

基于随机介质模型的隧道施工地表沉降预计*

高盼^{1,2,3} 郭广礼^{1,2,3}

(1. 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室; 2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室; 3. 中国矿业大学)

摘 要 针对隧道开挖过程中岩土体的形态结构特征,分析了随机介质理论在隧道开挖中的适用性,在此基础上建立了基于随机介质理论的独岩隧道开挖引起的地表沉降模型,选取了相应的模型参数,并编程实现模型。通过工程实例,分析了各模型参数的影响规律,最后根据 K1 + 700 隧道断面实测资料验证了模型的正确性。

关键词 隧道 随机介质理论 预计模型

The Prediction of Ground Surface Subsidence in Tunnel Excavation Construction Based on Stochastic Medium Model

Gao Pan^{1,2,3} Guo Guangli^{1,2,3}

(1. Key laboratory for Resources Environment and Disaster Monitoring of SBSM(CUMT); 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering; 3. China University of Mining Technology)

Abstract In view of the Morphological structure characteristics of rock and soil stratum, the applicability of stochastic medium theory in tunnel excavation was analyzed. Based on this, the stochastic medium model of ground surface subsidence in Duyan tunnel excavation was built, and then the program model brings to effect by selecting the proper parameters. Through the practical example, the paper analyzed the influence rule of each model parameter. At last, the correctness of the model is verified by the measured data with K1 + 700 tunnel contour.

Keywords Tunnel, Stochastic medium theory, Prediction mode

隧道施工建设过程中,必然会或多或少地引起地表沉降,地表沉降值过大会对隧道上方地表建筑物产生不利影响,甚至会引起安全事故。因此,对隧道开挖引起的地表沉降进行准确预计,可为减少由于隧道施工所造成的对地面建筑物的损害提供理论依据。

对隧道施工引起的地表沉降问题的研究,起源于对煤矿等矿山巷道上方地表沉降现象的分析。Martos 提出了隧道开挖所引起的地表沉降槽可由误差函数近似表示。在大量实测资料的基础上,Peck 认为,在不排水情况下,隧道开挖所形成的地表沉降槽的体积应等于地层损失的体积。他假定地层损失在整个隧道长度上均匀分布,隧道施工产生的地表沉降横向分布近似为一正态分布曲线^[1]。目前对隧道施工引起的地表沉降的研究以随机介质理论为主。本研究从自重应力型煤矿地表沉降的随机介质理论模型研究出发,结合隧道开挖的特点,研究了随机介质理论用于隧道施工引起的地表沉降规律,获得了各模型参数对沉降规律的影响,具有较好的实

际应用价值。

1 随机介质理论

随机介质理论是波兰学者李特威尼申(J. Litwiniszyn)于20世纪50年代为研究地下采矿引起的岩石及地表移动问题所提出的。在此基础上,我国学者刘宝琛等提出了较为实用的概率积分法。

随机介质理论认为,隧道开挖的随机介质为非连续介质模型,即在移动过程中,介质单元之间原有的联系发生变化,单元相互分离并发生相对运动^[2]。

以统计学的观点,可以将整个隧道开挖分解成无限多个小的单元开挖,整个开挖就等于构成这一开挖的无限小的单元开挖影响的总和。概率积分法就是将开挖过程所引起的岩层及地表移动过程看成是随机过程,用概率论的方法建立由地下单元开挖

* 国家公益性行业基金项目(编号:200811050),国家自然科学基金重点项目(编号:50834004)。

高盼(1989—),男,国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室,中国矿业大学环境与测绘学院,硕士研究生,221008 江苏省徐州市。

所引起的围岩及地表面单元下沉盆地表达式,经迭加建立地表沉降的剖面方程表达式^[3]。

隧道在开挖施工中遇到的岩体通常是由成分、组织各异的几种岩石构成的复合体,岩体形成后,在长期地质作用下,原始整体性受到诸如节理、断层、层面等等地质弱面的切割而破坏,成为形状、大小不同的岩块嵌合而成的结构体,而土体是一种分散体,而且可能受到弱面的切割。因此,当隧道施工引起岩土体发生运动时,单个岩块或土体颗粒的运动十分复杂,但大量实测结果表明,岩土体的总的运动趋势有着明显的规律性,因而隧道施工所引起的地表沉降适宜采用随机介质理论进行预计。

2 隧道开挖引起的地表沉降预计模型

隧道施工引起的地表沉降分布曲线具有一定的特点,由于隧道纵向长度远大于开挖断面的长和宽,因此,可简化为平面应变问题研究地表沉降规律。设在距离地面一定深度的地下开挖任意断面形状的隧道如图1。

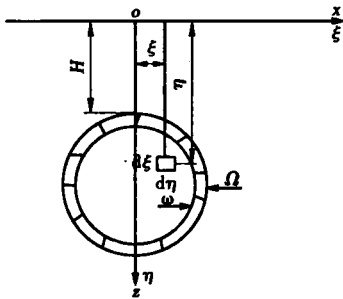


图1 任意断面隧道开挖示意

开挖初始断面为 Ω ,开挖断面的中心距离地面深度为 H ,图中对于开挖单元岩土体采用坐标系 $\xi\eta$,对于地表面则采用坐标系 xoz 。如果隧道全部坍塌,则经过长时间后,将引起地表的最大下沉。

把整个开挖范围分解为无限多个单元开挖,在单元开挖 $d\xi d\eta$ 的影响下,距离单元中心为 x 的地表最终的沉降值 $W_c(x)$ 为

$$W_c(x) = \frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(\eta)} x^2\right] d\xi d\eta. \quad (1)$$

设 $r(z)$ 为单元在 z 水平上的主要影响范围,它取决于开挖所处的地层条件,可以与 Z 成线性或非线性关系。引入地层主要影响角 β ,并认为 $r(z)$ 与 z 成线性关系

$$r(z) = \frac{Z}{\tan\beta}. \quad (2)$$

假定在整个开挖范围 Ω 内每个开挖单元完全

坍塌,应用叠加原理,可得到此时的地表下沉值为

$$W(x) = \iint_{\Omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (x - \xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (3)$$

实际上,任何隧道都不会发生完全坍塌,上式计算所得的地表下沉为最不利情况。隧道在施工过程中,常常对地层采取预处理和开挖后采取严密的支护措施,使得隧道建成后,隧道周围岩土体仅发生微小的位移。因此引起地表发生沉降的原因只是由于隧道周围岩体向开挖空间运动而导致的隧道开挖断面的收缩。如果隧道开挖初始断面为 Ω ,隧道建成后,开挖断面由 Ω 收缩为 ω ,根据叠加原理,地表下沉应当等于开挖范围 Ω 引起的下沉与开挖范围 ω 引起的地表下沉之差,即

$$W(x) = W_{\Omega}(x) - W_{\omega}(x) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (x - \xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (4)$$

3 工程实例

3.1 下沉预计模型的建立

以国道G209改建工程中独岩隧道工程为依托,利用随机介质理论建立简化的独岩隧道开挖模型。独岩隧道进、出口端埋深较浅,围岩条件差,节理裂隙发育,岩体松散破碎、极不稳定,这些介质能被较好地视作随机介质。因此隧道施工引起的地表沉降可采用随机介质理论进行预计。

结合独岩隧道的设计资料^[4],将隧道断面简化为一个圆形断面,如图2所示。开挖中心距地表深度为 H ,开挖断面初始半径为 R ,隧道断面沿轴向均匀收缩了 ΔR ,可得其地表点沉降值为

$$\begin{aligned} W(x) &= \int_a^b \int_c^d \frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(\eta)} (x - \xi)^2\right] d\xi d\eta - \\ &\int_e^f \int_g^h \frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(\eta)} (x - \xi)^2\right] d\xi d\eta = \\ &\int_a^b \int_c^d \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (x - \xi)^2\right] d\xi d\eta - \\ &\int_e^f \int_g^h \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (x - \xi)^2\right] d\xi d\eta. \end{aligned}$$

二重积分的上下限 a, b, c, d, e, f, g, h 分别为

$$\begin{aligned} a &= H - R, b = H + R, c = -\sqrt{R^2 - (H - \eta)^2}, \\ d &= -c, e = H - (R - \Delta R), f = H + (R - \Delta R), \\ g &= -\sqrt{(R - \Delta R)^2 - (H - \eta)^2}, h = -g. \end{aligned}$$

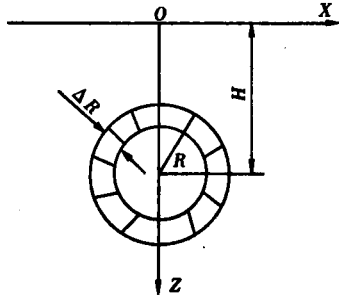


图 2 独岩隧道开挖示意

3.2 模型参数的影响规律

目前通用的计算软件有很多种,如 Matlab, MathCAD, Maple, Mathematica 等等。人们称 Mathematica 为物理学家的工具,对于数值积分、多项式和矩阵计算等能提供完善的符号计算功能,并给出美观的结果,同时 Mathematica 对于各种函数的绘图功能也相当出色^[5]。本次随机介质理论独岩隧道地表沉降模型有大量复杂的符号计算、数值积分及绘图需要,因此选择用 Mathematica 做为计算工具。

通过预计模型可以看到,影响隧道地表变形规律的主要有 4 个参数,通过分析各个参数对地表沉降的影响可以更好地认识独岩隧道地表的沉降规律,以便指导施工建设。因此根据独岩隧道设计资料,取 3 组参数如表 1。

表 1 独岩隧道模型计算参数

$\beta / (^{\circ})$	R / m	H / m	$\Delta R / mm$
30	5	15	25
35	6	25	75
40	7	35	125

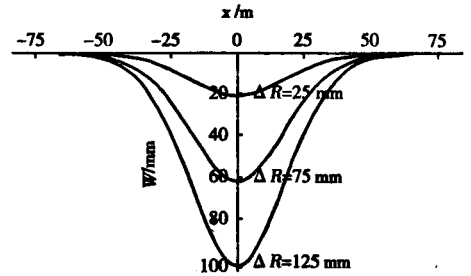
采用变化 1 个参数取值,固定其余 3 个参数取值的方法。因此,分为以下 4 种情况:

- (1) 情况 1。 $\beta = 35^{\circ}, R = 6 m, H = 25 m; \Delta H$ 分别取 25, 75, 125 mm。
- (2) 情况 2。 $R = 6 m, H = 25 m, \Delta H = 75 mm; \beta$ 分别取 $30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}$ 。
- (3) 情况 3。 $H = 25 m, \Delta H = 75 mm, \beta = 35^{\circ}; R$ 分别取 5, 6, 7 m。
- (4) 情况 4。 $\Delta H = 75 mm, \beta = 35^{\circ}, R = 6 m; H$ 分别取 15, 25, 35 m。

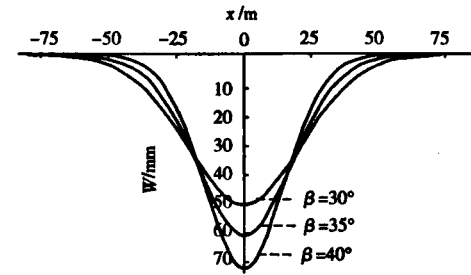
以上 4 种情况,通过 Mathematica 数值积分计算并作图,地表沉降结果如图 3 所示。

根据随机介质理论的计算分析结果,对比图 3 (a)至图 3(d),可以看出:

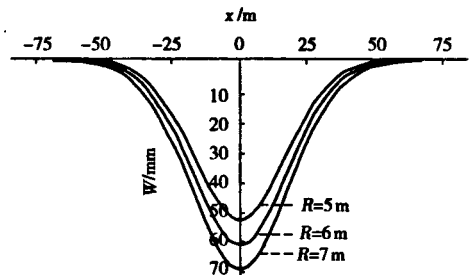
- (1) 地表沉降曲线是一条以隧道中轴线为对称



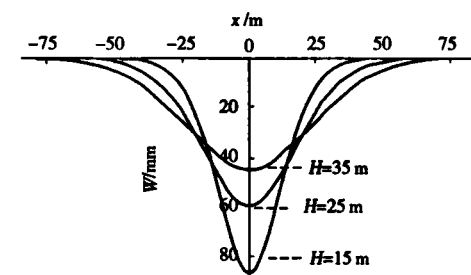
(a) 情况 1



(b) 情况 2



(c) 情况 3



(d) 情况 4

图 3 地表沉降曲线

轴的光滑连续曲线,曲线在 $x = 0$ 处,即隧道中轴线的正上方地表沉降达到最大;随着 x 绝对值增大,地表沉降逐渐减小至零。

(2) 地表沉降极值随着隧道洞周收敛值的增大而增大,而地表沉降影响范围不受洞周收敛值影响。

(3) 地表沉降极值随 β 角的增大而增大,地表沉降的影响范围却随 β 角的增大而减小。即围岩越坚硬,地表沉降极值越大,影响范围越小;围岩越破碎,地表沉降极值越小,影响范围越大。

(4) 地表沉降极值和影响范围随隧道开挖半径的增大而增大。

(5)地表沉降极值随隧道埋深的增大而减小,其影响范围随隧道埋深的增大而增大。

3.3 实测数据对比分析

本节选取进口端 K1 + 700 断面进行地表沉降预计分析。根据独岩隧道设计资料,取 $H = 18.5$ m, $R = 6$ m, 内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 。查阅相关资料及规范^[7],埋深小于 50 m 的 V 级围岩隧道围岩周边位移相对值为 0.2% ~ 0.6%,独岩隧道开挖半径 $R = 6$ m,因此取 $\Delta R = 12 \sim 36$ mm。

主要影响范围角的正切值 $\tan\beta$,在这里采用克诺泰(Knothe)的定义,即

$$\tan\beta = \frac{H-z}{i\sqrt{2\pi}} \text{ 和 } i = \frac{H-z}{\sqrt{2\pi}\tan(45^\circ - \varphi/2)}$$

式中, i 为沉降槽宽度系数, φ 为土体内摩擦角^[7]。可得 $\beta = 32.5^\circ$ 。

将各计算参数带入独岩隧道随机介质模型,通过 Mathematica 数值积分、绘图,与实测数据对比分析如图 4。

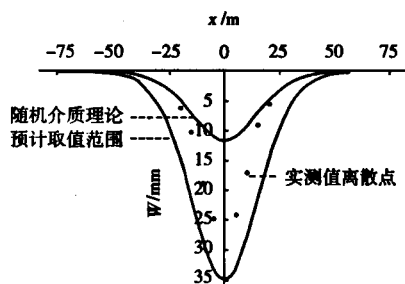


图 4 K1 + 700 断面地表沉降最终曲线

从图 4 中可看到,二者反映的地表沉降规律基本一致,就数值而言,地表沉降实测值在随机介质理论预计的地表沉降取值范围内。

4 结论

(1)地表沉降曲线是以隧道中轴线为对称轴的光滑连续曲线,在隧道中轴线的正上方地表沉降达到最大值。

(2)地表沉降极值随着隧道洞周收敛值的增大而增大,而地表沉降影响范围不受洞周收敛值影响。

(3)地表沉降极值随 β 角的增大而增大,地表沉降的影响范围却随 β 角的增大而减小。

(4)地表沉降极值和影响范围随隧道开挖半径的增大而增大。

(5)地表沉降极值随隧道埋深的增大而减小,其影响范围随隧道埋深的增大而增大。

(6)对于模型参数如何准确地获取、如何估计模型参数误差对预计结果的影响、如何修正模型误差等问题,有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] 贺跃光. 工程开挖引起的地表移动与变形模型及监测技术研究[D]. 长沙:中南工业大学,2003.
- [2] 邹友峰,邓喀中,马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2003.
- [3] 颜荣贵. 地基开采沉陷及其地表建筑[M]. 北京:冶金工业出版社,1995.
- [4] 朱建军,贺跃光,曾卓乔. 变形监测的理论与方法[M]. 长沙:中南大学出版社,2003.
- [5] Wolfram S. Mathematica 全书[M]. 赫孝良,周义仓,译. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [6] 交通部重庆交通科学研究所. JTJ042—94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [7] 姬永红. 隧道施工引起横向地层沉降的随机预测[J]. 岩土工程技术. 2004,18(1):316-319.

(收稿日期 2010-07-19)

(上接第 142 页)

并选取适合的逼近信号和细节信号对小波系数进行重构,即实现了对分解后的小波系数采取强制去噪,能达到很好的去噪效果,从而得到更接近真实值的数据,能更好地反映沉降动态变化规律。去噪后的数据规律性更加明显,因而使用去噪后的数据建模对后期的变形预报分析是更精确的。

参考文献

- [1] Pinsky M A. Introduction to Fourier Analysis and Wavelet[M]. Brooks:Wadsworth Group,2002.
- [2] Debnath L. Wavelet Transforms and Their Application[M]. Boston: Birkhauser,2002.

- [3] 张国华,张文娟,薛鹏翔. 小波分析与应用基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.
- [4] 程正兴. 小波分析与应用实例[M]. 西安:西安交通大学出版社,2006.
- [5] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 陈基明. 小波分析基础[M]. 上海:上海大学出版社,2002.
- [7] 唐桂文,江恒彪,左建章. 基于小波去噪理论的监测数据处理方法[J]. 测绘科学,2009,34(1):117-118.
- [8] 焦明连,蒋廷臣. 基于小波分析的灰色预测模型在大坝安全监测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(2):115-117.
- [9] 闫振,陆阳,余建华,等. 小波分析在边坡深部水平位移监测数据降噪中的应用[J]. 中南公路工程,2007,32(2):41-45.

(收稿日期 2010-07-16)