

张钟远, 谭磊, 赵鹏, 等. 三峡库区瞿塘峡至巫峡段消落带灰岩质量劣化特征[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 250-260.

DOI: 10.11932/karst2025y004

三峡库区瞿塘峡至巫峡段消落带灰岩质量劣化特征

张钟远¹, 谭磊², 赵鹏¹, 余姝¹, 白林丰^{1,3}, 曾德强¹, 靳鹏¹

(1. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400711; 2. 重庆市地质灾害防治中心, 重庆 401120; 3. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 文章以三峡库区瞿塘峡至巫峡段消落带灰岩为研究对象, 基于地质调查、回弹试验、声波波速测试、干湿循环试验和CT扫描等多源方法与技术, 开展岩体(岩石)质量劣化、强度变化、微观劣化规律分析, 系统研究该类岩体劣化特征。结果表明: 三峡库区瞿塘峡至巫峡段灰岩劣化现象主要有裂隙扩展与新生、溶蚀/潜蚀和机械侵蚀3种类型; 经历库水位升降周期后, 库水位变动带岩体强度降低明显, 且有浅表层劣化快、深层劣化较慢的规律; 干湿循环条件下结构面、裂隙等缺陷的存在是岸坡岩体劣化的控制性因素; 应力对裂隙的扩展作用要远大于溶蚀作用, 岩体遭受劣化的主要机制是水流的溶蚀作用与应力断裂, 其中应力是裂隙扩展的主要影响因素; 岩石劣化过程中裂隙动态演化过程依次为表面孔隙增多, 裂隙逐渐由表及里扩展延伸, 岩样内部孔隙明显大幅度增多, 裂隙结构面再扩展并不断增加其孔隙度使得裂隙显化愈加明显。

关键词: 消落带; 岩溶岸坡; 水岩作用; 岩体劣化; 干湿循环试验; 三峡库区

创新点: 通过原位测试与室内试验相结合, 系统揭示三峡库区瞿塘峡至巫峡段灰岩在周期性水位变动下的劣化规律与机理, 量化库水位升降对岩体回弹强度、声波波速及力学参数的长期影响, 总结干湿循环作用下岩石微观结构的劣化特征, 深入探究岩体结构劣化、微观机制及长期演化规律。

中图分类号: TV223.1; P642.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)02-0250-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩体劣化一般是指水库消落区岩体受水位涨落、溶蚀及应力变化等影响, 导致的岩体物理、力学性质降低现象, 通常包括岩体强度降低、裂隙增多、崩解速度加快等。2008年9月三峡工程开始试验性蓄水以来, 发生了多起碳酸盐岩岸坡岩体劣化引起的地质灾害案例。例如, 2008年11月23日龚家方发生岩体崩塌, 约 $38 \times 10^4 \text{ m}^2$ 岩体坠入长江, 产生13 m高涌浪^[1-3]; 2009年三峡库区试验性蓄水至156 m期间, 神女溪右岸青石岸坡发生 1500 m^2 的滑

塌^[4]; 同时新发现了一系列地质灾害隐患^[5-6]。这些地质灾害的形成都与库区水位周期涨落下岩体劣化有关^[6]。

2008年以来, 在三峡库区开展了大量地质灾害防治工作, 在实践过程中逐渐认识到库区地质灾害的主要诱发因素是水位变动。自2016年以来, 学者们开始着重关注劣化带的研究, 通过大量的野外调查工作, 逐步探究溶蚀岩体劣化机制, 包括以机械搬运为主的物理机制、以溶蚀潜蚀为主的化学机制和以应力断裂为主的力学机制^[5,7]。在这基础上, 学者通过地质调查、原位测试、室内试验等研究方

资助项目: 重庆市规划和自然资源局科研项目(KJ-2023046)

第一作者简介: 张钟远(1996—), 男, 工程师, 主要从事地质灾害防治与风险评价技术应用与研究。E-mail: kfzzy@163.com。

通信作者: 谭磊(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 476020650@qq.com。

收稿日期: 2024-09-04

法,进一步总结碳酸盐岩岸坡岩体劣化宏观现象,分析了消落区岩体在深度方向上的劣化规律,认为不同岩体结构和岸坡结构的岩体劣化有非常大的差异^[8-10]。但岩体劣化现象引发的岸坡灾变效应,涉及岩体强度指标的衰减。鉴于此,殷跃平等^[9]提出了溶蚀岩体劣化程度的量化评价指标,分析了其与岩体力学强度指标的相关性,认为岩体劣化造成了岩体力学强度的衰减,岩体体积节理数增量和岩体强度指标呈线性负相关,其为岩体劣化程度量化评价提供了新方法。随着研究的不断深入,采用干湿循环试验、电镜扫描技术、波速测试、高清摄影等技术方法,在岩石的物理性质改变、力学强度指标弱化和裂纹扩展特性等方面取得了大量研究成果^[11-14]。

现有研究以认识并揭示岸坡在长期水位变动情况下岩体强度弱化趋势规律为目的,所开展的试验侧重于岩石物理力学参数的获取,对岩体原生结构开展的试验较少。同时,侧重于岩体在强度弱化方面规律的认识,对岩体结构劣化、微观机制和长期演化规律的研究相对较少。而这一系列地质问题却是影响三峡库区地质灾害发育的重要因素。

本文在地质调查的基础上,总结了三峡库区灰岩宏观劣化现象,并采用回弹试验、声波波速测试、干湿循环试验和CT扫描等多源方法与技术,分析岩体表层、浅层质量劣化特征,揭示了岩体质量劣化规律和机理,以期为三峡库区岩质岸坡灾变防控提供技术支撑。

1 灰岩岩体宏观劣化现象

2008–2022年间对三峡库区重庆段岩质岸坡劣化带进行了长期勘查工作,该段灰岩区主要分布在瞿塘峡至巫峡区域(图1)。根据岩体劣化的现象、成因机制等对岩体劣化进行分类,三峡库区灰岩劣化现象主要有裂隙扩展与新生、溶蚀/潜蚀和机械侵蚀。

(1)裂隙扩展与新生 指消落区岩体裂隙明显增多,或者张开度或延伸度变大、迹长变长,岩体变得更破碎的现象。以三峡库区剪刀峰斜坡劣化段为例,其出露地层为嘉陵江组三段中厚至厚层状灰岩。消落带裂隙的贯通性比非消落带明显,其裂隙间距为0.3~0.8 m,延伸长度大多数大于3 m,新生显

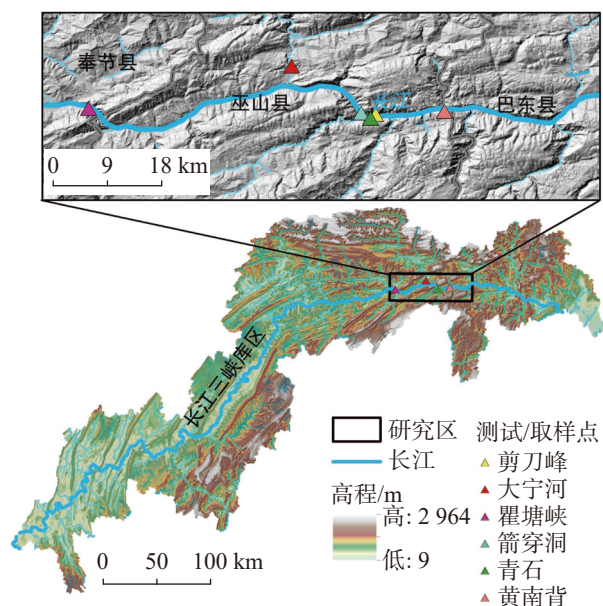


图1 研究区(瞿塘峡至巫峡段)测试/取样点位置图

Fig. 1 Locations of testing/sampling points in the study area (from Qutang Gorge to Wuxia Gorge)

化现象程度较高。通过矢量化裂缝可清晰发现许多新生微裂隙,且消落带发育密度明显大于非消落带(图2)。

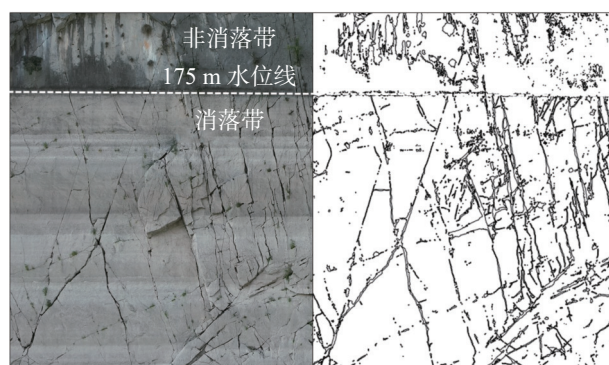


图2 剪刀峰段裂隙扩展与新生劣化现象

Fig. 2 Fissure expansion and degradation in Jiangdao Summit

(2)溶蚀/潜蚀 指消落区岩体中溶沟、溶槽、溶隙或孔洞明显变多或变大,胶结物溶解后被搬运,导致岩体缺陷明显增多的现象。以箭穿洞段为例,其地层为大冶组四段浅灰色薄层状泥质灰岩,消落区纵向状裂隙明显多于非消落区,沿裂隙方向发育大量的长条状溶蚀裂缝和孔洞。溶蚀裂缝长2.0~12.0 m,宽0.5~1.0 m,深度0.1~0.6 m。溶蚀裂缝主要沿构造裂隙发育,与岩体卸荷、构造切割相耦合,形成控制岸坡局部岩体稳定性的关键因素。调查发现纯质的灰岩反而岩溶发育程度较低,泥质含量较重

的泥质灰岩溶蚀迹象反而较强烈,溶孔及溶蚀裂缝的可溶物质被溶解带走,岩体完整性受到明显破坏(图3)。



图3 箭穿洞段溶蚀/潜蚀劣化现象

Fig. 3 Degradation resulted from corrosion/subsurface erosion in the Jianchuan Cave

(3)机械侵蚀 指水流机械力侵蚀造成了消落区中碎裂岩体发生带状侵蚀、凹腔状侵蚀、侧向侵蚀或坡面侵蚀。以三峡库区主要支流大宁河段为例,地层为三叠系下统嘉陵江组三段灰色薄层至中厚层状泥质灰岩,节理裂隙发育,裂隙面结合程度差,局部充填碎石,受层面裂隙及两组构造裂隙切割,岩体整体较破碎。在江水动力作用下,裂隙间胶结物被带走,块体与母岩脱开后多沿外倾裂隙出现翻滚、滑落。同时,在部分岩体滑塌脱落后,会形成小型凹腔,在库水动力作用下,对凹腔存在掏蚀作用,导致岩体顺层面脱落(图4)。



图4 大宁河段机械侵蚀劣化现象

Fig. 4 Degradation resulted from mechanical erosion in the section of the Daning River

2 基于原位试验的岩体质量劣化测试

2.1 岩体回弹测试

通过现场调查发现水位周期性变化下灰岩岸坡

的几种典型劣化现象,为表征表层岩体质量的劣化情况,以回弹试验表征岩体表层质量劣化特征。在黄南背段、瞿塘峡段和箭穿洞段分别开展原位回弹测试。回弹值与岩体质量呈正相关,回弹值越高,说明岩体强度越大^[7,14]。

采用 ZBL-S210 数显回弹仪对典型灰岩岸坡消落区 (145~175 m) 和非消落区 (>175 m) 分别进行现场回弹试验,测试时间为 2022 年 6~8 月。每组选择平整而干净的岩面作为一个测区,尺寸为 0.8 m×0.7 m,每个测区测点 16 个,基本均匀分布,去掉 3 个最大值和 3 个最小值,取剩下 10 个回弹值的平均值作为测区的回弹值。

典型灰岩岸坡强度回弹测试结果见图 5、图 6、图 7,根据消落区和非消落区强度回弹对比,黄南背、瞿塘峡和箭穿洞岸坡非消落区强度回弹值平均值分别为 58.75 MPa、52.65 MPa 和 53.60 MPa,消落区强度回弹值平均值分别为 52.20 MPa、43.00 MPa 和 40.30 MPa,可见在经历 13 个库水位升降周期后 (2008~2021 年),库水位变动带岩体表层强度降低分别为 11.15%、18.33% 和 24.81%,年平均降低率分别

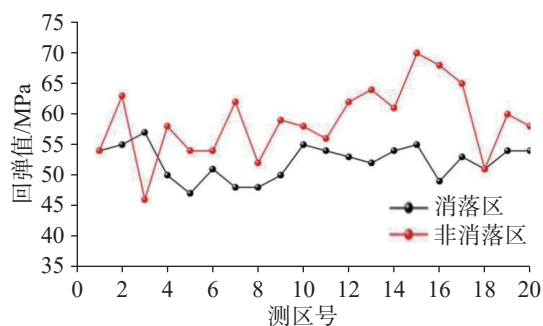


图5 黄南背库岸岩体强度回弹值

Fig. 5 Strength rebound value of rock mass along the bank of the Huangnanbei Reservoir

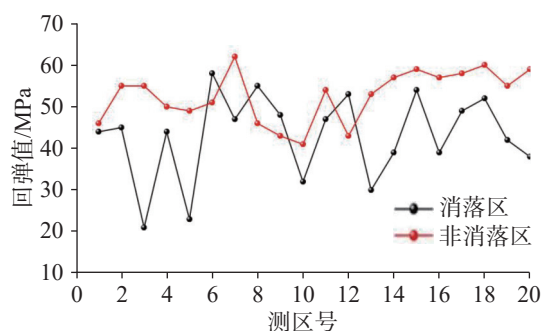


图6 瞿塘峡库岸岩体强度回弹值

Fig. 6 Strength rebound value of rock mass along the bank of the Qutang Gorge Reservoir

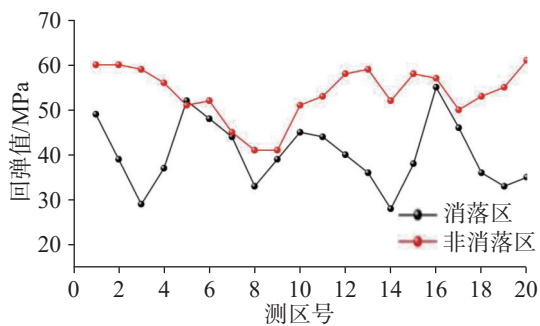


图 7 箭穿洞库岸岩体强度回弹值

Fig. 7 Strength rebound value of rock mass along the bank of the Jianchuan Cave

为 1.01%、1.67% 和 2.26%。

2.2 岩体声波波速测试

回弹试验一定程度上表征了岩体质量表层的劣化规律,针对岩体质量内部劣化情况可采用声波波速测试结果的强度下降率或函数下降来表征深度方向的岩体劣化情况^[15]。为探明库水位周期性变化条件下岩体质量的真实劣化规律,开展多期原位声波波速测试。波速测试可表征岩体的完整性情况,若声波波速在同一测区的时间尺度上或经历了库水位升降后呈下降趋势,说明岩体完整程度降低,岩体出现了劣化^[16]。

2017 年 9 月至 2022 年 5 月期间,采用 RSM-SY7 非金属声波检测仪,对三峡库区青石 6 号岸坡 145~175 m 消落带附近 6 对 12 个深孔中,进行了 9 次经历 5 个水文年的跨孔声波测试。以典型钻孔 ZK05 A/B 为例,ZK05 位于该岸坡消落带中部,钻孔吴淞高程 166.06 m,ZK05 经历了 5 个库水位循环周期,对其进行多期跨孔声波测试,以此结果表征库岸岩体的质量劣化过程,结合井下电视图分析浅层岩体质量劣化特征。

2.2.1 声波波速与井下电视对比

将 ZK05 首期声波速度与井下电视图对比可发现:声波速度较小位置发育裂隙结构面较密集,岩体表层裂隙比深部更为发育,呈现由浅入深质量劣化程度趋弱(图 8)。经历 5 个水位循环周期,进一步对比多期声波波速数据(图 9),发现声波波速在结构面、裂隙密集分布的位置持续下降明显。而原来结构面、裂隙较为稀疏的高波速区域下降不明显,可见结构面的发育可加速岩体质量劣化。

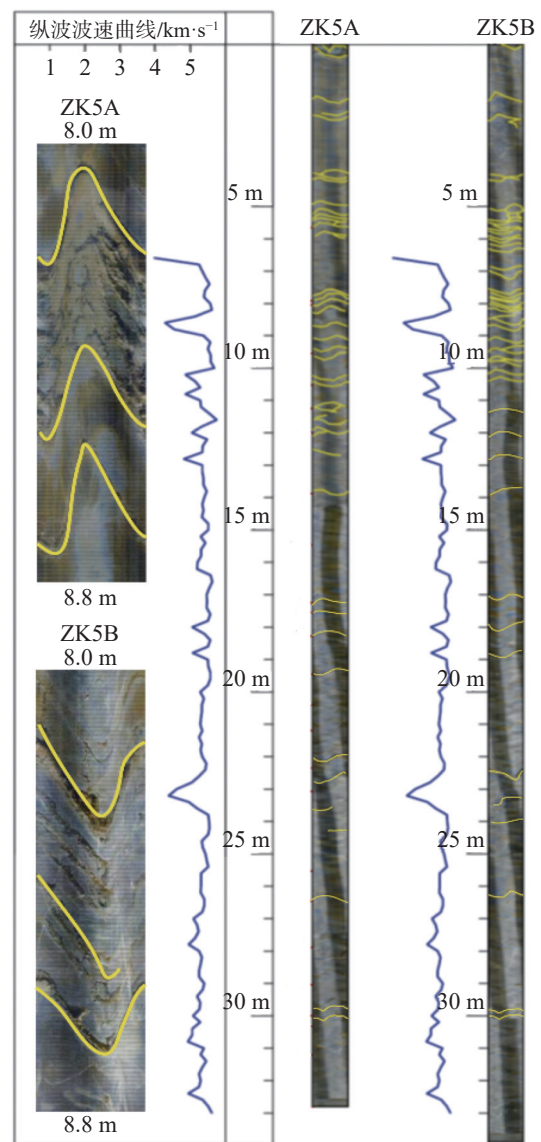


图 8 井下电视与首期波速

Fig. 8 Downhole TV and first wave velocity

2.2.2 不同深度声波数据变化

取 8 个裂隙结构面密集的特征深度: 6.2 m、8.4 m、12.6 m、14.2 m、17.6 m、23.2 m、27.0 m 和 30.8 m,提取多期声波数据进行对比分析(表 1),发现即使是结构面波速下降率最小的位置也高达 19.86%(深 14.2 m)。井下电视图显示,岩体在浅部较为破碎,且裂隙发育密集,声波波速下降率在深 6.2 m 处高达 67.20%。单从声波波速劣化下降的角度看,相较于完整岩体而言,裂隙结构面密集发育可能导致岩体质量劣化加速高达 7~45 倍,裂隙结构面等缺陷的存在是岸坡岩体质量劣化的控制性因素。同时,声波波速与岩体结构面的分布、岩层埋深密切相关,呈现出岩体劣化的不均一性^[17]。

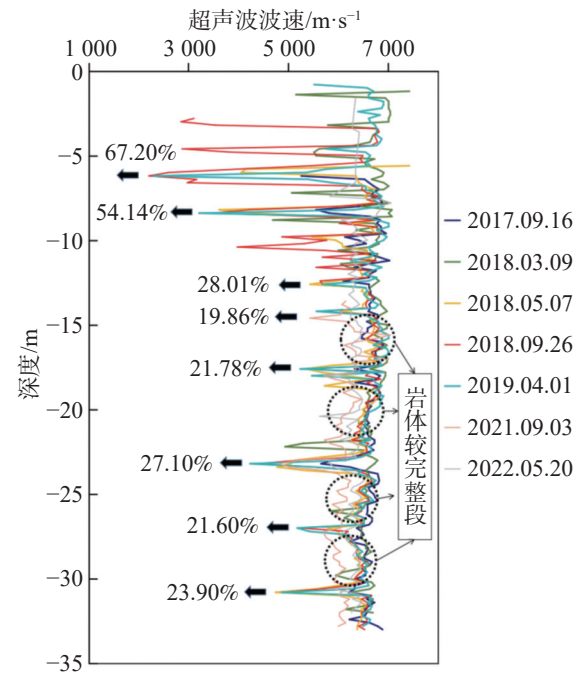


图9 多期跨孔声波波速对比
Fig. 9 Comparison of velocities of multi-phase cross-hole acoustic waves

3 基于室内试验的岩体质量劣化测试

3.1 岩石干湿循环测试

从近些年现场回弹试验、声波波速测试结果显示岩体节理、裂隙、强度在表层及浅表层的劣化情况,为模拟库区环境中更长时间尺度的岩体劣化情况,在三峡库区青石岸坡选取灰岩裂隙岩样,开展干湿循环室内试验,以观察在干湿循环状态下岩块波速的降低情况,在第0次和50次循环后进行单轴压缩试验和变形试验,进一步揭示岩石的强度劣化

规律。

试样取样地点位于三峡库区的青石岸坡,岩性为嘉陵江组灰岩,经钻、切、磨将岩样制作为标准试样(直径50 mm,高100 mm),共制样54组。为避免试样差别较大产生离散性,采用声波测试选样,选样方法如下:(1)舍弃部分外观上有较多溶孔、节理和充填的试样;(2)选择纹理纹路相近的样品进行岩石波速测试,统计样品波速集中的区间;(3)根据波速相对一致的区间,确定最终所选择的样品;(4)将选择的样品按波速相近原则选出11组样品,编号为1#~11#,为干湿循环试验样品;(5)选取26组样品,编号为12#~37#,其中12#~22#(11组)试样开展单轴抗压强度测试,23#~37#(15组)开展变形测试。将试样烘干后进行饱和的一系列过程,称为1个“干—湿”循环。干湿循环在0次(初始岩块)、5次、10次、15次、20次、25次、30次、35次、40次、45次、50次时分别开展波速测试以观察在干湿循环状态下岩块波速的降低情况。在第50次循环扫描完毕后进行单轴压缩试验和变形试验,以获取岩石的强度劣化情况。

3.1.1 干湿循环下波速变化

通过声波波速选样,将纵向波速位于5 000~6 500 m·s⁻¹、横向波速位于4 200~6 500 m·s⁻¹的典型裂隙岩样进行干湿循环试验,记录裂隙岩样不同干湿循环次数的纵向和横向波速。从试验结果看,岩样50次干湿循环之后纵向声波波速下降率在3.83%(2#岩样)~7.63%(6#岩样),平均为5.74%;每次干湿循环后下降率为0.08%(2#岩样)~0.15%(6#岩样),

表1 ZK05 岩体典型结构面跨孔声波波速数据(单位:km·s⁻¹)
Table 1 Data on cross-hole acoustic wave velocity of typical structural plane of ZK05 rock mass (unit: km·s⁻¹)

时间	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 27.0 m	深度 30.8 m
2017.09.16	6.527	5.826	6.617	6.602	6.329	5.665	6.370	6.209
2018.03.09	5.556	5.848	6.198	6.608	6.667	4.934	5.837	5.952
2018.05.07	4.054	4.348	5.435	6.048	5.357	5.051	5.792	4.747
2018.09.26	2.206	3.488	5.382	5.660	5.357	4.451	5.245	4.870
2019.04.01	2.194	3.214	5.185	5.565	5.237	4.234	5.178	4.870
2021.09.03	2.153	3.009	4.927	5.444	5.149	4.205	5.098	4.782
2022.05.20	2.141	2.671	4.764	5.291	4.951	4.130	4.994	4.725
总下降率	67.20%	54.14%	28.01%	19.86%	21.78%	27.10%	21.60%	23.90%
年均下降率	13.44%	10.83%	5.60%	3.97%	4.36%	5.42%	4.32%	4.78%

平均为 0.11%(图 10)。岩样 50 次干湿循环之后横向声波波速下降率在 13.21%(1#岩样)~32.74%(6#岩样), 平均为 26.07%; 每次干湿循环后下降率为 0.26%(1#岩样)~0.65%(6#岩样), 平均为 0.52%(图 11)。这表明裂隙岩样在干湿循环条件下, 纵向声波波速和横向声波波速均有不同程度的下降。

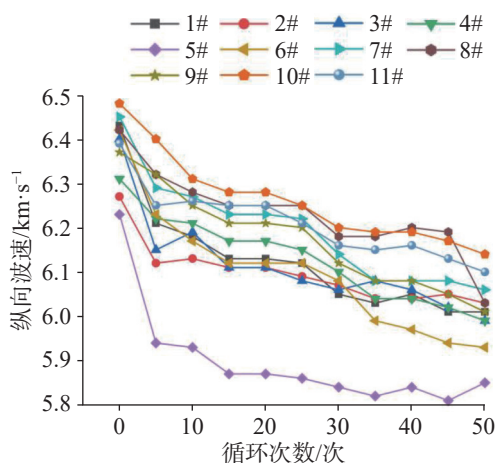


图 10 干湿循环条件下裂隙岩体纵向波速变化图

Fig. 10 Variations in longitudinal wave velocities of fractured rock mass under dry-wet cycle conditions

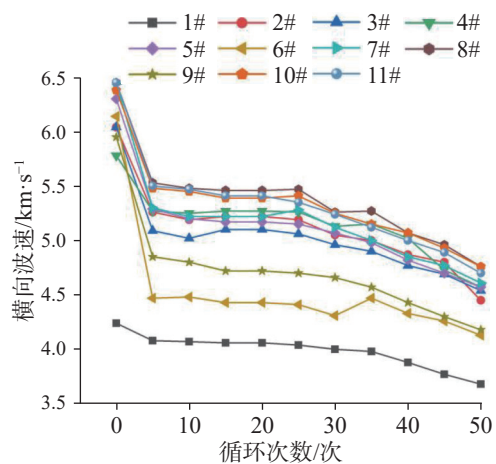


图 11 干湿循环条件下裂隙岩体横向波速变化图

Fig. 11 Variations in lateral wave velocities of fractured rock mass under dry-wet cycle conditions

3.1.2 干湿循环下强度变化

对选取的 26 组初始试样 (12#~37#), 其中 11 组 (12#~22#) 与经 50 次干湿循环后的 6 组试样 (1#~6#) 进行单轴抗压强度测试对比; 15 组初始试样 (23#~37#) 与经 50 次干湿循环后的 5 组试样 (7#~11#) 进行变形测试对比 (图 12)。经过 50 次干湿循

环后的岩样 (1#~6#) 单轴抗压强度明显小于未干湿循环裂隙岩样 (12#~22#)。裂隙岩样单轴强度平均下降值为 35.99MPa, 下降率为 47.05%, 每次循环下降率为 0.94%。50 次干湿循环后裂隙岩样的泊松比明显大于未干湿循环裂隙岩样, 平均增大值为 0.039, 增大率为 23.89%。50 次干湿循环后裂隙岩样 (7#~11#) 的变形模量明显小于未干湿循环裂隙岩样 (23#~37#)。裂隙岩样变形模量平均下降值为 49.07×10^4 MPa, 下降率为 19.21%, 每次循环下降率为 0.38%。

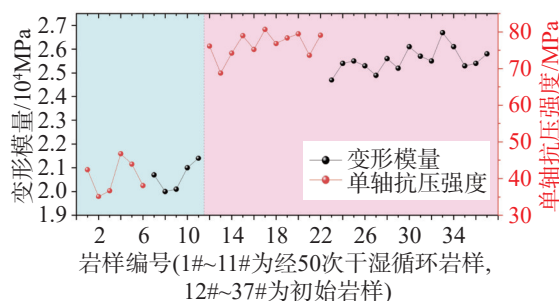


图 12 干湿循环试验前后抗压强度和变形模量对比图

Fig. 12 Comparison of compressive strength and deformation modulus before and after dry-wet cycle tests

3.2 岩石CT 扫描测试

通过上述室内外试验研究揭示了岩体在宏观尺度上长期劣化效应, 宏观力学性质往往受到微观结构的控制, 研究岩石微观劣化特征是分析消落带岩体劣化的基础^[18-21]。获取消落带原位岩样, 通过化学溶蚀和室内试验模拟岩体劣化环境, 开展基于 CT 扫描技术的岩石劣化过程中裂隙扩展演化过程探究, 进一步揭示消落带岩体质量劣化机制。

以三峡库区剪刀峰岸坡灰岩岩体作为研究对象, 制作标准圆柱体岩样 ($\phi=50$ mm, $h=100$ mm)(图 13); 通过配置草酸溶液 ($\text{pH}=5$) 来加快溶蚀作用的速率, 以模拟长期劣化水环境; 采用 nanoVoxel-3000 系列 X



图 13 试验岩样

Fig. 13 Rock sample in test

射线高精度三维显微镜(CT扫描技术)和MTS815.03型压力试验系统完成试验。通过裂隙扩展试验,得到在渗流和围压条件下,裂隙的扩张演化规律。

3.2.1 试验前后质量对比

试验结果可知,在酸化、第一次压力和第二次压力试验后,质量分别减少 0.51 g、0.36 g 和 0.08 g (图 14),说明试验前后质量呈减小趋势,尤其是酸化试验较为显著,其原因是草酸溶液中的 H^+ 与灰岩中的 CO_3^{2-} 发生水解反应,造成岩样质量下降。同时,灰岩岩样裂隙结构面填充物中含有石英颗粒及含铁物质等,溶蚀作用和氧化作用是质量减小的影响因素。在库区消落带实际环境中,地下水和地表水具有典型的化学侵蚀作用,这对应野外溶蚀/潜蚀劣化现象。在两次压力试验后,岩样质量均有减少,则可能与受压后岩样出现的局部崩解掉块有关,对应野外机械侵蚀劣化现象。

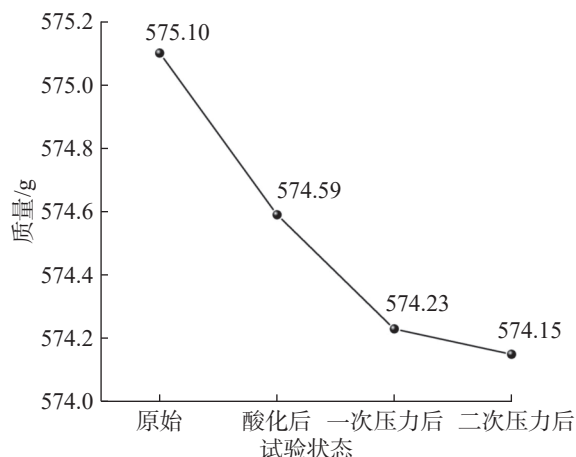


图 14 岩样试验前后质量变化折线图

Fig. 14 Line chart of mass change of C1 rock sample before and after test

3.2.2 岩样微观裂隙动态演化特征

在每次试验后,对岩样进行高精度 CT 成像,观测分析岩石微细观裂隙演化特征。由酸化试验前后裂隙形态对比图可知,溶蚀前后裂隙的大小发生了变化,在岩石表面尤为明显 (图 15),这说明岩石接触表面积较大的位置溶蚀作用更为明显。酸溶液与碳酸盐岩中含有的 $CaCO_3$ 、 $CaSO_4$ 等物质发生了化学反应,使得岩石孔隙增大。而在岩石内部孔隙体积反而减少 (图 15 中绿色标注所示),可能是反应析出物在有限空间里无法流动而填充了已有的孔隙。由

于岩样完整性较好,经过酸化试验后表面局部存在缺陷,裂隙扩展显化现象向内部深入一段距离便尖灭,岩样裂隙张开度较小、贯通性较差,无法为溶液提供进入通道,导致化学溶蚀作用大多发生在岩石表面 (图 15c, 图 15d)。

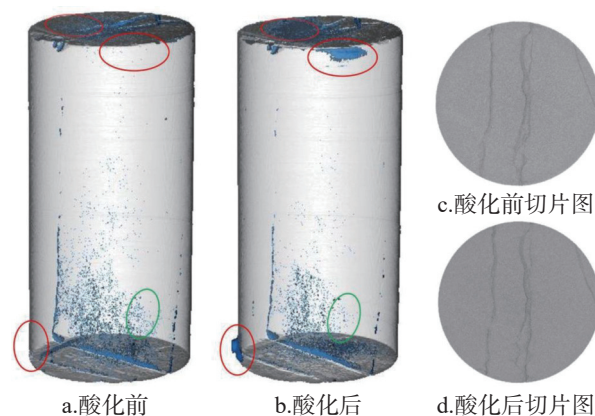


图 15 酸化试验前后裂隙形态对比图

Fig. 15 Comparison of fissure morphology before and after the acidizing test

在经过第一次压力试验后,由于压力破坏了岩石内部岩桥,导致岩石内部出现了 1 组新的裂隙 (图 16 中红色虚线所示)。在受到压力破坏过程中,裂隙逐渐出现由表及里扩展延伸,岩石内部孔隙明显增多,原有裂隙发生拉张扩展现象 (图 16c, 图 16d)。在第一次压力试验后岩石表面孔隙体积增大,可能与受压后岩样出现的局部崩解掉块有关。

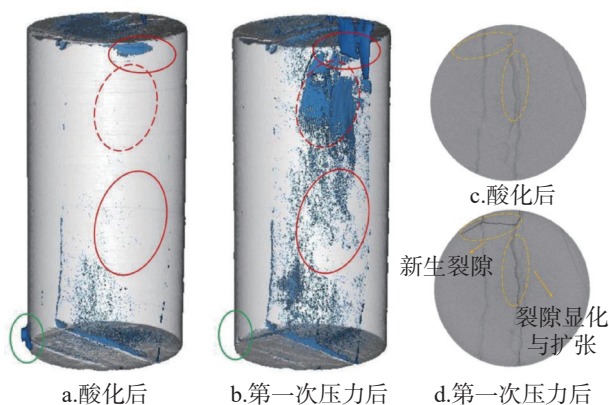


图 16 第一次压力试验前后裂隙形态对比图

Fig. 16 Comparison of fissure morphology before and after the first pressure test

二次加压后岩石内部孔隙明显增多,且分布较均匀 (图 17 红色标示),说明在持续应力作用下,裂隙结构面发生剪切型破坏,导致裂隙结构面扩展延伸,

使得裂隙显化进一步加大。同时,在应力作用过程中,随着已有裂隙的扩展作用破坏岩桥向四周扩展并逐渐贯通,形成一系列新生裂隙。而图 17 绿色标示处孔隙有减少现象,则可能是岩石受力过程中局部已有裂隙被压密所致。

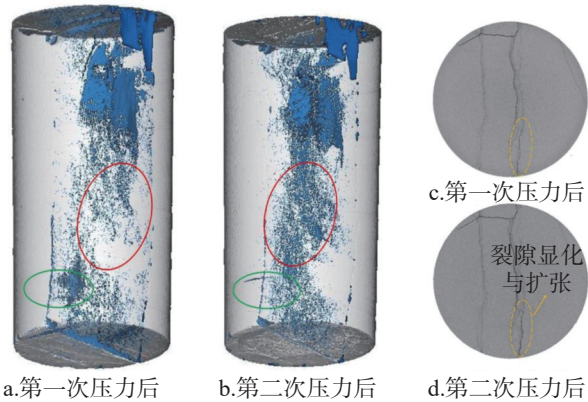


图 17 第二次压力试验前后裂隙形态对比图

Fig. 17 Comparison of fissure morphology before and after the second pressure test

3.2.3 岩样整体孔隙率

对扫描建立的岩石三维模型信息进行统计分析,得到岩样孔隙体积 (V_p) 和骨架体积 (V_r),则岩样整体孔隙率 (W_p) 为:

$$W_p = \frac{V_p}{V_p + V_r} \times 100\%$$

在酸化试验前后岩样整体孔隙率由 0.39% 上升到 0.60%(图 18),增长了 0.21%;第一次压力试验后整体孔隙率上升到 2.13%,增长了 1.53%。这说明岩石裂隙的扩展与延伸作用在应力条件下比溶蚀环境

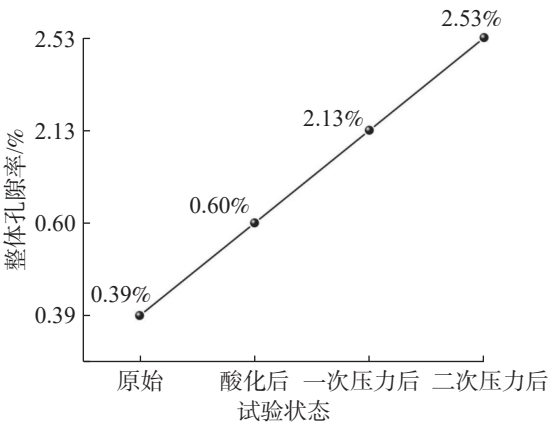


图 18 岩样试验前后整体孔隙率变化图

Fig. 18 Overall porosity variations before and after the rock sample test

更为显著。

4 讨论

通过岩体质量劣化原位试验和岩石质量室内试验结果可知,整体上非消落区岩体强度回弹值高于消落区,符合库水位变动条件下岩体劣化规律,但有些非消落区岩体强度回弹值低于消落区,其原因可能是部分测点在裂缝边缘,导致个别测试数据起伏较大。箭穿洞岩体强度回弹值变化幅度相对较大,其年均降低率是黄南背岸坡的 2.23 倍,是瞿塘峡岸坡的 1.35 倍,说明箭穿洞岸坡的劣化程度较高、劣化速率较快。结合地质调查可知,黄南背岸坡和瞿塘峡岸坡岩性主要以灰岩为主,箭穿洞岸坡岩性以三叠系大冶组泥质条带灰岩为主,黄南背岸坡和瞿塘峡岸坡岩体劣化现象以裂隙扩展与新生和溶蚀/潜蚀复合形式为主,箭穿洞岸坡岩体除此之外,还有机械侵蚀,劣化形式更为多样,泥质灰岩的水岩作用更为明显。这可能是箭穿洞岸坡强度回弹值下降率相对更大的原因。

岩体声波波速测试结果表明,岩体内部结构面与裂隙的分布对声波波速具有显著影响,结构面密集的区域,声波波速明显较低,且随着水位循环周期的增加,这些区域的波速持续下降,表明结构面的发育加速了岩体质量的劣化过程。相比之下,结构面稀疏的高波速区域则表现出较为稳定的特性,波速下降不明显。进一步分析不同深度下的声波数据变化,发现即使在波速下降率最小的深度位置,其下降幅度也远超完整岩体的平均水平,而浅部岩体的声波波速下降尤为剧烈,这直接反映了岩体在浅部更为破碎、裂隙更为发育的现状。这些数据不仅证实了结构面、裂隙等缺陷是控制岩体劣化的关键因素,还揭示了岩体劣化过程的不均一性,即不同深度、不同结构面分布条件下的岩体劣化速度和程度存在显著差异。

根据干湿循环下岩石声波波速测试结果,横向波速的下降值和下降速率明显大于纵向波速,这是由于选取的典型裂隙岩样的裂隙延伸方向多为纵向,说明在干湿循环条件下裂隙岩样的主要“劣化”部位是裂隙,并且当裂隙岩样的声波波速测试方向穿过裂隙时,可更明显地表征裂隙岩样的声波下降情况,这与现场声波波速测试结果规律具有一致性。同时,干湿循环下岩石强度下降率略低于现场回弹测试结

果,其原因可能是野外的劣化环境复杂程度高、野外测试中的岩体包含了微小裂缝,同时野外每次实际水位循环的周期比室内模拟循环周期更长^[22-26]。

通过岩石 CT 扫描测试可发现,水岩作用使岩石孔隙增多、损伤缺陷增加和完整性下降,揭示库区水流的物理冲刷侵蚀及化学溶蚀作用是消落带岩体质量劣化的重要因素。同时,岩体质量劣化过程中水流的物理冲刷侵蚀作用比化学溶蚀作用更加迅速明显。

5 结 论

(1)三峡库区消落带灰岩岸坡不同岩性和岸坡结构的岩体劣化现象有较大差异,宏观劣化现象主要有裂隙扩展与新生、溶蚀/潜蚀和机械侵蚀。岩体劣化加剧了地质灾害隐患的演化。

(2)经历库水位升降周期后,库水位变动带岩体表层强度降低明显。岩体质量劣化与裂隙结构面的分布、岩层埋深密切相关。裂隙、结构面等缺陷是岩体质量劣化的控制性因素。同时,结构面劣化并非等速的,浅表层劣化快、深层劣化较慢。

(3)每次干湿循环后岩石的波速值、单轴抗压强度、变形模量均有下降。化学溶蚀和单轴抗压试验后岩样质量均有所损失,且压力试验前后比酸化试验前后孔隙率变化幅度大,说明应力比溶蚀作用更易促进岩石裂隙的扩展。

参考文献

- [1] 吴碧辉,李华秀,姚明伙.巫山县龚家方至独龙一带斜坡变形破坏机制[J].地下空间与工程学报,2010,6(S2):1656-1659.
WU Bihui, LI Huaxiu, YAO Miaohuo. Deformation and failure mechanism of slope in area from Gongjiafang to Dulong of Wuxia county, Chongqing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S2): 1656-1659.
- [2] 黄波林,王世昌,陈小婷,殷跃平,姜治兵.碎裂岩体失稳产生涌浪原型物理相似试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1417-1425.
HUANG Bolin, WANG Shichang, CHEN Xiaoting, YIN Yueping, JIANAG Zhibing. Prototype physical similarity experimental study of impulsive wave generated by cataclastic rock-mass failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1417-1425.
- [3] 黄波林,殷跃平,刘广宁,陈小婷,王世昌.三峡库区龚家方崩滑体涌浪物理原型试验与数值模拟对比研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2677-2684.
HUANG Bolin, YIN Yueping, LIU Guangning, CHEN Xiaoting
- WANG Shichang. Comparison study of physical prototype model test and numerical simulation of Gongjiafang landslide in three gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2677-2684.
- [4] 闫国强.三峡库区典型灰岩顺层岸坡劣化演变与失稳机理研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2023
YAN Guoqiang. Study on deterioration evolution and instability mechanism of typical limestone bedding bank slope in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2023.
- [5] 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(08):1635-1643.
YIN Kunlong, ZHOU Chunmei, CHAI Bo. Failure mechanism and criterion of counter-tilt rock slopes at Wuxia gorge section in Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(08): 1635-1643.
- [6] 殷跃平,王鲁琦,赵鹏,张枝华,黄波林,王雪冰.三峡库区高陡岸坡溃屈失稳机理及防治研究[J].水利学报,2022,53(4):379-391.
YIN Yueping, WANG Luqi, ZHAO Peng, ZHANG Zhihua, HUANG Bolin, WANG Xuebing. Crashed failure mechanism & prevention of fractured high-steep slope in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(4): 379-391.
- [7] 黄波林,殷跃平,张枝华,王健,秦臻,闫国强.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, WANG Jian, QIN Zhen, YAN Guoqiang. 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.
- [8] 夏万春,王林峰,张继旭,冉榧,杨柳,钟宜宏.酸环境干湿循环作用下泥灰岩损伤劣化分析[J].工程地质学报,2022,30(6):2006-2015.
XIA Wanchun, WANG Linfeng, ZHANG Jixu, RAN Jian, YANG Liu, ZHONG Yihong. Damage and deterioration analysis of marl under dry wet cycle in acid environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 2006-2015.
- [9] 殷跃平,黄波林,李滨,张枝华,闫国强,郑嘉豪.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, ZHANG Zhihua, YAN Guoqiang, ZHENG Jiahao. Research on the deterioration index of karst rock mass in the fluctuating water level zone of Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(8): 2590-2600.
- [10] DOCHEZ Sandra, LAOUAFA Farid, FRANCK Christian, GUE-DON Sylvine, MARTINEAU Francois, D'AMATO Julie, SAIN-

- TENOY Albane. Multi-scale analysis of water alteration on the rock slope stability framework[J]. *Acta Geophysica*, 2014, 62(5): 1025-1048.
- [11] CHEN Chiwei, YANG Haiqing, SONG Kanglei, LIANG Dan, ZHANG Yuhan, NI Jianghua. Dissolution feature differences of carbonate rock within hydro-fluctuation belt located in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Engineering Geology*, 2023, 327: 107362.
- [12] LIANG Wei, LI Ke, LUO Jiashun, XU Mengtang, FENG Fushou. Microscopic Response of Limestone Physical Deterioration under Water-Rock Alternation in the Acidic Environment[J]. *Geofluids*, 2022(9): 7486878.
- [13] GAO Xuecheng, WANG Luqi, XIANG Yuzhou, JIANG Xiang, YANG Yang, RAN Bo. Study on the deterioration trend of the rock mass on the reservoir banks under dry-wet cycles[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 1-10.
- [14] WANG Luqi, YIN Yueping, HUANG Bolin, DAI Zhenwei. Damage evolution and stability analysis of the Jianchuandong Dangerous Rock Mass in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105439.
- [15] 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 李建林, 骆祚森, 邓华锋. 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, LI Jianlin, LUO Zuosen, DENG Huafeng. Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1851-1858.
- [16] XU Bin, LIU Xinrong, ZHOU Xiaohan, GUO Xueyan, WANG Yan, HUANG Junhui, LIU Jun, XIONG Fei, ZHANG Jilu. Investigation on the dynamic cumulative damage mechanism and stability of bedding rock slope under the deterioration of rock mass in the hydro-fluctuation belt[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(8): 332.
- [17] 殷跃平, 闫国强, 黄波林, 代贞伟, 秦臻. 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, DAI Zhenwei, QIN Zhen. 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.
- [18] 白林丰. 基于 DFN 的猴儿岩灰岩岸坡岩体劣化空间预测与破坏机理研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2023.
- BAI Linfeng. Research on spatial prediction and failure mechanism of rock mass deterioration in Hou'er limestone slope based on DFN[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.
- [19] 刘新荣, 郭雪岩, 许彬, 周小涵, 曾夕, 谢应坤, 王樊. 含消落带劣化岩体的危岩边坡动力累积损伤机制研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(3): 637-648.
- LIU Xinrong, GUO Xueyan, XU Bin, ZHOU Xiaohan, ZENG Xi, XIE Yingkun, WANG Yan. Investigation on dynamic cumulative damage mechanism of the dangerous rock slope including deteriorated rock mass in hydro-fluctuation belt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(3): 637-648.
- [20] 唐红梅, 周福川, 宋刚, 杨健, 毛柯洁, 苗梦琦. 酸蚀水致灰岩动态弱化机制及试验方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(6): 1312-1324.
- TANG Hongmei, ZHOU Fuchuan, SONG Gang, YANG Jian, MAO Kejie, MIAO Mengqi. Experimental study on the dynamic acid water weakening mechanism of limestone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(6): 1312-1324.
- [21] 杨何, 汤明高, 许强, 霍宇翔, 向育才, 邓文锋. 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, HUO Yuxiang, XIANG Yucai, DENG Wenfeng. 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*, 2020, 51(11): 1360-1371.
- [22] 闫国强, 黄波林, 殷跃平, 胡雷, 陈云飞. 三峡库区岸坡消落带岩体劣化分形特征与演化预测研究[J]. *地质学报*, 2023, 97(7): 2399-2407.
- YAN Guoqiang, HUANG Bolin, YIN Yueping, HU Lei, CHEN Yunfei. Research on fractal characteristics and evolution prediction of rock mass deteriorating in bank slope drawdown zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(7): 2399-2407.
- [23] 陈小婷, 黄波林, 李滨, 张鹏, 秦臻. 三峡水库碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(4): 567-576.
- CHEN Xiaoting, HUANG Bolin, LI Bin, ZHANG Peng, QIN Zhen. Karstification and slope failure in carbonate areas of Three Gorges Reservoir[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 567-576.
- [24] WU Qiong, LIU Yuxin, TANG Huiming, KANG Jintao, WANG Liangqing, LI Changdong, WANG Di, LIU Zhiqi. Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Engineering Geology*, 2023, 314: 107013.
- [25] YAO Wenmin, LI Changdong, KE Qirui, FAN Yibo, LI Bingchen, ZHAN Hongbin, CRISS Robert E. Multi-scale deterioration of physical and mechanical properties of argillaceous siltstone under cyclic wetting-drying of Yangtze River water[J]. *Engineering Geology*, 2023, 312: 106925.
- [26] MA Tengfei, LIU Huihui, ZOU Quanle, KONG Fanjie, RAN Qican, WANG Pingting. Damage evolution characteristics and deterioration mechanism of mechanical properties of sandstone subjected to drying-wetting cycles[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 4591-4605.

Degradation characteristics of limestone from the Qutang Gorge to Wuxia Gorge of the Three Gorges Reservoir area

ZHANG Zhongyuan¹, TAN Lei², ZHAO Peng¹, YU Shu¹, BAI Linfeng^{1,3}, ZENG Deqiang¹, JIN Peng¹

(1. Chongqing 208 Geological Environment Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400711, China; 2. Chongqing Geological Disaster Prevention and Control Center, Chongqing 401120, China; 3. College of Civil Engineering&Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract The study area encompasses the section of the Three Gorges Reservoir area from Qutang Gorge to Wuxia Gorge, stretching from Baidicheng in Fengjie county, Chongqing City in the west to Guandukou of Badong county in the east. The lithology of this area is predominantly composed of Permian and Triassic carbonate rocks. Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir in 2008, multiple geological disasters have occurred in the carbonate rock slopes. The periodic changes in reservoir water levels have exacerbated rock mass degradation, leading to the development of new geological hazards that pose a significant threat to the geological safety of the reservoir area. Rock mass degradation is primarily driven by water level fluctuations, dissolution, and stress changes, involving complex interactions of physical erosion and chemical dissolution. Existing research has focused on obtaining physical and mechanical parameters of rocks, with limited attention to the original structures, structural degradation, microscopic mechanisms, and prolonged evolution patterns. These geological factors are crucial in influencing the development of geological hazards in the Three Gorges Reservoir area. This study focused on limestone in the study area to reveal the patterns and mechanisms of rock mass degradation, aiming to provide technical support for the prevention and control of rock slope disasters in the Three Gorges Reservoir area. This study also employed in-situ testing methods such as rebound strength of rock masses and acoustic wave velocity, along with laboratory experiments including dry-wet cycling and CT scanning, to analyze the degradation of rock mass (rock) quality, changes in strength, and microscopic degradation patterns.

The results show, (1) After 13 cycles of reservoir water level fluctuations (2008–2021), the rebound strength of rock mass surfaces in zones of water level fluctuations decreased by 11.15%–24.81%, with an annual average reduction rate of 1.01%–2.26%. (2) Acoustic wave velocity and borehole television images reveal that the rock mass is more fractured near the surface, with densely developed fissures. Overall, the shallower the rock mass is buried, the higher the rate of decrease in acoustic wave. (3) After each dry-wet cycle, the longitudinal and transverse acoustic wave velocities of the rock samples decreased by 0.08%–0.15% and 0.26%–0.65%, respectively. The uniaxial compressive strength decreased by approximately 0.94%, and the deformation modulus decreased by about 0.38%. (4) After 50 dry-wet cycles, the average reduction rates of longitudinal and transverse wave velocities were 5.74% and 0.52%, respectively, while the uniaxial compressive strength and deformation modulus decreased by 0.94% and 0.38%, respectively. (5) CT scans of the rocks showed that under water-rock interaction, the internal pores of the rock mass continuously increased, and the integrity of the rock mass declined significantly, indicating obvious degradation.

Conclusions are drawn as follows, (1) The degradation of rock mass quality is closely related to the distribution of fissure surfaces and the depths of the rock layers. Defects, such as fissure surfaces, are controlling factors for the degradation of rock mass quality. This degradation is not uniform; it occurs more rapidly near the surface and at a slower rate at greater depths. (2) Physical scouring erosion and chemical dissolution, both caused by reservoir water flow, are significant factors in the degradation of rock mass quality in the drawdown zone. Physical scouring erosion occurs more rapidly and is more pronounced than chemical dissolution.

Key words fluctuation zone, karst bank slope, water-rock interaction, deterioration of rock mass, dry and wet cycle test, the Three Gorges Reservoir area

(编辑 黄晨晖)