

厚冲积层下地表沉陷与变形预计的新方法^①

张向东 赵瀛华 刘世君
(辽宁工程技术大学土木系, 阜新 123000)

摘 要 在厚冲积层下, 地表沉陷与移动有自身的特点和变形规律, 这些规律由上覆基岩和冲积层的综合影响所决定。在将冲积层视为随机介质, 而将基岩看成是粘弹性基础上的粘弹性梁的基础上, 建立了地表沉陷与变形预计的新方法及计算公式。通过实例分析, 证明该方法比较符合实际。

关键词 岩层移动 地表沉陷 随机介质理论

中图法分类号 TD823. 83

在建筑物下、铁路下、水体下和岩溶水体上开采, 是目前国内外许多矿山经常遇到的技术问题。为了提高矿产资源利用率, 增加投资效益, 人们早就开始了“三下”、“一上”开采的实践, 并对其引起的岩层移动和地表沉陷进行了深入的理论研究^[1-9]。但某些特殊地质条件下的地表移动规律还研究得不够, 其中厚冲积层条件下岩层及地表移动规律是目前研究的主要问题之一。在厚冲积层下, 地表移动具有下沉系数偏大(一般均在0.8以上)、水平移动系数较大、和拐点偏距较小等特点, 有其自身的变化规律。本文采用两种介质模型, 将冲积层视为随机介质, 而将基岩看成是粘弹性基础上的粘弹性梁, 从而建立了地表沉陷与变形预计的新方法及计算公式, 对“三下”开采有重要的指导意义。

1 地表沉陷计算模型

长期的理论研究和生产实践均表明, 岩层移动和地表沉陷是一个复杂的时空发展过程, 并与上覆岩层的性质密切相关。在厚冲积层条件下, 地表沉陷将由上覆基岩和冲积层的综合影响所决定。

以往人们在研究地表移动与变形等问题时, 为了方便, 常将上覆岩层过度简化, 或是看作单一的松散介质, 或是看成纯粹的弹性介质。本文采用两种介质模型, 将冲积层看成是随机介质, 而将基岩看成是粘弹性基础上的粘弹性梁。地下开采首先使基岩下沉, 并在基岩与冲积层交接面上形成下沉盆地, 这一下沉盆地可以认为是采空区向上传播的结果。基岩面的下沉相当于形成了新的“采空区”, 该“采空区”的范围及剖面形式由岩梁下沉曲线所确定。由于将冲积层视为随机介质, 便可根据“单元开采”的影响函数和迭加原理推导地表的下沉曲线方程, 其计算模型如图1所示。

2 地表沉陷与变形计算公式

岩梁下沉曲线的形式为^[1]:

$$W_k(s) = \begin{cases} \frac{1}{2} W_0 \exp\left(\frac{\pi}{R}s\right) \cos\left(\frac{\pi}{R}s\right), & \text{当 } -R/2 \leq s \leq 0 \text{ 时;} \\ W_0 \left[1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\pi}{R}s\right) \cos\left(\frac{\pi}{R}s\right) \right], & \text{当 } 0 \leq s \leq R/2 \text{ 时;} \\ W_0, & \text{当 } s \geq R/2 \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

① 辽宁省自然科学基金资助项目 961024 收稿日期: 1998-04-10; 修回日期: 1998-10-31
张向东, 男, 36岁, 副教授, 博士

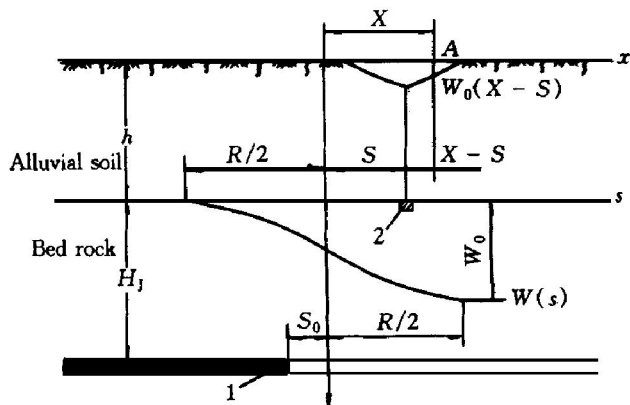


图1 地表下沉计算模型

Fig. 1 Computation model of surface subsidence

1—Wall of ore body; 2—Recovery element;

 W_0 —Greatest value of subsidence on surface of bedrock; H_j —Thickness of bedrock; h —Thickness of alluvial soil

鉴于厚冲积层盆地边缘收敛较慢, 中国矿业大学的王金庄、周雄等人建议选择双曲函数作为单元开采的影响函数, 即:

$$W_e(x) = \frac{1}{r} \operatorname{sech}^2\left(\frac{2x}{r}\right) \quad (2)$$

式中 $\operatorname{sech}(s)$ 为双曲正割函数, 即

$$\operatorname{sech}(s) = \frac{1}{\operatorname{ch}(s)} = \frac{2}{e^s + e^{-s}}.$$

根据叠加原理, 可得地表任意点 A 的下沉为:

$$W_k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} W_k(s) W_e(x-s) ds \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)可得:

$$W_k(x) = \frac{W_0}{2} + \frac{\pi W_0}{4R} \int_0^{R/2} \exp\left(-\frac{\pi}{R}s\right) \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi}{R}s\right) + \sin\left(\frac{\pi}{R}s\right) \right] \cdot \left[\operatorname{th} \frac{2(x+s)}{r} + \operatorname{th} \frac{2(x-s)}{r} \right] ds \quad (4)$$

令 $\lambda = \frac{\pi}{R}s$, 则有

$$W_k(x) = \frac{W_0}{2} + \frac{\sqrt{2} W_0}{4} \int_0^{\pi/2} e^{-\lambda} \sin\left(\lambda + \frac{\pi}{4}\right) \cdot \left[\operatorname{th}\left(\frac{2x}{r} + \frac{2R}{r}\lambda\right) + \right.$$

$$\left. \operatorname{th}\left(\frac{2x}{r} - \frac{2R}{r}\lambda\right) \right] d\lambda \quad (5)$$

上式不可积, 根据积分中值定理, 若 $f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上单调、非负且为非增函数, $g(x)$ 可积, 则有

$$\int_a^b f(x) g(x) dx = f(a) \int_a^b g(x) dx \quad (6)$$

式中 $a < c < b$

对于式(5)中的积分, 设 $f(\lambda) = e^{-\lambda} \sin(\lambda + \pi/4)$, 可以证明该函数满足中值定理条件, 则有

$$W_k(x) = \frac{W_0}{2} \cdot \left\{ 1 - \frac{\pi r}{4R} \left[\ln\left(\operatorname{ch}\left(\frac{2x}{r} - \frac{2cR}{r}\right)\right) - \ln\left(\operatorname{ch}\left(\frac{2x}{r} + \frac{2cR}{r}\right)\right) \right] \right\} \quad (7)$$

式中 $0 < c < \pi/2$

当 $x \rightarrow +\infty$ 时, $W_k(x) = W_0$, 则 $c = 1$ 。从而得到半无限开采时厚冲积层条件下地表下沉剖面方程为

$$W_k(x) = \frac{W_0}{2} \left[1 - \frac{\pi r}{4R} \ln \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{2x}{r} - \frac{2R}{r}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{2x}{r} + \frac{2R}{r}\right)} \right] \quad (8)$$

式中 $\operatorname{ch}(s)$ 为双曲余弦函数, 即

$$\operatorname{ch}(s) = (e^s + e^{-s})/2.$$

在矿壁上方, 由上式得 $W_k(0) = W_0/2$ 。一般情况下, 矿壁上方地表下沉值小于 $W_0/2$, 而向采空区偏移一段距离, 称为拐点移动距(或拐点偏距), 如图1中的 S_0 。因此, 拐点偏距是本预计方法中必不可少的参数之一。

式(8)的计算结果为地表最终下沉盆地各点的下沉量。对于地表的瞬时下沉, 可写成如下形式, 即

$$W(x, t) = \frac{W_0}{2} \cdot \left[1 - \frac{\pi r}{4R} \ln \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{2x}{r} - \frac{2R}{r}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{2x}{r} + \frac{2R}{r}\right)} \right] \cdot (1 - \xi e^{-\alpha t}) \quad (9)$$

将上式对 x 求导, 可得地表倾斜计算公式为

$$T(x, t) = \frac{\pi r W_0}{8R} \cdot \frac{\operatorname{sh}(\frac{4R}{\pi r})}{\operatorname{ch}(\frac{4x}{r}) + \operatorname{ch}(\frac{4R}{\pi r})} \cdot (1 - \xi e^{-\omega}) \quad (10)$$

将上式再对 x 求导, 可得地表曲率计算公式为

$$K(x, t) = - \frac{\pi r W_0}{8R} \cdot \frac{\operatorname{sh}(\frac{4R}{\pi r}) \operatorname{sh}(\frac{4x}{r})}{[\operatorname{ch}(\frac{4x}{r}) + \operatorname{ch}(\frac{4R}{\pi r})]^2} \cdot (1 - \xi e^{-\omega}) \quad (11)$$

对于水平移动和变形的计算, 本文仍采用阿维尔申的基本假设, 即认为水平移动与倾斜成正比, 其比例系数为通常所见的水平移动系数 B , 则

$$U(x, t) = BT(x, t) \quad (12)$$

$$\mathcal{E}(x, t) = BK(x, t) \quad (13)$$

3 有关地表移动预计参数的讨论

按上述公式预计地表沉陷与变形, 有 7 个参数需要确定。它们分别为下沉系数 η , 拐点移动距 S_0 , 基岩影响半径 R , 冲积层影响半径 r , 水平移动系数 B (或 b), 时间系数 ξ 和时间指数 ω 。

3.1 下沉系数

下沉系数是充分采动条件下地表移动稳定后最大下沉值与采厚关系的一个度量, 其大小决定于上覆岩层的性质、工作面尺寸、采深、采动次数以及采矿和顶板管理方法, 其中采矿和顶板管理方法是影响下沉系数的最主要因素。根据国内外大量观测资料, 对于全部垮落法 $\eta = 0.7 \sim 0.9$, 对于干式充填法 $\eta = 0.3 \sim 0.7$, 对于水砂充填法 $\eta = 0.05 \sim 0.3$, 对于条带开采法 $\eta = 0.1 \sim 0.3$ 。

对于同一矿区, 在采矿与顶板管理方法一定的前提下, 下沉系数与地质采矿条件之间的函数关系可以表示为

$$\eta = f(\frac{h}{H_0}, H_J) \quad (14)$$

式中 h 为冲积层厚度, m; H_0 为工作面平均采深, m; H_J 为基岩厚度, m。

在非充分采动条件下, 下沉系数与地质采矿条件之间的函数关系可表示为

$$\eta^0 = f(\frac{D_0}{H_0}, \frac{h}{H_0}, H_J) \quad (15)$$

式中 η^0 为非充分采动下地表下沉系数, D_0 为工作面斜长按 θ 角投影到地表的长度(m), θ 为开采影响传播角。

在不同矿区, 式 (15) 的函数形式将有所不同。在鹤壁矿区, 经过多元线性回归分析, 得到下沉系数与地质采矿条件的关系为^[2]

$$\eta^0 = 0.662 + 0.03288D_0/H_0 + 0.1035h/H_0 - 0.00009635H_J \pm 0.0209 \quad (16)$$

3.2 拐点移动距 S_0

实测结果表明, 拐点移动距与岩性、回采区段尺寸、采深和邻区开采的影响有关。在厚冲积层矿区, 拐点移动距与工作面尺寸之间存在着一种对数函数关系, 拐点移动距随工作面尺寸的增大而增大。当工作面尺寸达到充分采动条件时, 拐点移动距不再增大, 趋于稳定。另外, 拐点移动距随冲积层厚度的增加而减小, 经多元回归分析, 拐点移动距与地质采矿条件之间的函数关系可表示为

$$S_0/H = a_1 + a_2 \ln(l/H_0) - a_3 h/H \pm m \quad (17)$$

式中 H 为上、下山或走向开采深度, m; l 为工作面斜长, m; a_1 , a_2 和 a_3 为回归参数。

不同矿区拐点移动距的回归参数 a_1 , a_2 和 a_3 的值是不同的, 如淮北矿区上山方向为 $a_1 = 0.1949$, $a_2 = 0.2341$, $a_3 = 0.11$ 。

3.3 影响半径 R 与 r

在厚冲积层条件下, 采用基岩影响半径 R 和冲积层影响半径 r 两个参数来共同控制与调

整地表下沉曲线的形态。这两个参数的数值应根据各矿区的实测资料,通过回归分析得到。

在 R/r 不同的条件下,半无限开采时地表下沉曲线的最终形态如图 2 所示。由此可见,下沉曲线的平缓程度(即曲线的斜率)与 R/r 有关。因此,适当调整参数 R 和 r 值,使理论下沉曲线与实测结果的拟合误差最小,即可大大提高地表沉陷与变形的预计精度。

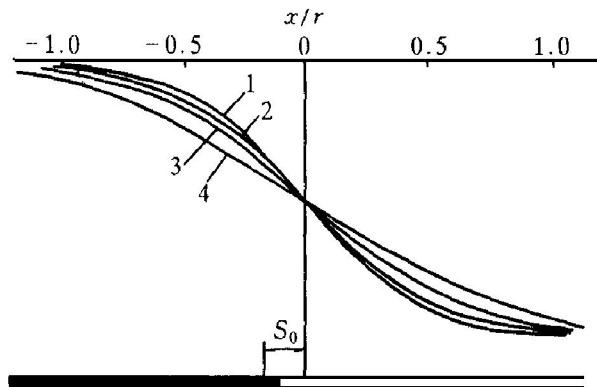


图 2 地表下沉盆地最终形态

Fig. 2 Final shape of surface subsidence basin

1— $R/r = 0$; 2— $R/r = 1.0$;

3— $R/r = 2.0$; 4— $R/r = 3.0$

3. 4 时间参数

由式(8)和(9)可知:

$$W(x, t) = W_k(x)(1 - \xi e^{-\omega t}) \quad (18)$$

当 $t = 0$ 时, 有

$$\xi = 1 - \frac{W(x, 0)}{W_k(x)} \quad (19)$$

从上式可以看出,若测得某点的瞬时下沉量和最终下沉量,便可确定时间系数 ξ 。当 $W(x, 0) = 0$ 时, $\xi = 1$ 。

地表点的下沉速度与其沉降量的关系为

$$\begin{aligned} V_w(x, t) &= \frac{\partial W(x, t)}{\partial t} \\ &= \omega [W_k(x) - W(x, t)] \end{aligned} \quad (20)$$

取有代表性的点,将其观测结果绘制成下沉—时间曲线,如图 3 所示,则有

$$\omega = \frac{1}{AB} \quad (21)$$

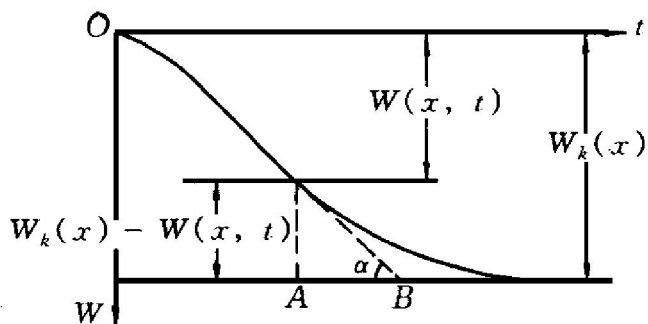


图 3 某点的下沉—时间曲线

Fig. 3 Dependence curve about subsidence and time of one point

4 地表沉陷与变形的计算

在有限开采时,可采用迭加原理计算地表的下沉,即:

$$W_k^0(x) = W_k(x) + W_k(D - x) - W_0 \quad (22)$$

式中 D 为工作面计算宽度, $D = L - S_1 - S_2$; L 为工作面实际长度; S_1, S_2 为工作面左右边界的拐点移动距。

将式(8)代入式(22)可得:

$$W_k^0(x) = \frac{\pi r W_0}{8R} \left[\ln \frac{\operatorname{ch}(\frac{2x}{r} + \frac{2R}{\pi r})}{\operatorname{ch}(\frac{2x}{r} - \frac{2R}{\pi r})} + \ln \frac{\operatorname{ch}[\frac{2(D-x)}{r} + \frac{2R}{\pi r}]}{\operatorname{ch}[\frac{2(D-x)}{r} - \frac{2R}{\pi r}]} \right] \quad (23)$$

上式为有限开采时地表各点的最终下沉量,对于地表瞬时下沉,可写成如下形式,即

$$W_k^0(x, t) = \frac{\pi r W_0}{8R} \left[\ln \frac{\operatorname{ch}(\frac{2x}{r} + \frac{2R}{\pi r})}{\operatorname{ch}(\frac{2x}{r} - \frac{2R}{\pi r})} + \ln \frac{\operatorname{ch}[\frac{2(D-x)}{r} + \frac{2R}{\pi r}]}{\operatorname{ch}[\frac{2(D-x)}{r} - \frac{2R}{\pi r}]} \right] \cdot (1 - \xi e^{-\omega t}) \quad (24)$$

将上式对 x 求导,可得有限开采时地表倾斜计算公式为

$$T^0(x, t) = \frac{\pi r W_0}{8R} \operatorname{sh}\left(\frac{4R}{\pi r}\right) \cdot \left[\frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{4x}{r}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{4R}{\pi r}\right)} + \frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{4(D-x)}{r}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{4R}{\pi r}\right)} \right] \cdot (1 - \xi e^{-\omega t}) \quad (25)$$

将上式再对 x 求导, 可得有限开采时地表曲率计算公式为

$$K^0(x, t) = - \frac{\pi r W_0}{8R} \operatorname{sh}\left(\frac{4R}{\pi r}\right) \cdot \left[\frac{\operatorname{sh}\left(\frac{4x}{r}\right)}{[\operatorname{ch}\left(\frac{4x}{r}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{4R}{\pi r}\right)]^2} + \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{4(D-x)}{r}\right)}{[\operatorname{ch}\left(\frac{4(D-x)}{r}\right) + \operatorname{ch}\left(\frac{4R}{\pi r}\right)]^2} \right] \cdot (1 - \xi e^{-\omega t}) \quad (26)$$

有限开采时地表水平移动和变形为

$$U^0(x, t) = BT^0(x, t) \quad (27)$$

$$\varepsilon^0(x, t) = BK^0(x, t) \quad (28)$$

5 实例分析

双鸭山矿务局岭东矿, 煤层厚 1.68 m, 埋藏深度 $H_0 = 160$ m, 倾角 $\alpha = 15^\circ$ 。在地表设置了观测站, 在走向剖面上, 观测站实测地表最终下沉量如图 4 所示。

根据对实测资料的分析, 下沉系数 $\eta = 0.63$, 拐点偏距 $S_0 = 28$ m, 水平移动系数 $B = 0.37$, 影响半径 $r = 102$ m, $R = 123$ m, 按式 (9) 计算的理论下沉剖面曲线如图 4 中的实线所示。由此可见, 本文建立的公式与实际吻合较好。

6 结论

(1) 在厚冲积层条件下, 地表沉陷与变形具有下沉系数和水平移动系数偏大, 而拐点偏

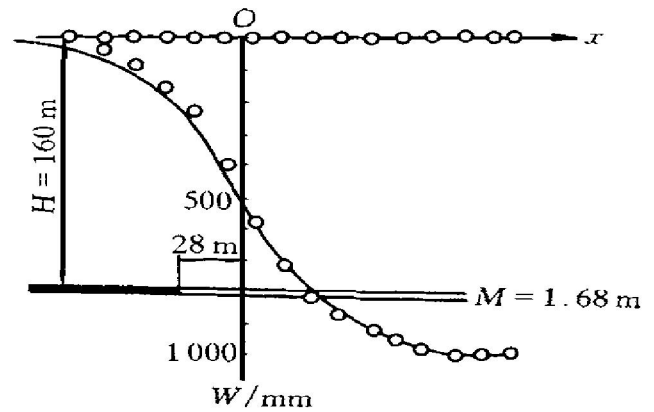


图 4 现场实测和理论分析结果

Fig. 4 Results of field test and theoretical analyses

距较小的特点;

(2) 第四纪冲积层与基岩物性相差较大, 在建立沉陷计算理论模型时, 应作为两种不同的介质来处理。本文将冲积层视为随机介质, 而将基岩视为粘弹性基础上的粘弹性梁, 所建立的计算公式及预计方法比较符合实际;

(3) 本文建立的预计方法有 7 个参数, 其物理意义明确, 便于推广应用; 同时可提高预计精度, 对解决“三下”矿体开采具有重要的指导意义。

REFERENCES

- 1 Liu Baochen (刘宝琛). Introduction of Mine Rock Mechanics (矿山岩体力学概论). Changsha: Science and Technological Publishing Corporation of Hunan, 1982: 255-309.
- 2 Guo Dazhi (郭达志) and Hao Qingwang (郝庆旺). Journal of China University of Mining & Technology (中国矿业大学学报), 1995, 24 (3): 57.
- 3 Cui Ximin (崔希民) and Yang shuo (杨 硕). China Mining Magazine (中国矿业), 1996, 24 (2): 52.
- 4 Wang Yongjia (王泳嘉). Journal of Northeast Institute Technology (东北工学院学报), 1984, 40 (4): 1.
- 5 Wu Ge (吴 戈). Journal of Shandong Mining Institute (山东矿业学院学报), 1994, 13 (3): 229.

- 6 Ma Fenghai (麻凤海) and Zhai Juechen (翟厥成). Journal of Fuxin Mining Institute (阜新矿业学院学报), 1992, 11 (3): 36.
- 7 Wu Lixin (吴立新) and Wang Jinzhuang (王金庄). Journal of China Coal Society (煤炭学报), 1994, 19 (3): 233.
- 8 Li Wenxiu (李文秀), Li Wendong (李文东) and Ma Guang (马光). Mining and Metallurgical Engineering (矿冶工程), 1993, 13 (3): 3.
- 9 Liu Tianquan (刘天泉). Journal of China Coal Society (煤炭学报), 1995, 20 (1): 1.

A NEW METHOD OF CALCULATING SURFACE SUBSIDENCE AND DEFORMATIONS UNDER THICK ALLUVIAL SOIL

Zhang Xiangdong, Zhao Yinghua and Liu Shijun

Liaoning Technology University, Fuxin 123000, P. R. China

ABSTRACT In condition of mining under thick alluvial soil, the surface subsidence and deformations have distinctive characteristics and developing regularity which are decided by the bedrock and quaternary alluvial soil. Based on the alluvial soil regarded as random medium and the bedrock looked upon as viscoelasticity beam on the viscoelasticity foundation, the new method and calculation equations were set up for predicting and calculating surface subsidence and deformations. By means of example, the new method has been proved being in agreement well with the actual situation.

Key words strata movement surface subsidence random medium theory

(编辑 何学锋)