

文章编号: 1000-582X(2012)06-072-08

高应力下脆性岩石卸荷力学特性及数值模拟

黄 达^{1,2}, 谭 清^{1a}, 黄润秋²

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要:高地应力下脆性岩体工程开挖变形机理、稳定性评价及灾害控制技术研究一直是岩石力学和工程地质研究的难点问题。基于高应力下脆性岩石卸荷力学试验分析,明确了卸荷过程中的岩石力学参数及变形破坏演化规律,发现高应力下脆性岩石的破坏具有较明显的应变强度特征。分析了高应力下脆性岩石卸荷破坏采用张拉屈服的 Griffith 应变强度准则的合理性,建立了考虑卸荷屈服引起岩体力学参数变化的弹脆塑性数值计算方法,并在实际工程中得以验证。

关键词:岩石力学;数值模拟;卸荷;力学参数;脆性岩体;高应力
中图分类号:TU45 **文献标志码:**A

Mechanical properties and numerical simulation of unloading of brittle rocks under high geostress

HUANG Da^{1,2}, TAN Qing^{1a}, HUANG Run-qiu²

(1a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, P. R. China)

Abstract: The investigations on the deformation mechanisms, estimation of stability and technique of disasters controlled of brittle rocks excavated under high geostress are difficult points for rock mechanics and engineering geology. The evolutionary rule of mechanical parameters and deformation failure of brittle rocks are discussed based on unloading under high geostress, and the obvious characteristics of strain strength for brittle rocks under high geostress is found. It is presented that the brittle rock yielded follows Griffith rule of strain strength at peak. The elasto-brittle-plastic numerical calculation method is established considering the dynamical variation of mechanical parameters in course of unloading yield, and it is validated by practical engineering.

Key words: rock mechanics; numerical simulation; unloading; mechanical parameters; brittle rockmass; high geostress

收稿日期: 2012-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40902078, 41172243); 教育部博士点新教师基金资助项目(200806111012); 中国博士后科学基金资助项目(20080440703); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKLG2011K003)

作者简介: 黄达(1976-), 副教授, 博士, 主要从事岩土工程和工程地质方向研究,
(E-mail)hdcq@yahoo.com.cn.

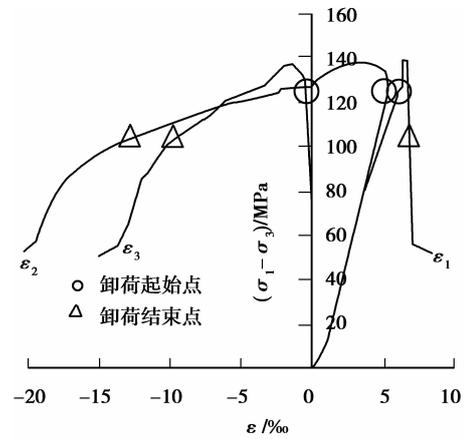
我国西南高山峡谷地区具有较明显的高应力特征,特别是构造应力量级高^[1-2],且这些地区水力及矿产资源丰富,高应力条件下岩体工程开挖卸荷力学响应及稳定性评价与控制已成为岩石力学和工程地质领域研究的热点和难点问题。近年来一些高应力下岩石卸荷试验和理论研究及实际工程建设表明^[3-9]:岩体工程开挖从力学本质来说是一个应力重分布过程,不同的地质环境、开挖方式或工程对象可引起不同的应力重分布特征,但一般来说开挖必定引起至少一个甚至多个方向的应力卸载;相对于加载条件,卸荷条件下岩石的变形破坏、力学参数及本构模型等均具有自身的特征;高应力条件下的脆性岩体工程开挖岩爆或劈裂破坏灾害特别突出。绝大多数岩体工程开挖数值分析仍然是采用常规的加载岩体力学数值理论方法^[10-13],基本没有考虑高地应力下卸荷过程中岩体力学参数及屈服准则的变化。文中在高应力下脆性大理岩卸荷力学特性试验研究的基础上,分析了高应力下其应力-应变、应变强度特征和损伤破裂演化过程,提出了高应力下脆性岩体开挖卸荷模拟采用 Griffith 应变强度准则的弹脆塑性模型,考虑了脆性岩石屈服破坏后参数的动态变化和峰后剪胀特性。

1 高应力下脆性岩石卸荷力学特性

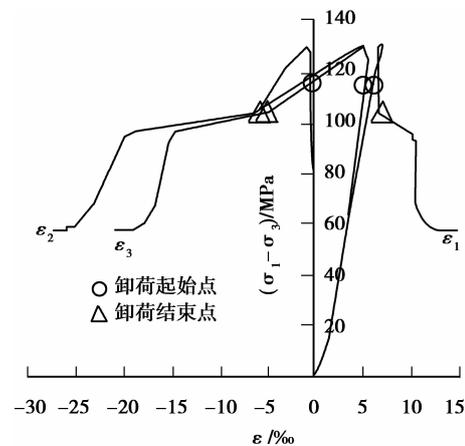
高应力下脆性岩石卸荷试验研究表明^[3,5-6]:相对常规加载试验,卸荷条件下岩石的变形模量 E 和粘聚力 c 减小,而摩擦角 φ 少量增大,泊松比 μ 增大;卸荷破坏过程中,岩石的扩容特征较突出(特别是峰后),且上述参数变化与体积应变存在较好的相关性^[5]。

锦屏一级水电站大理岩单轴抗压强度为 60~90 MPa,平均单轴抗拉强度为 3~7 MPa,平均单轴抗压抗拉强度比约为 15~20,呈现较强的脆性特性。图 1 为锦屏一级水电站 $T_2^{(6)}-3_2$ 层上部深灰色条纹状大理岩在初始围压为 30 MPa,轴压加载而围压卸载(图 1a)与轴压和围压同时卸载(图 1b)的三轴卸荷试验典型应力-应变全过程曲线。试验轴向加载卸荷速率约为 0.3 MPa/s,围压卸荷速率约为 0.5 MPa/s,试验加载至比例极限时开始卸荷,至岩样破坏(应力差明显急剧下降)时结束卸荷,并保持此时围压不变进行残余强度测试。图 1 表明:卸荷过程中峰前的轴向应变很小,而侧向变形迅速增大,

峰后体积明显扩容,表现出较强的轴向应变硬化特征;峰后轴向应变表现出近似理想的脆塑性特性,而侧向变形和体积扩容急剧增加。



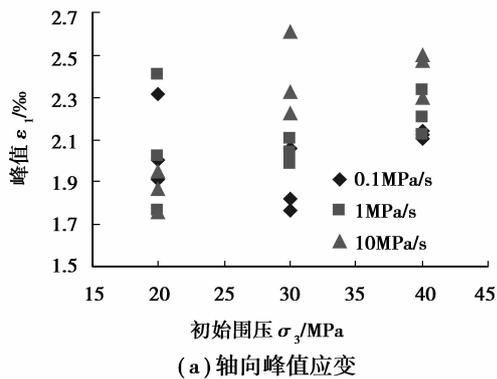
(a) 轴压加载围压卸载



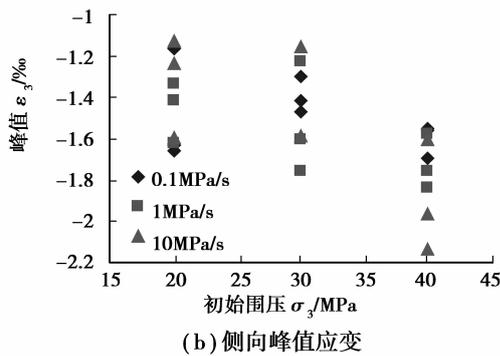
(b) 轴压及围压同时卸载

图 1 大理岩三轴卸荷典型全过程曲线

图 2 为轴压加载而围压卸载试验工况下 3 种卸荷速率时(分别为 0.1、1.0、10 MPa/s)峰值破坏点应变随卸荷初始围压变化散点图,可以看出,卸荷条件下峰值轴向压缩应变 ϵ_1 量约在 1.7%~2.5%之间,侧向膨胀应变 ϵ_3 在 1.1%~2.0%之间,变形量分布相对比较离散, ϵ_1 随卸荷速率及初始围压间没有明显规律, ϵ_3 随卸荷速率变化规律不明显,但随初始围压增大略有增大趋势。表明卸荷条件下物理力学特性相同的岩石变形破坏峰值应变变化不大。因此这一应变值具有重要的工程意义,可以作为开挖卸荷条件下岩石变形破坏预测的变形量度标准。



(a) 轴向峰值应变



(b) 侧向峰值应变

图 2 大理岩三轴卸荷峰值应变特征

高围压下大理的卸荷破裂一般呈现较明显的张性破裂特征,快速卸荷下一般呈现劈裂破坏(见图 3b),而较慢速卸荷下一般呈现张剪性破坏(见图 3a)。卸荷条件下岩石破坏过程可概化为如图 4 所示的破坏过程。由于卸荷使得应力差增大,卸荷初期,在轴向应力 σ_1 的压缩下会使得岩石中原来的原生微裂缝产生沿最大主应力方向的定向排列,随着卸荷过程的发展,应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 逐渐增大,微裂缝沿最大主应力方向压致拉裂扩展,这一过程符合 Griffith 破坏准则。当卸荷到一定程度时,卸荷引起的差异回弹变形使得这些微小张裂隙尖端拉应力集中,微裂隙张拉扩展,此时裂隙扩展主要是受法向拉应力控制;当继续卸荷,张裂隙间岩桥处会出现剪应力集中,继而剪断岩桥,并且沿那些相对较宽长的张裂隙形成一个张剪性贯通破裂带(见图 4a)。但当卸荷速率较快,应力差迅速增大,而围压迅速减小,侧向变形迅速增大,致使裂隙尖端的拉应力高度集中,这些张拉裂隙可能直接贯通,进而形成压致张拉劈裂破坏模式(见图 4b)。

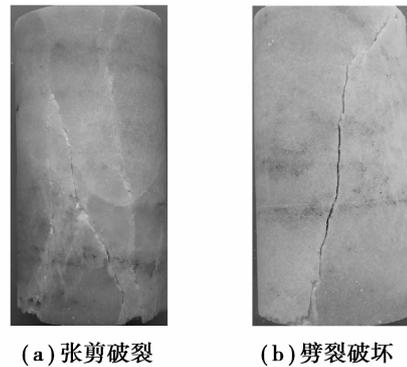


图 3 大理岩卸荷破裂典型照片

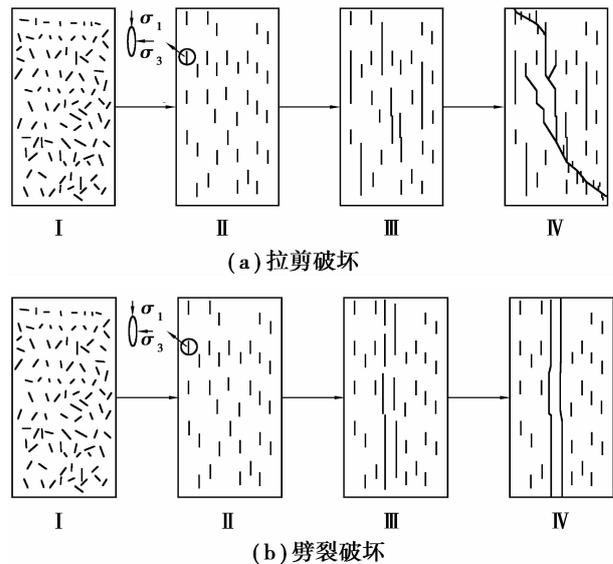
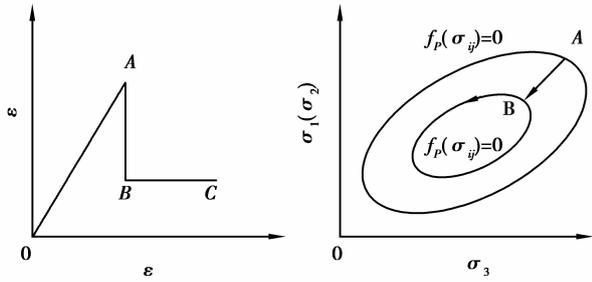


图 4 岩石卸荷破坏演化过程示意图

2 高应力下脆性岩体卸荷数值模拟

2.1 本构模型及屈服准则

脆性岩石在卸荷条件下呈现明显的脆性破坏特征,图 1 中 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 近似于理想的弹脆塑性模型。图 5 为理想弹脆塑性的应力-应变曲线及三维应力状态示意图^[14]。图 5(b)说明:应力空间任一点加载到峰值屈服面 $(f_P(\sigma_{ij})=0)$ A 点时,任何的进一步加载都会使 A 点迅速跌落至残余屈服面 $(f_R(\sigma_{ij})=0)$ 的 B 点。在突然或脆性破坏的过程中,没有应变增量出现,因此当岩体的应力状态达到峰值强度时,计算时可设置经历一个很少的应变增量特征值后,强度降至残余值^[14-15]。



(a) 模型的应力-应变曲线 (b) 模型的三维应力状态示意图

图 5 理想弹脆塑性模型^[14]

由于卸荷过程中岩石的破坏主要是由于侧向扩容变形所致,岩石的破坏形式主要表现为拉伸破坏,故屈服准则拟选用更加适合岩石拉破坏的 Griffith 准则。

Griffith 准则的常用表达式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_1 + \sigma_3} &= 8\sigma_t, (\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0) \\ \sigma_3 &= -\sigma_t, (\sigma_1 + 3\sigma_3 \leq 0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Murrel 推广的三维应力空间的修正的 Griffith 准则^[16],

$$f_G = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 - 24T_o(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 0, \quad (2)$$

式中 T_o 为抗拉强度。

由试验结果图 2 可知,卸荷条件下脆性大理岩经历一个相对较稳定的应变后强度达到峰值,具有较为明显的应变强度特征。因此数值计算中可将 Griffith 屈服准则转化为应变空间的表达式。

将应力张量、偏张量不变量代入式(2),可得

$$f_G = 6J_2 - 24T_oI_1 = 0, \quad (3)$$

应力空间中的不变量与应变空间中不变量有如下的转换公式

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{E}{1-2\mu}I'_1 = 3KI'_1 \\ J_2 &= \left(\frac{E}{1+\mu}\right)^2J'_2 = 4G^2J'_2 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

式中 K, G 分别为体积模量和剪切模量。

将式(4)代入式(3),可以得到应变空间中 Murrel 推广的 Griffith 准则

$$f_G = G^2J'_2 - 3KI'_1T_o = 0. \quad (5)$$

由于脆性岩石卸荷变形破坏受拉伸或体积应变的控制作用非常明显,文中选用公式(5)作为脆性岩石峰值屈服面准则。

2.2 计算过程参数处理

由于选用了近似的理想弹脆塑性本构模型,数值计算中岩石材料参数的变化以式(5)作为处理标准,当单元应变值满足式(5)($f_G=0$)时,岩石材料达到应变强度,弹性模型 E 迅速减小而泊松比迅速增大,经过 10^{-4} 最大主应变增量后进入塑性阶段,并同时增赋凝聚力 c 、抗拉强度、摩擦角 φ 和剪胀角参数。并且凝聚力 c 、抗拉强度要较相当情况下现场加载试验和相关物探测试的综合建议残余参数要小,而摩擦角 φ 要相对较大。

10^{-4} 最大主应变增量为改变弹性参数后应力降至稳定残余值大约需要迭代计算产生的应变增量特征阈值。可通过相同参数和本构模型条件下,模拟地下工程开挖应力变化边界条件(升轴压卸围压)的岩样数值模型试验确定。

由于脆性岩石卸荷变形破坏的峰后扩容非常明显,因此数值模型中峰后计算过程必须考虑剪胀或扩容,引入对应于非相关联流动法则的剪切势函数,

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi, \quad (6)$$

其中,

$$N_\psi = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi}, \quad (7)$$

式中: ψ 为剪胀角; σ_1 和 σ_3 分别为最大、最小主应力。

由文献[17]对 7 类岩石的剪胀角研究表明,岩石的剪胀角随围压的减小而逐渐增大,岩石的剪胀在塑性剪切应变产生后才发生,剪胀角在峰后破裂处迅速达到峰值,且越过峰值剪胀角后随塑性剪切变形增大而逐渐减小并趋于平稳。因此文中模拟时在峰值及其以前的计算中不考虑剪胀角,进入理想塑性阶段后迅速设置某计算值。

2.3 工程开挖卸荷数值模拟实现流程

采用弹性模型对初始地应力场进行反演分析,当达到较好结果后,将变形初始化,进而进行第一阶段的开挖试算,并在计算时步的控制下提取各单元的主应变,利用式(5)进行判断,如果 $f_G \geq 0$ 则表明岩体已达到 Griffith 拉伸破坏,则按前述的参数处理方法对岩体参数进行塑性参数置换,并同时进入残余阶段。如果较多的单元 $f_G > 0$,则表明岩体监测时步段内已经发生了一定的超过弹性应变极限的变形,则此时应该减小监测时步,但出现上述情况无法完全避免,这时 $f_G > 0$ 的单元应力仅仅由总应变中的弹性部分确定,故应对这些单元的应力进行调整。

每阶段均须选用较多的典型变形监测点作为位移反馈分析的参考数据。位移反分析的目标函数可为测点计算位移(增量)和量测位移(增量)的误差绝对值之和的最小值,其数学表达式为

$$F_U = \min\left(\sum_{i=1}^n |U_i - \bar{U}_i|\right), \quad (8)$$

式中: i 表示第 i 个测点; U_i 为正演计算得到的测点处的位移增量或位移值; \bar{U}_i 是测点实测的位移增量或位移值。

式(8)的最小值仅仅是指广义上的相对最小值,可通过调整计算参数逐渐逼近监测值。当达到计算允许误差范围后即可输出此阶段开挖的计算结果,并进入下一阶段的开挖试算和结果输出循环。

整个数值实现的流程如图 6 所示。

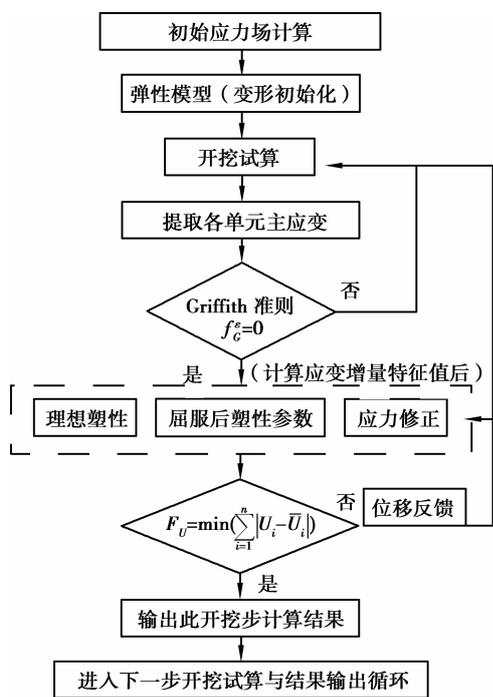


图 6 考虑卸荷效应的数值计算流程图

3 工程实例模拟分析

雅砻江锦屏一级水电站引水发电系统布置于坝区右岸,地下厂区洞室群规模巨大。地下厂房、主变室和尾水室 3 大洞室平行布置。厂房纵轴线方位为 $N65^\circ W$,厂内安装 6 台 600 MW 机组。厂房全长 276.99 m,吊车梁以下开挖跨度 25.60 m,以上开挖跨度 28.90 m,开挖高度 68.80 m。厂房和主变室之间的岩柱厚 45 m,主变室长 197.10 m,宽 19.30 m,高 32.70 m。尾水调压室采用“三机一室一洞”布置型式,设置 2 个圆柱型调压室,直径分别为 37.00 m、

41.00 m,尾调室距主变室顶拱中心线间距 77.65 m,两调压室中心线相距 95.1 m。

地下厂房水平埋深约 110~300 m,垂直埋深约 180~350 m。经实测统计分析:最大主应力 σ_1 一般为 20~30 MPa,部分应力集中区超过 30 MPa,最大达 35.7 MPa; σ_2 量值一般为 10~20 MPa, σ_3 量值一般为 5~10 MPa; σ_1 的方向比较一致,为 $N28.5^\circ \sim N71^\circ W$,平均为 $N48.7^\circ W$,倾角为 $20^\circ \sim 50^\circ$,平均倾角为 34.2° 。由于岩体强度相对不高,多数岩石强度应力比(R_b/σ_m)约 1.5~4.0,属于极高~高地应力区,且平均抗压和抗拉强度比约 17.5~19.0,属中等坚硬岩类和较典型的脆性岩石。

厂区地质条件较复杂,出露地层主要为三叠系中上统杂谷脑组第 2 段第 2~4 层大理岩(T_2^{3-4Z}),并含有一定的绿片岩夹层。发育有 NE 向的 f_{13} 、 f_{14} 、 f_{18} 3 条近平行的断层和 1 条紧挨 f_{18} 发育的煌斑岩脉 X,均与厂房轴线呈大角度相交,其走向与厂房轴线夹角约 $45.0^\circ \sim 60.0^\circ$,见图 7 所示。发育的 4 组主要节理裂隙有:1) $N30^\circ \sim 60^\circ E$, $NW \angle 30^\circ \sim 40^\circ$,最为发育;2) $N50^\circ \sim 70^\circ E/SE \angle 60^\circ \sim 80^\circ$,相对较发育;3) $N25^\circ \sim 40^\circ W/NE(SW) \angle 80^\circ \sim 90^\circ$,很少。4) $N60^\circ \sim 70^\circ W/NE(SW) \angle 80^\circ \sim 90^\circ$,零星发育。地下厂房岩体一般为 III 类围岩,断层带及其附近一般为 IV 类围岩。

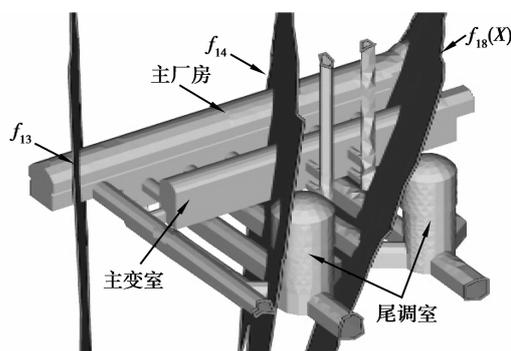


图 7 地下厂房区三维透视图

借助于 $FLAC^{3D}$ 计算软件,在上述计算方法的基础上,利用 $FLAC^{3D}$ 提供的自定义模型 UDM 接口以及 VC++ 编程语言,将考虑卸荷效应的脆性岩体模型嵌入到该软件,实现其计算功能。

综合试验结果,并经反复试算和监测反馈分析,确定数值计算岩体参数如表 1 所示,围岩和断层带的密度分别为 2 700、2 600 kg/m^3 (计算过程中保持不变)。锚固及喷层混凝土按实际施工布置,计算中锚固参数保证预应力锚索不致拉坏,砼喷层按弹性壳体单元模拟。

表 1 数值计算岩体力学参数

岩土材料	变形模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ 内摩擦角/		抗拉强度/ 剪胀角/	
			MPa	(°)	MPa	(°)
围岩	弹性段	18	0.25	—	—	—
	残余段	11	0.32	0.8	36	1.0
断层	弹性段	1.2	0.35	—	—	—
	残余段	0.5	0.42	0.01	26	0.04

下面以 2# 机组厂纵 0+31.7 m 剖面为例,对开挖至第 7 层时计算结果和实际的监测或测试结果进行对比分析,以论证这种脆性岩体工程开挖数值模拟方法的合理性。

图 8 为数值计算的围岩塑性区和基于波速测试及钻孔电视图像分析的围岩松动圈。图 8 表明运用文中的数值计算方法可较为准确地预测围岩松动圈,但可能是因为通过波速测试和钻孔电视图像分析的围岩松动相对较粗糙,计算的塑性区范围明显较测试结果要大一点,特别是应力较为集中的洞室下游侧拱腰部位。由于应用了 Griffith 屈服准则,塑性区无法判断岩体的剪切屈服特性。

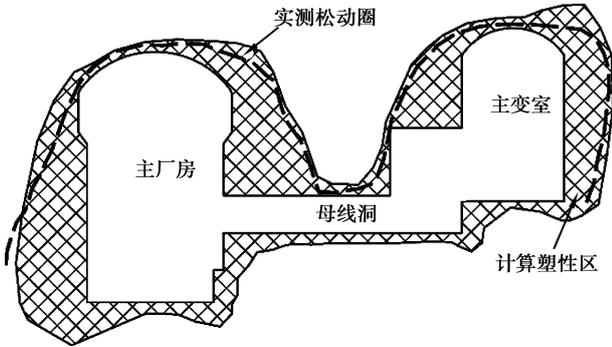


图 8 计算围岩塑性区与实测松动圈

但是从图 9 所示的钻孔全景图像上可明显看出在主厂房围岩深部约 11.8 m 和 18.5 m 处存在新的陡倾角破裂面,且呈现明显的张性特征。这也表明开挖卸荷条件下脆性围岩较深部仍然存在较为普遍的张拉破坏,可为文中的计算提供工程支撑。

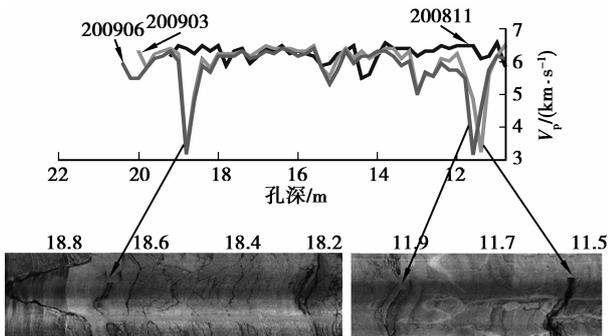


图 9 主厂房深部破裂处典型波速及钻孔图像

图 10 为围岩位移等值线及矢量图。洞周某些关键位置实测位移与数值计算结果(括号内实测值,外为数值计算值)对比表明,数值计算的位移大小与实测结果基本一致,误差约在 5 mm 以内。由于厂房区最大主应力方向倾向山外且略偏下游侧,中间主应力与厂房轴线大角度相交倾向上游,致使下游侧切向应力集中程度和法向方向应力释放程度较高,这也使得洞室下游侧变形普遍较下游侧大,特别是在下游拱腰处^[8]。位移矢量图(图 10b)显示位移方向近垂直于开挖面向卸荷方向变形,边墙处变形近水平(局部有向上趋势),表明高地应力下围岩卸荷变形主要向卸荷方向回弹和开裂变形。

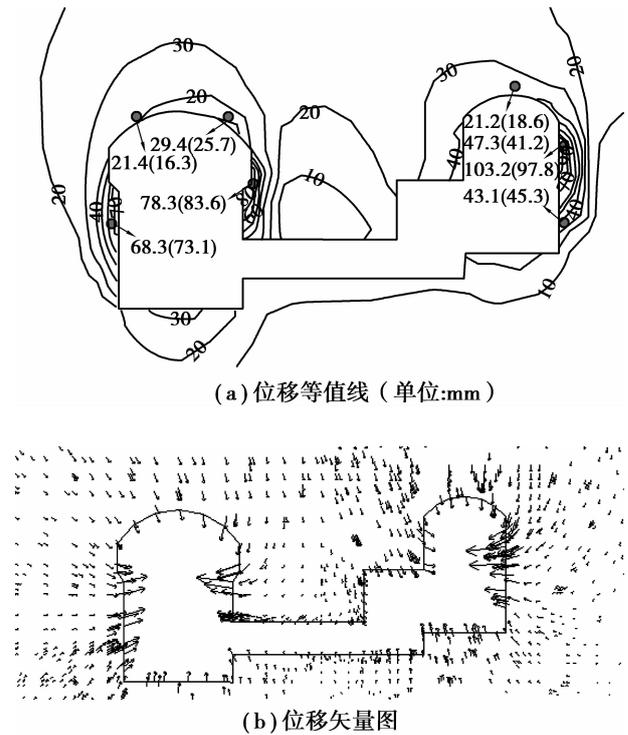


图 10 计算位移结果及与监测对比

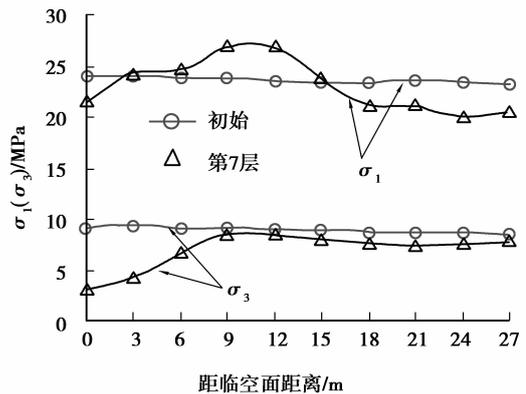


图 11 主厂房下游拱腰处围岩应力随深度变化特征

图 11 为主厂房下游拱腰处主应力随深度变化曲线图,表明开挖卸荷条件下会使最大主应力在某一深度范围内增加;而最小主应力由表至里逐渐增加,直至原岩应力;围岩的塑性区应为最大应力差集中部位以外的区域,这部分岩体产生了卸荷松动或破坏,图 11 显示卸松破裂区约 9~12 m,与计算塑性区范围基本一致。

4 结 论

1) 高应力下脆性岩石卸荷将先产生拉伸损伤,随后可发生劈裂或张拉裂缝剪切贯通破坏,其与初始应力状态和卸荷速率等相关;高应力下快速卸荷岩石呈现近理想的弹脆塑性本构特性,且具有较强的应变强度特性。

2) 高应力下脆性岩石卸荷破裂峰后具有明显的扩容特性,数值计算中应考虑峰后的剪胀。建立了采用 Griffith 应变强度准则和计算参数动态变化的弹脆塑性模型模拟高应力下脆性岩体工程开挖数值方法和实现过程。

3) 利用 FLAC^{3D} 软件平台,借助其自定义模块 UDM 和 VC++ 编程语言,对正在施工建设的雅砻江锦屏一级水电站地下厂房进行了模拟分析,结果表明这种数值计算方法与实际情况基本一致,具有较好的科学性。同时也完善了高应力下脆性岩体大型地下工程开挖变形机理及稳定性评价理论。

参考文献:

- [1] ZHANG Y S, ZHANG J G, LEI W Z, et al. Discussion on environmental geological problems in the areas from Southwest China to Southeast Asia [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 24-30.
- [2] QI S W, WU F Q, YAN F Z, et al. Mechanism of deep cracks in the left bank slope of Jinping first stage hydropower station [J]. *Engineering Geology*, 2004, 73(1/2): 129-144.
- [3] XIE H Q, HE C H. Study of the unloading characteristics of a rock mass using the triaxial test and damage mechanics [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(S1): 74-80.
- [4] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(2): 286-298.
- [5] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2205-2213.
- HUANG RUN-QIU, HUANG DA. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2205-2213.
- [6] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(1): 21-33.
- HUANG RUN-QIU, HUANG DA. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(1): 21-33.
- [7] ZHOU X P, QIAN Q H, ZHANG B H. Zonal disintegration mechanism of deep crack-weakened rock masses under dynamic unloading [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2009, 22(3): 240-250.
- [8] 李仲奎, 周钟, 汤雪峰, 等. 锦屏一级水电站地下厂房洞室群稳定性分析与思考 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(11): 2167-2175.
- LI ZHONG-KUI, ZHOU ZHONG, TANG XUE-FENG, et al. Stability analysis and considerations of underground powerhouse caverns group of Jinping I hydropower station [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(11): 2167-2175.
- [9] DRIAD-LEBEAU L, LAHAIE F, HEIB M A, et al. Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex french mining district [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 64(1/2): 66-78.
- [10] 邓建辉, 葛修润, 李焯芬. 三峡工程永久船闸边坡位移反分析回顾 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(17): 2902-2906.
- DENG JIAN-HUI, GE XIU-RUN, LI CHAO-FEN. Review on displacement back analysis for permanent shiplock slope of Three Gorges Project [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2902-2906.
- [11] 朱以文, 黄克戡, 李伟. 地应力对地下洞室开挖的塑性区影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1344-1348.
- ZHU YI-WEN, HUANG KE-JIAN, LI WEI. Study on effect of in-situ stresses on plastic region induced by excavations of underground openings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1344-1348.
- [12] 高俊合, 赵维炳, 李兴文. 深开挖有限元分析中释放荷载模拟——三种常用方法比较及改进的 Mana 法 [J]. *河海大学学报*, 1999, 27(1): 47-52.
- GAO JUN-HE, ZHAO WEI-BING, LI XING-WEN.

Simulation of unloading due excavation in F. E analysis-modified Mana method based on comparison of three methods[J]. Journal of HOHAI University, 1999, 27 (1): 47-52.

- [13] SHARAN S K. A finite element perturbation method for the prediction of rockburst [J]. Computers & Structures, 2007, 85(17/18): 1304-1309.
- [14] SHENG Q, YUE Z Q, LEE C F, et al. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2):165-184.
- [15] LEE C F, ZHENG H. Macro-constitutive model for

brittle-plastic rock and its application[C]// Proceedings of IS-NAGOYA97, Oct. 4-7, 1997, Gifu, Japan. [S. l.]: [s. n.], 1997: 359-364.

- [16] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [17] ZHAO X G, CAI M. Influence of plastic shear strain and confinement-dependent rock dilation on rock failure and displacement near an exaction boundary [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(5): 723-738.

(编辑 陈移峰)

~~~~~  
(上接第 57 页)

- [7] 王涣然, 李彦鹏, 杨栋, 等. 黏性液体中单个气泡上升的形状特性[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1492-1494.  
WANG HUAN-RAN, LI YAN-PENG, YANG DONG, et al. On the shape feature of a single bubble rising in viscous liquids [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(9): 1492-1494.
- [8] OHTA M, IMURA T, YOSHIDA Y, et al. A computational study of the effect initial bubble conditions on the motion of a gas bubble rising in viscous liquids [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(2): 223-237.
- [9] WANG Z Y, TONG A Y. Deformation and oscillations of a single gas bubble rising in a narrow vertical tube [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(3): 221-228.
- [10] FRANCOIS M, SHYY W. Computations of drop dynamics with the immersed boundary method, part 1: numerical algorithm and bouyancy-induced effect [J]. Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals, 2003, 44

(2): 101-118.

- [11] BOZZI L A, FENG J Q, SCOTT T C, et al. Steady axisymmetric motion of deformable drops falling or rising through a homoviscous fluid in a tube at intermediate reynolds number [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 336: 1-32.
- [12] VAN SINT ANNALAND M, DEEN N G, KUIPERS J A M. Numerical simulation of gas bubbles behavior using a three-dimensional volume of fluid method [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(11): 2999-3011.
- [13] KIM S J, PARK G C. Interfacial heat transfer of condensing bubble in subcooled boiling flow at low pressure [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(13/14): 2962-2974.
- [14] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(编辑 陈移峰)