

倾斜地表下隧道开挖引起的三维地表沉降计算^①

张永利¹, 黄 为¹, 张艳君²

1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 国网南昌供电公司, 南昌 330000

摘要: 为研究倾斜地表下隧道开挖引起的地表沉降计算方法, 考虑倾斜地表对隧道埋深的影响, 建立了倾斜地表下隧道开挖模型和三维情况下单元体开挖计算模型. 采用随机介质理论, 推导出三维倾斜地表下隧道开挖引起的地表沉降计算公式, 并结合工程实例选取监测数据和计算数据对比验证, 证明了计算方法的准确性. 最后针对地表倾斜角度进行对比分析, 表明地表斜面倾角越大, 地表不均匀沉降越明显. 该倾斜地表沉降计算方法对隧道开挖地表沉降预测有一定的工程价值和指导意义.

关 键 词: 三维沉降, 倾斜地表, 隧道, 随机介质理论

中图分类号: U459.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)08-0147-07

随着我国能源消耗日益增长, 自然资源丰富区域地下大范围被采空. 同时, 地铁和高速公路的快速发展, 导致大量隧道开挖, 地下工程开挖时会导致地面发生不均匀沉降, 尤其是对于斜坡地面, 严重的不均匀沉降会影响原有基础设施和建筑物的使用性和安全性. 针对隧道施工和地面沉降计算, 国内外很多研究学者对此做出了大量研究, 例如, Sagaseta^[1]提出了地层损失概念, 通过镜像源汇法简化了半空间隧道开挖的弹性解, 得到了弹性假设条件下的位移及应力解答. 同时, Loganathan 和 Poulos 等^[2-3]在他的研究基础上, 修正了计算方法得到垂直位移准确的计算公式. Verruijt 等^[4]人提出了复变函数法, 建立了弹性模型, 推导出了圆形隧道发生均匀收缩时半无限空间内围岩解析解并进行了数值分析. 晏莉^[5]等通过应力函数法对双孔平行有压隧道围岩位移进行了讨论. 张彬等^[6-8]运用有限元方法, 考虑流固耦合效应模拟了地铁隧道施工地表竖向位移等值线, 并在流固耦合作用下研究了不同地下水位高度的隧道施工对地表沉降的影响. 但是这些计算方法比较复杂, 并且在计算过程中需要提供大量的岩土参数, 导致地表沉降的计算难度大大提升.

针对岩土体参数复杂和获取难度大的特点, Litwiniszyn^[9]针对采煤岩层和地表移动规律问题提出了随机介质理论, 大大简化了计算过程, 为地表沉降研究做出了重大的贡献. 该理论经过我国刘宝琛等^[10-15]研究和推广之后在岩土工程界得到了广泛应用. 例如, 刘宝琛等运用随机介质理论深度研究了煤矿开挖等情况下引起的地表下沉问题, 杨小礼等^[16-17]人研究了单孔隧道和双孔隧道开挖引起的地表竖向沉降和水平位移, 并且分析了不同隧道深度和角度对沉降的影响. 邹金峰等^[18]针对桩基作用下的三维地表预测进行了相关的研究. 但是在已有的关于随机介质理论研究中大多数是针对平面内水平地表沉降计算, 针对三维倾斜地表研究却并不多见. 本文基于随机介质理论, 建立了倾斜地表下三维地表沉降计算模型, 并且得出了沉降解析解.

① 收稿日期: 2018-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574138).

作者简介: 张永利(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事煤矿灾害力学、两相流理论及应用等方面的研究.

1 计算原理与模型

1.1 计算模型

在均质的、各向同性的和不可压缩的土体中,开挖一个直径不变的隧道,隧道开挖时可及时采取支护措施阻止隧道坍塌,但是隧道在支护后仍会沿半径方向发生收缩,引起地表沉降.基于上述分析,本文建立了倾斜地表情况下三维隧道开挖模型和地表沉降计算模型,以竖直向下为 z 轴正方向,隧道开挖方向为 y 轴正方向, x 轴垂直 y 和 z 轴,如图 1 所示.

1.2 计算原理

根据随机介质理论基本原理可知,隧道开挖过程可分解为无数个微小单元体开挖,地表位移可假定等于无数个微小单元体开挖形成的地表沉降的线性叠加.本文计算时引入单元体开挖时地表沉降计算方法,单独计算地表每一点位移,计算过程中采用双坐标系,即为全球坐标系(x, y, z)和当地坐标系(ξ, ζ, η),坐标系以竖直向下为 z 轴(η 轴)正方向,如图 2 所示.隧道开挖时土体的下沉量用函数 $W(z, x, y)^{[17]}$ 满足:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W(z, x, y)}{\partial z} = & B_{11}(z, x, y) \frac{\partial^2 W(z, x, y)}{\partial x^2} + B_{12}(z, x, y) \frac{\partial^2 W(z, x, y)}{\partial x \partial y} + \\ & B_{22}(z, x, y) \frac{\partial^2 W(z, x, y)}{\partial y^2} + A_1(z, x, y) \frac{\partial W(z, x, y)}{\partial x} + \\ & A_2(z, x, y) \frac{\partial W(z, x, y)}{\partial y} + N(z, x, y) W(z, x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $B_{11}, B_{12}, B_{22}, A_1, A_2, N$ 是取决于介质结构特性的参数.

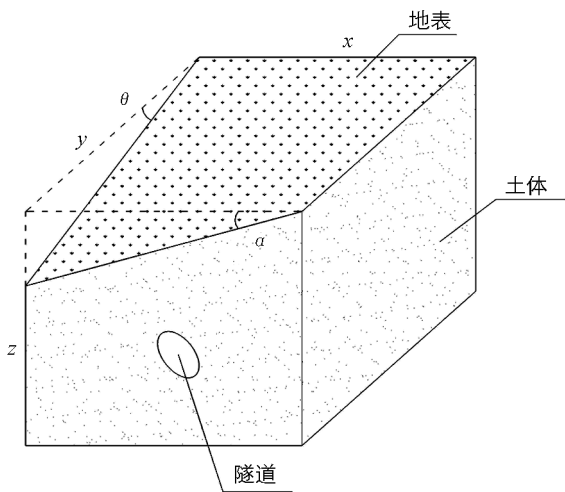


图 1 倾斜地表下单孔隧道开挖模型

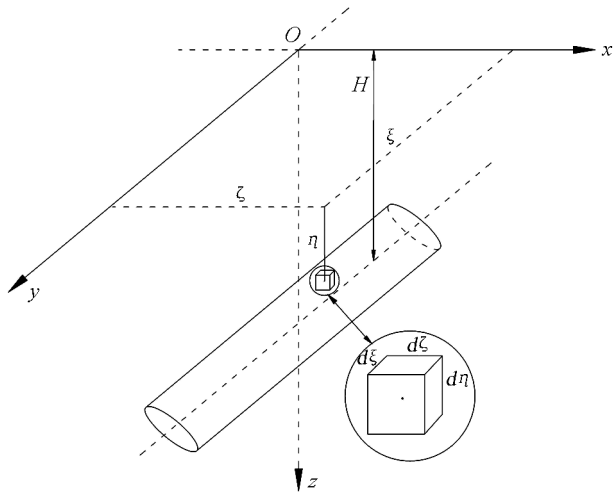


图 2 单元体开挖的地表沉降计算模型

结合单元体开挖边界条件,根据刘宝琛和邹金峰等人的研究,单元体单位引起的地表沉降表达式为

$$W_e(x, y, z) = \frac{1}{r^2(z)} \exp \left[\frac{-\pi(x^2 + y^2)}{r^2(z)} \right] \quad (2)$$

式中: $r(z)$ 为地表下沉主要影响半径.

线性叠加每个单元体开挖在地表同一点引起的沉降,即可计算出隧道开挖引起倾斜地表任一点的沉降.

$$W(x, y, z) = \sum W_e(x, y, z) \quad (3)$$

2 三维倾斜地表沉降计算

将倾斜地表沿 x 方向和 y 方向分解,沿 x 方向倾斜角度为 α ,沿 y 方向倾斜角度为 θ ,对于一般情况,隧

道可以近似看成很长的柱形体, 它的开挖横截面不沿长度变化. 由于隧道开挖是平面问题, 因此在每个平面开挖时, 位移分量不沿 y 方向变化, 而只是 x 和 z 的函数. 倾斜地面下, 单孔隧道开挖引起的三维地表沉降计算可分解为无数个单个平面开挖引起的沉降计算. 开挖隧道半径为 R , 平均收敛为 ΔR , 过开挖横截面中心点取竖直向下为 z 轴建立直角坐标系, 地表倾角为 α , H_0 为横截面圆心到 x 轴的距离, 取开挖单元 $dx dz$, η 和 ξ 分别为开挖单元体至地表和 z 轴的距离, 则由该单元开挖引起的位移由以上分析可计算, 计算简图如图 3 所示.

横截面中坐标为 (x, z) 的点在 $dx dz$ 单元体开挖的情况下, 地表沉降为

$$dW_p(x, y) = \frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(\eta)} X^2\right] d\xi d\eta \quad (4)$$

根据刘宝琛等人的研究(1993), 影响半径 $r(\eta)$ 可用土体主要影响角 β 和内摩擦角 φ 表示为

$$r(\eta) = \frac{\eta}{\tan\beta} \quad (5)$$

土体主要影响角用内摩擦角表示:

$$\tan\beta = \frac{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - 0.5\varphi)}{2.5} \quad (6)$$

隧道开挖后及时支护, 隧道收缩引起的地表沉降, 根据随机介质理论原理及其假定, 隧道开挖引起的地表沉降量应为初始开挖断面 Ω 与收缩后断面 Λ 引起的地表沉降之差, 隧道初始开挖断面 Ω 半径为 R , 隧道收缩后断面 Λ 半径为 $R - \Delta R$.

则横截面中横坐标为 x 的任意一点距地表高度为

$$H_1 = H_0 + X \tan\alpha \quad (7)$$

对式(4)进行积分, 横截面中地表任一点二维平面下隧道开挖引起的地表沉降可表示为

$$W(x, z) = \int_{H_1-R}^{H_1+R} \int_{-\sqrt{R^2-(H_1-\eta)^2}}^{\sqrt{R^2-(H_1-\eta)^2}} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (X - \xi)^2\right] d\xi d\eta - \int_{H_1-(R-\Delta R)}^{H_1+(R-\Delta R)} \int_{-\sqrt{(R-\Delta R)^2-(H_1-\eta)^2}}^{\sqrt{(R-\Delta R)^2-(H_1-\eta)^2}} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (X - \xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (8)$$

对于倾斜地表, 在 y 方向也存在一定倾角, 即三维空间中开挖单元据地表距离随 y 轴变化, 倾斜角度为 θ , 如图 4 所示. 则地表坐标为 (x, y, z) 点距隧道中心轴线高度:

$$H_2 = H_0 + x \tan\alpha + y \tan\theta \quad (9)$$

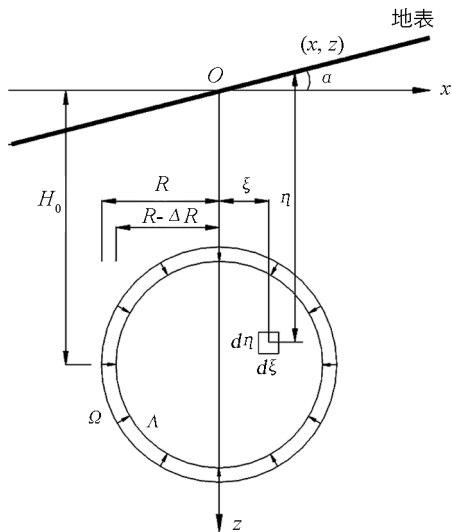


图 3 地表沉降平面计算简图

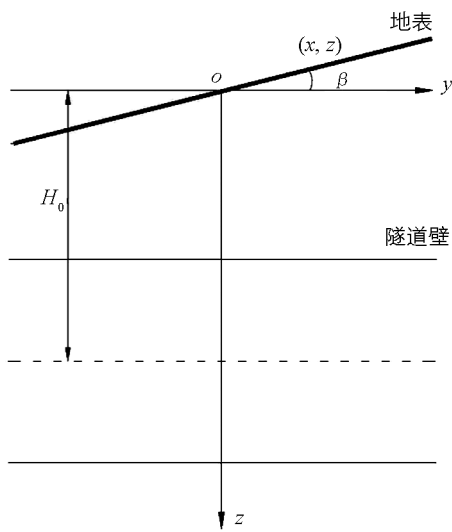


图 4 倾斜地表下沿隧道开挖方向计算简图

倾斜地表下隧道开挖后, 圆形隧道半径 R 均匀径向收缩后为 $R - \Delta R$, 地表上任意一点 (x, y, z) 沉降为

$$W(x, y, z) = \int_{H_2-R}^{H_2+R} \int_{-\sqrt{R^2-(H_2-\eta)^2}}^{\sqrt{R^2-(H_2-\eta)^2}} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right] d\xi d\eta - \int_{H_2-(R-\Delta R)}^{H_2+(R-\Delta R)} \int_{-\sqrt{(R-\Delta R)^2-(H_2-\eta)^2}}^{\sqrt{(R-\Delta R)^2-(H_2-\eta)^2}} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right] d\xi d\eta \quad (10)$$

长沙地铁一号线下穿京广铁路及其周边边坡, 开挖隧道上方土体以填土和粉质黏土为主. 盾构开挖隧道直径为 6 m, 边坡距隧道顶端最近和最远距离分别为 15.3 m 和 24.8 m, 垂直隧道开挖方向地表倾角 $\alpha = 4.8^\circ$. 根据监测资料, 开挖断面收缩稳定后, 计算范围内隧道平均径向收敛量为 12.2 cm. 由现场实验测试结果可知, 隧道上方土体内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$. 沿隧道盾构方向, 开挖隧道与边坡断面如图 5.

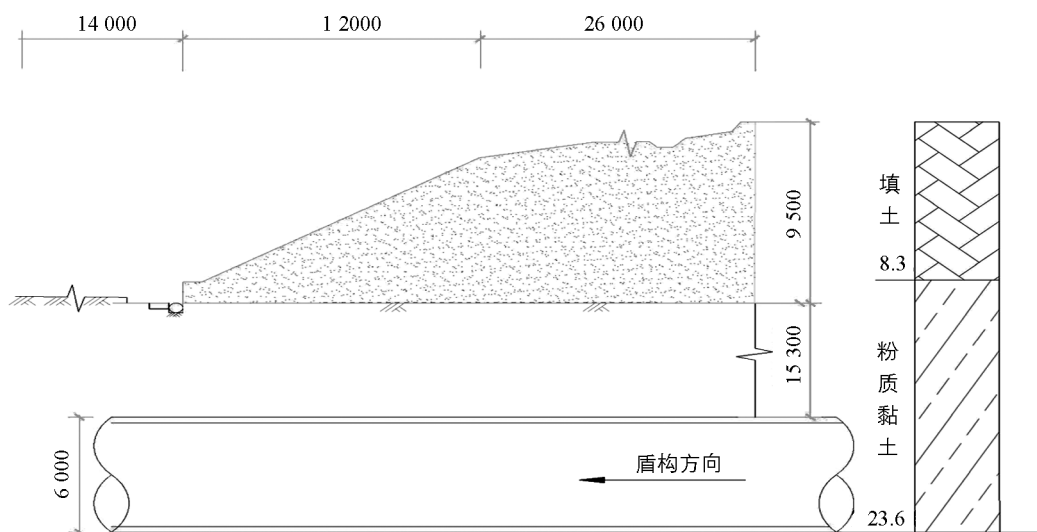


图 5 长沙地铁一号线隧道剖面图

取倾斜地表投影水平面为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的范围进行计算, 计算范围内最高点坐标为 $(30, 30, z)$, 到隧道中心线垂直距离为 24.8 m, 为方便计算, 将斜坡视为均匀倾斜, 沿隧道开挖方向斜坡倾角为

$$\tan\theta = \frac{9\,500}{60\,000} = 0.158$$

则,

$$H_0 = 24.8 - 30 \tan\theta = 20.05 \text{ m}$$

使用 MATLAB 编程计算得到斜面沉降值如图 6 所示. 从地铁一号线开挖阶段实时监测日报中筛选地表沉降稳定后的监测数据, 随机选取其中 6 个观测点与理论计算结果进行对比验证.

根据工程测量报告中随机选取的 6 个观测点的稳定沉降数据和相对对应点使用本文计算方法得出的数据对比和误差分析可以得出, 理论计算结果和沉降测量值基本接近, 只有第 2 和第 5 个点误差偏大, 大于 10%. 根据文献[20]的研究和计算模型分析, 造成该误差原因可能有 4 点: ① 监测点位置的岩土体进行了加固, 导致监测点实际沉降偏小, ② 附近存在桩基阻止了地表沉降, ③ 计算模型相对实际情况进行了简化, 计算高度与实际高度存在一定误差, ④ 由于客观因素导致监测数据存在一定的误差. 综上所述, 6 组倾

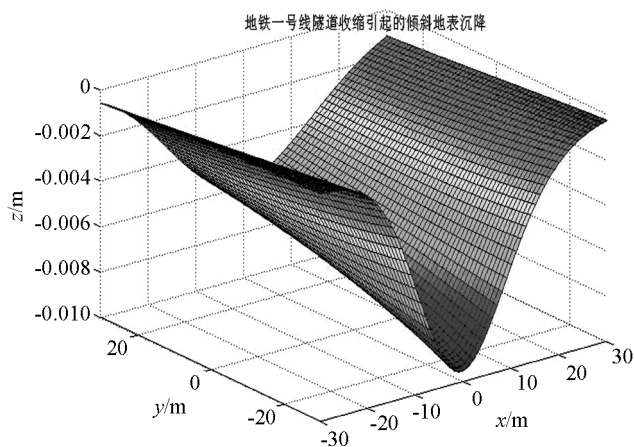


图 6 长沙地铁一号线隧道收缩引起地表三维沉降图

斜地表实测值和理论值吻合度较高, 平均误差仅为 5.92%.

表 1 地表沉降实测值和计算值对比

坐标/m	沉降计算值/mm	监测值/mm	误差/%
(-25, -28)	-0.2	-0.2	0
(-15, -5)	-3.27	-3.7	11.6
(0, 0)	-7.29	-7.0	4.1
(0, 8)	-6.86	-6.7	2.4
(15, 16)	-3.67	-3.3	11.2
(22, 25)	-2.26	-2.4	6.2

3 算例与参数分析

大多数学者对于地表沉降相关研究均基于水平地表, 然而地表倾斜对于地表产生不均匀沉降的影响也不可忽略, 尤其是对于地铁隧道等埋深较浅的隧道, 为研究地表倾斜度对地表不均匀沉降的影响, 取文献[18]中工程实例参数进行分析, 其中: 隧道半径 $R=3\text{ m}$, 径向收敛量 $\Delta R=0.031\text{ m}$, $H_0=40\text{ m}$, $\varphi=25^\circ$. 计算范围取倾斜地表投影水平面为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$, 分别计算倾斜角 $\alpha=10^\circ$, $\theta=10^\circ$; $\alpha=10^\circ$, $\theta=30^\circ$; $\alpha=30^\circ$, $\theta=30^\circ$ 三种情况下的地表沉降, 如图 7—图 9 所示, 并选取 $y=-20\text{ m}$ 处的沉降进行对比.

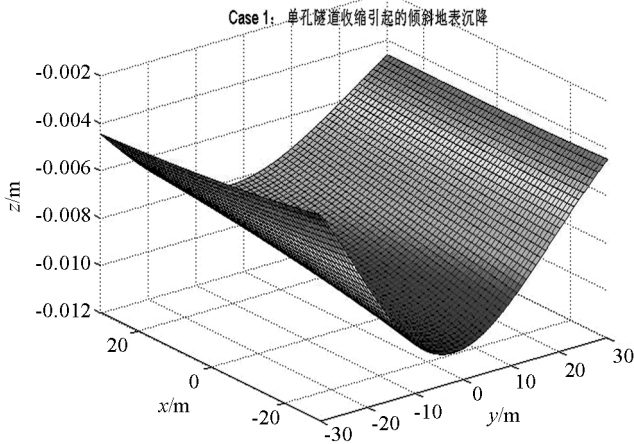


图 7 $\alpha=10^\circ$ 和 $\theta=10^\circ$ 时地表三维沉降

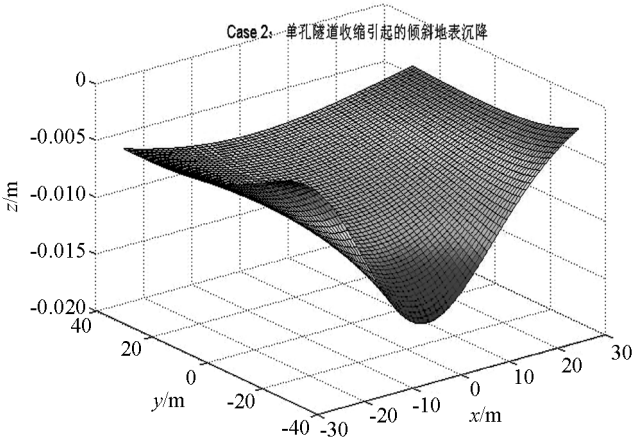


图 8 $\alpha=10^\circ$ 和 $\theta=30^\circ$ 地表三维沉降图

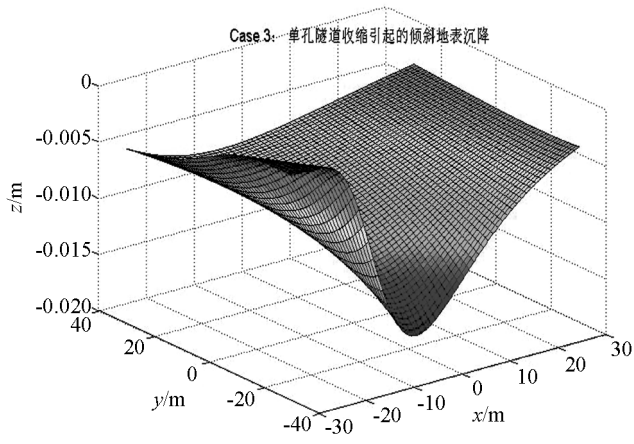


图 9 $\alpha=30^\circ$ 和 $\theta=30^\circ$ 时地表三维沉降

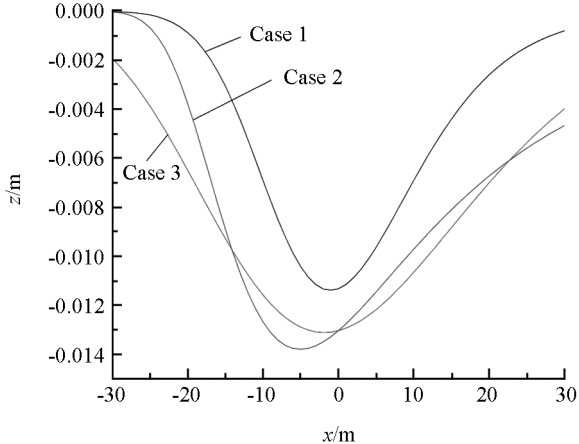


图 10 三种情况沉降对比图

从图 7—图 9 中可以明显地看出,隧道中心线处对应的地表沉降量较大,距离开挖隧道越远,地表沉降量越小.图 7 与图 8,图 8 与图 9 分别对比可知,地表倾角越大,地表不均匀沉降越明显.

Case1 和 Case2 中沿 x 轴方向倾角相同,沿 y 方向倾角不相同,在 $y=20\text{ m}$ 处,坐标相同的计算点 Case 2 中距隧道的距离比 Case 1 小,图 10 可以看出 Case 2 中沉降大于 Case 1 中的沉降,表明随着地表距开挖单元越近,沉降越大,即地表沉降随着隧道埋深减小而增大. Case1 和 Case3 中沿 x 轴方向倾角等于沿 y 方向倾角相同,而 Case2 不同,图 8 中沉降数据表明,相同倾角的情况下,沉降最大点与 $x=0\text{ m}$ 处更接近.

4 小 结

本文针对大多数隧道开挖工程处于倾斜地表下的情况,建立了倾斜地表下隧道开挖模型.基于随机介质理论原理中隧道开挖过程可分解为无数个微小单元体开挖的特性,建立单元体开挖计算模型,将隧道开挖位移求解简化为平面问题,基于随机介质理论推导了三维倾斜地表沉降计算方法,并结合长沙地铁一号线工程实例验证了计算方法的可靠性,根据选取的 6 个监测点对比得到综合误差为 5.92%,并且从岩土体加固、基础建筑设施、模型简化和观测误差 4 个方面对比分析了可能产生误差的原因.最后对地表倾斜度进行参数分析,结论表明地表斜面倾角越大,地表不均匀沉降越明显,开挖隧道越深,地表沉降越小.

参考文献:

- [1] SAGASETA C. Analysis of Undrained Soil Deformation Due to Ground Loss [J]. *Géotechnique*, 1988, 38(4): 647—649.
- [2] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(9): 846—856.
- [3] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface Settlements Due to Deformation of a Tunnel in an Elastic Half Plane [J]. *Geotechnique*, 1996(46): 753—756.
- [4] VERRUIJT A. A Complex Variable Solution for a Deforming Circular Tunnel in an Elastic Half-Plane [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, 21(2): 77—89.
- [5] 晏 莉,阳军生,刘宝琛.浅埋双孔平行隧道开挖围岩应力和位移分析 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(3): 413—419.
- [6] 张 彬,廖连烨,朱凤薇.地铁施工考虑流固耦合效应对地表沉降影响 [J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(1): 52—56.
- [7] 白光宇,张德强,张进德,等.山区开采沉陷地表移动变形规律 [J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(7): 684—688.
- [8] 邱明明,杨果林,魏赛赛,等.大跨度公路隧道施工力学响应数值试验研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(12): 170—178.
- [9] LITWINISZYN J. The Theories and Model Research of Movements of Ground Masses [C]// *Proceedings of the European Congress on Ground Movement*. University of Leeds, 1957: 202—209.
- [10] BAOCHEN L, DEZHANG L. The Application of Stochastic Medium Theory to the Problem of Surface Movements Due to Open Pit Mining [J]. *Chapter*, 1982, 16: 407—416.
- [11] BAOCHEN L. Stochastic Medium Theory and Its Application in the Settlement Problems [J]. *Comprehensive Rock Engineering*, 1993, 4: 780—816.
- [12] YANG J S, LIU B C, WANG M C. Modeling of Tunneling-Induced Ground Surface Movements Using Stochastic Medium Theory [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, 19(2): 113—123.
- [13] 黎新亮.浅埋暗挖隧道地层变位随机介质理论分析及控制技术研究 [D]. 北京:北京交通大学,2008.

- [14] 施成华, 彭立敏. 随机介质理论在盾构法隧道纵向地表沉降预测中的应用 [J]. 岩土力学, 2004(2): 320—323.
- [15] MENG F, ZHANG J S, LIU H Y. Analysis of Ground Movement in Pile Driving Based on Stochastic Medium Theory [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 438: 1404—1408.
- [16] YANG X L, WANG J M. Ground Movement Prediction for Tunnels Using Simplified Procedure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(3): 462—471.
- [17] 程 波. 抛填深埋暗挖地铁隧道施工技术研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2017, 31(9): 84—89.
- [18] ZOU J F, ZHANG Y J, DAN H C. Three-Dimensional Ground Settlement Induced by Metro Tunnel Excavation Considering the Influence of Group Piles [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 1—13.

Calculation of Three-Dimensional Surface Settlement Caused by Tunnel Excavation Under Sloping Ground

ZHANG Yong-li¹, HUANG Wei¹, ZHANG Yan-jun²

1. Liaoning Technical University, Fuxing Liaoning 123000, China;

2. STATE GRID Nanchang Power Supply Company, Nanchang 330000, China

Abstract: In order to develop a good calculation method of ground settlement induced by tunnel excavation under inclined surface, considering the influence of inclined surface on the depth of the tunnel, a tunnel excavation model under inclined ground and a three-dimensional excavation model for unit excavation are established. Formulas for calculating the surface subsidence caused by the excavation of a three-dimensional tunnel under an inclined surface are derived, using the theory of stochastic medium. The accuracy of the calculation method is proved by the comparison and verification of the monitoring data and the calculation result. In the end, a comparative analysis is made of the surface inclination angles, the result of which shows that the greater the inclination angle of the surface, the more obvious the uneven settlement of the surface.

Key words: three-dimensional settlement; sloping surface; tunnel; stochastic medium theory

责任编辑 汤振金