

采空场覆岩变形数值模拟与相似模拟比较研究

李向阳¹, 李俊平^{1,2}, 周创兵¹, 向文飞¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 鸡西大学, 黑龙江 鸡西 158100)

摘 要: 用有限元数值计算尝试了离层模拟, 并分别采用数值模拟与相似模拟的方法研究了木架山矿区 143 剖面倾斜采空场处理时的地表移动与覆岩破坏规律。研究发现, 随着矿柱的崩落, 覆岩跨度不断增加, 引起的地表移动范围也不断增大, 地表垂直沉降范围大致为跨度的 1.5~1.7 倍, 垂直沉降曲线始终对称于最大沉降点; 水平移动的范围大于垂直沉降的范围, 最大水平移动量大约为最大沉降量的 40%, 且水平移动不对称。另外, 当覆岩发生整体下沉时离层主要存在于跨度两端, 离层由层理剪切破坏引起。

关 键 词: 数值模拟; 相似模拟; 地表移动; 覆岩离层

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

Comparative study on numerical simulation and similarity simulation of overburden deformation in abandoned stope

LI Xiang-yang¹, LI Jun-ping^{1,2}, ZHOU Chuang-bing¹, Xiang wen-fei¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Jixi University, Jixi, 158100, China)

Abstract: An attempt is made to simulate the layer separation in overburden by using the finite element numerical modeling; and the numerical modeling together with similarity simulation is adopted to investigate the surface movement and the breakage of the overburden during the abandoned stope treatment of the section #143 in Mujia Hill. It has been found from this research that the range of surface movement increases moderately with the collapse of jambs and the increase of the roof span. The subsidence area ranges from 1.5 times to 1.7 times of the roof span and the subsidence curves are symmetrical to the vertical line through the point with maximum subsidence. The horizontal movement, however, is not symmetrical and its impacting area is larger than the range of subsidence, with its maximum value equal to 40% of the maximum subsidence. In addition, the layer separation exists in the end of span of overburden if the subsidence happens in whole overburden, which is resulted from the shear failure of the bedding plane.

Key words: numerical simulation; similarity-simulation; upper movement; layer separation in overburden

1 引 言

随着人们对矿产资源的需求越来越大, 采空区规模及开采深度不断加大, 由此引起的覆岩及地表沉降问题也越来越严重。例如地表塌陷、冲击地压、水土流失、房屋倒塌、交通中断等, 严重影响着人们的生产生活, 并带来巨大的经济损失。例如 1961 年 10 月大同矿务局挖金湾矿青羊湾矿井, 采空区一次性发生冒顶约 $16.3 \times 10^4 \text{ m}^2$, 地面塌陷 $12.8 \times 10^4 \text{ m}^2$, 沉降深度达 0.5~1.0 m, 共有 18 人死亡, 冒顶产生的强烈暴风摧跨巷道支架 90 m, 矿井的通风、运输系统均遭破坏, 全井被迫停产^[1]。因此, 就地下空

间与资源的可持续利用和环境保护而言, 有必要对采矿引起的地表沉降问题进行广泛而深入的理论与技术研究。

地表沉降具有非均匀、非连续与大位移的特点, 是一个高度复杂的非线性问题。前人在这方面已经做了大量的工作, 分别采用现场监测、理论分析、室内试验及计算机模拟等手段, 对覆岩与地表变形地预测、裂隙和离层的分布以及由此带来的采动损害的防护与控制等问题进行了广泛的研究, 得出许多有益的经验与结论^[2, 3]。但是, 对于地表垂直沉降与水平移动规律, 如何在数值计算中模拟离层的产生及其破坏机理等问题还有待进一步研究。

现场监测虽然具有真实、可靠度大的优点，但其周期较长、工作量大、成本高，且难以抓住主要因素进行机理分析；经验公式与理论分析虽简单易行，但由于很多复杂的地质因素被概化或忽略，复杂地质条件下的工程问题误差较大，且不能模拟覆岩的动态变形过程。相似模拟则可以弥补上述不足^[4]。另外，数值模拟较相似模拟快捷，改变方案和有关参数较相似模拟方便、灵活，而且能够处理复杂的材料本构关系，因而在工程实践中得到了广泛应用^[5]。

本文分别采用数值模拟与相似模拟方法，对本架山倾斜采空场 143 剖面的覆岩及地表移动规律、数值计算中离层的模拟及其产生机理进行了研究，并通过相互比较，得出了一些有益的结论与建议。

2 工程地质概况

本架山采空区有平行产出的Ph1与Ph3上、下两层矿，由于上层矿Ph3已用露天方式结束开采，在地表形成了下凹地形；下层矿Ph1因非法不规则地滥采乱挖，目前已经形成了走向长1 200 m，斜长140~380 m，平均斜长350 m，总面积约 $37.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的采空区。为了保护矿产资源，必须崩塌Ph1上部斜长不小于80 m的采空区，堵塞非法开采通道，但是为避免引发顶板冲击地压灾难，需要预先确认覆岩及地表的移动、破坏情况。

143剖面附近两矿层间距约为50 m，矿层平均倾角约为20°。矿石为磷块岩，矿层厚度为2~3 m，平均为2.2 m。Ph1矿体的直接顶板为含磷白云岩，厚约3 m；间接顶板为白云岩，直达Ph3矿体；直接底板为隔水性良好的页岩。Ph3矿体直接顶板为白云岩，直达地表。围岩矿体层理均发育。在Ph3矿层，有沿倾向长5 m，间距20 m的2个小矿柱。在Ph1矿层，有沿倾向分布的3个小矿柱、2个大矿柱及下面一系列小矿柱，间距均为20 m。大矿柱沿倾向长25 m。岩体力学参数见表1^[6]。

表 1 岩体物理力学参数值
Table 1 Mechanics parameter of rock

介质	重度 /kN·m ⁻³	弹模 /GPa	泊松比 μ	抗拉强 度/MPa	抗压强 度/MPa	凝聚力 /MPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
白云岩	28.5	18.57	0.149	4.0	108.8	9.39	39.7
含磷白云岩	25.0	11.00	0.239	3.0	84.9	9.13	39.5
磷矿	29.8	23.375	0.18	3.73	158.3	26.7	33
层理	25	5	0.25	1	20	5	10
页岩	23.5	18.54	0.129	5.8	218.2	12.56	46

3 数值模拟

3.1 有限元模型

根据实际地质资料，建立了8结点等参单元三维有限元模型。模型垂直走向长512 m，高247.5 m，沿走向方向长30 m，模型沿走向方向剖分了6层，单元总数为29 964个，结点个数为36 071。在模型左、右、下三面上施加法向约束。本文研究的主要目的是考察Ph1矿层在崩倒上部3个小矿柱和大矿柱时的直接顶板与上覆岩层的移动规律。因此只模拟了Ph1矿层中的覆岩层理，层理厚度为30 cm。在Ph1与Ph3矿层之间有7层层理，其余地方有6层，层理编号从上至下依次为1，2，3，...^[7]。143剖面采空区模型见图1。

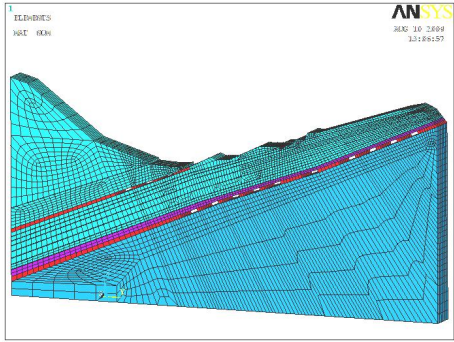


图 1 143 剖面采空区模型图
Fig.1 The model of abandoned stope at the section #143

3.2 有限元计算结果分析

采空区处理时先崩倒Ph3矿的两个小矿柱，然后从上到下依次崩倒Ph1矿的3个小矿柱与上部大矿柱。为了作出每次开挖引起的地表移动曲线，依次从最左边至Ph1矿体覆岩最右边地表，选取地表单元结点作为测点，共130个。

因为原型为平面应变状态，而所做的相似模拟试验为平面应力状态，所以按有无沿走向的法向约束将两者进行了比较。分别绘出了两种状况下采空区形成时的移动云图，见图2与图3。结果显示，平面应力状态下的沉降范围较小，但是沉降量较大，这主要是因为平面应力模型无侧向约束，但两种状态下的垂直沉降量最大值差别不超过3%，这说明本例中相似模拟采用有一定厚度的平面应力模型是可行的。

崩倒Ph3矿层的2个小矿柱以后，覆岩跨度达到70 m，地表最大沉降量为4.4 mm，影响范围只限于直接覆岩。直接顶最大拉应力为3.852 MPa，因此可能会发生局部冒落。

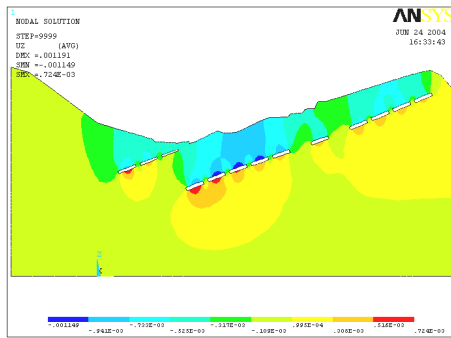


图 2 平面应力状态下的沉降云图

Fig.2 The subsidence nephogram of plane stress state

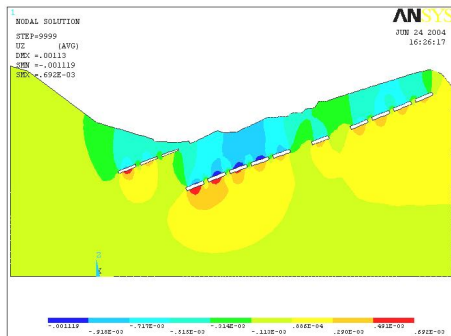


图 3 平面应变状态下的沉降云图

Fig.3 The subsidence nephogram of plane strain state

崩倒Ph1矿3个小矿柱后, 覆岩跨度达到95 m, 但是覆岩应力及地表移动没有突然增大的趋势, 顶板拉应力及矿柱压应力均小于岩体抗拉、抗压强度, 因此, 直接顶板与覆岩都不会跨落。

大矿柱长25 m, 分3次崩落。当层理内的拉应力大于1 MPa时, 岩层就会拉裂破坏, 如果此时该地层理上下表面的垂直沉降差超过1 mm, 就认为这里有离层产生。因为层理的厚度只有30 cm, 其重力影响不大, 且既不能受拉应力, 又不能受压应力, 这时可以采用将这些层理单元杀死的办法模拟离层的产生。

当直接顶的拉应力达到3 MPa时, 顶板会开裂、跨落, 此后对覆岩不会再有影响, 因此, 也将其杀死。继续进行类似计算, 直到大矿柱全部崩倒。

当跨度达到103.3 m时, 离层存在于第4~6 层, 位于跨度正上方。这时直接顶板最大拉应力达到2.67 MPa, 不会跨落。

当跨度为111.6 m时, 离层扩展到第2 层, 并转移到跨度两边, 直接顶板跨落。离层单元与跨落单元如图4所示。此时, 非法采矿的通道已经被密封, 而且没有发生覆岩的整体跨落, 只是在跨度两端有离层发生。覆岩由跨度两端向中间依次分为支撑区、离层区与压实区。因此顶板极限跨度为111.6 m。

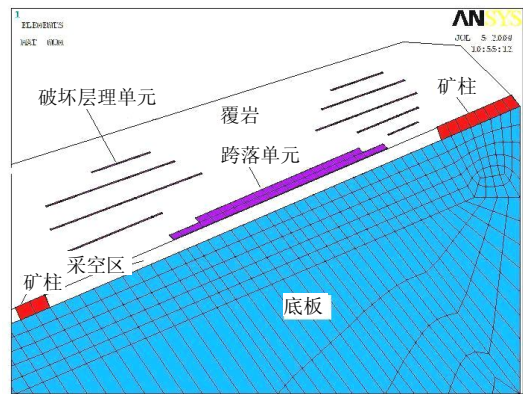


图 4 111.6 m 跨度时的覆岩变形情况

Fig.4 The deformation situation of overburden of roof span of 111.6 m

为了便于与相似模拟进行比较, Ph1 矿柱崩倒时的地表及层理移动曲线都是相对 Ph3 两个小矿柱崩落以后的。111.6 m 跨度时层理 3 的上下表面水平位移与垂直沉降曲线见图 5, 从图中可以看出, 在跨度两端, 层理上下表面的水平位移差值很大, 岩层明显属于剪切破坏。

因为数值模拟不能模拟离层在重力作用下的大位移破坏及覆岩跨落的动态全过程, 后续过程的模拟需要借助相似模拟来完成。

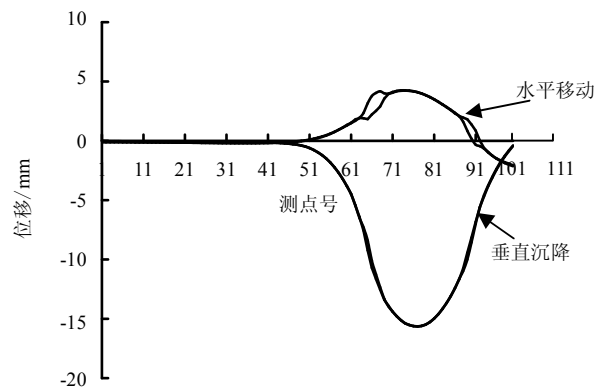


图 5 111.6 m 跨度时层理 3 的移动曲线

Fig.5 The movement curve of #3 bedding plane of roof span of 111.6m

跨度为 95, 103.3, 111.6 m 及 140 m 时的地表水平与垂直位移曲线分别见图 6、图 7。由图可知, 随着开挖跨度的增加, 地表垂直沉降与水平移动范围均不断扩大, 但是垂直沉降范围大致都为跨度的 1.5~1.7 倍, 没有对更远的地表产生影响。虽然矿层有 20° 的倾角, 但是垂直沉降始终对称于最大沉降点。水平移动不对称, 下边与上边移动方向相反, 大小不同, 最大值约为最大沉降量的 40%, 其移动范围大于垂直沉降范围。一般认为地表水平位移是由垂直沉降几何变形引起的, 但是其移动范围不应

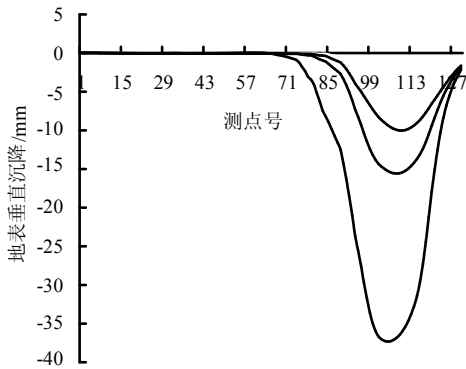


图 6 Ph1 大小矿柱开挖引起的地表沉降曲线
Fig.6 The subsidence of upper of diversified roof span

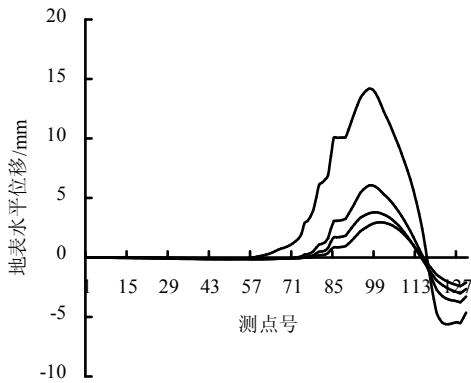


图 7 Ph1 大小矿柱开挖引起的地表水平位移曲线
Fig.7 The horizontal movement of upper of diversified roof span

当大于垂直沉降范围。因此，选取覆岩下部地表的 78 号点来探讨其原因，分别绘出该点的移动曲线和第 1 主应力变化曲线，见图 8 和图 9。由图 8 可知，随着覆岩跨度的增加，78 号点的水平移动始终大于垂直移动。图 9 可以看出，该点从受压状态转变为受拉状态，拉应力不断增大，方向与变形方向一致。因此，在沉降边缘，地表水平移动主要是由覆岩横向受拉引起，而不是传统认为的由地表下沉几何变形引起。水平位移量值比垂直沉降量值大，移动范围也较之更广，下边的移动量大于上边，是因为下边的第 1 主应力增量变化大。

水平移动存在的范围广，且不易监测，实际上在地表可能会产生裂隙，导致房屋开裂，铁路错轨等。

4 相似模拟

由于有限元数值模拟方法只适合于弹塑性介质，无法模拟矿柱崩倒引起覆岩受拉变形到开裂、垮塌破坏发展全过程，因此，本文借助相似模拟试验，确定开挖过程中的地表移动情况，验证引起顶板自然冒落的极限跨度。这对下凹地形下用崩落法处理采空区时控制地表岩体移动灾害具有重要的参考价值。

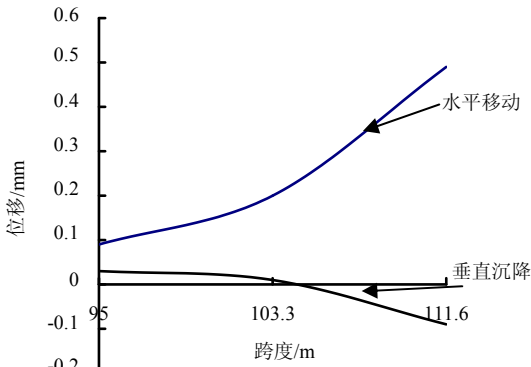


图 8 78 号点垂直沉降与水平移动曲线
Fig.8 The subsidence and horizontal movement of the point No. 78

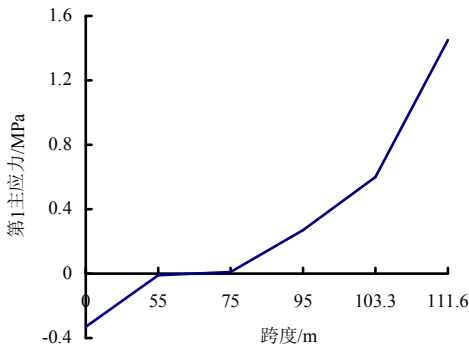


图 9 78 号点第 1 主应力变化曲线
Fig.9 The curve of first principal stress of the point No. 78

4.1 相似模拟材料及建模

模型架长 300 cm，宽 20 cm，高 250 cm。依据模型架尺寸与木架山 143 剖面图，确定长度比尺 $\alpha_L=150$ 。应用河沙、石膏和大白粉配制模型时密度可调整的范围不大，因此，假定各种模型岩石的密度都是 1.44 g/cm^3 。应用正交试验依据单轴抗压强度进行配比^[8]。各种模型岩石的配比见表 2。

表 2 岩石参数及配比								
Table 2 Rock parameter and mixture ratio of model								
岩性	密度 g/cm^3		单轴抗压强度 /MPa		配比(砂:石膏:大白粉)	材料的用量 / $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1}$		
	原型	模型	原型	模型		沙子	石膏	大白粉
白云岩	2.85	1.44	108.8	0.366	7:5:5	7.56	0.540	0.540
含磷白云岩	2.50	1.44	84.9	0.326	9:2:8	7.8	0.173	0.691
磷矿	2.98	1.44	120	0.387	7:4:6	7.56	0.432	0.648
页岩	2.35	1.44	218.2	0.891	6:4:6	7.38	0.492	0.738

由于木架山矿区岩体层理发育，原型岩层厚度超过 3 m 时，按 3 m 进行分层装模，采用云母片模拟岩层层理。由于矿区主要是重力应力场，试验中仅考虑重力应力和移动边界条件，由模型架实施移动约束。地表移动采用千分表量测，从右至左编号顺序依次为 $F_1 \sim F_{19}$ ，各测点间的水平距离为 13.5 cm。上下采空区形成后的相似模拟模型及地表沉降曲线如图 10、图 11。



图 10 143 剖面的采空区模型

Fig.10 The model of abandoned stope at the section #143

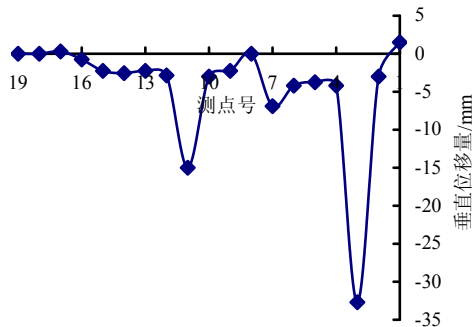


图 11 采空区形成引起的地表下沉量

Fig.11 The subsidence of abandoned stope formed

4.2 相似模拟结果分析

从图 10 与图 11 可以看出: 采空区形成后, 未出现地表滑坡和顶板垮塌, 也未见明显的岩体移动和局部变形与破坏, 仅 3 号测点沉降达到 32.7 mm, 11 号测点达到 15 mm, 其它点都不超过 5 mm(所有测点沉降量都已经换算成原型的地表沉降量)。显示出采空区形成未引起明显的应力集中, 不会引起严重的地表沉降事故, 这与现场实际完全吻合。但是几乎所有的测点沉降量都明显超过数值计算结果(见图 2), 其原因是模型养护时的自重下沉没有稳定。

崩倒Ph3矿层的2个小矿柱后, 上层顶板跨度达 70 m, 覆岩中产生了离层, 离层厚度达 3 m, 在 6 m 高处有微离层现象, 在 6 m 以上的岩层中没有发现微离层现象。这说明当顶板跨度达到 70 m 时, 在短期内不会自然发生大规模顶板垮塌, 但可能发生局部冒顶, 与数值计算结果较为一致。

从Ph1上部开始, 崩倒第1 个小矿柱后顶板跨度达到 45 m, 未发现任何岩层运动现象。接着崩倒第2个小矿柱, 此时顶板跨度达到 70 m, 也没发现岩层的运动情况。第3个小矿柱崩倒后顶板跨度达到 95 m, 此时在岩层中发现了离层现象, 离层高度达 3 m, 但离层微小, 3 m 以上的岩层未见变化。这说明当顶板跨度达到 95 m 时, 在短期内也不会自然发生大规模顶板垮塌, 但可能发生局部冒顶。绘出地表移动曲线, 见图12。从图中可以看出, 3 个小矿柱开挖引起地表下沉不明显, 最大才 3 mm。

随后开始崩倒上部大矿柱, 当崩倒到 15 m 时跨度达到 110 m, 上覆岩层有 3 m 垮落, 3 m 之上还有 15 m 厚的岩层发生离层, 离层广泛存在于跨度两端, 其位置和范围与数值计算的结果基本符合(见图13)。证明了数值模拟是正确的。110 m 的极限跨度与数值计算中 111.6 m 的结果也相差不大, 且地表移动曲线不论是沉降量, 还是沉降形态与沉降范围都与数值计算结果接近, 见图12。

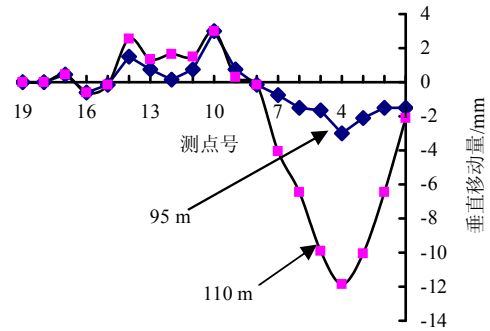


图 12 95 m 与 110 m 跨度时地表垂直移动曲线

Fig.12 The subsidence curve of the roof spans of 95 m and 110 m



图 13 110 m 极限跨度时的覆岩破坏模型

Fig.13 The model of 110 m roof span

当上部大矿柱全部崩倒后, 整个岩层全部垮塌。这时F₄测点超出了百分表的量程。模型破坏如图14所示。由图可以很明显地看出, 覆岩跨落后几乎充填了整个采空区。地表移动曲线见图15, 其最大沉降位置在4号点附近, 达到了 2.5 m, 而覆岩离层一直贯穿到地表, 整个覆岩分为跨落带、离层带和弯曲下沉带。



图 14 140 m 跨度时的覆岩破坏模型

Fig.14 The model of roof span of 140 m

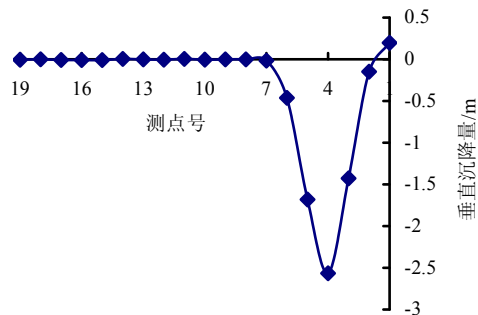


图 15 140 m 跨度时地表垂直移动曲线

Fig.15 The subsidence curve of the roof span of 140 m

5 结 论

采用数值模拟与相似模拟两种方法来研究木架山采空区的覆岩及地表移动规律,技术上可优势互补,结果上可相互印证,不失为一种理想的分析研究手段。将两者的结果进行分析并相互比较后,得出了如下一些结论与建议:

(1) 由数值计算结果可知,在相似模拟试验中采用有一定厚度的平面应力模型代替平面应变模型是可行的。

(2) 两种模拟方法的结果均显示地表垂直沉降始终对称于沉降中心点,与矿层倾角无关,沉降范围大致为跨度的 1.5~1.7 倍。

(3) 地表水平移动范围大于垂直沉降范围,原因是沉降引起沉降范围边缘的侧压减小,并逐步由受压转变为水平受拉,最大水平移动量约为最大沉降量的 40%。地表水平移动不对称的原因是因为倾斜矿场覆岩下部的应力变化增量较上部大。

(4) 采用很薄的实体单元来模拟层理,当层理内的拉应力达到其极限抗拉强度、且层理上下表面的垂直沉降差超过 1 mm 时,将单元杀死模拟离层的产生是可行的。只要把层理单元划分的足够薄,精度上也是有保证的。

(5) 相似模拟试验得出的顶板极限跨度为 110 m,数值计算在 111.6 m 跨度时的变形破坏模式与试验的结果非常接近,但是数值计算只是根据计算的拉应力分布和岩体抗拉强度实施破坏判断,无法考虑从变形至破裂、坍塌的动态过程,因此应以相似模拟试验结果为准。在 110 m 跨度内,覆岩不会产生大的变形,不会影响后续矿藏的开采。

(6) 相似模拟试验考虑的因素不够全面,例如弹模、抗拉强度、泊松比、摩擦角等都没有考虑。未仔细考虑养护与开挖时间相似,结果也可能存在一定误差。相似模拟试验中测量时采用无接触的全站仪与摄影仪,不仅可以准确的测量更多点的水平移动与垂直移动,还减少了开挖等人为因素对千分

表的震动与触动,并提高其测量精度。而且模型中没有布置应变,不能将覆岩内部的应力、应变分布与数值计算结果进行比较。建议以后相似模拟试验中采用微型的应力测试手段测试应力。

参 考 文 献

- [1] 李俊平, 钱新明, 郑兆强. 采空场处理的研究进展[J]. 中国铝业, 2002, 26(3): 10—15.
LI Jun-ping, QIAN Xin-ming, ZHENG Zhao-qiang. Progress of study on abandoned stope disposal[J]. *China Molybdenum Industry*, 2002, 26(3): 10—15.
- [2] 黄乐亭. 开采沉陷力学的研究与发展[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(2): 54—56.
HUANG Le-ting. Research and development of mining subsidence mechanism[J]. *Coal Science and Technology*, 2003, 31(2): 54—56.
- [3] 王金庄. 开采沉陷若干理论与技术问题研究[J]. 矿山测量, 2003, (3): 1—4.
WANG Jin-zhuang. Research on some theories and technical problems regarding mining-induced subsidence [J]. *Mine Surveying*, 2003, (3): 1—5.
- [4] 张建全, 闫保金, 廖国华. 采动覆岩移动规律的相似模拟实验研究[J]. 金属矿山, 2002, (8): 10—13.
ZHANG Jian-quan, YAN Bao-jin, LIAO Guo-hua. study on the rules of overlying rock movement dy equivalent material simulation[J]. *Metal Mine*, 2002, (8): 10—13.
- [5] 苏仲杰, 于广明, 杨伦. 覆岩离层变形力学机理数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 287—1 290.
SU Zhong-jie, YU Guang-ming, YANG Lun. Numerical simulation on mechanism of deformation of separated strata in overburden[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(8): 1 287—1 290.
- [6] 李俊平, 彭作为, 周创兵, 等. 木架山采空区处理方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3 884—3 890.
LI Jun-ping, PENG Zuo-wei, ZHOU Chuang-bing, et al. Study of project disposing abandoned stope in Mujiashan Hill[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3 884—3 890.
- [7] 谢兴华. 薄层单元在覆岩离层模拟中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(3): 14—16.
XIE Xing-hua. Application of laminar layer element in simulation of over burden delamination[J]. *Mining Research and development*, 2002, 22(3): 14—16.
- [8] 李俊平, 李向阳. 下凹地形下采空区处理方案的相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 581—586.
LI Jun-ping, LI Xiang-yang. Similarity-simulation study of project disposing abandoned stope under the sunken topography[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(4): 581—586.