

问题探讨

岩层移动模拟研究中模型范围问题探讨

陈晓祥¹, 谢文兵¹, 魏文政², 宋勤发²

(1. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 2. 郑州煤炭工业(集团)有限责任公司, 河南 郑州 452300)

摘 要: 基于岩层控制的关键层理论和开采沉陷理论, 采用相似材料模拟试验、FLAC 和 UDEC 数值模拟计算, 对岩层移动模拟研究中如何确定模型上边界范围进行了研究。研究结果表明, 当模型中存在关键层时, 应将模型的上边界取至主关键层以上, 否则将导致岩层载荷分布和破断距的严重失真; 当模型中不存在关键层时, 应将模型上边界取至导水断裂带以上, 否则会导致岩层破断距的严重失真和载荷集中程度偏大。

关键词: 模型范围; 岩层移动; 数值模拟; 关键层

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336 (2006) 06-0073-04

Discussion on model scope for simulation research of strata displacement

CHEN Xiao-xiang¹, XIE Wen-bing¹, WEI Wen-zheng², SONG Qin-fa²

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Zhengzhou Coal Industrial Group Corporation Ltd., Zhengzhou 452300, China)

Abstract: Base on the key layer theory and mining subsidence theory of the strata control, with the simulated material simulation test and the FLAC and UDEC numerical simulation calculation, the paper studied how to set the top boundary scope of the model for the strata displacement simulation. The research results showed that when a key layer in the model, the top boundary of the model should be set above the key layer, otherwise, the load distribution and broken distance of the rock stratum would seriously not be true to the original. When no key layer in the model, the top boundary of the model should be set above water conductive cracking zone, otherwise, the broken distance of the rock stratum would seriously not be true to the original and load concentration would be too high.

Key words: model scope; strata displacement; numerical simulation; key layer

1 概 述

在对采矿问题和岩土工程开采或开挖问题进行数值模拟的过程中, 首要的问题是确定模型的范围。从理论上讲, 计算模型越大, 边界效应对分析问题的影响越小, 但考虑到计算机运行速度和内存对模拟问题单元数的限制, 不可能把模型范围取得无限大, 只能确定一个合理的范围, 对研究问题的结果不产生显著影响即可。对于模型的左右边界, 根据弹性力学分析, 一般应位于距离巷道周边 5 倍巷道跨度以外, 然而合适的距离取决于分析的目的。传统的做法是根据该研究问题所在矿区的实际地质资料把模型左右边界取在采动影响以外或采动影响较小的位置, 模型的下边界一般可以根据采场端部岩体破坏区理论取在采场底板破坏深度以下, 而模型的上边界范围一直是争论的焦点, 需要进行

深入地研究, 利用相似模拟实验和计算机数值模拟对此问题进行了探讨, 认为目前的处理方法有 2 种, 一种就是将模型上边界取到主关键层以上, 另一种方法就是将模型上边界取到导水断裂带以上。

相似模拟实验和计算机数值模拟是目前研究煤矿采场覆岩移动规律的重要方法。当覆岩中有关键层时, 只有主关键层上部岩层可以简化为均布载荷加在模型上边界, 主关键层及其下部岩层必须全部铺设^[1]。另一种是基于开采沉陷学理论, 它将开采引起的弯曲带以上的岩层简化为均布载荷加在模型上边界, 断裂带以下的岩层全部铺设。本文将基于这 2 种理论和方法, 探讨模型上边界的合理确定问题。

2 基于岩层控制关键层理论的取法

该方法的前提是模型中存在关键层, 此时可将

模型上边界取到主关键层以上,上边界以上到地表的岩层则简化为均布载荷加在模型上边界。为了探讨这样的取法是否合理,试验设计了2个相似材料模拟模型^[2],模型的几何相似比为1:100,采用平面应力模拟实验台进行了对比研究。

2.1 相似材料模拟试验^[3]

模型一模拟煤层埋深300 m,模型宽度300 m,煤层厚3 m,直接顶厚4 m,基本顶厚10 m,主关键层在基本顶上方15 m,厚20 m。模型上边界取到主关键层上方20 m,以上基岩和表土层总厚度220 m,简化为均布载荷加在模型上边界。模型二模拟的煤层埋藏条件和各分层岩性与模型一相同,模型上边界取到基本顶上方15 m,即主关键层下方,以上基岩和表土层总厚度260 m,简化为均布载荷加在模型上边界。

以基本顶的初次破断距作为考察对象,对比模型一和模型二的试验结果。图1a、1b分别为随煤层开采,模型一和模型二的基本顶初次破断的情况。从实验结果可以看出,模型一在煤层开采55 m时,基本顶发生初次破断,并导致其上覆直至主关键层以下的所有软岩层都同步破断,在主关键层下方出现了明显的离层。模型二在煤层开采35 m时,主关键层发生初次破断。与模型一相比,模型二中基本顶的初次破断距小20 m,相差达36.37%,显然,将模型的上边界取在主关键层下方导致了模型二中基本顶初次破断距偏小。

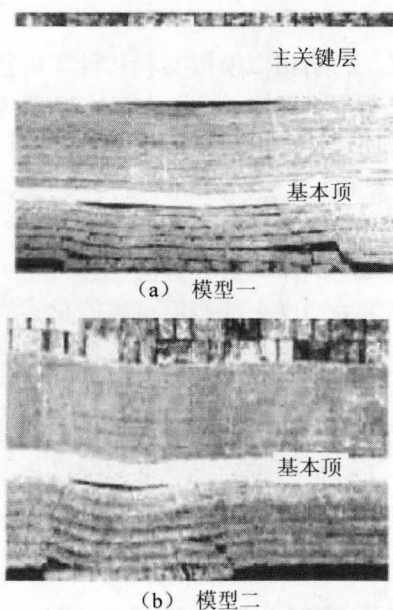


图1 相似材料模拟试验结果

2.2 计算机数值模拟试验

为了研究模型上边界位置对模拟结果的影响,采用了中国矿业大学“211”工程引进的数值模拟软件FLAC^{2D}和 UDEC 进行了对比研究。

FLAC^{2D}是二维有限差分软件,适用于岩土工程中边界形状复杂及非线性问题的数值模拟。UDEC 是二维离散元数值模拟软件,适用于岩土工程中非连续体力学行为的数值模拟^[4]。与其他数值计算软件如 ANSYS, ADINA 相比,FLAC^{2D}和 UDEC 的最大特点是计算分析岩土工程中的物理不稳定问题,因而特别适用于岩土工程中几何和物理高度非线性问题的稳定性分析,如采场的采动影响规律,软岩巷道的大变形问题,采动后的地表沉降,露天矿的边坡稳定,软土的地基稳定,水坝的稳定性问题等。

2.2.1 UDEC 数值模拟及其结果分析

设计了3个模型进行分析,模型一模拟的煤层埋藏条件和岩体力学参数见图2和表1,模型上边界取到地表。模型二上边界取到主关键层上方20 m,以上基岩和表土层总厚度220 m,简化为均布载荷加在模型上边界。模型三模拟的各分层厚度和岩体力学参数与模型一相同。模型上边界取到基本顶上方15 m (主关键层下方),以上基岩和表土层总厚度260 m,简化为均布载荷加在模型上边界。

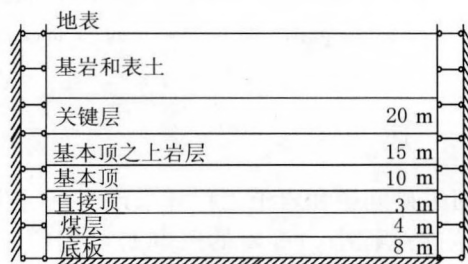


图2 数值分析模型

表1 模型各岩层力学参数

岩层	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/ GPa	泊松 比	内摩擦角/ (°)	抗拉强 度/MPa	内聚力/ MPa
底板	2 500	22	0.22	24	13	18.4
煤层	1 300	3.1	0.3	35	1.2	5.2
直接顶	2 500	46	0.23	31	12	23.4
基本顶	2 500	46	0.23	32	12	23.4
基本顶上	2 500	46	0.23	32	12	23.4

图3a, 3b和3c分别是模型一、模型二和模型三的工作面采宽0, 20, 40, 60和80 m时基本顶上载荷分布规律^[5]。结果表明, 关键层对其下部岩层的载荷分布及破断距有显著影响^[4~7]。

(1) 未开采时, 2个模型基本顶上的载荷都是近似均匀分布的。

(2) 开采以后, 基本顶上的载荷就变为非均匀分布, 工作面煤壁前的顶板岩层中, 存在很高的应力集中, 而工作面顶板及邻近采空区顶板一定高度内存在一个应力降低区, 处于应力降低区的基本顶上的载荷低于上覆岩层重量, 处于应力升高区的基本顶上的载荷大于上覆岩层重量。

(3) 随着工作面向前推进, 基本顶上的载荷是动态变化的, 在采空区上方逐步降低, 而在采空区两侧的集中逐渐增大, 且随着工作面的推进, 应力峰值也逐渐右移。当采空区尺寸达到一定值后

(如60 m), 基本顶在采空区部分的载荷趋于定值, 如采空区中部的0.05 MPa。

(4) 对比图3a和图3b可见, 随着工作面的推进, 模型二基本顶上的载荷变化趋势和载荷分布规律同模型一完全相似, 它们在开采宽度为0时关键层上的载荷都约等于6.8 MPa, 只是采空区两侧载荷的峰值大小有微小误差, 这说明只要将模型上边界取至主关键层以上, 对基本顶上载荷分布几乎没有影响; 而模型三基本顶上载荷随工作面推进变化范围很大, 虽然也出现了应力集中和降低现象, 但两侧煤壁上方应力集中程度差别很大, 对采宽80 m而言, 右侧煤壁上方应力集中系数比左侧煤壁上应力集中系数大约50%, 且基本顶载荷在0.34~21.22 MPa之间波动, 几乎无规律可循, 因此, 将模型上边界取至主关键层以下的简化方式是不合理的。

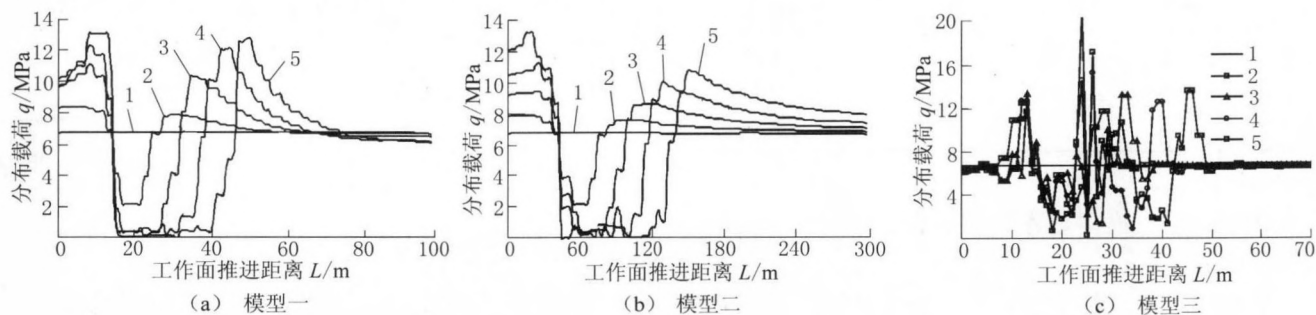


图3 随工作面推进基本顶上载荷分布

1~5—采宽分别为0, 20, 40, 60, 80 m 曲线

2.2.2 FLAC 数值模拟及其结果分析

采用 Mohr - Coulomb 塑性本构模型, 以拉破坏作为岩层破断的判别依据, 当拉应力大于岩层抗拉强度时, FLAC 软件会自动判别并在模型上显示岩层拉破坏的位置, 如图4所示。

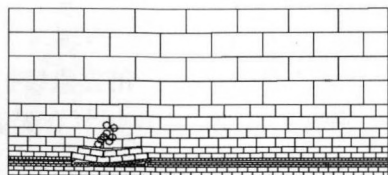


图4 FLAC 模型基本顶拉破坏判别

数值模拟的结果表明, 模型一开挖35 m时基本顶发生初次破断, 模型二开挖35 m时, 基本顶发生初次破断, 而模型三开挖20 m时, 基本顶就

发生初次破断, 与模型一和二相比, 模型三的基本顶初次破断距小15 m, 相差达到42.86%。可见, 将模型上边界取在主关键层以下, 导致了基本顶初次破断距的严重失真, 而将模型上边界取至主关键层以上, 并将主关键层以上的基岩简化为均布载荷加在模型上边界, 并不影响基本顶的初次破断距, 和模型上边界取至地表时一致。

3 基于开采沉陷学理论的取法

该方法的前提是模型中不存在关键层, 此时可将模型上边界取到导水断裂带以上, 模型上边界以上到地表的岩层则简化为均布载荷加在模型上边界。已有研究表明和开采沉陷学理论认为^[8], 煤层采出以后, 在采空区周围岩层中产生了较为复杂的移动和变形。根据采矿工程的需要, 将移动稳定后的岩层按其破坏程度, 大致分为3个不同的开采

影响带,即冒落带、断裂带和弯曲下沉带。准确确定冒落带和断裂带高度,对建立合理的数值分析模型有着至关重要的意义。

3.1 数值模拟模型

根据潞安常村矿的实际地质资料建立3个模型进行分析研究。常村矿S2-6综放工作面主采3号煤层,埋藏深度330 m,煤层厚度6.07 m,割煤高度3.0 m,直接顶为砂岩,厚度3 m,基本顶为中细砂岩,厚度6 m,直接底为细砂岩,厚度5.0 m,工作面长度为220 m,基本顶周期来压步距约为25 m。留巷宽4.0 m,巷高3.0 m,留巷前巷道采用锚梁网进行加固。3个模型岩石力学参数完全相同,见表2。

表2 模型各岩层力学参数

项目	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ kg·m ⁻³
煤	1 300	900	0.5	28	1 600
中砂岩	5 300	3 200	1.56	36	2 600
黑泥岩	2 300	1 200	1.0	30	2 400

模型一中,模型边界取至地表,模型尺寸大小为330 m×330 m。

模型二中,根据常村矿实际地质资料,该工作面上覆岩层属中硬岩层,适合采用覆岩导水断裂带高度 H_{li} 计算经验公式^[8]:

$$H_{li} = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6 \text{ 或}$$

$$H_{li} = 20 \sqrt{\sum M} + 10$$

把采高 $\sum M = 6$ m代入到上面式中,可得到 $H_{li} = 45$ m或 $H_{li} = 59$ m,可见,导水断裂带上部在煤层上方45~59 m范围,因此,模型上边界取到煤层上方60 m,60 m以上岩层直至地表均以均布载荷形式加在模型上边界。

模型三中,数值模型上边界取到煤层上方10 m(在导水断裂带内),10 m以上岩层直至地表均以均布载荷形式加在模型上边界。

模型采用Mohr-Coulomb塑性本构模型,在模拟中以拉破坏作为岩层破断的判别条件,当拉应力大于岩层抗拉强度时,软件会自动判别并在模型上用小圆圈显示岩层拉破坏的位置。因此,可直观地

对不同开采步距时的基本顶破断进行判别。

3.2 数值模拟结果分析

数值模拟的结果表明,FLAC和UDEC数值模拟结果相似,模型一开挖25 m时基本顶发生初次破断,模型二开挖25 m时,基本顶发生初次破断,而模型三开挖15 m时,基本顶就发生初次破断,与模型一和二相比,模型三的基本顶初次破断距小10 m,相差达到40%。可见,将模型上边界取在导水断裂带以内,导致了基本顶初次破断距的严重失真,而模型一和二的基本顶初次破断距一致,说明将模型上边界取至导水断裂带以上,并将导水断裂带以上的基岩简化为均布载荷加在模型上边界,并不影响基本顶的初次破断距。

图5是基本顶上载荷最值随工作面推进的变化规律曲线。从图5中可以看出:

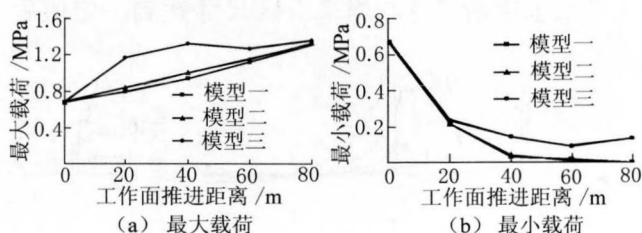


图5 基本顶上载荷最值随工作面推进的变化规律

(1) 模型一和模型二基本顶上最大载荷随着工作面推进,有逐渐增大的趋势,最小载荷有减小的趋势,且随工作面推进,最小趋于一定值。

(2) 模型一和模型二的基本顶上最大或最小载荷随工作面推进的变化趋势基本是一致的,而模型三无论是最大或最小载荷的变化趋势都与模型一和模型二有较大差别,这说明了模型的上边界取到主关键层以下将导致基本顶上载荷集中程度失真,势必对分析问题的结果产生较大的影响。

4 结 论

在建立岩层移动物理模拟和数值模拟模型时,应首先根据文献[9]判别模型中有无关键层存在、主亚关键层位置,若模型中存在关键层,可将模型上边界取在主关键层以上,因为研究表明,关键层的存在引起了其下部岩层载荷分布的动态变化和非均匀分布^[5]。若将模型上边界取在主关键层以下,将引起岩层载荷分布特征的改变,从而导致

(下转第91页)

时期安全工作加大了安全特别小分队活动的频次和重点工程的复查力度,加大了事故隐患、三违行为的查处整改力度,确保隐患得到及时整改。

(3) 抓安全专项整治。为了加强重点行业有效监督监管,公司开展了交通运输安全和生产安全、“一通三防”安全专项整治和安全生产督查活动。经过专项整治,规范了车辆的使用和人员的管理,完善了瓦斯监测监控系统 and 防尘系统,杜绝了超通风能力生产,强化了工程计划、设计审查、开工报告、会议协议、施工组织设计或安全技术措施的编制、审批、贯彻落实和施工现场等的安全管理,使安全责任进一步得到了落实,现场管理得到了有效控制。

(4) 抓特殊时期安全工作。3年来,公司安全工作一个突出特点就是狠抓特殊时期的现场安全,确保特殊时间内安全工作万无一失。针对两节两会、“五·一”、“十·一”期间活动多、服务性车辆外出多及消防治安难管的情况,公司提前做好准备工作,研究部署特殊时期的安全工作,下发专门通知。对停工停产、维护检修、零星工程、要害岗位、治安消防、外出车辆的管理做出具体要求。对特殊时间各单位停产停工地点进行停工前后的检查验收,对检修单位的检修地点、检修人员、检修项目、检修措施的制定、审批、验收做出详细规定,

并进行了跟踪考核,保证了检修期间的安全。同时,加强了节日期间的干部跟班、值班管理,加大了安全特别小分队的活动频次,对重要的工程和不放心地点进行了突袭检查,有利地保证了现场的安全。

(5) 抓安全教育培训。公司利用“安全生产月”组织职工进行了全员安全法律法规知识学习培训,组织了“遵章守法、关爱生命”主题演讲比赛和“全国安全生产普法知识竞赛”暨“安全生产管理创新征文”活动,利用安全知识考试、安全知识智力竞赛、公司级抽考、文艺演出、演讲比赛、安全座谈会、技术比武、事故案例展览、安全漫画展览等活动形式,普及了安全知识,营造安全文化氛围,使职工的安全责任心得到了增强。同时,公司加大了对职工进行多层次安全培训教育的力度,有针对性地对各级领导干部、安监系统人员和特殊工种人员进行了培训教育,使职工的安全技能有了较大提高。

作者简介:吴国富(1964-),男,山西阳城人,工程师,现任晋城无烟煤矿业集团有限责任公司宏圣建筑工程有限公司副总经理。

收稿日期:2006-02-16;责任编辑:李军涛

(上接第76页)

岩层破断距的严重失真,(根据相似模拟试验和数值模拟实验结果,破断距比原型小36.37%~42.8%);若模型中不存在关键层,应首先根据文献[8]计算导水断裂带高度,然后将模型上边界取在导水断裂带以上,若将模型上边界取在导水断裂带以下,将导致岩层破断距的严重失真,并影响基本顶上载荷集中程度失真,势必对分析问题的结果产生较大的影响。此研究结果不但适用相似材料模型试验、FLAC和UDEEC数值模拟软件,对于其它数值模拟软件也可借鉴和采用。

参考文献:

- [1] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [2] 李鸿昌.矿山压力的相似模拟试验[M].徐州:中国矿业大学出版社,1988.
- [3] 许家林,钱鸣高,马文顶,等.岩层移动模拟研究中加载

问题的探讨[J].中国矿业大学学报(自然科学版),1999(3).

- [4] Itasa Consulting Group, INS. UDEC Version 1.8 [R]. Itasa Consulting Group, 1992.
- [5] 钱鸣高,茅献彪,缪协兴.采场覆岩中关键层上载荷的变化规律[J].煤炭学报,1998(2).
- [6] 许家林.岩层移动与控制的关键层理论及其应用[D].徐州:中国矿业大学,1999.
- [7] 何国清,杨伦,凌庚娣.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [8] 许家林,钱鸣高.覆岩关键层位置的判别方法[J].中国矿业大学学报,2000(5).

作者简介:陈晓祥(1979-),男,江苏涟水人,中国矿业大学建筑工程学院博士研究生,主要从事巷道围岩加固、岩土特殊施工技术和数值模拟方面的研究.Tel: 13685120139, E-mail: chenxxiang@163.com

收稿日期:2006-02-08;责任编辑:曾康生