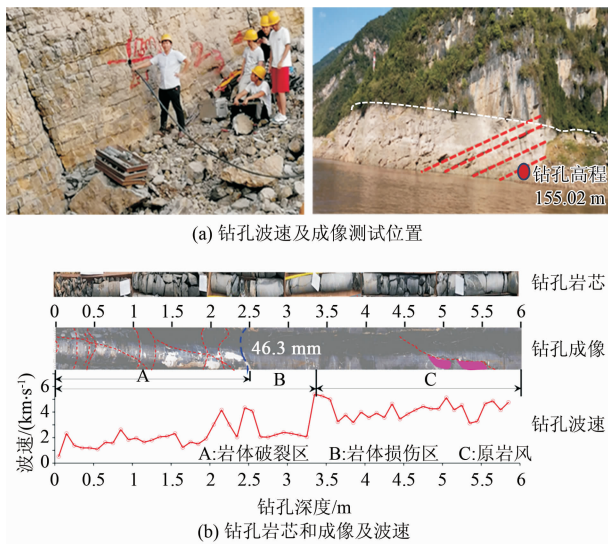


图 10 岸坡消落带岩体水平钻孔成像及声波测试

Fig. 10 Horizontal drilling imaging and acoustic wave testing at rock mass in the hydro-fluctuation belt of shore slope

试数据,分析波速变化特征,通过钻孔成像分析岩体完整性程度,结合波速变化和成像特征,将消落带岩体划分为受库水位升降水动力作用强劣化区、弱劣化区、无劣化区。强劣化区范围约为 0 ~ 2.55 m,弱劣化区约为 2.55 ~ 3.35 m,其他区域为无劣化区。强劣化区声波平均波速为 $2091 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,弱劣化区声波平均波速为 $2113 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,无劣化区声波平均波速 $4186 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,浅表层强劣化区与无劣化区相比波速降低了 49.95%。火焰石库岸消落带主要为含燧石结核的厚层状灰岩,浅表层层理面和节理裂隙较为发育,库水与地下水联通较好,受库水和地下水联动及干湿交替作用、溶蚀作用等影响,浅表层岩体较为破碎,声波波速表现为低值,随着钻孔深度的增加,岩体的完整性变好,水岩作用相对减弱,表现为声波波速增大。利用水平钻孔波速测试可以初步评价消落带岩体的劣化程度及影响范围。

3 碳酸岩溶蚀和裂隙结构面劣化成因机制分析

岸坡消落带岩体劣化是一个动态演化过程,这个过程不断改造岸坡的形貌特征,同时,引起库岸消落带岩体强度降低、岩体变形加剧、结构面的扩展与联通及新结构面的形成等一系列地质过程的发生,随着岩体劣化的持续进行,岸坡地质环境处于不断

的变化状态,这与一般不涉水边坡地质环境具有显著的不同,受消落区岩体劣化的影响,岸坡稳定性也处于动态演化过程之中,会诱发库岸滑坡、崩塌、危岩体失稳等一系列地质灾害发生。岩体劣化具有多尺度特性,是多场多过程综合作用的结果,且具有时间效应特性。

3.1 可溶岩溶蚀劣化

水的溶蚀性和水的流动性等是岩体溶蚀劣化的重要条件和影响因素^[4]。层状岸坡灰岩和泥灰岩的层面和节理裂隙面成为溶蚀劣化发生的通道,在这些结构面处易形成富集水,不断受到库水和裂隙水的溶蚀冲蚀作用,这种不断的、长期的循环作用,造成岩石中的可溶物不断溶蚀,不仅在宏观上表现为溶隙和溶孔,破坏岩体的完整性,而且在岩石细观结构上改变孔隙结构,进而影响岩石的强度特性。

碳酸岩岸坡发生溶蚀作用的主要原因是水中含有侵蚀性 CO_2 气体。试样为取自调查区的岩样,将其置于 1 L 水溶液反应容器中,持续通 CO_2 气体长期浸泡 40d,采用 CIC-D120 型离子色谱仪测定浸泡过程中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的析出量,采用 JSM-IT100 型扫描电子显微镜观察试样的细观结构变化特征。矿物溶蚀速率可用于定量评价试样浸泡过程中矿物析出情况,计算公式^[21]为:

$$R = \frac{2.5X + 3.5Y}{t} \quad (1)$$

式中, R 为矿物溶蚀速率($\text{mg} \cdot (\text{d} \cdot \text{L})^{-1}$); X 、 Y 分别为析出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为溶蚀反应时间(d)。

表 2 为去离子水溶液中析出离子的变化情况,在浸泡 40 ds 的过程中,溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度变化如图 11a 所示,其中, Ca^{2+} 的浓度要明显高于 Mg^{2+} ,并且 Ca^{2+} 的生成速率要明显高于 Mg^{2+} ,在浸泡初期,离子析出较快,在后期呈现较为缓慢的趋势,这与陈如冰^[21]等所得的试验结果一致。试样的溶蚀速率如图 11b 所示,随着浸泡时间的增加,溶蚀速率呈递减趋势。

通过将经历长期浸泡碳酸岩的细观结构与初始试样进行对比发现,初始试样矿物结构完整,棱角分明,可以看出矿物表面虽有破碎但无明显的结构间溶孔存在,并且原生孔隙间多被碳酸岩矿物填充(图 12a)。在持续通 CO_2 气体去离子水溶液中浸泡 40 d 的试样溶蚀较为严重,填充在原生孔隙间的碳

表 2 去离子水溶液中析出离子浓度变化

Tab. 2 Concentration changes of precipitated ions in deionized water solution

浸泡时间/d	质量浓度/(mg · L ⁻¹)		溶蚀速率 R/ (mg · (d · L) ⁻¹)
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
1	27.38	6.85	92.43
5	61.16	12.29	39.18
10	87.00	13.30	26.41
15	96.03	14.02	19.28
20	116.62	14.69	17.15
25	125.02	15.89	14.73
30	133.16	16.76	13.05
35	135.53	16.83	11.36
40	135.64	17.06	9.97

酸岩矿物多被溶蚀,并且其表面也出现数量更多尺寸更大的次生孔隙及溶隙(图 12b)。

以上试验结果表明,碳酸岩试样在 CO₂ 气体存在的环境中不断溶蚀,方解石 (CaCO₃) 和白云石 (CaMg(CO₃)₂) 矿物中的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 不断溶解进入溶液中,并且细观矿物表面也出现不同尺寸的溶孔及溶隙,破坏了岩石细观结构的完整性。

水岩化学作用是溶蚀劣化的主要诱发因素,赋存重力环境和矿物组成及细观结构特性也是不可忽略的重要因素。浅表层岩石的溶蚀劣化主要取决于水的溶蚀性和矿物组成及细观结构特性,张良喜^[22]等研究表明,岩石内部孔隙、微裂隙等细观结构特性控制溶蚀的方式、进程和发展。韩庆之^[23]等研究表明,碳酸盐岩组分对可溶性强弱有较大影响。总的趋势是随着方解石含量的增加,溶蚀率增加。汤艳春^[24]等研究表明,应力对宏观溶蚀速率有影响,且与其所处的应力阶段有关。申林方^[25]等研究表明,应力促进化学反应的发生,且与其局部应力分布及大小有关。在分析可溶岩溶蚀作用时应考虑应力作用因素的影响。

通过室内溶蚀试验揭示了溶蚀矿物溶蚀过程(图 11)及溶蚀细观结构变化特性(图 12),虽然室内试验环境与原位岩体赋存环境存在差异,但岩体劣化的内在控制机制是岩体结构和物质组成,在本质上是一致的,通过与现场劣化调查比对,其劣化表现的溶孔型劣化特征(图 3a)较为一致。

3.2 裂隙结构面劣化

碳酸岩库岸消落带岩体裂隙结构面较为发育,

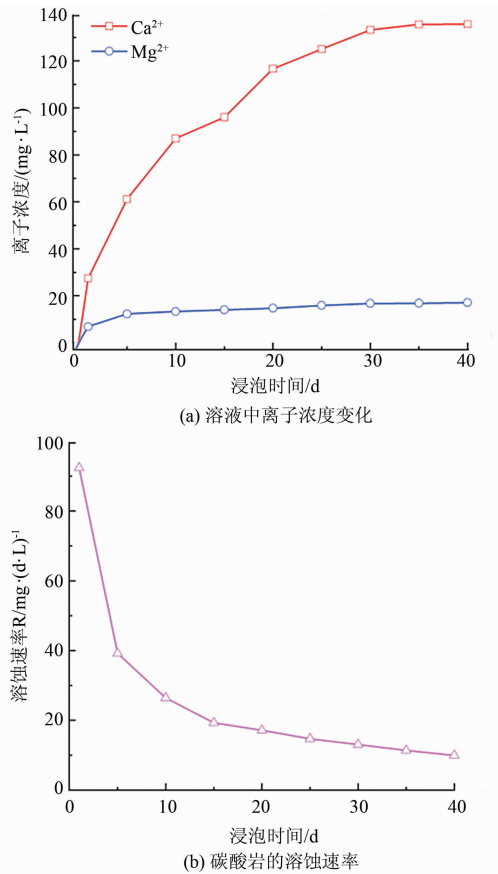


图 11 水溶液中析出离子浓度及溶蚀速率
Fig. 11 Concentration of precipitated ions and dissolution rate

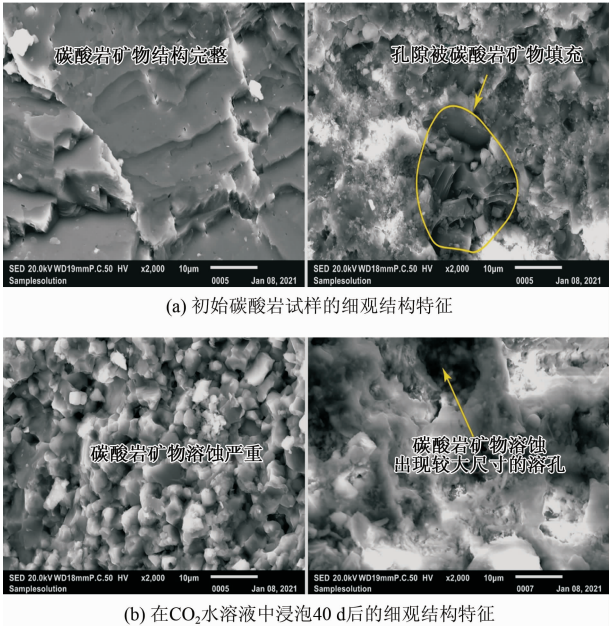


图 12 碳酸岩溶蚀试样细观结构特征
Fig. 12 Meso-structure characteristics of carbonatite rock

为水岩作用发生提供了有利条件,而裂隙结构面是水岩作用最为强烈的部位,也是岩体强度降低和变

形加剧的重要影响因素,在对碳酸岩岸坡进行调查时发现,浅表层岩体裂隙结构面劣化最为严重,已有的试验和理论研究成果表明,裂隙结构面的劣化速率高于岩石的劣化速率。

为研究裂隙结构面水岩作用劣化特性,在实验室采用劈裂试验法获得人造裂隙结构面的试验样本(图 13),开展在去离子水溶液中持续通 CO_2 长期浸泡试验($\text{pH} = 5$),利用 Artec3D SPIDER 型手持式三维激光扫描仪分别对浸泡 0、10、20、30、40 d 的试样进行单裂隙结构面形貌扫描,以便描述劈裂面形貌特征的变化。在获取试样的点云数据后,为消除试样在长期浸泡过程中岩石边界碎片剥落产生的误差,选取截面中心 $20 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 矩形区域的点坐标进行分析^[26],建立以试样直径和厚度分别为 X 轴和 Y 轴,截面的垂直方向为 Z 轴的坐标系,然后利用 MATLAB 进行编程处理数据,以获得劈裂面两侧试样 1 和 2 在不同浸泡时间下的三维形貌特征(图 14)。表面粗糙度能够评价劈裂面水岩作用后变化情况,表征平面粗糙度评价指标 JRC (joint roughness coefficient) 由式(2)确定^[27],均方根 Z_2 由式(3)确定^[26, 28],计算结果见表 3。

$$JRC = 51.85 (Z_2)^{0.60} - 10.37 \quad (2)$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{mD} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(z_{ij} - z_{ij-1})^2}{x_{ij} - x_{ij-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, m 为平行于坐标面 x_{oz} 平面与坐标面 x_{oy} 交线的个数; n 为交线上选取的等距点个数; D 为圆盘的直

径(mm)。

试样在劈裂破坏之后(图 13)测量的起伏度(最大和最小 Z 值间的差值)分别为 5.4 mm 和 5 mm ,粗糙度为 13.88 和 13.56 。在通 CO_2 的去离子水溶液中浸泡 30 d,可以明显观察到试样的劈裂面在凹陷处和凸起周围处不断溶蚀,导致劈裂面凸起和凹陷的差值不断增大,进而导致起伏度和粗糙度不断增大(图 14e 和图 14f);在浸泡 30 ~ 40 d 过程中,试样的起伏度和粗糙度达到平稳状态(图 14g、图 14h),最终试样的起伏度分别达到 9.2 mm 和 8.0 mm ,粗糙度分别达到 14.93 和 14.04 。图 14 三维形貌特征表明,劈裂面粗糙度的分布也具有非均匀性分布特征,这与岩石内部微孔隙、微裂隙等随机分布有关,也与岩石内部的充隙物性质有关,是岩石非匀质性在水岩作用方面的重要表现之一。

4 碳酸岩劣化评价

岩体劣化评价指标是反映岩体劣化程度的量化表示。根据指标的适用对象可分为室内评价指标和现场评价指标,室内评价指标多用于室内试验结果的量化评价,现场评价指标多用于现场测试结果的量化评价。根据指标描述的劣化尺度可分为细观评价指标和宏观评价量化指标,细观指标能够反映岩石劣化细观演化特性,主要为微孔隙结构特性和孔隙率变化,宏观评价指标主要为强度或者变形指标。根据岸坡消落带岩体劣化的表现形式和适用的试验技术,岩体劣化评价包括评价内容、评价指标和评价方法,具体建议见表 4。本文提出的评价方法主要是基于野外调查评价的需求,对不同的评价对象,既可以是单一方法,也可以采取多种方法,同时,也可以结合室内试验及测试,对岩体劣化进行综合评价。

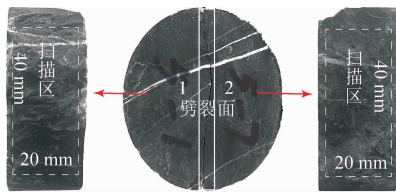


图 13 含裂隙结构面试验及编号

Fig. 13 Testing and numbering samples of fracture planes

表 3 持续通入二氧化碳溶液结构面粗糙度

Tab. 3 Morphology parameters of the structural surfaces in continuous CO_2 ventilation

试样 编号	不同浸泡时间粗糙度				
	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d
1	13.88	14.60	14.52	14.94	14.93
2	13.56	13.70	13.56	14.03	14.04

5 结论

在库水作用和水溶蚀长期作用下,库岸地质环境处于不断变化之中,岩体劣化也是库区地质环境变化的重要体现。碳酸岩库岸岩体在宏观上表现为不同的劣化特征,具有多途径劣化的方式,呈现出不同的劣化模式。岩体劣化在不同的区域也具有明显的差异性,主要受控于岩体的物质基础和赋存环境条件。

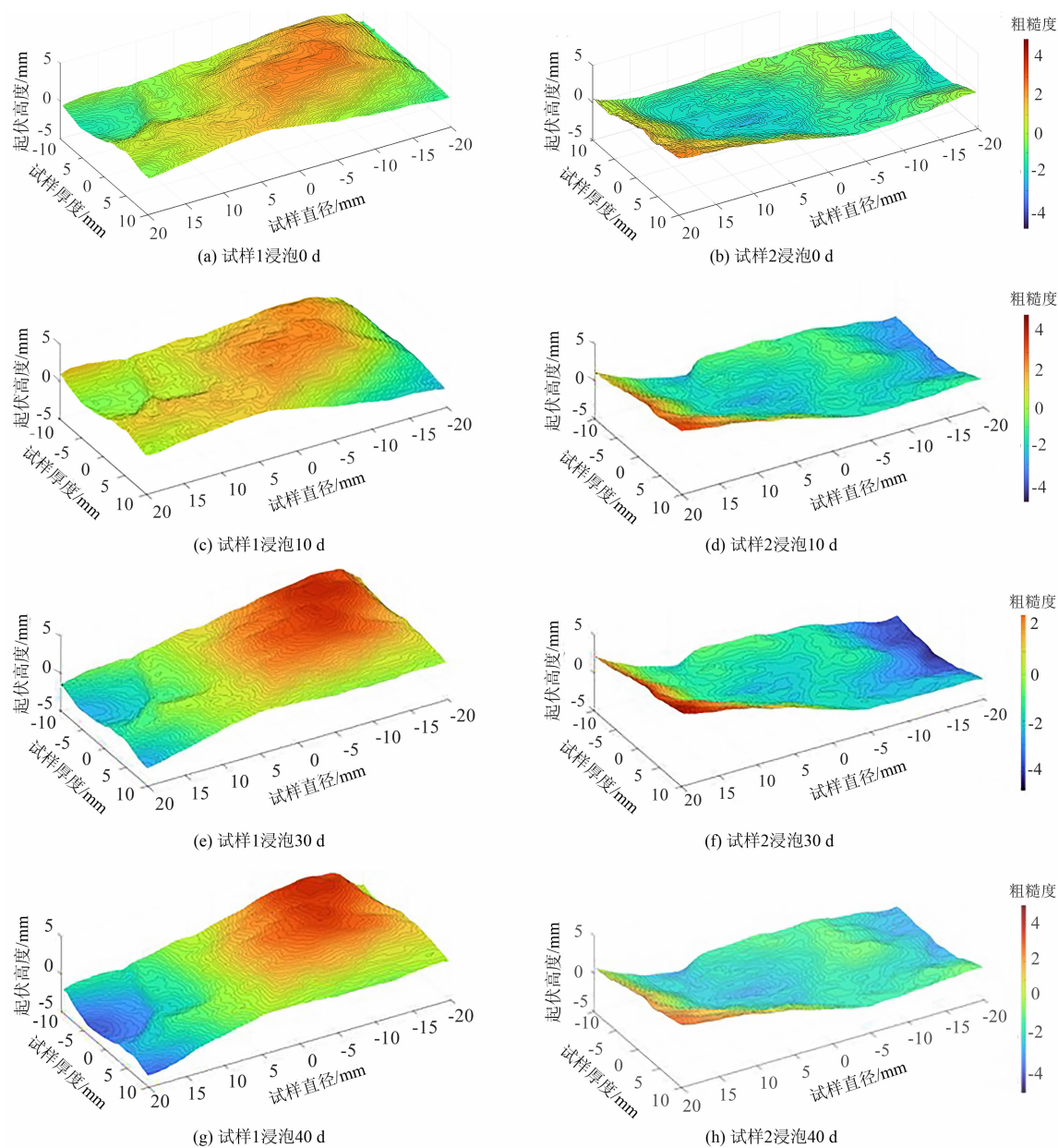


图 14 长期浸泡过程中碳酸岩试样的三维形貌特征

Fig. 14 Three-dimensional morphology characteristics of carbonatite samples during long-term immersion

表 4 岸坡消落带岩体劣化评价

Tab. 4 Deterioration evaluation of rock mass in the hydro-fluctuation belt

评价项目	评价指标	评价方法
岩体(岩石)强度劣化	强度比、波速比	主要采用“比拟法”,消落区与非消落区岩体(岩石)强度比,可采用点荷载试验法、回弹法、钻孔波速法等方法
裂隙结构面劣化	结构面发育密度、体积节理数 J_v	消落区与非消落区对比法,测窗法、钻孔波速法、三维激光扫描测试、数码摄影测量、地质雷达测试 ^[11] 、超声波测试法 ^[9]
剥蚀型劣化	剥蚀率、剥蚀密度	测窗法、三维激光扫描测试、数码摄影测量
侵蚀型劣化	侵蚀深度和侵蚀率、侵蚀密度	消落区与非消落区对比法,测窗法、钻孔波速法、三维激光扫描测试、地质雷达测试 ^[11]
溶蚀型劣化	溶蚀率、溶隙扩展率和密度	消落区与非消落区对比法、测窗法、钻孔波速法、地质雷达测试 ^[10]

注:评价方法主要是以野外调查评价为主的方法。

(1)根据库水作用和水的溶蚀性对岩体劣化的影响条件、环境、过程及机制,可分为溶蚀型、剥蚀型、侵蚀型、断层型。

(2)岸坡岩体完整性好的区域,其劣化不明显,结构面发育的区域,岩体较为破碎,岩体劣化最为严重,岸坡的形貌特征改变较为明显,不同类型的结构面,水岩作用过程和特性不同,产生不同的劣化效应。

(3)库水与地下水联动影响岸坡岩体劣化的范围,岸坡水平钻孔波速测试及成像分析表明,岩体劣化沿孔深呈现逐渐减弱的趋势,其减弱程度取决于库水与地下水的联通程度,沿深度方向可以划分为强劣化区、弱劣化区和无劣化区。

(4)针对碳酸岩岸坡不同的劣化类型,可采用不同的劣化评价指标和评价方法或者多种方法的综合应用。

(5)库水和地下水联动及干湿交替循环作用环境是碳酸岩岸坡消落带岩体劣化的主要影响因素。

参考文献 (References)

- [1] 张国栋, 邵杰鹏, 叶义成, 等. 三峡库区秭归碎屑岩岸坡消落带岩体劣化特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, **45**(3): 26 - 31. [ZHANG Guodong, SHAO Jiepeng, YE Yicheng, et al. Research on the deterioration characteristics of elastic rock of bank slopes in the fluctuating water level zone of Three Gorges reservoir area [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, **45**(3): 26 - 31] DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2023.03.005
- [2] 张加桂. 三峡地区泥灰质岩石在岩溶和风化过程中力学性质的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(7): 1073 - 1077. [ZHANG Jiagui. Variation of mechanical property of marlite in process of karstification and weathering in Three Gorges region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(7): 1073 - 1077]
- [3] 张加桂. 河谷斜坡带泥灰质岩石区地貌对岩溶的控制机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, **34**(3): 415 - 419. [ZHANG Jiagui. Mechanism of landform control over karstification in mud-limestone area along valley slope zone [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, **34**(3): 415 - 419] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2004.03.018
- [4] 张加桂, 殷跃平, 蔡秀华, 等. 三峡库区巫山县翠屏小区岩溶引起的地质灾害危险性研究[J]. 地球学报, 2008, **29**(4): 495 - 501. [ZHANG Jiagui, YIN Yueping, CAI Xiuhua, et al. The catastrophic karstification of the foundation limestone in Cuiping area, Wushan county, Three Gorges reservoir region [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2008, **29**(4): 495 - 501]
- [5] 王林峰, 程平, 夏万春, 等. 化学及干湿循环作用下泥灰岩损伤劣化特性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, **42**(5): 976 - 984. [WANG Linfeng, CHENG Ping, XIA Wanchun, et al. Analysis of damage and deterioration characteristics of marl under chemical and dry-wetting cycles [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, **42**(5): 976 - 984] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.20210902005
- [6] ABBASZADEH M, NASIRI M, RIAZI M. Experimental investigation of the impact of rock dissolution on carbonate rock properties in the presence of carbonated water [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**: 791. DOI: 10.1007/s12665-016-5624-3
- [7] 韩铁林, 师俊平, 陈蕴生. 干湿循环和化学腐蚀共同作用下单裂隙非贯通试样力学特征的试验研究[J]. 水利学报, 2016, **47**(12): 1566 - 1576. [HAN Tielin, SHI Junping, CHEN Yunsheng. Laboratory study on mechanical behaviours of the single-intermittent cracked masses under the combined action of water chemical corrosion and dry-wet cycles [J]. Shuili Xuebao, 2016, **47**(12): 1566 - 1576] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160616
- [8] 刘新荣, 景瑞, 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): 1321 - 1332. [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): 1321 - 1332] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0887
- [9] 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): 1787 - 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): 1787 - 1796] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1535
- [10] 张鹏, 张森林, 黄波林, 等. 岸坡消落带岩体劣化的新生型滑坡(崩塌)隐患演化模式研究[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(5): 1416 - 1426. [ZHANG Peng, ZHANG Senlin, HUANG Bolin, et al. Study on the evolution model of neogenic landslide (collapse) hazards in rock mass of hydro-fluctuation belt [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(5): 1416 - 1426] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0164
- [11] 杨何, 汤明高, 许强, 等. 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, 2020, **51**(11): 1360 - 1371. [YANG He, TANG Minggao, XU Qiang, et al. Deterioration characteristic test and quality evaluation of bank slope rock mass in hydro-fluctuation belt of Three Gorges reservoir area [J]. Shuili Xuebao, 2020, **51**(11): 1360 - 1371] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200094
- [12] 郭静芸, 毕鑫涛, 方然可, 等. 可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述[J]. 水文地质工程地质, 2020, **47**(4): 24 - 34. [GUO Jingyun, BI Xintao, FANG Ranke, et al. Advances in the

- chemical dissolution methods of soluble rocks [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, **47**(4): 24 – 34] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.202003054
- [13] LIU Yang, LIU Changwu, KANG Yaming, et al. Experimental research on creep properties of limestone under fluid-solid coupling [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(11): 7011 – 7018. DOI: 10.1007/s12665 – 015 – 4022 – 6
- [14] 殷坤龙, 周春梅, 柴波. 三峡库区巫峡段反倾岩石边坡的破坏机制及判据[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(8): 1635 – 1643. [YIN Kunlong, ZHOU Chunmei, CHAI Bo. Failure mechanism and criterion of counter-tilt rock slopes at Wuxia Gorges section in Three Gorges reservoir area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(8): 1635 – 1643] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.08.014
- [15] 张志强, 李宁, 陈方方, 等. 非贯通裂隙岩体破坏模式研究状与思考[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(S2): 142 – 148. [ZHANG Zhiqiang, LI Ning, CHEN Fangfang, et al. Review and status of research on failure mode of nonpenetrative fractured rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(S2): 142 – 148] DOI: 10.16285/j.rsm.2009.s2.050
- [16] 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): 2590 – 2600. [YIN Yueping, HUANG Bolin, LI Bin, et al. Research on the deterioration index of karst rock mass in the fluctuating water the level zone of Three Gorges reservoir area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(8): 2590 – 2600] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021198
- [17] 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]. *Shuili Xuebao*, 2020, **51**(8): 883 – 896] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200280
- [18] 黄波林, 殷跃平, 李滨, 等. 三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及灾变效应[J]. *水文地质工程地质*, 2020, **47**(4): 51 – 61. [HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of karst bank slope in the Three Gorges Project reservoir area [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, **47**(4): 51 – 61] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.202003055
- [19] 张加桂, 陈庆宣, 蔡秀华. 三峡地区泥灰质岩石中几种表生构造及其与地质灾害的关系[J]. *中国地质*, 2003, **30**(3): 320 – 324. [ZHANG Jiagui, CHEN Qingxuan, CAI Xiuhua. Some supergene deformation structures in marly limestone in the Three Gorges region and their relation to geohazards [J]. *Geology in China*, 2003, **30**(3): 320 – 324]
- [20] 罗元华, 伍法权, 常中华. 三峡库区奉节县新城区 T2b3 泥质灰岩斜坡变形破坏模式的现象学研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(12): 2029 – 2054. [LUO Yuanhua, WU Faquan, CHANG Zhonghua. Phenomenology research on deformation and failure modes of slopes composed of argillaceous limestone of the third number of Badong group(T2b3) in new site of Fengjie county of Three Gorges reservoir area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(12): 2029 – 2054]
- [21] 陈如冰, 罗明明, 罗朝晖, 等. 三峡地区碳酸盐岩化学组分与溶蚀速率的响应关系[J]. *中国岩溶*, 2019, **38**(2): 258 – 264. [CHEN Rubing, LUO Mingming, LUO Zhaohui, et al. Response relationship between chemical composition and dissolution rate of carbonate rocks in the Three Gorges area [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, **38**(2): 258 – 264] DOI: 10.11932/karst20190210
- [22] 张良喜, 赵其华, 胡相波, 等. 某地区白云岩室内溶蚀试验及微观溶蚀机理研究[J]. *工程地质学报*, 2012, **20**(4): 576 – 584. [ZHANG Liangxi, ZHAO Qihua, HU Xiangbo, et al. Laboratory dissolution test on dolomite and its micro-dissolution mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, **20**(4): 576 – 584]
- [23] 韩庆之, 梁杏, 曾克峰, 等. 碳酸盐岩可溶性室内研究[J]. *地质科技情报*, 1998, **17**(S2): 101 – 105. [HAN Qingzhi, LIANG Xing, ZEN Kefeng, et al. Study on solubility of carbonate rock in door [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1998, **17**(S.2): 101 – 105]
- [24] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 应力作用下岩盐的溶蚀模型研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(2): 296 – 302. [TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Study on dissolving model under effect of stress for rock salt [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(2): 296 – 302] DOI: 10.16285/j.rsm.2008.02.049
- [25] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 应力作用下岩石的化学动力学溶解机制研究[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(5): 1320 – 1326. [SHEN Linfang, FENG Xiating, PAN Pengzhi, et al. Chemical kinetics dissolution mechanism of rock under stress [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(5): 1320 – 1326] DOI: 10.16285/j.rsm.2011.05.006
- [26] 韩宇峰, 王兆会, 唐岳松. 劈裂实验中不同岩石力学行为特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, **49**(5): 863 – 873. [HAN Yufeng, WANG Zhaohui, TANG Yuesong. Mechanical behavior of different rocks in the splitting test [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2020, **49**(5): 863 – 873] DOI: 10.13247/j.cnki.jcuml.001192
- [27] TATONE B S A, GRASSELLI G. A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, **47**(8): 1391 – 1400. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2010.06.006
- [28] ZHANG Guangcheng, KARAKUS M, TANG Huiming, et al. A new method estimating the 2D joint roughness coefficient for discontinuity surfaces in rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, **72**: 191 – 198. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.09.009

Rock Mass Deterioration in the Hydro-Fluctuation Belt of Carbonate Riverside in the Three Gorges Reservoir of the Yangtze River, China

ZHANG Guodong¹, XIA Wenzhong¹, HE Yuming², WEI Can¹

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Hubei Hydrogeological Engineering Geological Survey Institute, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: Hydro-fluctuation belt is a distinct area with alternating dry-wet action formed by ceaseless shifting of rise and fall of reservoir water table. Compared with other parts on a shore slope, strong water-rock interaction develops on a hydro-fluctuation belt, consequently altering geomorphology of the shore slope, even undermining its stability to some extent.

Although great efforts were made to investigate the roles of hydro-fluctuation belt in riverside stability, there were still insufficient knowledge of rock mass deterioration characteristics, degradation classification and assessment, and deterioration indicators.

In this study, it investigated carbonate rock masses suffered erosion from hydro-fluctuation effect in the reach of Zhigui and Badong of the Three Gorges reservoir of the Yangtze River, China. Field survey, indoor experiments, analogy method, etc. were used to reveal the characteristics, process and mechanism of rock mass deterioration.

(1) Based on the macroscopic erosion effect to rock mass in the hydro-fluctuation belt of shore slope, it could categorize four levels of deteriorations. Joint water-rock interaction inflicted by reservoir water and groundwater controlled degradable extents of carbonate rock mass, but it weakened gradually along the depth direction; therefore, rock mass could be divided into three zones in terms of the property variation.

(2) The most serious deterioration took place along various discontinuity planes in rock mass, among which fracture planes played crucial roles in governing primary deterioration characteristics and types of rock mass.

(3) Erosion behaviors of reservoir water associated with erodibility jointly affected deterioration phases of rock mass as well as development pattern.

(4) Based on interaction levels between reservoir water and groundwater in riversides, this study introduced deterioration indicators and a proper approach to evaluating of carbonate rock mass deterioration in hydro-fluctuation belt, and justified by engineering applications.

The research has reference significance for evaluation of rock mass deterioration in hydro-fluctuation belt.

Key words: hydro-fluctuation belt; carbonate shore slope; water-rock interaction; deterioration of rock mass; the Three Gorges reservoir

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)