

典型曲线法在山东龙口软岩煤矿区 开采沉陷预测中的应用

张惠生¹, 顾伟²

(1. 天津市国土资源和房屋管理局, 天津 300042;

2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为丰富矿区开采沉陷的预计方法, 提高预测的精度, 在综合大量文献的基础上, 提出了典型曲线法。典型曲线法避免了由理论模型的假设和简化而造成预计公式的误差, 提高了预计的精度, 通过开发预计程序, 方便了数据的处理, 实现了典型曲线法沉陷预计的电算化。以山东龙口软岩矿区为例, 详细介绍了典型曲线的建立和应用方法, 预计结果和实测最大下沉值的绝对偏差为 9 mm, 相对误差为 1.1%。

关键词: 龙口矿区; 开采沉陷; 预计方法; 典型曲线; 预计程序; 山东省

中图分类号: TD327; P618.11 **文献标识码:** A

0 引言

煤炭是我国的主体能源, 在国民经济和国计民生中占有举足轻重的地位。我国的煤炭可开采储量位居世界第 3 位^[1]。煤炭资源开采造成的地表沉陷严重影响着开采区正常的生产、生活^[2-3]。矿山开采前应预先计算出受开采影响的岩层或地表的移动和变形, 并采取相应的保护措施。

目前, 在矿山开采沉陷领域, 概率积分法预计模型已成为我国较为成熟、应用最为广泛的预测方法^[4]。但该方法的缺点是: 由于岩体本身及受采动岩体移动规律的复杂性, 理论模型很难全面、准确地反映岩层和地表移动的规律, 不得不进行某种假设和简化, 由此导致用其最大值和分布情况的解析公式求得的预计结果与实际情况不相符合的后果。这种不符合的后果, 轻则使预计的准确性降低, 重则使预计的结果发生错误^[5-6]。典型曲线法的分布和参数均来自实测资料, 可避免由于理论模型的假设和

简化而造成预计公式的误差, 预计误差较小, 是目前较为可靠的预计方法之一, 各国都在实测基础上建立了大量的典型曲线。前苏联根据大量多年的实测资料, 在顿涅茨克、卡拉干达等重要矿区建立了各自的典型曲线; 我国邯郸峰峰矿区和平顶山矿区也都根据多年的地表移动观测资料建立了本矿区的典型曲线^[7]。由于典型曲线的针对性较强, 需要大量的实测资料和分布函数且不利于数据处理等, 从而制约了典型曲线法的应用和推广。

本文根据大量文献资料, 分析了龙口软岩矿区 21 个观测站 46 条观测线的实测数据, 开发出相应的预计分析程序, 解决了典型曲线预计针对性强和不便于数据处理的问题, 实现了典型曲线法预计的电算化, 提高了典型曲线法的应用效果。

1 典型曲线法

1.1 典型曲线法的基本原理

典型曲线法是用无因次的典型曲线表示活动盆

收稿日期: 2013-12-05; 改回日期: 2014-01-08; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51304199)资助。

作者简介: 张惠生(1957—), 男, 高级工程师, 从事水工环地质、地质资料信息管理等方面的研究工作。通信地址: 天津市和平区曲阜道 84 号, 天津市国土资源和房屋管理局; 邮政编码: 300042; E-mail: ysjctj@163.com

地主断面上的移动和变形曲线的一种方法,是将大量实测曲线无因次化,再经综合整理分析求出典型曲线,即用无因次的曲线表示地表下沉、倾斜、曲率、水平移动和水平变形在活动盆地主断面内的分布规律。这 5 种移动变形曲线都能以典型曲线的形式给出,也可仅给出下沉典型曲线,而倾斜、曲率、水平移动和水平变形曲线按其间的数学关系由下沉曲线导出。

1.2 典型曲线的建立

(1)根据地质采矿条件(所采煤层、充分采动程度、采深或采厚等),将观测站分为若干组,每组观测站的地质采矿条件应大体相同。

(2)将观测站实测的移动和变形曲线无因次化,方法是:选择共同的下沉曲线特征点(如盆地边界点和最大下沉点)作为坐标原点,将沿地表的 x 值(沿走向主断面)或 y 值(沿倾向主断面)除以平均开采深度 H_0 或相应的半移动盆地长(如下山方向 L_1 ,上山方向 L_2 ,走向方向 L_3)作为无因次横轴,将移动和变形值除以相应的最大值作为无因次纵轴,将实测的移动和变形曲线化为无因次曲线。

(3)比较同组内的同名移动或变形曲线(如下沉曲线),求出它们的平均曲线,该平均曲线就是移动或变形分布的典型曲线。典型曲线可用无因次曲线表示,也可用诺谟图或分布系数表表示。

2 龙口软岩矿区观测站资料

龙口软岩矿区位于山东省龙口市和蓬莱县境内,属黄县煤田,该煤田东西长 28 km,南北宽 12~15 km。矿区含煤面积约 300 km²,可采总储量 23 398.6×10⁴ t,现有北皂、梁家、洼里 3 对生产矿井,直接影响工农关系的村庄下压煤问题十分严重,据 2003 年底统计,村庄压煤的可采储量 15 436.9×10⁴ t,占可采储量的 65.97%。

龙口矿区地层为单斜构造,以断裂为主,煤层大体由海上向内陆倾斜。龙口煤田成煤于新生代古近纪,为碳化程度较低的褐煤,深部为长焰煤。煤系地层主要由黏土岩、砂岩、含油泥岩及煤组成。主采煤层为煤 2 和煤 4,是典型的顶板软、底板软和煤层软的三软地层。显著的地层特点使得该区域的岩层移动具有较强的特殊性,为此龙口矿区于 1973 年建立了地表移动观测站,到目前为止已建立各类地表移动观测站 21 个,观测线 46 条(表 1)。这些观测站

包括初次开采和重复开采,涵盖了 23.5~152.4 m 的冲积层、61~1 600 m 的采深以及 1.4~17.19 m 的采厚,几乎涉及到矿区所有地质采矿条件。

由于龙口矿区开采深度变化大,岩层及地表移动规律存在差异,不同采深和表土层条件下,地表移动规律及参数有较大的变化,给地表移动预测及保安煤柱留设的参数选取带来了困难。另外,由于岩体介质的复杂性,目前利用理论方法难以准确地预测,必须借助实测资料综合分析,采用数理统计方法寻求地表移动参数与地质采矿条件之间的关系,以便找出不同地质采矿条件下参数的变化规律。

3 龙口软岩矿区典型曲线法的建立及应用

3.1 龙口矿区下沉无因次曲线的建立

3.1.1 下沉无因次曲线建立

(1)在实测下沉曲线上确定出最大下沉点和边界点的位置(下沉 10 mm 的点),最大下沉点至边界点的距离称半移动盆地长,以 L 表示。

(2)将半移动盆地长 L 十等分,标出这些等分点至原点的距离 $0.1L, 0.2L, \dots, 0.9L, 1.0L$, 等分点的无因次坐标 $Z = x/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1.0$ 。

(3)测出各等分点的下沉值 W_x ,用最大下沉值 W_m 除 W_x ,得到相对下沉值 $W_1/W_m, W_2/W_m, \dots, W_9/W_m, W_{10}/W_m$ 。

该法只用到 1 个最大值,即最大下沉值 W_m (充分采动时为 W_0),其计算公式为:

$$W_m = mq \cos \alpha \sqrt{n_1 n_3}$$

$$n_1 = K_1 \frac{D_1}{H_0}$$

$$n_3 = K_3 \frac{D_3}{H_0}$$

式中, n_1, n_3 为沿倾向和走向的采动程度系数; K_1, K_3 为系数,一般取 0.9; n_1, n_3 在代入公式中计算时,若其值 > 1,则取 1; D_1, D_3 为工作面宽度; H_0 为平均采深; m 为煤层采厚; q 为下沉系数; α 为煤层倾角。

(4)作下沉无因次曲线,取横坐标为 $Z = x/L = 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1.0$,纵坐标为 W_x/W_m 。为便于对比,各观测线下沉无因次曲线选用相同的比例尺。将按上述方法求得的点位 Z 和相对下沉值点用平滑曲线连接。

表1 龙口矿区观测站情况

Table 1 Conditions of observation station in Longkou mining area

矿名	工作面	表土厚度/m	倾角/ $^{\circ}$	走向长/m	倾斜长/m	采厚/m	采深/m			观测线
							H_2	H_1	H_0	
北皂矿	1103	42.5	9	770	87	2.1	206	224	243	走向1条,倾向2条
	1203	42.5	9	665	125	2.3	228	248	255	走向1条,倾向2条
	4303	52.4	4	784	110	4.6	214	220	217	走向1条,倾向3条
	4410	50	8	405	66	5.78	305	319	314	走向、倾向各1条,铁路观测线1条
梁家煤矿	1203	45	8	770	135	4.19	320	334	327	走向、倾向各1条
	2201	40	9	980	137	3.93	295	321	311	走向、倾向各1条
	2209	45	10	875	102.8	3.97	415	439	427	走向、倾向各1条
	2610	45	11.3	1148	154	3.02	414	440	398	走向、倾向各1条
	2208	45	10	230	58	3.75	316.5	326.5	321.5	走向1条,倾向3条
	2408	40	8.5	1260	86~134	2.6	544	600	552	走向、倾向各1条
	2406	43	7.5	1378	145.7	2.57	511	576	543	倾向1条
	4111	50	7	875	123	7.19	424	524	512	走向、倾向各1条
	4109	50	7	886	113	6.38	410	507	497	倾向1条
	4108	38	10	829	133	6.48	375	395	387	走向、倾向各1条
4112	35	9	893	147	6.53	414	448	439	走向、倾向各1条	
洼里矿	10103	29.5	5	210	768	2.03	261	303	282	走向2条,倾向1条
	1201	23.5	6	247	55	1.43	63	70	66.5	走向1条,倾向2条
	4203	24	5	270	113	1.97	61.4	79.2	69	走向、倾向各1条
	11206	26	6	64~112	676	2.0	261	319	285	走向1条
	11202	26	6	97~103	628	2.0	265	330	285	走向1条
	11208	26	6	239	790	2.0	260	321	282	走向1条

3.1.2 下沉无因次曲线分类分析

将不同地质采矿条件下所求得的下沉无因次曲线进行分析对比,排除特殊地质构造和采动异常情况下的曲线,发现曲线形态主要与采区宽度和深度的比值 $D/H=n$ (n 为采动系数) 有关,即与采动程度有关。从倾向剖面下沉无因次曲线图(图1)可以看出,采动程度不同,曲线形状明显不同;从走向剖面下沉无因次曲线图(图2)可以看出,由于龙口矿区所有观测站的走向均达到充分采动,而倾向均为非充分采动,因此曲线形状大致相同。

3.1.3 无因次曲线分布规律

通过分析对比不同地质采矿条件下所得的下沉

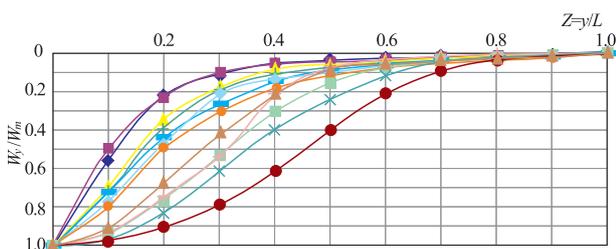


图1 龙口矿区倾向剖面下沉无因次曲线

Fig. 1 Dimensionless curve of subsidence in dip in Longkou area

无因次曲线,排除有地质构造和异常采动情况下的曲线,可得出以下规律性认识:

(1)采动程度相同,下沉无因次曲线形态相似;采动程度不同,下沉无因次曲线形态不同。

(2)当走向达到充分采动,倾向未达到充分采动,倾向的下沉无因次曲线形态不同,并按一定的规律排列。应按不同采动程度系数对倾斜下沉无因次曲线进行分类,制作不同的采动程度的下沉典型曲线。

(3)下沉无因次曲线特征:①当 $n \geq 1$ 时,曲线靠近煤柱一侧,盆地边界处曲线收敛快,最大下沉点处

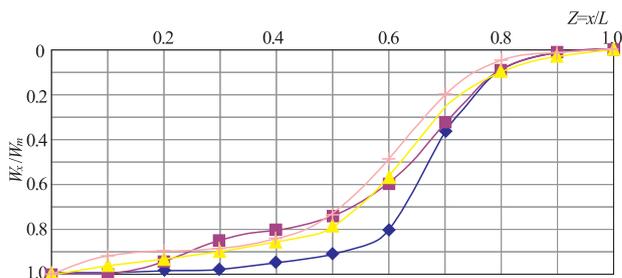


图2 龙口矿区走向剖面下沉无因次曲线

Fig. 2 Dimensionless curve of subsidence in strike in Longkou area

曲线收敛慢;②当 $n \geq 0.7$ 时,曲线略偏向采空区一侧,盆地边界处收敛慢,最大下沉点处曲线收敛较快;③当 $n < 0.5 \sim 0.6$ 时,曲线偏向采空区一侧,最大下沉点处曲线收敛快,曲线中部上升快,整个曲线偏向采空区一侧。

通过分析下沉无因次曲线得知,下沉无因次曲线反映了地表下沉的分布规律,而与地表移动盆地具体尺寸大小、下沉量大小无关,因此不同观测站的下沉无因次曲线可相互比较,综合分析。

3.2 龙口矿区典型曲线的建立

按不同的采动程度建立下沉典型曲线。龙口矿区地表移动观测资料的观测精度基本相同,可取无因次曲线的算术平均值作为典型曲线的下沉分布系数。

(1)走向充分采动情况下走向主断面下沉典型曲线的建立。

排除由特殊地质构造和采动异常的曲线,选取相对规范的工作面观测数,即求出走向充分采动情况下的走向下沉典型曲线的下沉分布系数(表 2),图 3 为走向下沉典型曲线图。

(2)走向充分采动、倾向有限开采情况下,倾向

主断面下沉典型曲线的建立。

在走向达到或接近充分采动的情况下,按采动程度系数 n 的不同值对倾斜方向的无因次下沉曲线进行分组,然后将各组曲线分别求取其平均值,得到倾斜方向不同采动程度的下沉典型曲线。表 3、表 4、表 5 分别是走向接近充分采动,倾向为有限开采,采动程度系数为 $n=0.6, n=0.7, n=0.8$ 的情况下求取倾斜方向下沉典型曲线的下沉分布系数。图 4、图 5、图 6 分别是 $n=0.6, n=0.7, n=0.8$ 情况下求得的倾斜方向下沉典型曲线。

将走向达到充分采动时的走向下沉典型曲线和倾向 $n=0.8$ 情况下的下沉曲线进行综合比较,可以将走向下沉典型曲线看作是倾斜方向 $n=1$ 情况下的下沉典型曲线。用内插法得出 $n=0.9$ 情况下的倾斜方向的下沉典型曲线,计算结果见表 6。内插是根据随着采动程度的减小,下沉无因次曲线偏向采空区一侧的原理在实测下沉典型曲线上以采动程度的不同而进行内插。所求得的典型曲线适用于走向达到充分采动或接近充分采动的情况下,倾斜方向不同采动程度情况下倾斜主断面的地表下沉预计。

表 2 龙口矿区走向主断面下沉典型曲线分布系数

Table 2 Distribution coefficient of typical curve of the main fault plane subsidence in strike in Longkou area

x/L_3	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
W_x/W_m ($n \geq 1$)	0.000	0.020	0.079	0.258	0.559	0.747	0.834	0.885	0.932	0.966	1.000

表 3 $n=0.6$ 时倾斜方向下沉典型曲线的下沉分布系数

Table 3 Distribution coefficient of computing dip typical curve in condition of $n=0.6$

y/L_1 或 y/L_2	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
W_y/W_m ($n=0.6$)	0.000	0.009	0.017	0.024	0.035	0.052	0.086	0.167	0.340	0.669	1.000

表 4 $n=0.7$ 时倾斜方向下沉典型曲线的下沉分布系数

Table 4 Distribution coefficient of computing dip typical curve in condition of $n=0.7$

y/L_1 或 y/L_2	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
W_y/W_m ($n=0.7$)	0.000	0.010	0.018	0.039	0.081	0.154	0.240	0.394	0.589	0.832	1.000

表 5 $n=0.8$ 时倾斜方向下沉典型曲线的下沉分布系数

Table 5 Distribution coefficient of computing dip typical curve in condition of $n=0.8$

y/L_1 或 y/L_2	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
W_y/W_m ($n=0.8$)	0.000	0.011	0.023	0.048	0.095	0.180	0.336	0.570	0.777	0.940	1.000

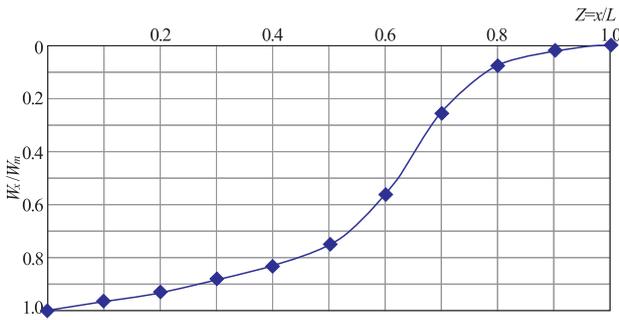


图3 龙口矿区走向主断面下沉典型曲线
Fig. 3 Typical curve of the main fault plane subsidence in strike in Longkou area

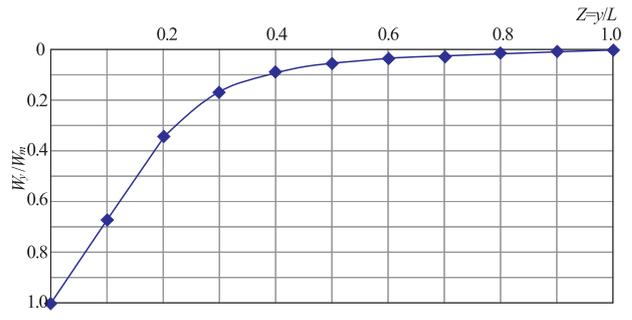


图4 n=0.6时倾斜方向下沉典型曲线
Fig. 4 Dip typical curve in condition of n=0.6

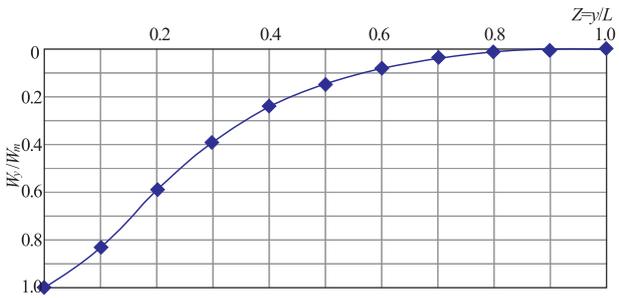


图5 n=0.7时倾斜方向下沉典型曲线
Fig. 5 Dip typical curve in condition of n=0.7

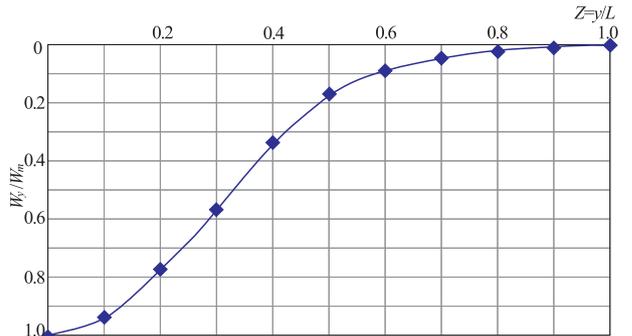


图6 n=0.8时倾斜方向下沉典型曲线
Fig. 6 Dip typical curve in condition of n=0.8

表6 龙口矿区倾向主断面下沉典型曲线分布系数

Table 6 Distribution coefficient of dip subsidence typical curve in Longkou area

y/L ₁ 或 y/L ₂	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
n ≥ 1.0	0.000	0.020	0.079	0.258	0.559	0.747	0.834	0.885	0.932	0.966	1.000
0.9	0.000	0.015	0.051	0.153	0.327	0.463	0.585	0.727	0.855	0.953	1.000
0.8	0.000	0.011	0.023	0.048	0.095	0.180	0.336	0.570	0.777	0.940	1.000
0.7	0.000	0.010	0.018	0.039	0.081	0.154	0.240	0.394	0.589	0.832	1.000
0.6	0.000	0.009	0.017	0.024	0.035	0.052	0.086	0.167	0.340	0.669	1.000

根据上述下沉典型曲线,其他移动变形值可按其间的数学关系由下沉曲线导出。在预计时,用上面所述的方法先预计出主断面上 $x/L=0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0$ 各点的下沉值 $W_n (n=0 \sim 10)$, 再按以下公式求出其他移动变形值:

$$i_{n \sim n+1} = \frac{W_n - W_{n+1}}{0.1L} \quad (n=0 \sim 9) \quad (1)$$

$$K_{n+1} = \frac{i_{n \sim n+1} - i_{n+1 \sim n+2}}{0.1L} \quad (n=0 \sim 8) \quad (2)$$

$$U_x = Bi_x \quad (3)$$

$$U_y = Bi_y + W_y \text{ctg } \theta \quad (4)$$

$$\epsilon_x = BK_x \quad (5)$$

$$\epsilon_y = BK_y + i_y \text{ctg } \theta \quad (6)$$

式中, $i_{n \sim n+1}$ 为 $n \sim n+1$ 线段中点的倾斜值; K_{n+1} 为 $n+1$ 点的曲率值; B 为水平移动系数, 实测确定的参数; U_x, U_y 为走向主断面、倾向主断面上的水平移动值; ϵ_x, ϵ_y 为走向主断面、倾向主断面上的水平变形值; θ 为开采影响传播角。

4 典型曲线法的程序开发及测试验证

4.1 典型曲线法的程序开发

根据上述建立的典型曲线方法, 开发预计计算程序, 实现地表沉陷预计的电算化。根据下沉典型曲线的分布系数及地质开采条件计算出地表移动变

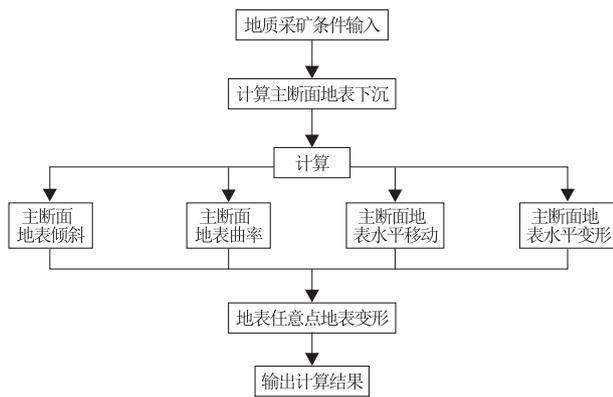


图 7 程序设计流程图

Fig. 7 Program flow diagrams

形的各种变形值,并可绘制变形曲线。基于典型曲线法的地表沉陷预计程序流程见图 7。

4.2 测试验证

为验证预计结果的可靠性,根据北皂矿 1103 工作面的地质采矿条件,对 1103 工作面倾向进行地表沉陷预计计算。表 7 为计算结果和实测结果比较。图 8 显示了实测下沉值和程序计算值的拟合效果。由计算结果可知,预计和实测的最大下沉值的绝对偏差为 9 mm,相对误差为 1.1%。

表 7 1103 工作面倾向末次观测实测值和程序预计比较

Table 7 Comparison of last field survey dip subsidence data of 1103 observation station and program prediction

实测下沉值/mm	程序计算下沉值/mm	偏差/mm	相对误差/%
31	27	4	12.90323
38	34	4	10.52632
39	36	3	7.692308
47	50	-3	-6.38298
59	62	-3	-5.08475
76	85	-9	-11.8421
107	118	-11	-10.2804
172	170	2	1.162791
275	286	-11	-4
434	436	-2	-0.46083
663	669	-6	-0.90498
795	804	-9	-1.13208
698	694	4	0.573066
491	485	6	1.221996
338	330	8	2.366864
230	242	-12	-5.21739
158	145	13	8.227848
112	108	4	3.571429
81	76	5	6.17284
55	50	5	9.090909
55	42	13	23.63636
42	32	10	23.80952
28	24	4	14.28571
18	16	2	11.11111

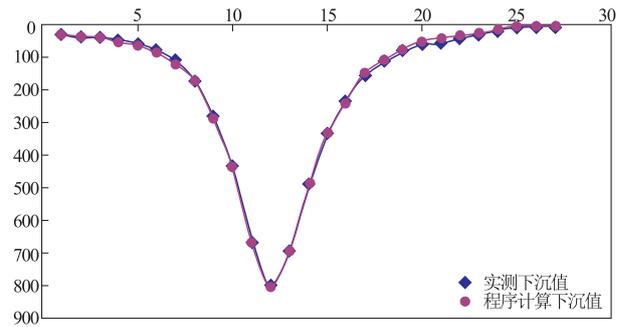


图 8 1103 工作面倾向末次观测实测值和程序预计比较

Fig. 8 Comparison of last field survey dip subsidence data of 1103 observation station and program prediction

上述比较结果,程序计算结果和实测结果接近,证明了基于龙口矿区实测值的典型曲线开采沉陷预计是可靠的。

5 结论

(1)地表沉陷是一个复杂的工程力学问题,涉及因素多、研究对象复杂且难以直接接触等特点决定了地表沉陷预计的难度,而基于实测数据的典型曲线预计方法在特殊地质条件下具有很好的预测结果。

(2)基于实测数据的典型曲线法完全避开了由于理论模型假设造成的预计公式的误差,也避免了由于参数反演或选取中产生的误差,大大提高了沉陷预计的精度。

(3)随着各个矿区大量地表观测站的建立,充足的实测资料为典型曲线的建立和应用提供了基础。

(4)典型曲线法预计的计算程序极大地简化了典型曲线中的数据处理,提升了预计结果的输出及应用效果。典型曲线法预计的完善和推广应用对提高我国沉陷预计精度,指导生产实践具有理论和实际意义。

参考文献:

[1] 叶敦和,尹善春. 21 世纪中国煤地质与勘探展望[J]. 地学前缘,1999,6(S1):9-15.
 [2] 谭志祥,邓喀中. 采动区建筑物地基、基础和结构协同作用模型[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(3):264-267.
 [3] 刘玉成. 开采沉陷的动态过程及基于关键层理论的沉陷模型[D]. 重庆:重庆大学,2010.
 [4] 吴侃,黄珍珍,王欣. 矿山开采沉陷的完备预计模型[J]. 煤矿

- 开采, 2006, 11(4): 4-6
- [5] 吴侃, 靳建明, 戴仔强. 概率积分法预计下沉量的改进[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(1): 19-22.
- [6] 查剑锋, 郭广礼, 赵海涛, 等. 概率积分法修正体系现状及发展展望[J]. 金属矿山, 2008(1): 15-18.
- [7] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [8] 王金庄, 邢安仕, 吴立新. 矿山开采沉陷及其损害防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [9] 邓喀中, 张冬至, 张周权. 深部开采条件下地表沉陷预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 52-55.
- [10] 吴侃, 葛家新, 王玲丁, 等. 开采沉陷预计一体化方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [11] 王悦汉, 邓喀中, 张东至, 等. 重复采动条件下覆岩下沉特性的研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 470-475.

Establishment and application of typical curve method for Longkou soft rock coal-mining area in Shandong province

ZHANG Huisheng¹, GU Wei²

(1. Tianjin Land Resources and Housing Administrative Bureau, Tianjin 300042; 2. China University of Mining and Technology, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In order to enrich the mining subsidence prediction methods and improve the precision of prediction, we synthesize a large amount of references and materials and propose the typical curve method. The typical curve method can avoid the errors of the expected formula resulted from the assumptions and simplifications of theoretical model so as to greatly improve the prediction precision. With wide use of computer technology and development of prediction program data processing can be greatly facilitated and computerization of the typical curve method's subsidence prediction realized. Taking Longkou soft rock coal mining area as an example this paper introduces the establishment and application of typical curve method in detail. Field check shows that the absolute deviation of the predicted subsidence and the measured subsidence is 9 mm and the relative error 1.1%.

Key Words: Longkou mining area; mining subsidence; prediction method; typical curve; prediction program; Shandong province