

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0709-07

考虑损伤效应深部锚固巷道蠕变破坏模拟分析

赵同彬^{1,2}, 张玉宝¹, 谭云亮¹, 刘姗姗¹, 尹延春¹

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要 首先通过深部泥岩数字散斑蠕变试验, 发现分级加载第 I 阶段泥岩试件表面变形集中现象明显, 表明该岩体在较低应力水平开始出现损伤, 并随着载荷级别增加, 逐渐演化为一组剪切破裂带, 直至整个试件发生破坏; 然后引入损伤变量 D_t , 建立考虑损伤效应的加锚岩体非线性 BKS 蠕变损伤模型, 采用 FISH 函数编制程序实现其在 FLAC^{3D} 中的开发; 最后采用 BKS 蠕变损伤模型对口孜东矿锚固岩支护控制进行数值模拟。结果表明: 深部岩体的损伤特性增大了蠕变破坏区范围, 且在锚固范围外仍出现蠕变破坏, 深部围岩内部非连续性破裂现象明显。同时将模拟结果与现场钻孔探测结果进行对比分析, 证实了数值模拟研究中考考虑损伤效应更能客观地反映深部岩体的蠕变破坏特征, 对深部巷道破坏机理研究有指导意义。

关键词 深部岩体; 锚固巷道; 损伤效应; 蠕变破坏; 数字散斑

中图分类号 TD 325

文献标志码 A

Simulation analysis on creep failure of deep bolting roadways considering the effect of damage

ZHAO Tongbin^{1,2}, ZHANG Yubao¹, TAN Yunliang¹, LIU Shanshan¹, YIN Yanchun¹

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. School of Mineral Resources and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract From creep experiments of deep mudstones in digital speckle method, the phenomenon of deformation concentration that occurs in the surface of specimen is obvious under the first step loading. And it indicates that the damage begin to appear in rock mass under the relatively low stress level. With the increasing of loading level, a shear fracture band is formed until the whole specimen failure. Then the BKS model which can reflect rock damage effect is put forward by introducing damage variable D_t . By using FISH function, the model's program composition is realized in the FLAC^{3D}. Finally, the model is applied to simulating the bolting surrounding rock control in Kouzidong mining area. The result shows that creep failure zone increases and occurs beyond the anchorage range due to the damage characteristics, and non-continuity failure is obvious during deep surrounding rock. Meanwhile, it is confirmed that the numerical simulation considering damage effect can objectively reflect the creep failure characteristics of deep rock mass by contrasting simulated results with detection results of field borehole.

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004068); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2011NJ014); 山东科技大学杰出青年科学基金项目(2011KYJQ106); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目

作者简介: 赵同彬(1975—), 男, 黑龙江省齐齐哈尔市人, 博士, 副教授, 从事岩体力学与采矿工程方面的研究。

E-mail: ztbwh2001@163.com

Tel: 0532-86057946

Consequently, there is a guiding significance for the research on failure mechanism of deep roadways.

Key words deep rock mass; bolting roadways; damage effect; creep failure; digital speckle

岩石的蠕变变形对深部巷道围岩的破坏产生重要影响,其时效特性越来越引起人们的关注。近年,岩石力学工作者在改进岩石蠕变本构模型和描述蠕变变形与时间的演化过程等方面取得较多的研究成果^[1]。文献[2-3]通过不同的方式组合 4 种基本的线性元件,提出了几种蠕变模型;赵同彬等^[4]通过 Hooke 体与广义 Kelvin 体并联建立了能描述加锚岩石蠕变特性的 B-K 模型;高延法等^[5]分析了海域巷道流变机理,探讨了巷道围岩应力场的演变规律;勾攀峰等^[6]针对深井巷道两帮锚固作用机理及稳定性进行了力学计算、数值分析及现场观测;韦四江等^[7]研究了组合载荷作用下巷道围岩锚固体的变形破坏失稳过程及锚杆工作阻力的变化;王成等^[8]基于 Bingham 模型,分析了地应力、巷道半径、支护强度和围岩注浆等因素对巷道围岩蠕变的影响。

深部岩体具有大变形、非连续与非协调特性,其蠕变行为更多表现出的是非线性。许多学者对非线性蠕变做了大量的研究工作。王永岩等^[9]应用 Mohr-Coulomb 和 Griffith 破坏准则获得了高地应力岩体的蠕变破坏规律,并计算验证了郑榕明和孙钧提出的非线性流变理论;蒋斌松等^[10]通过将岩体的本构模型与非线性理论相结合,从理论上证明深部岩体的非线性蠕变具有混流行为;王进学等^[11]利用岩石损伤力学理论对锚固节理岩体的损伤破坏进行了研究,建立了加锚(加索)节理岩体贡献刚度矩阵的理论模型;文献[12-13]通过分析蠕变试验曲线,验证了蠕变参数随着时间的延长会发生变化,并通过不同方式定义了损伤变量;周小平等^[14]研究了损伤变量与深部岩体分区破裂化效应之间的关系等;伍国军等^[15]通过流变试验和大量的理论分析,结合大岗山水电站工程研究了流变岩体的锚固时效性,建立了非线性损伤黏弹塑性本构模型。深部岩体是一种具有初始损伤的非连续介质,其内部存在着大量节理和裂隙,考虑损伤对深部岩体蠕变破坏造成的影响是十分必要的。本文通过分析深部泥岩数字散斑蠕变试验曲线及图像,引入损伤变量 D_t 建立加锚体 BKS 非线性蠕变损伤本构模型,利用 FISH 函数实现其在 FLAC^{3D} 中的开发,并应用此模型对口孜东矿锚固围岩蠕变破坏过程进行数值模拟分析。

1 深部岩石蠕变试验及损伤演化方程

1.1 深部泥岩数字散斑蠕变试验

选用泥岩试件取自口孜东矿-1 000 m 水平大巷,试件尺寸加工为 80 mm×40 mm×25 mm,试件模型如图 1 所示。参照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),利用 RLJW-2000 微机控制试验机进行泥岩单轴压缩蠕变试验。整个蠕变试验过程中,采用数字散斑测量系统获取图像,图像分辨率为 4872 像素×3248 像素,图像的物面分辨率为 0.023 7 mm/像素,加载过程中散斑图像的采集速度为 5 帧/s,恒载过程中为 5 min/帧。

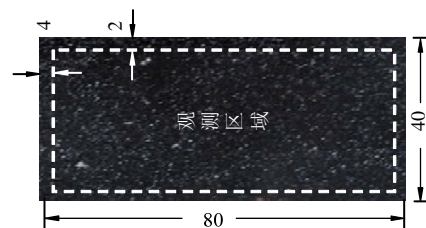


图 1 试件散斑场、尺寸及观测区域布置 (mm)

Fig.1 Specimen's speckle field, size and observation area layout

泥岩试件分级加载应力的变化曲线以及试验过程中的纵向应变试验曲线如图 2 所示。蠕变试验过程中,载荷级别(I~VII)分别为 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% 极限应力水平,总共历时 48.1 h。

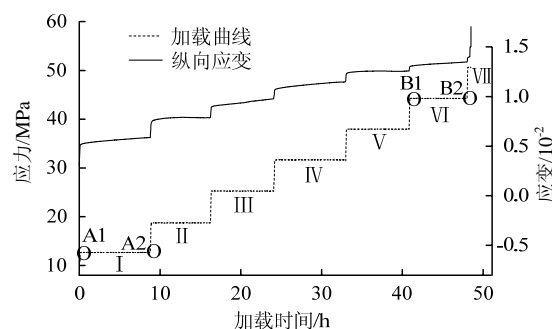


图 2 试验分级加载曲线及纵向应变演化

Fig.2 The curves of step loading and the vertical strain

将采集到的散斑图像通过 DSCM 数据处理系统进行分析^[16],分别选取各加载阶段荷载稳定后的第一张图片和下级加载前的最后一张图片(如图 2

中的 A1A2, B1B2), 得到相应阶段试件表面观测区域的蠕变阶段剪应变场, 其加载第 I, VI 阶段分析结果如图 3, 4 所示。

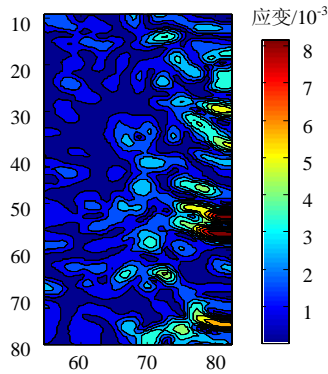


图 3 第 I 阶段试件剪应变场

Fig.3 The deformation field evolution of the first phase

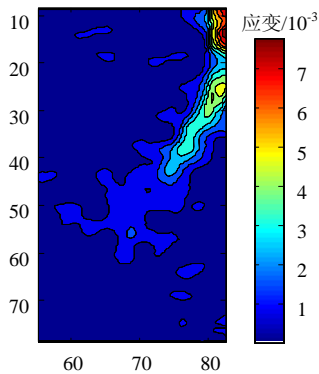


图 4 第 VI 阶段试件剪应变场

Fig.4 The deformation field evolution of the sixth phase

分级加载第 I 阶段, 加载应力值为 12.65 MPa。从图 3 可看出: 在加载过程中试件表面变形分布比较随机, 但已有多处出现变形集中的现象; 由于岩石是脆性材料, 试件变形集中区域与损伤集中部位相对应。由此可见, 在加载第 I 阶段试件已经存在损伤变形, 此时损伤程度较小, 与图 2 中的试件纵向蠕变曲线相符合。图 4 表示加载到第 VI 阶段时试件表面的变形状况, 加载应力值为 44.29 MPa。此时试件已出现明显的裂纹, 在恒载作用下, 蠕变变形累积到裂隙扩展阶段, 试件右上角变形集中区域演化为一 条剪切破裂带, 与图 2 中纵向应变的增大相符合。当分级加载到第 VII 阶段时, 经历较短暂的载荷恒定, 试件右上角的破裂带进一步扩展, 此时试件变形进入加速蠕变阶段, 最终整个试件发生失稳破坏。

1.2 损伤演化方程

深部岩体的蠕变应力和应变的关系是非线性

的, 其材料的蠕变特性与内部损伤机制是密不可分的, 岩体的蠕变性导致材料内部产生微裂缝及微空洞的贯通, 并在时间的推移下微裂缝不断发展, 致使围岩体的弹性模量逐渐降低。因此本文通过弹性模量的变化定义损伤变量:

D=1-E(t)/E_0(1)

式中: E_0 为岩体初始弹性模量; E(t)为 t 时刻的弹性模量。

本文采用文献[17]推导弹性模量与时间 t 关系的方法, 得出深部岩体弹性模量对时间的变化方程。当恒压力为 σ_0 时, 可得 t 时刻深部岩体的弹性模量表达式:

E(t)=σ_0/(p_1+p_2exp(-p_3t))(2)

式中 p_1, p_2, p_3 为试验待定参数。

则损伤演化方程可写为

D_t=1-σ_0/(E_0(p_1+p_2exp(-p_3t)))(3)

以分级加载第 III 阶段 (40% σ_c 应力水平, σ_0=25.31 MPa, E_0=2.53 GPa) 为例, 采用阻尼最小二乘法对蠕变试验数据进行拟合, 可以得到深部泥岩的相应损伤参数, 如表 1 所列, 相关指数为 0.968。根据拟合的试验参数, 通过式 (2), (3) 可分别得到弹模和损伤变量与时间的关系, 如图 5, 6 所示。

表 1 深部泥岩损伤参数

Table 1 Damage parameters of deep mudstone

岩性	p ₁	p ₂	p ₃
泥岩	0.007 887 865 104	-0.000 436 706 935	1.137 129 430 812

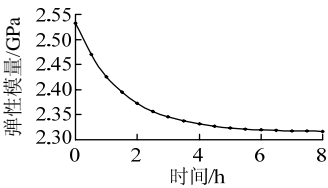


图 5 弹性模量随时间变化曲线

Fig.5 Curve of elastic modulus with time

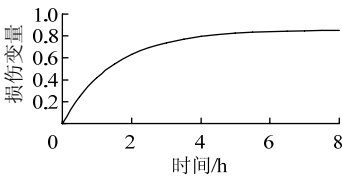


图 6 损伤变量随时间变化曲线

Fig.6 Curve of damage variable with time

由图 5 可看出: 深部泥岩的弹性模量随时间的增长逐渐减小, 且趋于稳定, 其长期弹模 E_∞=2.31

GPa。图 6 给出了泥岩损伤演化方程随时间变化的规律:随着时间的增长,损伤变量 D_t 逐渐变大且最终趋于稳定,其长期损伤变量 $D_\infty=0.85$,此时损伤变量较大,与图 2 中第 III 阶段的蠕变变形量较大的情况相一致。假设元件模型各蠕变参数损伤规律相同,可得出蠕变参数随时间变化的函数关系式

$$A(t) = A_0(1 - D_t) \quad (4)$$

式中 A 表示不同的蠕变参数。

2 非线性 BKS 蠕变损伤模型及其数值模拟实现

通过观察加锚岩体蠕变试验曲线,文献[4]中提出了一个加锚体 B-K 模型。本文以该 B-K 模型为基础,在黏弹阶段内引入考虑损伤变化的蠕变参数,可得到加锚岩体蠕变损伤 BKS 模型;其在一维状态下本构方程如式(5)所列,元件模型如图 7 所示。

$$\varepsilon_c = \sigma_0 \left[\frac{1}{\beta} + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\beta} \right) \exp \left(-\frac{\beta}{\alpha} t \right) \right] \quad (5)$$

式中: $\alpha = \frac{E_1 + E_b}{E_1 + E_2} \eta_0 (1 - D_t)$; $\beta = \left(\frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} + E_b \right) \times (1 - D_t)$; $\lambda = (E_1 + E_b)(1 - D_t)$; σ_0 为应力常数。其中, E_1 为瞬时弹性模量, E_2 为 K 体弹性模量, E_b 为加锚弹性模量, η_0 为 K 体黏性系数。

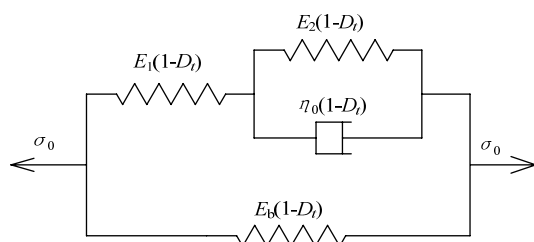


图 7 BKS 元件模型

Fig.7 The model of BKS

FLAC^{3D} 内嵌 FISH 程序语言,用户可用于自定义变量和新建 FISH 函数,从而增加了本构模型构建的开放性,扩大了 FLAC^{3D} 的应用。本文利用 FISH 函数编写嵌入损伤变量 D_t ,实现 BKS 模型在 FLAC^{3D} 中的程序开发,其具体计算实现过程如下:

- 1) 针对具体工程问题,建立计算模型,进行网格划分;
- 2) 将单元体定义为加锚岩体材料,输入初始材料参数,包括岩体密度、瞬时体积模量、剪切模量、K 体剪切模量、K 体黏性系数等;
- 3) 施加初始及边界条件,进行单元应力及应变

计算分析;

4) 每荷载步计算岩石单元的围压状态,由表 1 试验参数可求得损伤变量 D_t ,利用编写的 FISH 函数将损伤变量 D_t 嵌入 FLAC^{3D} 中,修正 BKS 的蠕变参数;

5) 循环载荷步,直至达到最大不平衡力收敛,计算结束。

3 口孜东矿深部锚固支护巷道破坏特征研究

3.1 工程概况

口孜东矿位于淮南煤田西部,井田倾向宽 3.0~7.3 km,走向长 7.4 km,面积约 33.6 km²;煤层倾角南翼比较平缓,一般为 5°~10°,北翼稍陡,一般为 10°~18°。111303 工作面巷道沿 13-1 煤层掘进,煤层厚度为 4.36 m。13-1 煤层顶板是一层 12 m 左右厚的泥岩,该层泥岩呈灰色,泥质结构为主,局部鳞片状,滑面发育,岩性较差,是典型的煤矿软岩,自承载能力较低。其基本支护方式是锚杆(索)+金属网支护,锚杆长度 2.5 m,间排距 700 mm×700 mm;锚索长度 6.3 m,间排距为 1500 mm×1400 mm;M5 钢带沿巷道走向布置,压在锚索垫板之上。

3.2 计算模型的构建及力学参数选取

建立数值模型长 80 m、宽 50 m、高 50 m,巷道形状为圆拱形,宽 5.8 m,高 4.3 m,巷道三维计算模型如图 8 所示。巷道开挖后,模拟支护现场中锚杆的支护范围为 2.3 m,锚索的支护作用范围为 6.0 m。模型底面垂直方向约束,四周采用水平方向位移固定,竖直方向自由,顶部为应力边界。考虑岩体的初始应力主要由上覆岩层的自重引起,埋深 1 000 m,平均容重 $\gamma = 2 530 \text{ kN/m}^3$,故在顶面上方施加 25.3 MPa 的均布载荷(相当于蠕变试验中分级加载第 III 阶段)。

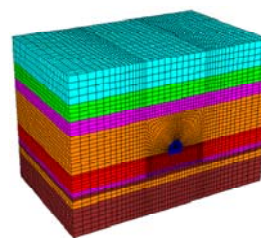


图 8 三维计算模型

Fig.8 Three dimensional calculation model

深部巷道围岩变形破坏的主要因素是蠕变特性。模拟初始地应力场计算时,所需本构模型采用

伯格斯黏弹塑性模型；巷道开挖后，锚杆支护范围
置的摩尔库仑体进行计算。模拟计算所需力学参数
采用 BKS 模型；判断围岩进入塑性依据 FLAC^{3D} 内
见表 2，3 所列。

表 2 伯格斯模型的岩层物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock in Burgers model

岩性	岩体密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	体积模量 K/GPa	Maxwell 剪切模量 G_M/GPa	Kelvin 剪切模量 G_K/GPa	Maxwell 黏性系数 $\eta_M/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	Kelvin 黏性系数 $\eta_K/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	黏聚力 c/MPa	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$	单轴抗拉 强度 R_t/MPa	剪胀角 $\varphi/(^{\circ})$
砂质泥岩	2 570	6	5	3	800	700	3	35	0.2	12
粉砂岩	2 700	8	6	2	900	1 000	4	40	0.4	13
中砂岩	2 650	8	6	2	900	1 000	3	35	0.6	20
细砂岩	2 600	7	4	3	600	800	4	40	0.8	13
泥岩	2 500	6.5	5	1	1 000	1	2.8	35	0.8	10
煤	1 350	2	1	0.9	200	150	1	28	0.6	10
碳质泥岩	2 570	6	5	3	800	700	3	35	0.8	12

表 3 BKS 模型的岩层物理力学参数
Table 3 Physical and mechanical parameters of rock in BKS model

岩性	岩体密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	体积模量 K/GPa	剪切模量 G_1/GPa	K 体剪切模量 G_2/GPa	K 体黏性系数 $\eta_0/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	黏聚力 c/MPa	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$	单轴抗拉强度 $R_t(\text{MPa})$	剪胀角 $\varphi/(^{\circ})$
泥岩	2 500	8.40	50.41	54.63	3 019.35	2.8	35	0.8	10

3.3 数值模拟结果分析

分别对不考虑损伤与考虑损伤 2 种工况进行数值模拟。结果表明：考虑损伤的巷道围岩破坏区明显大于不考虑损伤时的情况，蠕变时间越长，其差异性越明显。如图 9 所示，巷道经过 16 d 时考虑损伤的破坏区范围开始出现增大现象；当蠕变 50 d 时考虑损伤情况的破坏范围逐渐扩大，且在锚杆支护范围外开始产生破坏区，围岩内部出现非连续性破坏现象；当蠕变 80 d 时不考虑损伤情况的巷道顶板

围岩破坏范围最大为 3.78 m，而考虑损伤的巷道锚固部分围岩的破坏区域最大达到 4.2 m，并且在巷道围岩深部形成另一个圈层的破坏区(外圈破坏区)。巷道围岩经过长时间的蠕变损伤破坏后，最终形成的破坏区特征为：内圈破坏区的范围为 2.8~4.2 m，大于锚杆支护长度 2.3 m；外圈破坏区的范围为 6.4~7.5 m，大于锚索支护长度 6.0 m；巷道围岩破裂已经超过锚杆锚索的有效支护范围。

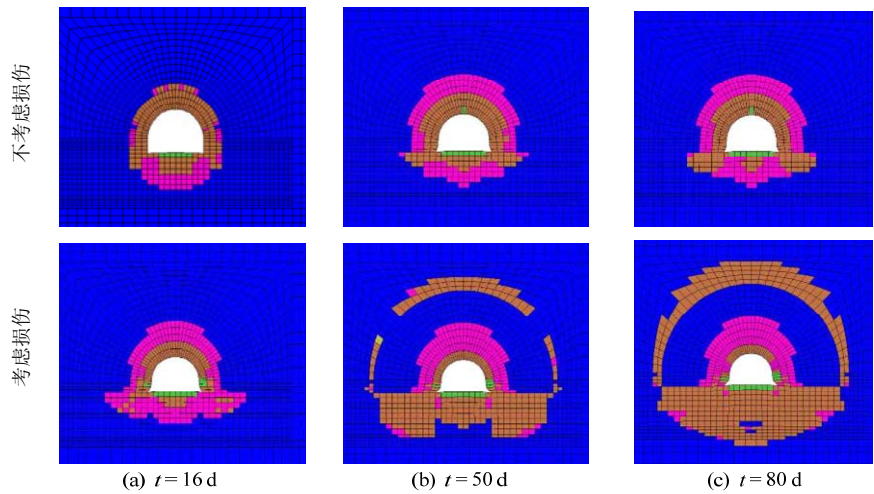


图 9 巷道围岩破坏区分布情况
Fig.9 Failure distribution of roadway surrounding rock

3.4 现场钻孔探测分析

采用 YTJ20 型岩层探测记录仪对巷道顶板的

破坏情况进行钻孔探测，该仪器图像分辨率可达 0.1 mm，可用于巷道围岩离层、破裂、错位、岩性

变化等情况的探测。现场顶板岩层的钻孔探测如图 10 所示, 探测结果表明: 口孜东矿 111303 工作面巷道围岩松动破坏区范围为 2~3 m, 离层与裂隙共存区范围一般在 3~4 m, 且在 6~7 m 之间深处仍存在一定范围的破裂区, 围岩内部不连续破坏现象明显, 超过顶板锚杆锚索的锚固支护范围。

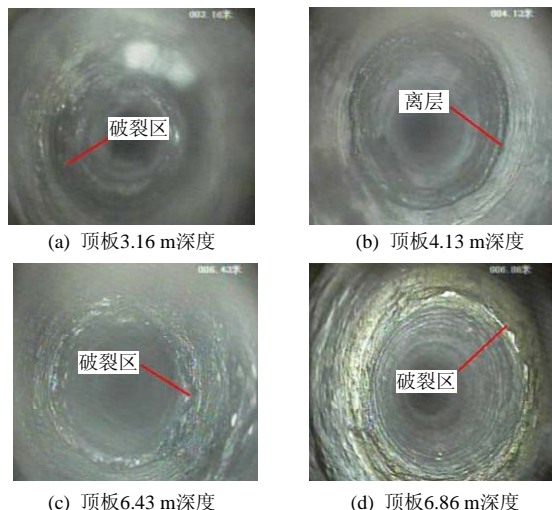


图 10 顶板岩层钻孔探测图

Fig.10 Borehole detecting figure of roof

在距离行人上山开口 220 m 位置处对巷道断面的顶底板和两帮进行位移量监测, 由图 11 可知: 巷道开挖后 76 d 内, 围岩变形一直处于持续增加状态, 顶底板累计变形量达到 934 mm, 两帮累计变形量达到 625 mm; 且变形速度较大, 顶底板移近速度为 12.29 mm/d, 两帮移近速度为 8.22 mm/d。

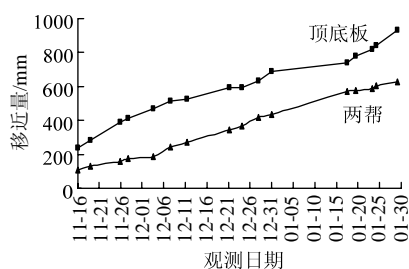


图 11 巷道围岩位移监测值

Fig.11 Displacement monitoring values of surrounding rock of roadway

综合分析得到的顶板岩层破裂情况如图 12, 通过上述现场实测数据和 BKS 模型模拟结果对比分析可知: 不考虑蠕变损伤的情况下, 围岩顶板产生的蠕变破坏范围明显小于现场钻孔探测结果, 且未出现非连续性破裂现象; 而考虑损伤的情况下, 围岩顶板的破坏范围与现场钻孔探测结果更为接近, 在锚固范围外仍出现蠕变破坏, 非连续性破裂特征

现象明显。因此, 在数值模拟研究中考虑损伤效应的锚固围岩体破坏范围, 能更客观地反映深部岩体的蠕变破坏特征, 与现场工程实际趋于一致。

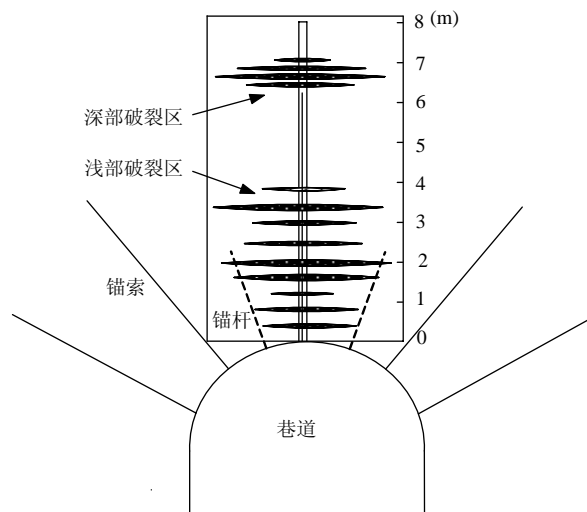


图 12 顶板岩层破裂探测情况

Fig.12 The detecting situation of roof fracture

4 结 论

1) 室内数字散斑蠕变试验表明: 分级加载第 I 阶段泥岩试件表面变形集中现象较为明显, 深部岩体在较低应力水平时便开始出现损伤; 随着载荷级别增加, 试件损伤逐渐增大, 变形集中区域逐渐演化为一处剪切破裂带, 直至整个试件发生破坏。这揭示出深部岩体的蠕变破坏是一个非线性的损伤演化过程。

2) 通过对深部岩体的损伤演化方程进行分析, 得到蠕变损伤的特征参数及演化规律, 并基于加锚岩体 B-K 模型引入损伤变量 D_t , 建立了 BKS 蠕变损伤模型, 利用 FISH 函数成功实现其在 FLAC^{3D} 中的开发。

3) 应用自定义的 BKS 蠕变损伤模型对口孜东矿 111303 工作面锚固支护巷道围岩的蠕变破坏进行了数值模拟, 结果表明深部岩体的损伤发育增大了顶板围岩的蠕变破坏区范围, 非连续性破裂特征现象明显; 通过模拟结果与现场钻孔探测结果对比分析, 可以说明考虑损伤效应的数值模拟研究更能客观地反映深部岩体的蠕变破坏特征, 更接近现场工程实际情况。

参考文献:

- [1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.

- SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [2] 刘姗姗, 赵同彬. 黏弹性广义 Kelvin 模型的 FALC^{3D} 二次开发[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 20-23.
- LIU Shanshan, ZHAO Tongbin. Secondary development on generalized viscoelastic Kelvin model with FLAC^{3D} [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 29(4): 20-23.
- [3] 刘钦, 李树才, 李利平, 等. 软弱破碎围岩隧道炭质页岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 21-28.
- LIU Qin, LI Shucui, LI Liping, et al. Experimental study of carbonaceous shale creep characters of weak broken surrounding rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup 2): 21-28.
- [4] 赵同彬, 谭云亮, 刘珊珊, 等. 加锚岩体流变特性及锚固控制机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1730-1734.
- ZHAO Tongbin, TAN Yunliang, LIU Shanshan, et al. Analysis of rheological properties and control mechanism of anchored rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1730-1734.
- [5] 高延法, 曲祖俊, 牛学良, 等. 深井软岩巷道围岩流变与应力场演变规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1244-1252.
- GAO Yanfa, QU Zujun, NIU Xueliang, et al. Rheological law for soft rock tunnel and evolution law for stress field in deep mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1244-1252.
- [6] 勾攀峰, 辛亚军, 申艳梅, 等. 深井巷道两帮锚固体作用机理及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 7-13.
- GOU Panfeng, XIN Yajun, SHEN Yanmei, et al. Stability analysis and mechanism of two-side anchorage body in deep mine gateway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 7-13.
- [7] 韦四江, 勾攀峰. 巷道围岩锚固体变形破坏特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 199-204.
- WEI Sijiang, GOU Panfeng. Experimental study on deformation and failure characteristics of anchored body in roadway surrounding rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 199-204.
- [8] 王成, 汪良海, 张念超. 高应力软岩巷道围岩流变动态演化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 14-18.
- WANG Cheng, WANG Lianghai, ZHANG Nianchao. Research on the dynamic evolutionary of rock rheology in soft rock with high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 14-18.
- [9] 王永岩, 齐珺, 杨彩虹, 等. 深部岩体非线性蠕变规律研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 117-121.
- WANG Yongyan, QI Jun, YANG Caihong, et al. A study of nonlinear creep law in deep rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 117-121.
- [10] 蒋斌松, 蔡美峰, 贺永年, 等. 深部岩体非线性 Kelvin 蠕变变形的混沌行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1862-1867.
- JIANG Binsong, CAI Meifeng, HE Yongnian, et al. Chaotic behavior of nonlinear Kelvin creep of rock mass in deep ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1862-1867.
- [11] 王进学, 沈杰, 陈忠辉. 锚固节理煤岩巷道的损伤力学研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 203-207.
- WANG Jinxue, SHEN Jie, CHEN Zhonghui. Study into damage mechanics of anchoring reinforced roadway in jointed coal rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 203-207.
- [12] 缪协兴, 陈至达. 岩石材料的一种蠕变损伤方程[J]. 固体力学学报, 1995, 16(4): 343-346.
- MIAO Xiexing, CHEN Zhida. A creep damage equation for rocks[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1995, 16(4): 343-346.
- [13] 金丰年, 范华林. 岩石的非线性流变损伤模型及其应用研究[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2000, 1(3): 1-5.
- JIN Fengnian, FAN Hualin. Study of nonlinear rheology damage property of rock[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2000, 1(3): 1-5.
- [14] 周小平, 周敏, 钱七虎. 深部岩体损伤对分区破裂化效应的影响[J]. 固体力学学报, 2012, 33(3): 242-250.
- ZHOU Xiaoping, ZHOU Min, QIAN Qihu. Influence of rock damage on zonal disintegration around deep circle tunnels[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2012, 33(3): 242-250.
- [15] 伍国军. 地下工程锚固时效性及可靠性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [16] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1352-1356.
- SONG Yimin, JIANG Yaodong, MA Shaopeng, et al. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1352-1356.
- [17] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246-251.
- XU Hongfa. Time dependent behaviours of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 246-251.