

采动区房屋基础滑动层作用的 三维有限元分析与现场试验

仲继寿 杨舜臣

彭增甫

(中国矿业大学, 徐州, 221008)

(峰峰矿务局, 邯郸, 056201)

文 摘 本文根据三维有限元模型分析探讨了采动区房屋基础滑动层在地表变形影响下的作用, 并与现场试验结果进行了比较。分析与试验都表明, 在地表拉伸或压缩变形条件下, 基础滑动层的设置均能有效地降低墙体和加固构件的采动附加应力, 地表水平变形对上部结构的作用存在上限值。

1. 引 言

在矿山采动区, 基础滑动层是砖混建筑物抗采动变形的的主要柔性措施之一, 它一般设置于基础与基础圈梁之间, 如图1所示。亦可设置在基础与岩石地基之间。材料一般为两层油毡中夹滑石粉或石墨。由于滑动层价格低廉(占总加固费用的5%左右)、施工方便、效果显著, 因而得到了越来越广泛的应用。本文通过模拟分析与现场实测, 对采动区房屋基础滑动层的作用以及地表水平变形对上部结构的影响进行了分析。

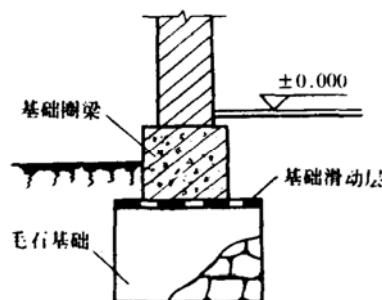


图1 基础滑动层的设置

2. 试验房概况

2.1 采矿地质条件

试验房地表共经受3个开采工作面的采动影响。称为一、二、三工作面, 采深176.3~205m, 煤层倾角 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}$, 平均采厚1.9m, 冒落式顶板管理。

2.2 地基土壤物理力学性质

表土层厚11.3m, 属中等压缩性砂质粘土。物理力学指标: 压缩模量 $E=1.6\text{MPa}$, 压缩系数 $a_v=0.017\sim 0.025(\text{MPa})^{-1}$, 粘聚力 $c=0.032\text{MPa}$, 内摩擦角 $\phi=27^{\circ}$, 天然容重 $\gamma=16.08\text{kN/m}^3$ 。

2.3 试验房加固方案与措施

三栋试验平房A、B、C的平面尺寸为12.5m×4.5m,檐高3.1m,无内横墙。两栋试验楼房I、II的平面尺寸10.6m×5.0m,层高2.8m。各试验房的基础圈梁与基础之间均设置了滑动层,材料为两层油毡夹滑石粉,垂直劲度系数 $\lambda_v=112\text{MPa}$,水平劲度系数 $\lambda_h=2.69\text{MPa}$,摩擦系数 $f=0.224$ 。各试验房的加固措施见表1。

表1 试验房抗采动措施

试验房号	基础圈梁 ($b \times h$) ^①	中圈梁 ($b \times h$)	顶圈梁 ($b \times h$)	构造柱 ($b \times h$)	窗台下加强带 ($b \times h$)	基础连系梁 ($b \times h$) ^②
A	240×240	—	240×120	240×240	240×60	60×60
B	300×400	—	—	—	240×60	60×60
C	240×240	—	240×120	—	—	60×60
I	350×350	240×120	240×120	240×240	—	—
II	350×350	—	240×120	—	240×60	—

注 ①尺寸单位均为mm;

②基础连系梁均为外包砖,总截面尺寸为370mm×370mm,内配1 ϕ 22钢筋。

墙体采用MU7.5砖、M2.5混合砂浆砌筑,楼板屋面为预制钢筋混凝土空心板,加固构件的混凝土标号为C20,采用毛石条形基础。

3. 三维有限元模型的建立与分析

3.1 三维有限元模型的建立

针对砖混结构的特点采用以下几种单元建立有限元模型^[1]:

(1) 墙体,由于其厚度较小,平面外刚度不大,因此采用三维平面应力膜单元模拟。

(2) 圈梁、构造柱等采用三维梁单元模拟,而墙体中的水平加筋,窗台下钢筋混凝土加强带等则采用空间桁架单元模拟。

(3) 基础及地基均采用六面体等参元,地基模拟深度和基础外皮至考虑边界的水平距离分别取条形基础宽度的7倍和4.5倍。

(4) 采用空间节理单元模拟基础滑动层以及基础与地基之间的接触面。

对于墙体及地基单元,根据应力水平和相应的破坏准则判断单元的受力状态与破坏模式,当发生破坏后进行相应的刚度修正和应力修正。

根据采动区房屋加固构件的受力与变形特点,钢筋混凝土加固构件均采用线弹性材料模式。

滑动层单元的破坏包括滑移与脱开。在本文的计算中,为简化起见,采用线性材料模式,其计算框图如图2所示。

3.2 模拟结果分析

以峰峰矿区抗采动试验平房A为例。为简化起见,假设地表变形对称于建筑物的两个主轴,屋面板在自身平面内刚度为无限大,有限元模型如图3。图中滑动层单元及距山墙4m处

的基础连系梁未表示出来。地表水平变形 $\varepsilon=8\text{mm/m}$ ，曲率变形 $K=0.6\times 10^{-3}\text{m}^{-1}$ 为沿建筑物长轴方向的地表变形预计值。

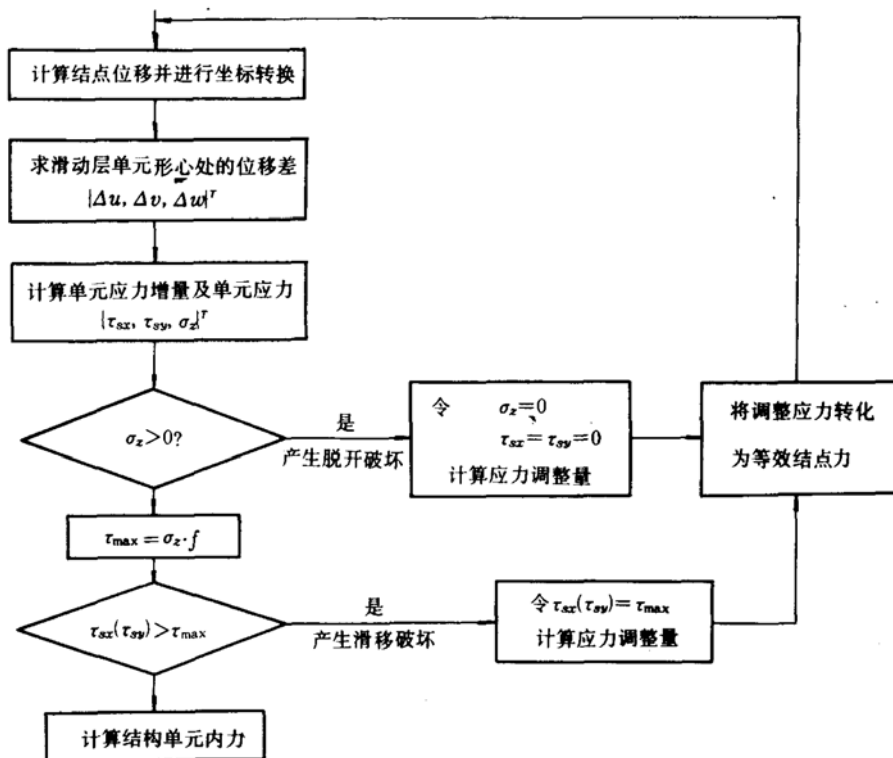


图2 滑动层单元计算框图

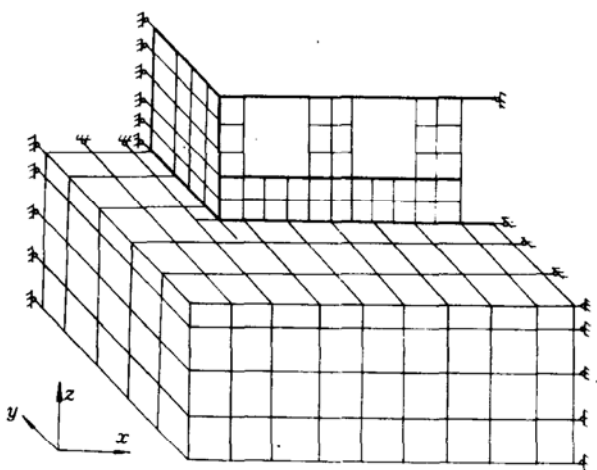


图3 试验平房A三维有限元计算模型

模拟分析表明，在正、负两种地表变形条件下，滑动层的设置均能使墙体及水平加固构件的最大采动应力降低50%左右。图4、图5分别给出了两种地表变形条件下前墙基础圈梁的受力情况。图中虚线表示没有设置滑动层时的结果。

我们可以将纵墙假设成为一个两边有山墙作为弹性支座的偏心受力深梁，其附加作用力

的主要来源之一是基础圈梁与基础之间的水平剪切应力。滑动层的设置使得基础与圈梁之间的摩擦系数大大降低,因而在很大程度上降低了上部结构的附加采动应力。

滑动层处的最大水平剪切应力不会超过其最大静摩擦力。当水平剪切应力达到了最大摩擦力后,滑动层将产生滑移,因而水平剪切应力达到最大值后不会再增大。此时相应的地表水平变形值即为对上部结构影响的上限值。

有限元模拟分析表明,当地表水平变形达到7mm/m左右(不考虑曲率变形影响)时,试验平房A的滑动层单元大部分产生滑移破坏,上部结构的附加采动应力增加不大,因此该值可以近似地认为是试验平房A条件下,地表水平变形对上部结构影响的上限值。

对于不同的建筑物,在相同的基础滑动层条件下,由于上部荷载的不同,滑动层的极限抗剪强度(即最大静摩擦力)不同,因而地表水平变形对上部结构影响的上限值不同。在该试验平房条件下,其上限值远小于20mm/m^[2]。

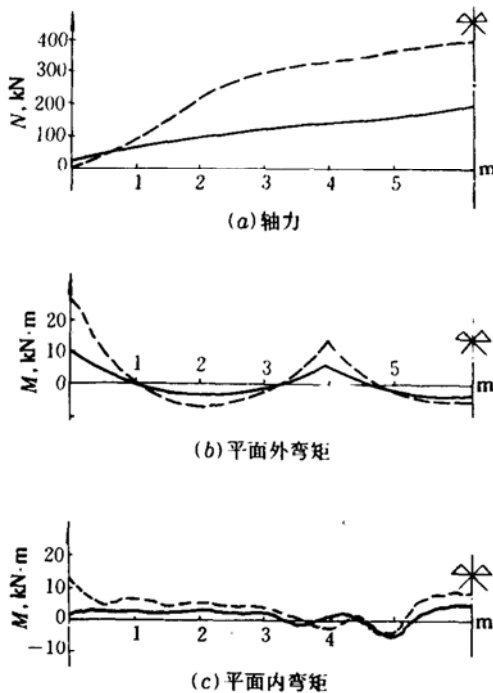


图4 拉伸-正曲率变形条件下
基础圈梁的受力分布

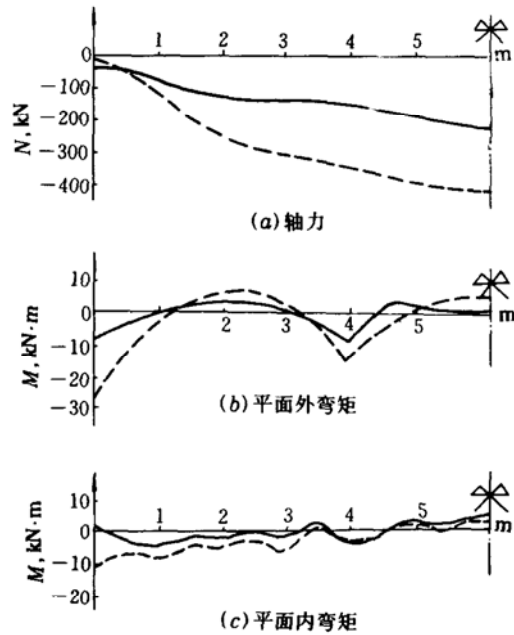


图5 压缩-负曲率变形条件下
基础圈梁的受力分布

4. 试验结果分析

各工作面开采时,试验房沿纵墙和横墙方向经历的地表变形如表2所示。

两年多的观测表明,楼房I、II的基础滑动层基本上没有产生滑移,三栋平房A、B、C的基础滑动层均产生了不同程度的滑动,如图6所示。滑移主要发生在第一工作面开采影响期间(1989年4月~1989年9月)。

表2

各工作面开采时试验房经历的地表变形值

工作 面号	沿建筑物纵墙方向(ϵ/K)					沿建筑物横墙方向(ϵ/K)				
	A	B	C	I	II	A	B	C	I	II
一	7.9/ 0.73	10.4/ 1.25	6.8/ 0.44	7.3/ 1.46	8.3/ 0.84	-1.5/ -0.13	-2.6/ -0.2	-1.1/ -0.51	-1.4/ -0.13	-2.3/ -0.16
二	-2.5/ -0.1	-2.6/ -0.1	-2.1/ -0.1	-2.1/ -0.1	-2.3/ -0.11	-4.1/ -0.1	-3.7/ -0.1	-3.2/ -0.1	-3.6/ -0.1	-3.4/ -0.1
三	-2.4/ -0.1	-2.9/ -0.11	-3.0/ -0.1	-2.1/ -0.1	-2.5/ -0.1	3.9/ -0.1	-3.5/ -0.1	-3.0/ -0.1	-3.5/ -0.1	-3.0/ -0.1

注: ϵ 为地表水平变形值, mm/m; K 为地表曲率变形值, 10^{-3}m^{-1} 。

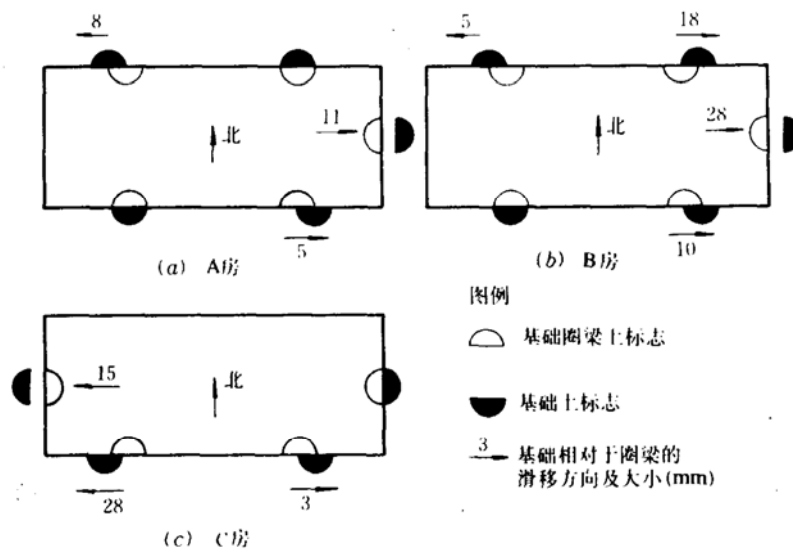


图6 试验平房基础滑动层位移示意图

从试验房的观测结果可知, 尽管滑动层产生了较大的滑移, 但基础圈梁以及上部墙体几乎没有产生破坏(B房后墙除外), 各加固构件中钢筋的附加采动应力均较低。表3给出了试验房水平加固构件钢筋最大附加采动应力的实测值(其中圈梁均指沿纵墙方向圈梁的跨中截面处, 基础连系梁为跨中位置处)。因此, 基础在地表拉伸变形作用下被拉裂甚至拉断, 而在压缩变形条件下被挤压。从滑动层处基础与基础圈梁之间的相对滑移量和方向可以看出, 由于地表变形与建筑物主轴方向斜交, 因而引起了建筑物的扭曲变形。滑动层的设置使采动引起的建筑物变形主要发生在基础部分, 从而大大降低了建筑物上部结构的变形程度。实测表明, 建筑物墙体的变形很小(如图7所示), 没有产生明显的扭曲变形。

图7为试验平房A受第一工作面开采影响时后墙墙面的实测水平变形曲线, 图中小圆圈表示测点。对地表变形和滑动层处滑移标志的观测表明, 当地表水平变形达到5.6~6.3mm/m(1989年6月中旬)时, 试验平房基础滑动层处开始出现滑移。图7给出了滑动层滑

移前后墙面典型的两次实测水平变形曲线。从图中可以看出,在滑动层开始滑移前,地表水平拉伸变形的影响是主要的(5月25日,实测地表变形 $\epsilon=2.7\text{mm/m}$, $K=0.18\times 10^{-3}\text{m}^{-1}$),因而墙面主要表现为拉伸变形。由于端部墙面受山墙变形的影响,因此端部墙面上部拉伸小,下部拉伸大,而中部墙面则表现为上部拉伸大、下部拉伸小。这与有限元模拟分析的结论是一致的。当滑动层处滑移破坏发生后,墙面变形的性质则发生了很大的变化。由于地表水平变形对上部墙面的作用基本达到了最大值(上限值),所以墙面变形的性质主要表现为曲率变形的影响(7月5日,实测地表变形为 $\epsilon=6.7\text{mm/m}$, $K=0.48\times 10^{-3}\text{m}^{-1}$)。此时,墙面中部上部受拉,下部受压;端部墙面亦是如此。

表3

加固构件的钢筋附加采动应力

试验房号	加固构件	最大的附加采动应力(MPa)	
		受拉钢筋	受压钢筋
A	基础圈梁	25	-34
	顶圈梁	36	—
	基础连系梁	—	-17
B	基础圈梁	46	-73
	基础连系梁	—	-24
C	基础圈梁	21	-37
	顶圈梁	45	—
	基础连系梁	—	-19
I	基础圈梁	42	-23
	中圈梁	57	-59
	顶圈梁	23	—
II	基础圈梁	73	-28
	顶圈梁	26	—

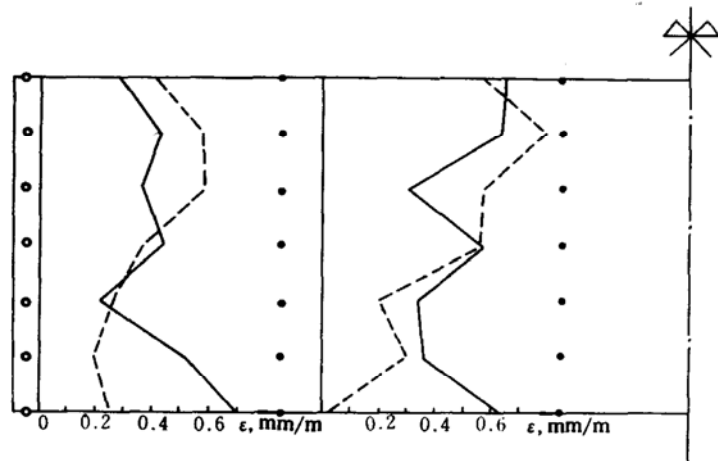


图7 试验平房A后墙实测水平变形曲线

注: 图中实线代表1989.5.25测值; 虚线代表1989.7.5测值

进一步分析B房后墙裂缝的开展过程可以更好地说明滑动层的效果。B房采用的是大断面小配筋率的基础圈梁加固方案,前墙门窗过梁贯通,没有设置顶圈梁。在经历了 $\epsilon = 7.2\text{mm/m}$, $K = 0.18 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}$ 的地表变形(沿建筑物纵墙方向)时,建筑物未产生可见裂缝,此时室内混凝土地面已产生20mm的裂缝。当地表变形达到 $\epsilon = 8.6\text{mm/m}$, $K = 0.49 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}$ 时,由于曲率变形对上部墙体的作用超过了水平变形的作用^[9],顶部墙体受拉,因而出现了典型的正曲率破坏情况。此时,B房后墙中部楼板下墙体及屋面开始出现开裂,以后裂缝往墙体下部发展。当 $\epsilon = 10.4\text{mm/m}$, $K = 0.81 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}$ 时,裂缝发展到距基础圈梁10皮砖处,裂缝最大宽度为5mm。在开采第二和第三两个工作面时,地表为压缩变形区,基础被挤压,墙体裂缝没有因此而变窄,而是继续向下发展,直至基础圈梁顶面。由此可以说明,滑动层的效果很显著。

上面提到的基础滑动层开始产生滑移时的地表水平变形值在5.6~6.3mm/m之间,此值即为该试验平房条件下地表水平变形对上部结构影响的上限值,该值与有限元模拟结果基本一致。

5. 结 论

基础滑动层在地表变形作用下产生滑移的机理比较复杂,它不但与滑动层材料、上部结构的重量和刚度、基础的强度和刚度以及施工质量有关,还与地表变形的性质有关。在地表拉伸变形作用下,当地表水平变形超过了对上部结构影响的上限值后,滑动层产生显著的滑移破坏,此时如果相应的地表曲率变形较大,从而引起滑动层界面性质(如平整度、接触状态等)的变化,那么地表水平变形对上部结构影响的上限值将会发生变化。再综合倾斜变形的影响,情况就更复杂了。在地表压缩变形作用下,则滑移破坏主要表现在基础的压缩上,此时亦同样存在上述的复杂情况。从建筑物保护和充分发挥滑动层作用的角度来说,采用摩擦系数较低的滑动层材料,适当加强基础的刚度是必要的。

本文试验房地表倾斜变形影响很小,有限元模拟分析亦是基于该条件下进行的。即在分析中没有考虑地表倾斜变形和曲率变形对滑动层滑移机理的影响。通过有限元模拟分析和现场试验我们可以得到如下结论:

(1)在两种地表变形(拉伸与压缩地表变形)条件下,滑动层的设置均能使墙体和加固构件的采动附加应力降低。

(2)在设置滑动层条件下,地表水平变形对上部结构的影响存在上限值。

(3)当地表变形与建筑物主轴斜交时(即采煤工作面推进方向与建筑物主轴斜交),滑动层的设置大大降低了地表变形引起的上部结构的扭曲变形。

(4)三维有限元模拟分析采动区建筑物的附加采动应力和变形较符合实际,理论分析与实测结果基本一致。

本文承蒙煤炭科学研究院焦传武教授、中国矿业大学北京研究生部马伟民教授及峰峰矿务局煤炭科学研究所邢安仕高级工程师的指导,谨致谢意。

参 考 文 献

1. Shunchen Y, Jishou Z. The Establishment and Analysis of a Three Dimensional Finite Element Model on Brick Buildings against Surface Ground Deformations due to Mining. Proceedings of the 4th International Conference on Ground Movements and Structures, Cardiff, U K, 1991.
2. 周国铨等. 建筑物下采煤. 北京: 煤炭工业出版社, 1983. 236.
3. 仲继寿, 杨舜臣. 抗采动农房结构措施优化的试验研究. 第二届国际采矿科学技术讨论会论文集, 徐州, 1991. 242~249.

3-D FEM Analysis and Field Test for Effect of Slip Layer of Building Foundation in Mining Areas

Zhong Ji-shou Yang Shun-chen

(China University of Mining & Technology, Xuzhou)

Peng Zeng-fu

(Fengfeng Mine Bureau, Handan)

Abstract Effects of slip layer of building foundation subjected to deformations of ground surface in mining areas were studied by 3-D FEM and field test, and results were compared. Both showed under the condition of ground surface deformation, tension or compression, the presence of foundation slip layer reduces the additional stress effectively, and there is an upper limit for effect of horizontal deformation of ground surface to superstructure limit.