

DOI: 10.11779/CJGE20211510

水-岩和重复剪切次序作用下节理岩体损伤效应及模型

邓华锋^{1,2}, 王文东^{1,2}, 李建林^{1,2}, 冯云杰^{1,2}, 李冠野^{1,2}, 齐豫^{1,2}, 陈兴周³

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 水库蓄水运行过程中, 部分库岸边坡出现了明显的台阶式变形趋势, 消落带岩体处于库水位周期性升降变化和阶段性重复剪切次序作用下。基于此, 设计进行了节理岩体的水-岩作用试验, 并在不同水-岩作用周期进行重复剪切试验, 研究结果显示: ①在水-岩和重复剪切次序作用下, 节理岩体的抗剪强度、剪切刚度、节理面粗糙度系数均呈现先陡后缓的劣化趋势, 比较而言, 前4个作用周期的劣化趋势尤为明显, 而且法向应力越大, 劣化趋势越明显; ②由重复剪切导致的抗剪强度劣化趋势在初始状态时尤为明显, 之后随水-岩作用周期的增加迅速减弱, 由水-岩作用导致的抗剪强度劣化趋势在前4个作用周期较为明显, 随后趋于平缓; ③将节理面岩壁损伤区域分为水-岩作用损伤区域、水-岩和重复剪切次序作用损伤区域, 对JRC-JCS抗剪强度模型进行了修正, 验证分析表明修正后的模型计算值与试验结果吻合较好。相关研究方法和成果可为库岸边坡消落带节理岩体性能劣化分析提供较好参考。

关键词: 消落带; 水-岩作用; 重复剪切; 次序作用; 损伤

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)03-0503-09

作者简介: 邓华锋(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

Damage effects and model for jointed rock mass under water-rock interaction and repeated shear sequence

DENG Huafeng^{1,2}, WANG Wendong^{1,2}, LI Jianlin^{1,2}, FENG Yunjie^{1,2}, LI Guanye^{1,2}, QI Yu^{1,2},
CHEN Xingzhou³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. College of

Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Architecture and Civil

Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the process of reservoir impoundment, some bank slopes show an obvious step-type deformation trend, and the rock mass in the water-level-fluctuation zone is under the action of periodical fluctuation of reservoir water level and periodic repeated shear sequence. Based on this, the water-rock interaction tests on the jointed rock mass are designed, and the repeated shear tests are carried out in different water-rock interaction periods. The results show that: (1) Under the effects of water-rock and repeated shear sequence interaction, the shear mechanical properties of jointed rock mass deteriorate obviously, while the shear strength, shear stiffness and JRC exhibit the degradation trend of “first steep then slow”. In comparison, the former six cycles of degradation trend are obvious, and the greater the normal stress, the more obvious the degradation trend. (2) The deterioration trend of the shear strength caused by the repeated shear is particularly obvious in the initial state, and then decreases rapidly with the increase of the water-rock interaction cycle. The deterioration trend of the shear strength caused by the water-rock interaction is obvious in the first six cycles, and then tends to be flat. (3) The damage area of joint surface wall is divided into the water-rock damage area, water-rock and repeated shear sequence damage area. The JRC-JCS shear strength model is modified, and the verification analysis shows that the calculated values by the modified model are in good agreement with the test results. The relevant research methods and results may provide a good reference for the performance degradation analysis of jointed rock mass in the water-level-fluctuation zone of reservoir bank slopes.

Key words: hydro-fluctuation belt; water-rock interaction; repeated shear; sequence interaction; damage

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2034203, U1965107); 中国水利水电科学研究院水利部水工程建设与安全重点实验室开放研究基金项目(IWHR-ENGI-202001)

收稿日期: 2021-12-20

0 引言

三峡库区蓄水运行以来,库岸边坡的变形稳定一直是相关领域关注的焦点,大量的研究表明,库水位周期性升降变化作用下消落带岩土体的损伤劣化,是导致岸坡变形失稳的主要因素之一^[1-3]。很多学者采用不同的方法模拟了消落带岩体的水-岩作用过程。刘新荣等^[4-5]通过浸泡-风干循环试验模拟了消落带的水位涨落情况,得到了水-岩作用下砂岩的抗剪强度、抗压强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角等参数的劣化规律;姚华彦等^[6]、崔凯等^[7]、周世良等^[8]分别对红砂岩、板岩、泥岩等岩石进行了一系列的水-岩作用试验,获得了各类岩石在水-岩作用下的损伤劣化效应;邓华锋等^[9]模拟了消落带岩体的“浸泡-风干”循环和水压力升降变化过程,发现水压力升降变化加剧了消落带岩体的损伤效应。在水-岩作用试验研究基础上,傅晏^[10]、王永新^[11]通过数值模拟方法分析了库岸边坡岩土体损伤劣化对其稳定性的影响规律。综合这些研究成果发现,水-岩作用下库岸边坡消落带岩体损伤劣化效应显著,而且对库岸边坡长期变形稳定存在明显的影响。

节理、裂隙是控制岩质岸坡变形稳定的关键部位,也是水-岩作用影响的重要区域,水库运行过程中节理、裂隙的性能劣化是直接影响库岸边坡的变形稳定^[12]。相关节理岩体水-岩作用试验研究也逐渐开展,段玲玲等^[13]、姚强岭等^[14]、窦子豪等^[15]和黄智刚等^[16]研究分析了水-岩作用下含节理、裂隙岩体的渗透系数、声发射特性、抗剪强度、抗压强度等物理力学参数劣化规律。从这些研究成果可以看出,在长期水-岩作用下,岩体结构面的物理力学性能劣化趋势也非常明显。

水库蓄水运行以后,库岸边坡要受到库水位周期性升降变化、降雨、水库地震等复杂因素的作用,监测资料显示,较多库岸边坡变形呈现出明显的台阶式的发展特征^[17],典型岸坡的变形监测曲线如图1所示。消落带是库岸边坡变形稳定敏感地带,长期的水-岩作用导致了岸坡消落带岩体的损伤劣化,库水位的升降变化、降雨、水库地震等因素导致岸坡部分区域的岩体顺结构面出现阶段性、多期次的剪切滑移。也即,库岸边坡消落带岩体的损伤劣化受长期水-岩作用和阶段性重复剪切共同影响。综合目前库岸边坡消落带水-岩作用研究来看,主要侧重于分析水-岩作用对消落带岩体的损伤劣化效应,很少考虑水-岩作用和阶段性重复剪切滑移对结构面的累积损伤效应。

基于此,在前期库岸边坡消落带水-岩作用试验研究基础上,以三峡库区典型岸坡消落带节理岩体为研究对象,进行模拟库水位周期性升降变化的水-岩作用

试验,在不同试验周期进行重复剪切试验,模拟水库运行过程中的多期次剪切滑移过程,分析库岸边坡消落带节理岩体在水-岩和重复剪切次序作用下的累积损伤演化规律。

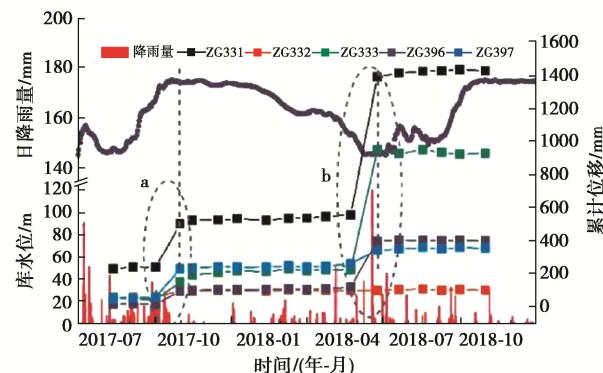


图 1 典型库岸边坡随时间的累积位移变化^[17]

Fig. 1 Cumulative displacements of typical reservoir bank slope with time

1 试验方案

1.1 节理岩样制备

试验用砂岩取自三峡库区典型库岸边坡,岩石为侏罗系石英砂岩。由于现场采集含天然节理的岩样难度较大,试验过程中,现场采集层理显著的完整岩块,室内进行切割和打磨,制备成边长为 100 mm 的立方块试样。参考以往的经验^[18-19],采用劈裂法顺层理弱面将完整岩样劈裂成如图 2 所示的单节理试样,然后进行节理面的形貌特征扫描,选取 12 个节理面形貌特征较为一致的试样进行试验。

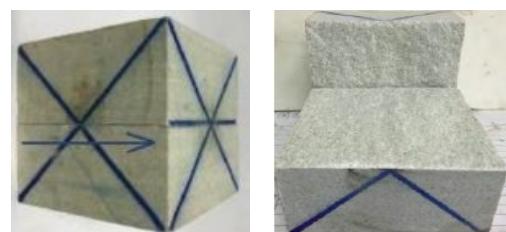


图 2 单节理试样制备

Fig. 2 Preparation of single-joint specimen

1.2 水-岩作用和重复剪切过程模拟

为了较好地模拟库岸边坡消落带的库水位周期性升降变化过程,采用自主研制的 YRK-2 岩石浸泡-风干试验仪进行试验,该设备可以实现岩样浸泡过程中库水压力升降变化和干湿循环过程的模拟。参考以往研究经验^[10, 20],首先对节理试样进行饱水处理,测试其在初始饱水状态下的抗剪性能;然后开始干湿循环水-岩作用试验,设计单次干湿循环周期为 40 d,分为 2 个阶段:①模拟低水位时的风干阶段,将试样放置

于浸泡容器内, 设置温度30℃风干10 d; ②向浸泡容器中注满从库区取回的库水, 通过调节水压力来模拟库水位上升、稳定和下降阶段, 设计的最大浸泡压力为0.3 MPa, 每个阶段持续10 d, 此为一个干湿循环过程。而后, 重复上述①、②步骤, 设计的干湿循环次数为10次。

为了研究消落带节理岩体在长期水-岩作用和阶段性剪切作用下的累积损伤演化规律, 分别在初始饱水状态及第1, 2, 4, 6, 8, 10次浸泡结束后, 对节理试样进行重复剪切试验。考虑1.0, 1.5, 2.0和2.5 MPa等4种法向应力, 每种法向应力3个试样。根据以往经验^[21-22], 节理试样经过3次左右直剪试验后, 其抗剪强度趋于稳定, 因此, 本文设计进行了4次重复剪切试验, 保证试样在各周期重复剪切作用下抗剪强度趋于稳定。为了获得节理面形貌特征变化规律, 在每次剪切前后使用ST500三维非接触式表面轮廓仪对节理面进行扫描, 并分析提取节理面微观形貌参数。

2 水-岩和重复剪切次序作用下节理岩体抗剪性能劣化规律分析

重复剪切作用下典型节理岩体剪切应力-剪切位移曲线如图3所示, 可以看出, 曲线没有明显峰值, 总体可分为弹性阶段、屈服阶段、塑性硬化或者流动阶段。随剪切次数的增加, 曲线整体下移, 抗剪强度在3次剪切后逐渐趋于稳定, 这与以往重复剪切试验得到的规律是一致的^[21-22], 主要是由于在重复剪切作用下, 节理面上的微凸起和凹陷部分逐渐发生切齿、摩擦和填充, 节理面的粗糙度逐渐降低并趋于稳定, 对应节理面的抗剪强度也逐渐趋于稳定。

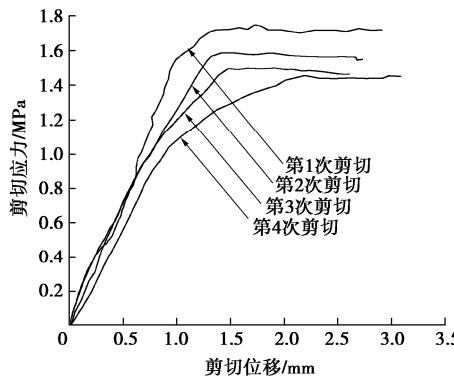


图3 典型节理试样剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 3 Shear stress-shear displacement curves of typical samples

绘制水-岩和重复剪切次序作用下的剪切位移-剪切应力曲线如图4所示(选择初始状态及第1, 6, 10期曲线)。参考以往研究经验^[21-22], 在统计抗剪强度时, 剪切应力-剪切位移曲线中有峰值时取峰值强度作

为抗剪强度, 无明显峰值时, 取曲线稳定阶段的值作为抗剪强度, 各周期节理岩样的抗剪强度如图5所示。

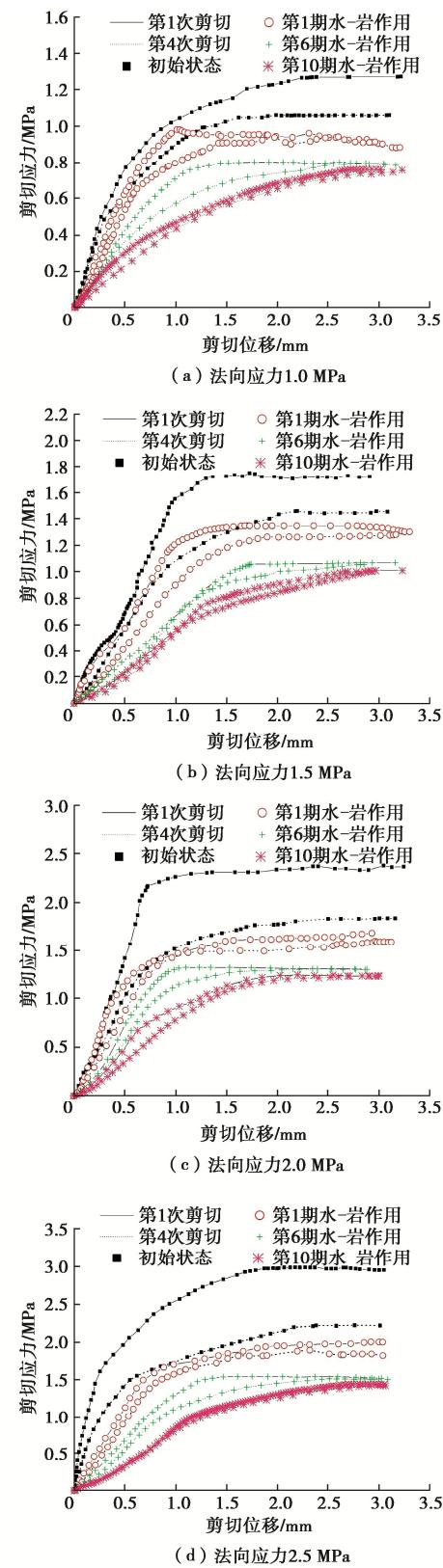


图4 水-岩和重复剪切次序作用下的剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 4 Shear displacement-shear stress curves under water-rock interaction and repeated shear sequence

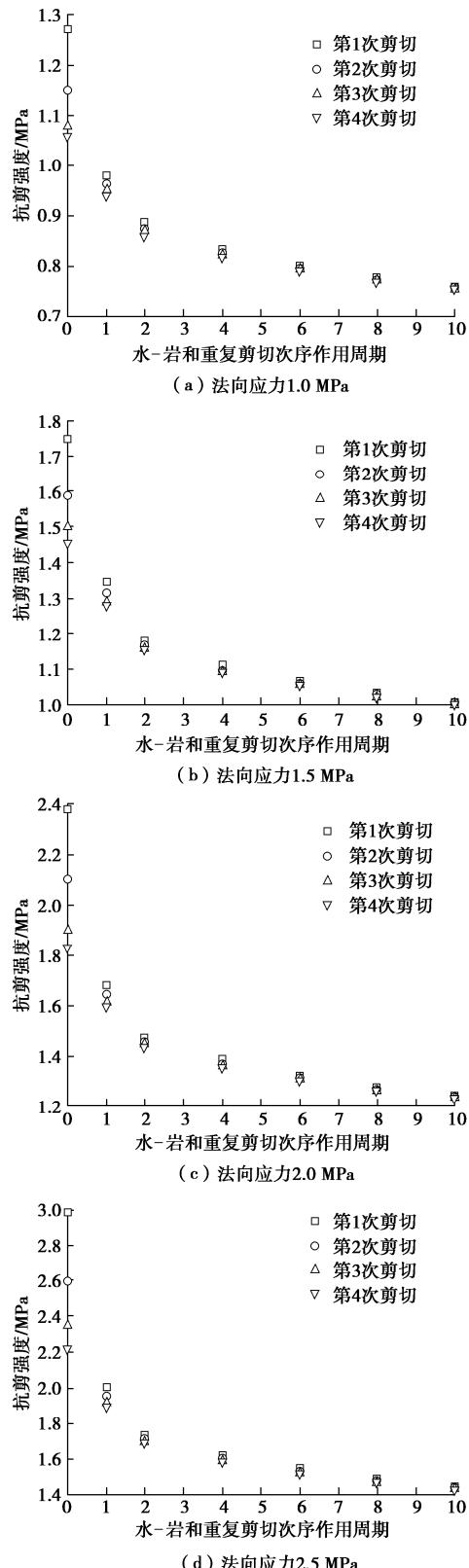


图 5 水-岩和重复剪切次序作用下节理岩体抗剪强度劣化图

Fig. 5 Shear strength deterioration of jointed rock mass under water-rock and repeated shear sequence

综合图 4, 5 可以看出:

(1) 随水-岩和重复剪切次序作用周期(后文简称“周期”)的增加, 节理岩样的抗剪强度呈先陡后缓的趋势逐渐降低, 相比初始状态, 1, 2, 4, 6, 8, 10

次水-岩和重复剪切次序作用后, 不同法向应力下节理岩体的抗剪强度劣化幅度分别为 11.27%~14.73%, 18.91%~23.98%, 22.84%~28.72%, 25.36%~31.68%, 27.42%~34.07%, 28.83%~35.68%。比较而言, 前 4 个周期内, 节理岩样的抗剪强度劣化幅度较大, 6 个周期之后劣化趋势趋于平缓。

(2) 第 N 个周期内第 1 次与第 4 次剪切的抗剪强度差值(这期间只有重复剪切影响), 即该周期由重复剪切导致的节理岩样抗剪强度阶段劣化值, 具体统计如图 6 (a) 所示。初始状态下 ($N=0$), 重复剪切导致的节理岩样抗剪强度劣化幅度尤为明显, 不同法向应力下的阶段劣化幅度达到了 16.68%~25.63%, 而后, 由重复剪切导致的抗剪强度劣化趋势迅速减弱, 1, 2, 4, 6, 8, 10 周期对应的节理岩样抗剪强度阶段劣化幅度分别为 4.00%~5.45%, 2.04%~3.06%, 1.85%~2.20%, 1.04%~1.85%, 1.01%~1.66%, 0.62%~1.11%。主要是由于多次重复剪切后, 节理面的形貌特征变化趋缓, 进而使重复剪切导致的抗剪强度劣化趋势减弱。

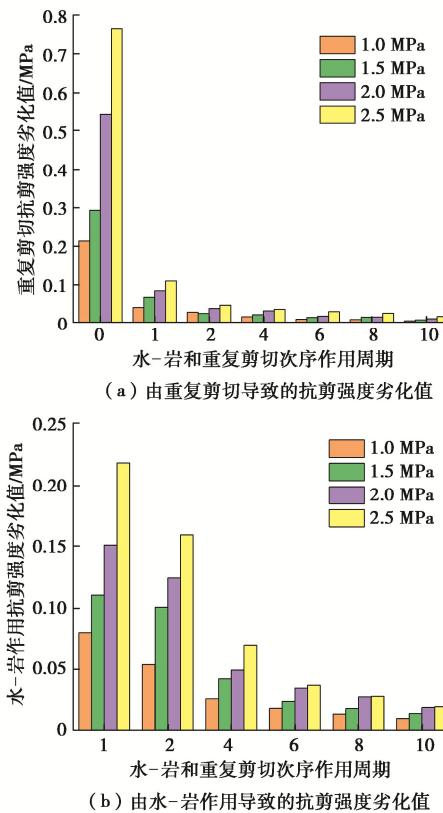


图 6 重复剪切和水-岩作用分别导致的节理岩体抗剪强度阶段

劣化柱状图

Fig. 6 Columnar diagram of shear strength deterioration of jointed rock mass caused by repeated shear and water-rock interaction

(3) 第 N 个周期第 4 次剪切与第 $N+1$ 个周期第 1 次剪切的抗剪强度差值(这期间只有水-岩作用影

响), 即第 $N+1$ 次水-岩作用导致的抗剪强度阶段劣化值, 具体统计如图 6(b) 所示。不同法向应力下第 1, 2, 4, 6, 8, 10 个周期由水-岩作用导致的抗剪强度阶段劣化幅度分别为 7.56%~9.82%, 5.73%~8.42%, 3.05%~4.17%, 2.22%~2.57%, 1.74%~2.13%, 1.33%~1.51%。比较而言, 水-岩作用在前 4 个周期导致的节理面抗剪强度劣化幅度比较明显, 而后逐渐降低, 并在 6 个周期后逐渐趋于稳定。

(4) 在水-岩作用和重复剪切作用下, 节理面的抗剪强度均存在先快后慢的劣化趋势。比较而言, 初始状态下, 重复剪切导致节理面抗剪强度劣化尤为明显, 而后劣化幅度迅速减小并趋于稳定; 水-岩作用在前 4 个周期对节理面抗剪强度影响效应更加明显。

3 水-岩和重复剪切次序作用下节理岩体损伤劣化机理和模型分析

3.1 节理面粗糙度系数 JRC 变化规律分析

为了定量分析水-岩和重复剪切次序作用对节理面粗糙度的影响, 参考以往的研究经验^[23-24], 根据扫描分析得到的节理面坡度均方根, 采用式(1)计算节理面的粗糙度系数 JRC。选取试样初始状态下的节理面粗糙度系数在 16.50~17.60 区间, 总体比较接近。

$$JRC = 32.69 + 32.98 \cdot \lg(S_{dq}) \quad (1)$$

式中: S_{dq} 为节理面的坡度均方根。

为了便于对比分析, 对各试样的粗糙度系数进行归一化处理, 如图 7 所示 (横轴上的 0' 表示初始状态第 1 次剪切前的节理面粗糙度系数, 0 表示初始状态第 4 次剪切前的节理面粗糙度系数, 而后的 JRC 值取各周期第 4 次剪切前的粗糙度系数)。

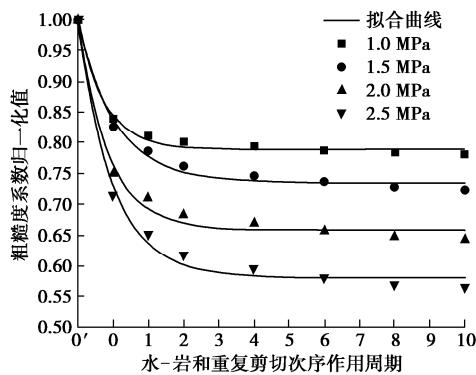


图 7 节理面归一化的粗糙度系数劣化规律曲线

Fig. 7 Curves of normalized JRC degradation law of joint surface

由图 7 可得, 不同法向应力下, 水-岩和重复剪切次序作用下节理面粗糙度 JRC 的劣化规律一致, 总体呈现“先陡后缓”的变化趋势, 即随着水-岩和重复剪切次序作用周期的增加, 节理面粗糙度 JRC 逐渐减小, 4 个周期之后, 粗糙度系数 JRC 逐渐趋于稳定, 比较而言, 法向应力越大, 劣化幅度越明显。

3.2 节理岩体抗剪强度损伤劣化模型分析

根据 Barton 等建立的 JRC-JCS 模型^[25-26], 如式(2)所示, 可以得到节理岩样抗剪强度的计算值。

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (2)$$

式中: τ 为抗剪强度; σ_n 为法向应力; JRC 为节理面粗糙度; JCS 为节理面岩壁强度; φ_b 为基本内摩擦角。

取不同周期岩样的单轴抗压强度作为节理面的岩壁强度 $JCS_{U(N)}$, 同时, 在不同周期对节理面的基本内摩擦角 $\varphi_{b(N)}$ 进行摩擦试验, $JCS_{U(N)}$ 和 $\varphi_{b(N)}$ 劣化曲线如图 8 所示。

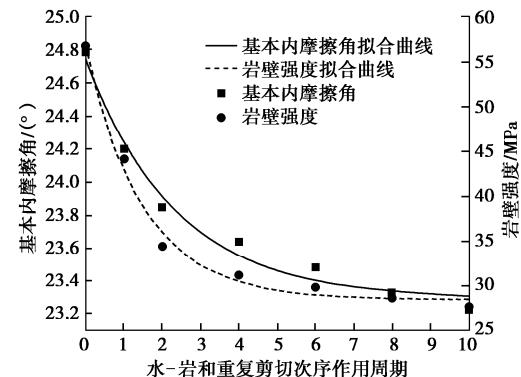
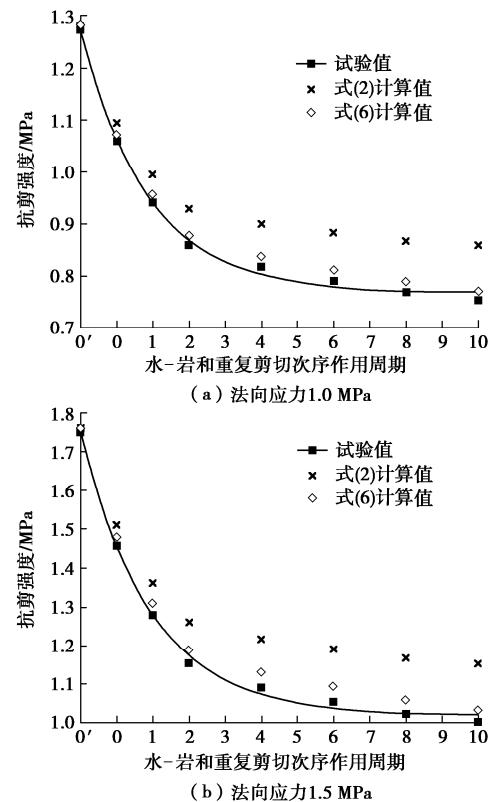


图 8 节理面岩壁强度和基本内摩擦角劣化曲线

Fig. 8 Deterioration curves of JCS and basic internal friction angle

以各周期第 4 次剪切试验结果为对象, 将抗剪强度计算值与试验值进行对比, 如图 9 所示, 其中, 0' 表示初始状态第 1 次剪切时的抗剪强度, 0 表示初始状态第 4 次剪切时的抗剪强度。



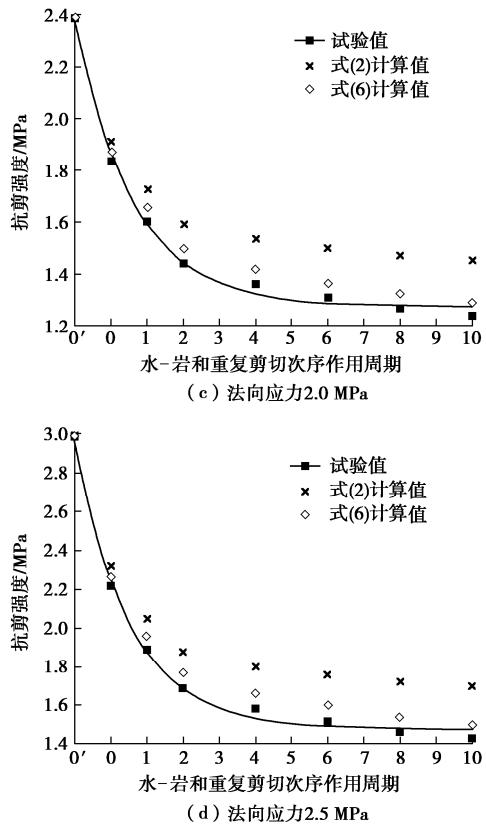


图 9 节理面抗剪强度试验值与计算值对比图

Fig. 9 Comparison between test and calculated values of shear strength of joint surface

由图 9 可以看出：

(1) 节理面抗剪强度的计算值与试验值均呈指数形式降低, 初始状态下第 1 次剪切时的抗剪强度计算值与试验值吻合较好, 第 4 次剪切时, 二者出现一定差别, 随着水-岩和重复剪切次序作用周期的增加, 抗剪强度计算值与试验值之间的差距逐渐增大, 四种法向应力下抗剪强度计算值与试验值间的误差范围从 3.28%~4.58% 逐渐增加到 13.86%~19.09%。

(2) 分析上述误差形成的主要原因是, 在水-岩作用和重复剪切作用这两种因素次序作用下, 一方面长期水-岩作用导致节理面上、下盘岩石的力学性能逐渐劣化, 这是以往水-岩作用研究中分析较多的^[6, 12-13]; 另一方面, 重复剪切过程会导致节理面两侧一定深度范围的岩壁产生损伤, 这是前述研究中没有考虑到的。即如果只是单纯考虑水-岩作用损伤对岩壁强度的影响, 忽略重复剪切对岩壁的损伤, 采用 JRC-JCS 模型计算得到节理面的抗剪强度肯定高于试验结果, 而且这个效应会累积放大。基于此, 应该把节理岩体的损伤区域分成如图 10 所示的两个区域, 在节理面两侧同时考虑水-岩作用和重复剪切的损伤效应, 这也和实际工程中常见的结构面两侧的剪切带分布是一致的。

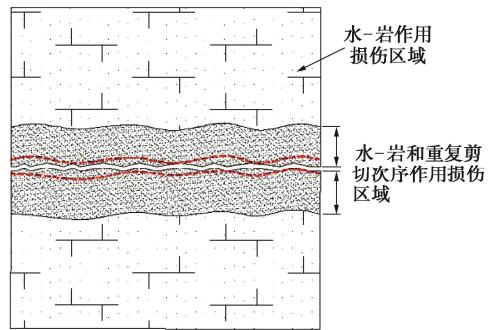


图 10 水-岩和重复剪切次序作用下结构面岩壁损伤区域

Fig. 10 Damage area of structural plane under water-rock interaction and repeated shear sequence

为了量化重复剪切作用对节理面岩壁的损伤效应, 参考以往研究经验^[27], 采用剪切刚度劣化来表征重复剪切对于节理面岩壁强度的损伤, 计算分析中取剪切应力-剪切位移曲线弹性阶段的斜率作为剪切刚度^[29]。 $K_{1(N)}$, $K_{4(N)}$ 分别为第 N 个水-岩作用周期第 1 次、4 次剪切时的剪切刚度, 则第 N 个水-岩作用周期重复剪切造成的损伤变量 $\Delta D_{(N)}$ 为

$$\Delta D_{(N)} = 1 - \frac{K_{4(N)}}{K_{1(N)}} \quad (3)$$

前述分析中, 取不同水-岩作用周期下岩样的单轴抗压强度作为节理面的岩壁强度 $JCS_{U(N)}$, 没有考虑重复剪切对岩壁强度的影响, 基于此, 引入考虑重复剪切作用损伤的节理面岩壁强度修正系数 $\delta_{(N)}$, 使得修正之后岩壁强度的损伤同时包含水-岩作用和重复剪切作用导致的损伤, 则第 N 个水-岩作用周期考虑重复剪切作用的岩壁强度修正系数为

$$\delta_{(N)} = 1 - \sum_{N=0}^{10} (\Delta D_{(N)}) = 1 - \sum_{N=0}^{10} \left(1 - \frac{K_{4(N)}}{K_{1(N)}} \right) \quad (4)$$

修正之后的节理面岩壁强度为

$$JCS_{(N)} = JCS_{U(N)} \times \delta_{(N)} \quad (5)$$

式中: $JCS_{(N)}$ 为第 N 个水-岩作用周期考虑重复剪切作用损伤修正之后的节理面岩壁强度。

结合不同周期节理试样的剪切应力-剪切位移曲线, 根据式 (4) 可以计算得到考虑重复剪切作用损伤效应的节理面岩壁强度的修正系数, 如图 11 所示。

将式 (5) 代入到式 (2) 中, 可得到考虑水-岩和重复剪切次序作用损伤效应的节理岩体抗剪强度计算公式, 如下式所示:

$$\tau_{(N)} = \sigma_n \tan \left[JRC_{(N)} \cdot \lg \left(\frac{JCS_{(N)}}{\sigma_n} \right) + \varphi_{b(N)} \right] \quad (6)$$

式中: $\tau_{(N)}$ 为第 N 个周期的节理面抗剪强度; $JRC_{(N)}$ 为第 N 个周期的节理面粗糙度; $\varphi_{b(N)}$ 为第 N 个周期的基本内摩擦角。

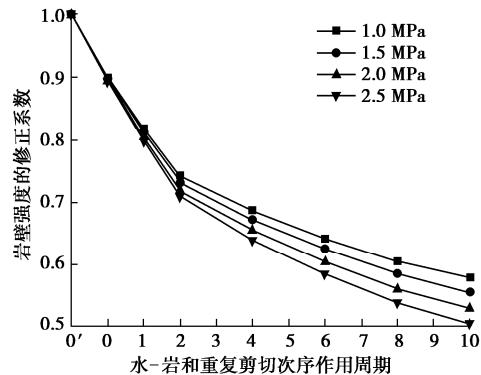


图 11 水-岩和重复剪切次序作用下修正系数劣化规律曲线
Fig. 11 Curves of correction coefficient deterioration law under water-rock and repeated shear sequence

将式(6)计算得到的节理面抗剪强度与试验结果进行对比,绘入前面的图9中,对比分析可以看出:

(1) 采用式(6)计算得到的节理面抗剪强度与试验值之间的差别明显减小,初始状态第4次剪切时,不同法向应力下修正之后的抗剪强度计算值与试验值的误差减小为1.14%~2.23%,10个周期后,抗剪强度计算值和试验值的误差范围为2.74%~5.58%,说明上述修正方法是合理的。

(2) 在考虑水-岩作用损伤效应基础上,进一步考虑重复剪切对节理面岩壁的损伤效应之后,节理面抗剪强度计算值和试验值依然存在一定的差别,这个差别逐渐稳定在5%左右。分析其主要原因是,在水-岩和重复剪切次序作用下,节理面的形貌特征发生了比较明显的变化,前述分析计算中考虑了节理面粗糙度系数降低的影响,但没有考虑形貌特征变化对节理面吻合度降低的影响,因此,导致修正之后的节理面抗剪强度依然略有偏大,但在多周期重复剪切作用下,节理面上、下盘的吻合度逐渐降低并趋于稳定,由此带来的计算结果误差也逐渐稳定在一定范围内。如何具体量化水-岩和重复剪切次序作用下节理面吻合度的变化,也是后续研究中亟待解决的问题。

4 结论及讨论

(1) 在水-岩和重复剪切次序作用下,节理面的抗剪强度、剪切刚度、粗糙度系数总体呈“先陡后缓”的劣化趋势。其中,由重复剪切导致的抗剪强度劣化趋势在初始状态时较为明显,之后随水-岩作用周期的增加迅速减弱;由水-岩作用导致的抗剪强度劣化趋势在前6个水-岩作用周期较为明显,随后趋于平缓。

(2) 考虑水-岩作用和重复剪切对节理岩体的累积损伤效应,将节理面岩壁的损伤区域分为水-岩作用损伤区域、水-岩和重复剪切次序作用损伤区域,并采用剪切刚度的劣化来表征重复剪切作用下节理面岩壁

强度的损伤效应,建立了考虑水-岩和重复剪切次序作用损伤效应的节理面JRC-JCS抗剪强度模型,验证分析表明,修正之后的抗剪强度计算值与试验值吻合较好。

(3) 在水库长期运行条件下,一方面,长期水-岩作用下会导致库岸边坡节理岩体逐渐损伤劣化,另一方面,在库水位变化、降雨、地震等因素作用下,库岸边坡可能出现持续性或者阶段性的重复剪切滑移,这个滑移过程会导致节理岩体力学性能的进一步劣化。因此,在库岸边坡节理岩体性能劣化分析中,要系统地考虑这两个方面因素的影响。

参考文献:

- [1] 李鹏, 刘建, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1865-1871. (LI Peng, LIU Jian, ZHU Jiebing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1865-1871. (in Chinese))
- [2] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 1-9. (WANG Sijing, MA Fengshan, DU Yonglian. On the rock-water interaction in reservoir areas and its geoenvironmental effect[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(3): 1-9. (in Chinese))
- [3] 徐千军, 陆杨. 干湿交替对边坡长期安全性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(增刊1): 1021-1024. (XU Qianjun, LU Yang. Effect of alternate wetting and drying on the long term stability of slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(S1): 1021-1024. (in Chinese))
- [4] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302. (LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298-1302. (in Chinese))
- [5] 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): 1543-1554. (LIU Xinrong, LI Dongliang, WANG Zhen, et al. The effect of dry-wet cycles with acidic wetting fluid on strength deterioration of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1543-1554. (in Chinese))
- [6] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影

- 响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3704-3708, 3714. (YAO Huayan, ZHANG Zhenhua, ZHU Chaohui, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3704-3708, 3714. (in Chinese))
- [7] 崔 凯, 吴国鹏, 王秀丽, 等. 不同水岩作用下板岩物理力学性质劣化实验研究[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(6): 1045-1052. (CUI Kai, WU Guopeng, WANG Xiuli, et al. Drying-wetting-saturating experiments for deterioration of physical and mechanical properties of slate[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(6): 1045-1052. (in Chinese))
- [8] 周世良, 刘小强, 尚明芳, 等. 基于水-岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 1933-1939. (ZHOU Shiliang, LIU Xiaoqiang, SHANG Mingfang, et al. Time-varying stability analysis of mudstone reservoir bank based on water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 1933-1939. (in Chinese))
- [9] 邓华锋, 支永艳, 段玲玲, 等. 水-岩作用下砂岩力学特性及微观结构损伤演化 [J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3447-3456. (DENG Huafeng, ZHI Yongyan, DUAN Lingling, et al. Mechanical properties and microstructure damage evolution of sandstone under water-rock action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3447-3456. (in Chinese))
- [10] 傅 晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (FU Yan. Study on Water-Rock Interaction with the Cyclic Drying-Wetting Effect on Rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [11] 王永新. 水-岩相互作用机理及其对库岸边坡稳定性影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006. (WANG Yongxin. Study on the Effect of Water-Rock Interaction on Stability of Reservoir Bank[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese))
- [12] 邓华锋, 段玲玲, 支永艳, 等. 干湿循环作用下节理面剪切力学特性演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(S2): 3958-3967. (DENG Huafeng, DUAN Lingling, ZHI Yongyan, et al. Evolution of shear mechanical properties of jointed surface under dry-wet cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(S2): 3958-3967. (in Chinese))
- [13] 段玲玲, 邓华锋, 齐豫, 等. 水-岩作用下单裂隙灰岩渗流特性演化规律研究 [J]. 岩土力学, 2020, **41**(11): 3671-3679, 3768. (DUAN Lingling, DENG Huafeng, QI Yu, et al. Study on the evolution of seepage characteristics of single-fractured limestone under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3671-3679, 3768. (in Chinese))
- [14] 姚强岭, 王伟男, 李学华, 等. 水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2021, **50**(3): 558-569. (YAO Qiangling, WANG Weinan, LI Xuehua, et al. Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, **50**(3): 558-569. (in Chinese))
- [15] 窦子豪, 赵志宏, 高天阳, 等. 水岩作用下花岗岩裂隙剪切力学特性演化规律 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, **61**(8): 792-798. (DOU Zihao, ZHAO Zhihong, GAO Tianyang, et al. Evolution law of water-rock interaction on the shear behavior of granite fractures[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, **61**(8): 792-798. (in Chinese))
- [16] 黄智刚, 左清军, 吴立, 等. 水岩作用下泥质板岩软化非线性机制研究 [J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 2931-2942. (HUANG Zhigang, ZUO Qingjun, WU Li, et al. Nonlinear softening mechanism of argillaceous slate under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(9): 2931-2942. (in Chinese))
- [17] 全德富, 谭飞, 苏爱军, 等. 基于多源数据的谭家湾滑坡变形机制及稳定性评价 [J]. 地质科技通报, 2021, **40**(4): 162-170. (TONG Defu, TAN Fei, SU Aijun, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Tanjiawan landslide based on multi-source data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, **40**(4): 162-170. (in Chinese))
- [18] 杨洁, 荣冠, 程龙, 等. 节理峰值抗剪强度试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(5): 884-894. (YANG Jie, RONG Guan, CHENG Long, et al. Experimental study of peak shear strength of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(5): 884-894. (in Chinese))
- [19] 唐志成, 刘泉声, 夏才初. 节理三维形貌参数的采样效应与峰值抗剪强度准则 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(7): 2524-2531. (TANG Zhicheng, LIU Quansheng, XIA Caichu. Investigation of three-dimensional roughness scale-dependency and peak shear strength criterion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(7): 2524-2531. (in Chinese))
- [20] 邓华锋, 方景成, 李建林, 等. 水-岩和循环加卸载次序作

- 用下砂岩动力特性损伤演化规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 343-351. (DENG Huafeng, FANG Jingcheng, LI Jianlin, et al. Damage evolution of dynamic characteristics of sandstone under the sequential action of water-rock interaction and cyclic loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 343-351. (in Chinese))
- [21] 夏才初, 宋英龙, 唐志成, 等. 反复直剪试验节理强度与粗糙度变化的研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3589-3594. (XIA Caichu, SONG Yinglong, TANG Zhicheng, et al. Shear strength and morphology characteristic evolution of joint surface under cyclic loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3589-3594. (in Chinese))
- [22] 邓华锋, 肖 瑶, 李建林, 等. 重复剪切作用下节理强度和形貌特征劣化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 183-188. (DENG Huafeng, XIAO Yao, LI Jianlin, et al. Degradation laws of joint strength and micro-morphology under repeated shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 183-188. (in Chinese))
- [23] 夏才初. 岩石结构面的表面形态特征研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3): 71-78. (XIA Caichu. A study on the surface
- morphological feathers of rock structural faces[J]. Journal of Engineering Geology, 1996, 4(3): 71-78. (in Chinese))
- [24] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z_2 [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(3): 243-251.
- [25] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287-332.
- [26] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1): 1-54.
- [27] 刘 杰, 张 瀚, 王瑞红, 等. 冻融循环作用下砂岩层进式损伤劣化规律研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1381-1394. (LIU Jie, ZHANG Han, WANG Ruihong, et al. Investigation of progressive damage and deterioration of sandstone under freezing-thawing cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1381-1394. (in Chinese))
- [28] 周 辉, 程广坦, 朱 勇, 等. 大理岩规则齿形结构面剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 852-860. (ZHOU Hui, CHENG Guangtan, ZHU Yong, et al. Experimental study of shear deformation characteristics of marble dentate joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 852-860. (in Chinese))

第十八届全国岩石动力学学术会议暨高端学术论坛第一号（征文）通知

中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会拟定于2023年9月在重庆市召开“第十八届全国岩石动力学学术会议暨高端学术论坛”，欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃赐稿并积极参加会议。现将有关事项通知如下：

会议主题：岩石动力学与能源开发工程

会议内容：岩石动力学专委会会议；岩石动力学学术会议。

会议专题：岩石动态力学性质与本构关系；岩体中应力波传播与衰减规律；岩石动力特性测试技术与方法；岩石动态特性数值模拟与仿真；油气开发岩石力学理论与方法；爆炸及动载破岩的理论与技术；岩爆与冲击地压的机理及防控；矿震、煤与瓦斯突出灾变机制；山区岩石工程安全与防灾减灾；其他与岩石动力学相关的研究。

会议重要时间节点：2023年1月30日发第一号通知；2023年5月31日论文全文投稿截止；2023年6月20日论文修改通知；2023年6月30日发第二号通知；2023年7月20日提交论文修改稿截止；2023年8月20日发会议报到通知。

论文电子版发送到 rockdynamics18@163.com，抄送

lxhuang@whrsm.ac.cn, 请注明岩石动力学大会征文。会议具体地址与时间详见第二号通知。

会议论文与出版：本届全国岩石动力学学术会议论文投稿截止日为2023年5月31日。论文经评审合格将择优刊登在《岩石力学与工程学报》《岩土力学》《地下空间与工程学报》等期刊，其他论文刊登在《重庆科技学院学报（自然科学版）》出版的论文集。论文格式与要求见期刊网站征稿启示。

<http://rockmech.whrsm.ac.cn/>

<http://ytlx.whrsm.ac.cn/>

<http://dxkjxb.cqu.edu.cn/>

<http://xbbjb.cqust.edu.cn/>

本次学术会议按惯例仍对优秀论文进行评奖。

主办单位：中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会；重庆科技学院。

会议联系人与方式：联系人一：赵宝云，电话：13883352946，E-mail：rockdynamics18@163.com，邮编：401331，地址：重庆市沙坪坝区大学城东路20号。

（会议组委会）