

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251333

考虑损伤劣化效应的大型地下洞室围岩 卸荷松弛特性分析

张雨霆¹, 黎 傲¹, 何 军¹, 刘鹏程²

(1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 大型地下洞室开挖施工易诱发围岩卸荷松弛, 一般在施工期采用现场测试手段查明其松弛深度, 但在勘察设计阶段尚缺乏有效手段估计松弛深度。首先分析了洞室群的围岩卸荷松弛特征, 指出应力场调整是驱动围岩宏观演化及承载力下降的直接原因, 目前多采用钻孔声波测试技术和声波变化率指标来查明围岩松弛深度, 且已建水电站地下厂房的围岩松弛深度一般在5 m以内; 然后, 建立了考虑损伤劣化效应的岩体开挖卸荷松弛量化分析方法, 并提出围岩卸荷松弛演化的量化指标和定量判据; 最后, 针对实际工程开展了围岩卸荷松弛评估, 发现所提方法和判据能够在传统塑性区指标基础上进一步量化分析围岩受到开挖扰动的程度, 实现更精准和更具针对性的洞室支护设计。

关键词: 地下洞室; 开挖卸荷; 围岩松弛; 损伤劣化; 数值分析; 安全判据

中图分类号: TV554

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0119-04

Unloading Relaxation Analysis of Surrounding Rock Mass in Large Underground Caverns Considering Damage and Deterioration Effects

ZHANG Yu-ting¹, LI Ao¹, HE Jun¹, LIU Peng-cheng²

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: The excavation construction of large underground cavern chambers is prone to induce the relaxation of the surrounding rock unloading. Generally, in-situ testing methods are used to determine the relaxation depth during the construction period, but there is a lack of effective means to estimate the relaxation depth during the survey and design stage. Firstly, the characteristics of surrounding rock unloading relaxation in cavern groups are analyzed, and it is pointed out that the adjustment of the stress field is the direct cause driving the macro-mesoscopic evolution of surrounding rock and the decline of bearing capacity. At present, borehole acoustic testing technology and acoustic change rate indicators are mostly used to identify the surrounding rock relaxation depth. The surrounding rock relaxation depth of underground powerhouse for the built hydropower station is generally within 5 m. Then, a quantitative analysis method for rock mass excavation unloading relaxation is established considering damage and deterioration effects, and quantitative indicators and criteria for the evolution of surrounding rock unloading relaxation are proposed. Finally, the assessment of surrounding rock unloading relaxation is carried out for actual projects. It is found that the proposed method and criteria can further quantitatively analyze the degree of surrounding rock disturbed by excavation on the basis of traditional plastic zone indicators, so as to realize more accurate and targeted cavern support design.

Key words: underground caverns; excavation unloading; surrounding rock relaxation; damage and deterioration; numerical analysis; safety criteria

1 引言

地下厂房洞室群作为水电站和抽水蓄能电站

的关键建筑之一, 其重要性不言而喻, 未来仍存在大量的地下厂房洞室群建设需求。地下厂房洞室群开挖卸荷导致围岩应力重分布, 进而诱发其力

收稿日期: 2025-06-29, 修回日期: 2025-08-01, 接受日期: 2025-08-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(U2340229); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2022-重大-15); 北京江河水利发展基金会水利青年科技英才项目(JHYC202305); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023316/YT)

作者简介: 张雨霆(1984-), 男, 正高级工程师, 研究方向为水工岩石力学, E-mail: magicdonkey@163.com

通讯作者: 何军(1987-), 男, 高级工程师, 研究方向为水工岩石力学, E-mail: hejun@mail.crsri.cn

学特性发生变化,尤其是在距开挖面的一定深度范围内出现承载能力下降,形成开挖松弛区。目前,主要通过施工期钻孔测试实现围岩卸荷松弛和支护优化^[1]。郭亮等^[2]采用地质雷达测试围岩松动圈范围,进而提出支护设计方案;陈庆发等^[3]通过声波测试手段查明了薄层状地层内的巷道松动范围并作为调整支护方案的依据;王克权等^[4]通过“钻孔窥视+超声波测试”方式,测试巷道的围岩松动圈,提出顶板的支护类型及参数;吴钰等^[5]通过声波测试查明了水电站主厂房的围岩松弛深度。由此可知,洞室围岩卸荷松弛范围往往通过施工期的直接测试获得,还少有在勘察设计阶段对围岩松弛范围进行合理估计,进而实现洞室围岩稳定性评价和支护优化的成果。鉴此,本文首先研究了洞室群的围岩卸荷松弛特征,以明确围岩松弛区的形成机理和表征测试方法,然后提出考虑损伤劣化效应的岩体开挖卸荷松弛量化分析方法,并建立相关指标和判据,最后开展工程案例,验证了所提方法和指标的合理性和实际应用的先进性。

2 大型地下厂房洞室群的围岩卸荷松弛特征分析

2.1 洞室围岩松弛区的形成机理

在地下洞室开挖过程中,开挖卸荷导致洞周围岩的径向应力骤降,切向应力集中,围岩从原岩的三向受力平衡转变为双向或单向受力状态。在洞周二次应力场的形成过程中,围岩经历了从三向受压到双/单向受拉/压的力学响应过程,显著影响岩体结构和稳定状态。在细观层面表现为岩体内裂隙的萌生和扩展,在宏观层面表现为裂缝的张开和贯通,导致围岩承载能力下降,形成卸荷松弛区。此时,围岩模量较原岩状态时下降,表现出应变软化特性。因此,评估围岩卸荷松弛范围并进行加固,是贯穿于洞室施工期的一项重要工作。

2.2 工程岩体卸荷松弛的表征及测试方法

围岩发生卸荷松弛将直接影响岩体的承载能力,实际工程多通过钻孔方法实现围岩松弛范围的测试。利用岩体钻孔,采用以下 4 项指标表征围岩松弛范围:①钻孔声波波速。即利用钻孔声波波速沿深度分布曲线形态的变形特征来判别岩体的卸荷松弛程度,将波速曲线的陡降(突变)段或平均波速值低于未扰动岩体波速值一定比例(10%~20%)的区间作为围岩卸荷松弛区^[6-7];②

图像,观察到孔内岩壁出现密集分布的新生裂缝,与围岩松弛区形成时在宏观层面发生的裂缝张开和贯通机理一致,因此新生裂缝的最大深度,即可判定为工程岩体的松弛深度;③围岩变形区间。利用钻孔布置多点位移计,监测开挖引起的不同深度围岩变形分布,将发生显著变形的测点区间作为围岩松弛的大致范围;④围岩渗透系数。未卸荷区域的原始岩体结构相对完整,渗透系数通常较小,而卸荷松弛区将新生裂缝或使原有裂隙张开、扩展,导致岩体孔隙率增大、裂隙连通性增强,促使渗透系数显著增大,进而改变岩体的渗透特性,且渗透性随深度的变化规律与卸荷影响范围存在直接关联,故可作为卸荷松弛范围的判断依据。一般通过钻孔压水试验获得渗透系数随深度的变化规律,并将渗透系数突变段(一般比原岩增大 10 倍及以上)作为间接判定卸荷松弛深度的依据。

在表征岩体卸荷松弛的指标中,钻孔声波是最常采用的测试手段,相关规范也针对该指标对岩体的卸荷松弛程度采用了更加量化的判据。如《水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范》(SL4-2020)^[7]利用开挖爆破前后声波变化率 η 作为判据,计算方法为:

$$\eta = (1 - V_{p1}/V_{p0}) \times 100\% \quad (1)$$

式中, V_{p0} 、 V_{p1} 分别为开挖爆破前后的波速。

规定当声波变化率 $\eta > 15\%$ 时,岩体破坏开挖质量较差; $10\% < \eta < 15\%$ 时,岩体轻微破坏。以此为判据,当 $\eta > 15\%$ 时,岩体质量较差,属强卸荷松弛区; $10\% < \eta < 15\%$ 时,岩体破坏轻微,属弱松弛区(图 1)。

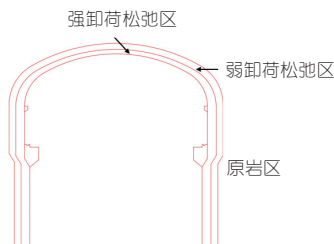


图 1 地下厂房围岩卸荷松弛区

Fig. 1 Relaxation zone of underground powerhouse

2.3 大型地下洞室的围岩松弛范围实测数据分析

对我国几座代表性水电站的大型地下厂房洞室群在施工期的围岩松弛范围的实测结果进行统计(表 1),其中:①多采用钻孔声波测试方法获得围岩松弛深度,表明该方法是测试围岩松弛的主要手段;②埋深总体在 300~500 m 之间,主厂房开挖规模接近,以玄武岩、花岗岩、灰岩等岩性为主,均为常见中硬岩;③现场实测的围岩松弛深度

一般在 3~4 m 以内,局部受断层破碎带或软弱岩层影响,深度可超过 5 m。对于多洞室交汇区域,围岩受多向卸荷影响显著,松弛深度会增加,需局部加强支护。综上所述,目前已建工程的洞室开挖规模较大,由于地下厂房尺寸接近,所处地层多为中硬岩,故围岩松弛深度基本接近,一般在 5 m 内。该数据可作为围岩松弛深度分析时,估计卸荷诱发围岩损伤劣化程度的定量依据。

表 1 典型水电站大型地下厂房洞室群的围岩松弛区深度

Tab. 1 Surrounding rockmass relaxation zone of underground cavern at typical projects

工程名称	洞室埋深/m	岩性	松弛区深度
溪洛渡	340~480	玄武岩	在 3 m 以内
大岗山	390~520	花岗岩	在 5.2 m 以内
白鹤滩	260~330	玄武岩	在 4.8 m 以内
乌东德	160~540	灰岩、大理岩	在 3.5 m 以内
官地	200~420	玄武岩	在 3.3 m 以内

3 考虑损伤劣化效应的岩体开挖卸荷松弛量化分析方法

3.1 基本思路

采用钻孔声波方法测试时,声波在传播过程中遇到这些结构面时将发生绕射、反射和折射等物理效应,导致破碎岩体或裂隙发育区域的声波速度降低、波形畸变以及频谱特性改变。这种变化在本质上反映了岩体内部结构完整性的变化,即岩体节理裂隙越发育围岩破碎程度就越高,声波的高频能量衰减就越显著,表现为波速量值降低。因此,可根据从岩体表层到深部的波速值分布规律,实现围岩卸荷松弛深度的量化判断,建立基于损伤劣化概念的围岩卸荷松弛深度量化分析方法。

3.2 围岩损伤及其劣化过程的表征

材料由微裂纹萌生、扩展等不可逆变化引起的宏观力学性能的劣化现象,称为损伤。该概念的内涵与围岩松弛区形成时的岩体结构演化特征具有较好的一致性,因此现有研究多采用损伤概念来描述开挖卸荷引起的围岩松弛弱化和承载力降低,即:

$$E_1 = (1 - D)E_0 \tag{2}$$

式中, E_0 、 E_1 分别为开挖前、后模量; D 为描述损伤劣化程度的损伤系数。

FRANTZISKONIS G 等^[8]研究表明,岩石等脆性材料在弹性变形阶段不会引发损伤,结构损伤的本质是材料发生塑性变形后的局部能量耗

散,且随着塑性应变累积,损伤区应力和力学参数将发生渐进式衰减,损伤程度与塑性应变成正相关关系,损伤演化方程为:

$$D = 1 - e^{-Re_D} \tag{3}$$

其中
$$e_D = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p}$$
 式中, R 为损伤常数,与围岩岩性及赋存条件相关; $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变偏张量; $\cdot$ 为张量的点积运算符号。

3.3 基于损伤劣化的围岩卸荷松弛演化定量分析方法

根据弹性波理论的声波波速公式,可得变形参数与纵波波速的关系式为:

$$E = \rho V_p^2 (1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu) \tag{4}$$

式中, V_p 为纵波波速; μ 为泊松比; ρ 为密度。因洞室开挖对围岩泊松比和密度影响相对较小,可认为围岩模量 E 与波速的平方 V_p^2 线性相关。结合式(1)、(2)、(4),可得:

$$D = 1 - \frac{E_1}{E_0} = 1 - \left(\frac{V_{p1}}{V_{p0}} \right)^2 = 1 - (1 - \eta)^2 \tag{5}$$

利用所提出的声波变化率 η 作为判据,代入式(5),可得基于损伤劣化的围岩卸荷松弛演化定量判据,见表 2。由表 2 可知,采用声波变化率构建的损伤劣化指标,可有效反映洞室开挖卸荷作用下围岩松弛范围以及岩体遭受扰动程度的变化规律。

表 2 基于声波变化的损伤劣化和围岩松弛程度定量判别

Tab. 2 Damage degradation based on acoustic wave and qualitative judgement of relaxation zone

声波变化率	损伤劣化程度	围岩松弛特征
$\eta > 15\%$	$D > 0.278$	强松弛
$15\% > \eta > 10\%$	$0.278 > D > 0.190$	弱松弛
$10\% > \eta$	$0.190 > D$	未松弛

4 实例分析与验证

4.1 工程概况

重庆某抽蓄电站的地下厂房洞室群规模较大,厂址区未见大规模断层通过,节理、层理中等发育。厂房勘探平洞揭露少量小规模断层分布,宽度一般为 2~5 cm。

4.2 计算反演流程

首先对洞室施工期开挖支护过程进行数值分析,针对洞室尺寸和埋深以及所处地层条件,根据类似洞室工程,将实测围岩松弛深度作为反演依据,求得损伤常数 R 。然后,再进行开挖支护计算,获得损伤系数 D 分布,根据表 2,获得围岩卸

荷松弛分析结果。

4.3 初始计算条件

图 2 为三维数值分析模型,岩体质量级别Ⅲ类,块体密度为 2.650 g/cm^3 ,变形模量为 10 GPa ,泊松比 μ 为 0.26 ,岩体抗剪断强度中内摩擦角 f' 为 43.5° ,黏聚力 c' 为 0.75 MPa 。

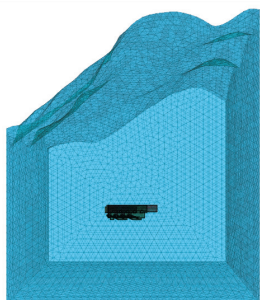


图 2 三维计算模型

Fig. 2 Three dimensional calculaiton mesh for underground caverns

4.4 计算结果分析

根据反演,可知 R 取 150 时,主厂房上游边墙卸荷区深度约为 5 m ,该区域受多洞室交汇影响较小,与已建类似工程实测松弛区深度接近,故取 $R=150$ 。

(1)围岩变形。总体上表现为向临空面发展,洞周的拱顶逐步下沉,底板回弹(图 3)。主厂房拱顶变形量值为 $20\sim 30 \text{ mm}$,上游边墙为 $24\sim 55 \text{ mm}$,下游边墙为 $30\sim 58 \text{ mm}$,最大值 63.5 mm ,位于下游边墙与母线洞交汇处。

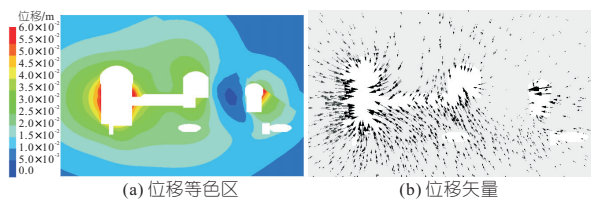


图 3 围岩变形分布

Fig. 3 Deformation distribution of surrounding rock mass

(2)围岩塑性区和松弛区。对比开挖完成的围岩塑性区、弱卸荷区、强卸荷区(图 4),主厂房拱顶部位分别为 4.4 、 1.6 、 0.4 m ;上游边墙分别为 9.4 、 5.0 、 3.5 m ;下游边墙与母线洞交汇区域为 13.9 、 12.3 、 8.8 m 。

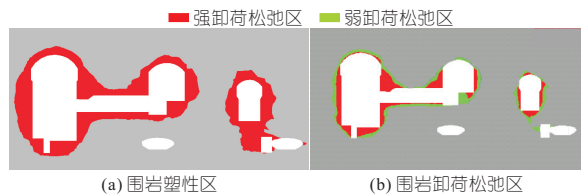


图 4 围岩塑性区和松弛区分布

图 4 Distribution of plastic zone and relaxation zone of surrounding rock mass

分析可知,围岩塑性区深度大于松弛区深度,弱松弛区深度大于强松弛区深度,但不同部位差异程度不同,即顶拱部位不仅松弛区深度显著小于塑性区,而且强松弛区深度显著小于弱松弛区深度;上游边墙部位松弛区深度显著小于塑性区,但强松弛区深度和弱松弛区差异不大;下游边墙部位的塑性区、弱松弛区和强松弛区深度值差异相对较小。

根据量值分析规律,结合工程经验可得:①围岩应力状态进入塑性后,不一定导致承载能力降低,采用考虑损伤劣化效应的卸荷松弛概念,能够更准确地刻画围岩在开挖卸荷后的性状特征,如顶拱和上游边墙,围岩卸荷区深度均显著小于塑性区,表明这些部位围岩受开挖卸荷引起的应力调整较显著,但由此引起的岩体卸荷松弛程度相对有限,锚固支护措施应超过围岩松弛深度。②将围岩松弛区域进一步区分为强卸荷和弱卸荷后,能够有效揭示洞周不同部位受开挖卸荷扰动的影响程度,如主厂房下游边墙区域,塑性区和松弛区深度接近,且强卸荷区深度接近弱卸荷区,表明该部位的围岩卸荷扰动程度十分显著,需要进行重点加固,进而提高局部易扰动围岩的稳定性。

(3)支护受力。洞室群整体开挖完成后,应力小于 100 MPa 的锚杆占 86.3% ,在 $100\sim 200 \text{ MPa}$ 的锚杆占 10.7% ,在 $200\sim 360 \text{ MPa}$ 的锚杆占 2.5% ,大于 360 MPa 的锚杆占 0.5% 。整体来看,随着地下厂房洞室群的逐层开挖,洞室群周围的锚杆受力不断增大。与洞周围岩变形相对应,锚杆受力较大区域主要集中在边墙中部和断层出露处,个别锚杆受断层切割影响应力值达到屈服。整体来看,系统锚杆体能够较好控制围岩变形,同时具备一定安全裕度。

5 结论

a. 围岩卸荷松弛是大型地下厂房洞室群施工期开挖支护活动的必然结果,多采用钻孔声波方法进行测试,发现已建水电站地下厂房围岩松弛深度一般在 5 m 以内,受不利地质结构或洞室交汇影响,局部围岩松弛深度将加大。

b. 工程案例表明,所提出的围岩损伤及其劣化表征方法能够实现围岩卸荷松弛深度的定量分析,在传统塑性区指标的基础上,赋予围岩稳定分析更多评价指标,提升围岩支护设计的针对性,使局部易扰动围岩更易识别和加固。

(下转第 47 页)

c. 未来研究可通过扩展数据集、引入深度学习等技术,进一步支持水安全管理与决策。

参考文献:

- [1] 龚巧灵, 官冬杰. 基于 BP 神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 292-299. (GONG Q L, GUAN D J. Study on water resources security evaluation of Chongqing section of Three Gorges Reservoir based on BP neural network[J]. Research of soil and water conservation, 2017, 24(6): 292-299. (in Chinese))
- [2] 张彦, 李明然, 寇利卿. 基于 PSR-PCA-ANFIS 模型的保定市中心城区水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电, 2022(2): 68-75. (ZHANG Y, LI M R, KOU L Q. Evaluation of water resources security in Baoding central city based on PSR-PCA-ANFIS model[J]. China rural water and hydropower, 2022(2): 68-75. (in Chinese))
- [3] 周振民, 穆文彬. 组合权重可变模糊模型在地表水水质评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2011(10): 82-86. (ZHOU Z M, MU W B. Application of variable fuzzy model based on combined weight in evaluation of surface water quality[J]. China rural water and hydropower, 2011(10): 82-86. (in Chinese))
- [4] 李书浩. 基于矩估计组合赋权的烤烟可用性评价及预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022. (LI S H. Evaluation and prediction of flue-cured tobacco availability based on moment estimation and combination weighting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese))
- [5] 王钰, 李扬, 张紫涵, 等. 基于组合赋权-集对分析的城市供水安全评价[J]. 水电能源科学, 2024, 42(4): 30-34. (WANG Y, LI Y, ZHANG Z H, et al. Urban water supply safety evaluation based on combination weighting-set pair analysis[J]. Water resources and power, 2024, 42(4): 30-34. (in Chinese))
- [6] 刘璐, 张绍阳, 冉思雨, 等. 基于 PSO-SA 算法的源项反演方法研究[J]. 现代电子技术, 2024, 47(1): 100-104. (LIU L, ZHANG S Y, RAN S Y, et al. Research on source inversion method based on PSO-SA algorithm[J]. Modern electronics technique, 2024, 47(1): 100-104. (in Chinese))
- [7] 迟国泰, 陈洪海. 基于信息敏感性的指标筛选与赋权方法研究[J]. 科研管理, 2016, 37(1): 153-160. (CHI G T, CHEN H H. A study of indice screening and weighting method based on information sensitivity[J]. Science research management, 2016, 37(1): 153-160. (in Chinese))
- [8] WANG Z P, TIAN J C, FENG K P. Optimal allocation of regional water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Energy reports, 2022, 8: 9119-9126.
- [9] 迟国泰, 曹婷婷, 张昆. 基于相关-主成分分析的人的全面评价评价指标体系构建[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(1): 111-119. (CHI G T, CAO T T, ZHANG K. The establishment of human all-around development evaluation indicators system based on correlation-principle component analysis[J]. Systems engineering-theory & practice, 2012, 32(1): 111-119. (in Chinese))
- *****
- (上接第 122 页)
- 参考文献:
- [1] 霍志芳, 谷拴成, 韩庆达. 巷道围岩松动圈测试的研究[J]. 西安矿业学院学报, 1994, 14(1): 18-21. (HUO Z F, GU S C, HAN Q D. Research on measuring cracked range of roadway surrounding rock[J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 1994, 14(1): 18-21. (in Chinese))
- [2] 郭亮, 李俊才, 张志铖, 等. 地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 3009-3015. (GUO L, LI J C, ZHANG Z C, et al. Research on surrounding rock loose zone of tunnel under unsymmetrical loading with ground penetrating radar and its application[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(S1): 3009-3015. (in Chinese))
- [3] 陈庆发, 周科平, 胡建华, 等. 缓倾薄层弱结构松动圈声波测试时测孔布置的理论依据与验证[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1406-1410. (CHEN Q F, ZHOU K P, HU J H, et al. Theory basis and practice of acoustic measuring boreholes arrangement for broken rock zone in gently inclined thin layer weakness structure[J]. Journal of central south university (science and technology), 2009, 40(5): 1406-1410. (in Chinese))
- [4] 王克权, 赵俊杰, 王振涛. 孤岛工作面回采巷道围岩松动圈测试及支护设计[J]. 矿业装备, 2024(12): 7-9. (WANG K Q, ZHAO J J, WANG Z T. Test and support design of surrounding rock loose zone in mining roadway of isolated island working face[J]. Mining equipment, 2024(12): 7-9. (in Chinese))
- [5] 吴钰, 李东, 罗登泽, 等. 猴子岩水电站地下洞室群围岩松弛损伤控制技术[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 142-145. (WU Y, LI D, LUO D Z, et al. Control technology of loosening surrounding rock and damage of underground cavern group in houziyan hydropower station[J]. Water resources and power, 2021, 39(8): 142-145. (in Chinese))
- [6] 国家能源局. 水电水利地下工程施工安全评估导则—围岩稳定: DL/T 5826-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021. (National Energy Administration. Guide for Safety Assessment of Hydropower and Water Resources Underground Engineering Construction-Surrounding Rock Stability: DL/T 5826-2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范: SL 47-2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical specification for excavation construction of rock-foundation of hydraulic structures: SL 47-2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2021. (in Chinese))
- [8] FRANTZISKONIS G, DESAI C S. Constitutive model with strain softening[J]. International journal of solids and structures, 1987, 23(6): 733-750.