

FLAC 锚杆单元模型的修正及其应用*

漆泰岳¹ 陆士良² 高波¹

(¹ 西南交通大学土木工程学院 成都 610031) (² 中国矿业大学能源工程与工程学院 徐州 221008)

摘要 对 FLAC^{2D}3.3 中的锚杆单元模型进行了修正,使其具备模拟锚杆损伤软化的功能。实例分析表明,修正后的模型可有效模拟大变形巷道锚杆支护的特有规律。

关键词 采矿工程,大变形巷道,锚杆,力学特性,围岩控制

分类号 TD 345

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)13-2197-04

AMENDED MODEL OF BOLT ELEMENT IN FLAC AND ITS APPLICATION

Qi Taiyue¹, Lu Shiliang², Gao Bo¹

(¹ College of Civil Engineering, SWJTU, Chengdu 610031 China)

(² College of Mineral and Energy Resources, CUMT, Xuzhou 221008 China)

Abstract It is shown from the in-situ monitoring and laboratory experiments that the declining, function-losing, damaging and softening, are the mechanical characteristics of rock bolts in roadways with large deformation. So the model of bolt element in FLAC3.3, a software, is amended to simulate the process of damaging and softening of rock bolts. The research result has been successfully applied in practical works.

Key words mining engineering, roadway with large deformation, rock bolt, mechanical characteristics, control of surrounding rock masses

1 引言

现场实测和实验室测定表明:大变形巷道的锚杆支护一般要经历初锚、增阻、恒阻、降阻直至失效的过程,锚杆工作阻力下降直至失效是大变形巷道锚杆支护所特有的规律(见图1)^[1~4]。因此,在数值模拟大变形巷道的锚杆支护时,软件应当具备模拟锚杆这一特性的功能。但目前许多软件都不具备这一功能^[5,6]。虽然 FLAC 能够模拟全锚锚杆,当变形较小时锚杆的力学特性曲线比较接近实际,但当变形较大时锚杆的锚固力仍然保持恒定不

发生下降,与实际情况不符(图2)^[7]。本文对此加以探讨。

2 原来的 FLAC 锚杆单元模型

FLAC 的锚杆模型是一种理想弹塑性模型(图2)。随着围岩的变形,锚杆工作阻力以线弹性增长到最大值,锚杆进入理想塑性状态,并保持在最大工作阻力上。

2.1 基本方程

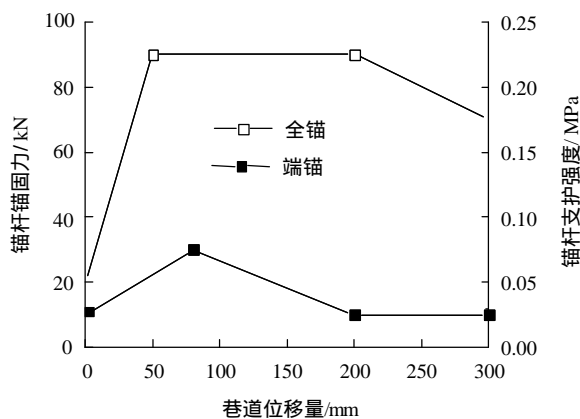
(1) 线弹性段:

$$\Delta F = \min\{\Delta F_b^t, \Delta F_c^t\} \quad (1)$$

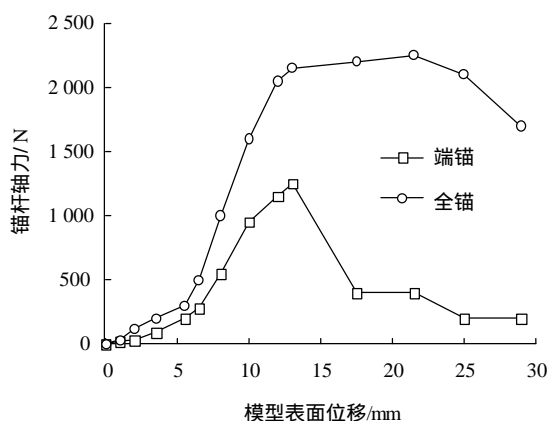
2002年4月26日收到初稿,2003年4月4日收到修改稿。

* 高等学校博士学科点专项基金(97029006)资助项目。

作者 漆泰岳 简介:男,1958年生,博士后,现任教授、博士生导师,主要从事巷道矿山压力及围岩控制、高速铁路隧道空气动力学和各类隧道施工力学方面的研究工作。E-mail: qitaiyue21@sina.com。



(a) 实测曲线



(b) 实验室测定曲线

图1 锚杆力学特性实测曲线

Fig.1 Measured curves of mechanical characteristics of bolts

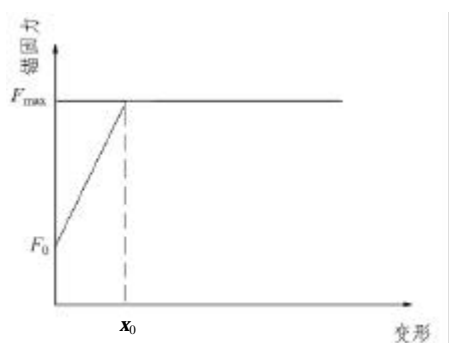


图2 FLAC 锚杆单元模型

Fig.2 Original model of bolt element in FLAC

式中: $\Delta F_b^t = \frac{EA}{\Delta L} \Delta u^t$, $\Delta F_c^t = K_c \Delta u^t$ 。其中, ΔF_b^t , ΔF_c^t 分别为任意时步单位长度锚杆杆体承受的轴力和锚固剂的剪切力的增量(单位为 N/m); E 为单位长度锚杆杆材的弹性模量(单位为 Pa/m); A 为锚杆杆体的横截面积(m^2); Δu^t 为任意时步锚杆的变形量(m); ΔL 为锚杆单元的长度(m); K_{bond} 为锚固剂

的刚度(N/m/m); F_{max} 为锚杆的最大轴力(N)。

(2) 理想塑性段:

$$\frac{F_{max}}{L} = S_c + p' p_e \tan j \quad (2)$$

式中: L 为锚杆的锚固长度(m), S_c 为锚固剂的最大剪切力(N/m), p' 为锚杆钻孔周边的压力(Pa), j 为锚固剂剪切摩擦角($^\circ$), p_e 为锚杆钻孔的周长(m)。

2.2 强度条件

锚固剂的屈服剪切强度为

$$[t] = \frac{S_c}{\alpha(D+2t)} \quad (3)$$

式中: $[t]$ 为锚固剂的屈服剪切强度(Pa), D 为锚杆直径(m), t 为锚杆钻孔与锚杆之间的间隙(m)。

3 修正的 FLAC 锚杆单元模型

修正的 FLAC 锚杆单元模型见图 3。

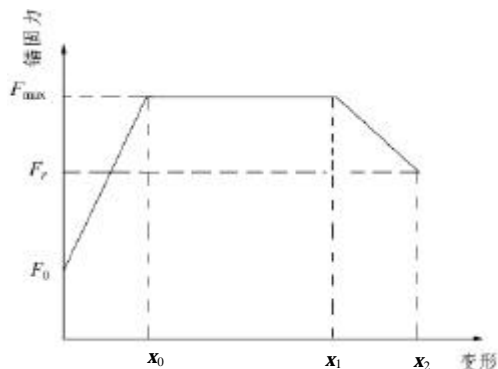


图3 修正的 FLAC 锚杆单元模型

Fig.3 Amended model of bolt element in FLAC

(1) 增阻段:

$$K_{bond}^I = \min \left\{ \frac{EA}{\Delta L}, K_{bond} \right\} \quad (4)$$

(2) 恒阻段: 当锚杆达到屈服剪切强度时, 其轴力取为 F_{max} 。

(3) 损伤软化段(即降阻段):

$$K_{bond}^D = -\frac{F_{max} - F_r}{L(x_2 - x_1)} \quad (5)$$

式中: K_{bond}^I , K_{bond}^D 分别为锚杆增阻速度和损伤软化速度, 单位为 N/m/m; x_0 , x_1 , x_2 分别为锚杆在发生屈服时、开始损伤软化时和残余轴力时相应的变形量(m); F_r 为锚杆的残余轴力(N)。

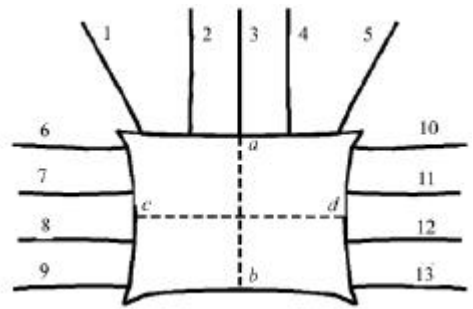
(4) FLAC 中的内存堆栈技术

在 FLAC 中, 所有重要信息(网格坐标、材料参

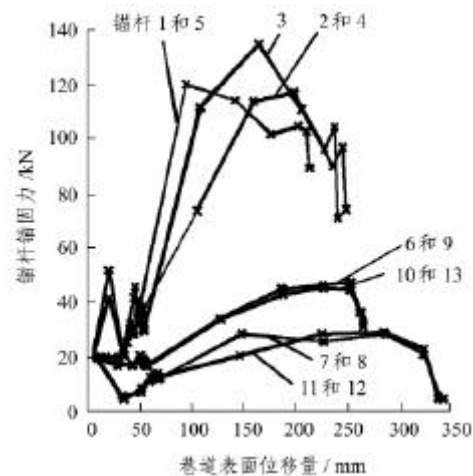
数等)都是采用内存堆栈技术进行存贮的,即调用 FISH 函数的参数地址存贮函数 $\text{imem}(i)$ 和参数存贮函数 $\text{fmem}(i+j)$ (其中 i 为地址指针, j 为地址指针偏移量)。一个地址指向对应的位置,用于存放数据;指针变量为整数变量,而数据变量为浮点数变量。锚杆结构单元材料指针与锚杆单元的安装顺序正好相反,即先存入的单元数据在最后取出,最后存入的数据最先取出。应用 FISH 函数编程时,一定要遵循这一原则。

(5) 修正的锚杆单元模型编程

用数组 $x(i)$ 分别记录每根锚杆的所有单元节点 ($i=1, 2, \dots, n$) 的位移量,其中 i 为锚杆节点数, n 表示某根锚杆锚头的节点数。由 $x(i)$ 记录的锚杆单元节点的位移量,再根据实验室和现场测试得到的锚杆力学特性曲线(图 4),就能确定各锚杆单元节点的锚固力值。



(a) 巷道围岩变形、锚杆编号及测站布置



(b) 锚杆的力学特性曲线

图 4 巷道围岩变形情况及锚杆的力学特性曲线
Fig.4 Deformation of surrounding rock masses and mechanical property of rock bolts

根据上述原理编程,并将程序嵌入到 FLAC 程序中,就能获得锚杆在不同变形阶段的锚固力大小,

从而能反映出锚杆的实际力学特性曲线。由于程序清单太长,在此略去。

4 实例分析

本文利用晋城矿务局成庄煤矿 2207 综采放顶煤工作面煤巷锚杆支护设计的实例,对锚杆力学特性的全过程进行研究。

(1) 地质条件及模拟步

煤层及地质条件如表 1,埋深为 440 m,巷道沿底板掘进,其顶板为 3.1 m 厚的节理裂隙十分发育的顶煤。巷道宽 4 m,高 3 m,锚杆间排距为 0.8 m。顶板布置 5 根 $\phi 20$ mm、长 2 m 的全长树脂锚固螺纹钢锚杆,每排锚杆用 W 型钢带连接;两帮各布置 4 根 $\phi 16$ mm、长 1.8 m 的端头树脂锚固圆钢锚杆,用拉杆连接。

表 1 成庄矿煤巷地质条件

Table 1 Geological condition of roadway of Chen Zhuang coal mine					
层号	岩性	柱状	厚度 /m	抗压强度 /MPa	岩性特征
1	粉砂岩		4.25	55	泥质胶结, 含少量细粉砂岩
2	砂质泥岩		1.04	40	泥质胶结
3	炭质泥岩		0.66	20	大部分缺失, 随采掘脱落
4	煤		6.52	30	上部较坚硬, 节理裂隙发育, 下部有 0.6 m 厚的软煤
5	粉砂岩		1.24	45	泥质胶结。
6	细砂岩		1.2	55	含少量云母

模拟步为: 原岩应力步; 开挖巷道步; 巷道支护步; 继续加载步; 回采加载步。

(2) 模拟结果及分析

图 4 为巷道的围岩变形情况和锚杆的力学特性曲线。从图 4(b)可以看出,巷道在掘进影响和稳定阶段的围岩相对移近量为:顶、底板 121 mm;两帮 137 mm。在回采影响阶段的顶、底板相对移近量为 434 mm;两帮 569 mm。整个掘进、回采阶段的围岩相对移近量为:顶、底板 555 mm;两帮 706 mm。在掘进影响和稳定阶段,所有的锚杆都处于良好的工作状态;在回采影响阶段,所有锚杆的工作阻力开始下降,除部分帮锚杆趋于失效外,大部分锚杆仍在发挥作用。

(3) 技术措施及效果

根据数值模拟的结果,在工作面回采期间,在工作面前方 50 m 范围内,增加了临时加强支护,以避免回采期间锚杆完全失效,确保巷道围岩稳定。实践证明,根据理论研究成果,采取相应的技术措施,使巷道围岩的变形量控制在锚杆所允许的范围内,现场观测顶、底板相对移近量为 466 mm,两帮相对移近量为 560 mm,确保了生产安全。

5 结 论

(1) 在大变形巷道中,锚杆的工作阻力下降(即损伤软化)是一种必然规律,现场实测和实验室研究都证明了锚杆的这一力学特性。但目前的商业化数值分析软件都不具备模拟锚杆这一特性的功能。本文对 FLAC3.3 中的锚杆单元模型进行修正,使其具备了这一功能。

(2) FLAC 中的 FISH 函数功能强大,充分利用 FLAC 的内存堆栈技术,能有效弥补 FLAC 的不

足。

(3) 本文使用修正后的锚杆单元模型进行了锚杆支护设计,采取了相应的技术措施,实践表明效果良好。

参 考 文 献

- 1 陆士良,汤 雷,杨新安著. 锚杆锚固与锚固技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998
- 2 陆士良,漆泰岳. 强初撑急增阻高阻力锚杆的支护机理[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):5~7
- 3 陆士良,付国彬. 采动巷道岩体变形与锚杆锚固力变化规律[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(3):201~203
- 4 郝海金,漆泰岳. 预应力加长杆锚杆的应用[J]. 矿山压力与顶板管理,1999,(3/4):143~146
- 5 刘 涛,杨凤鹏. 精通 ANSYS[M]. 北京:清华大学出版社,2002
- 6 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京:机械工业出版社,2002
- 7 Itasca Consulting Group Inc. manual of FLAC—fast lagrangian analysis of continua[R]. [s. l.]: [s. n.], 1996

古田隧道——“缝合”在山体上的隧道

全长 1 838 m 的古田隧道,沿南水河穿行山体外侧,其地表覆盖层最薄处仅为 4 m,山体围岩又属于见水成泥的千枚状页岩,而且严重偏压。去年 1 月 11 日以来,隧道掌子面上多次出现黄土夹带着树干、树根涌入洞内的现象,山体上也出现了多处裂缝和陷坑。6 月 26 日,隧道进口方向长达 260 多米的山体发生整体滑坡,隧道移动竟达 1.5 m。

古田隧道整体滑动这种极其罕见的现象,引起了铁道部、上海铁路局赣—龙线工程指挥部以及有关设计科研机构的高度重视,铁道部工程管理中心专家说:“搞了一辈子铁路,还没有见过这样的地质状况”。

中铁十一局集团赣—龙铁路指挥部工程技术人员在专家的指导下,对治理大面积滑坡的各种方案进行了反复的试验和测算,首次在中国隧道施工史上使用了山体滑坡整体“缝合”技术;洞内采用了预应力中空锚杆、偏压式钢筋混凝土和可缩性钢架,进行超强支护,洞外上排采用锚索桩、中间为微型锚筋桩、下排采用锚固桩并配设预应力锚索。职工们用潜孔钻在山体上钻出几十个 40 m 深的“针孔”,然后,以成束的钢筋、钢索当线,精心地缝合那几乎坠落的山体。许多人见了都说:现在科学技术发展了,什么奇迹都会创造出来,过去只说缝衣服,现在连山都能缝。

(摘自 2004 年 4 月 25 日《科技时报》第 3 版)