

交叉隧道盾构施工引起既有隧道沉降的 随机介质模型^{*}

房明¹, 周翠英², 张毅³

- (1. 广东财经大学公共管理学院, 广东 广州 510320;
2. 中山大学工学院//岩土工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275;
3. 广东省建筑设计研究院勘测设计研究所, 广东 广州 510010)

摘 要: 交叉隧道开挖施工引起地层的位移会对埋置其中的既有隧道产生影响, 甚至造成灾害。为此, 提出了交叉隧道盾构施工引起既有隧道沉降计算的随机介质理论方法, 分析了交叉隧道工程应用随机介质理论的原理及基本方程, 从而建立了新建隧道盾构施工引起既有隧道沉降的随机介质模型, 并探讨了计算参数的选取方法。工程实例分析表明: 随机介质理论适用于计算交叉隧道盾构施工引起的既有隧道沉降变形, 从而对交叉隧道安全施工具有一定的指导意义。

关键词: 交叉隧道; 盾构施工; 穿越; 随机介质模型; 沉降

中图分类号: TD853.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)01-0080-05

Stochastic medium model of existing tunnel settlement caused by shield construction in crossing tunnels

FANG Ming¹, ZHOU Cuiying², ZHANG Yi³

- (1. School of Public Administration, Guangdong University of Finance & Economics,
Guangzhou 510320, China;
2. School of Engineering//Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Institute of Survey Design, Architectural Design and Research Institute of
Guangdong Province, Guangzhou 510010, China)

Abstract: The strata settlement caused by shield construction in crossing tunnels has influence on the deformation or even damage of the existing tunnel. Therefore, the stochastic medium theory is presented to calculate the existing tunnel settlement caused by shield construction in crossing tunnels, and to analyze the principles. The fundamental equations of the stochastic medium theory is applied to the crossing tunnels engineering. The stochastic medium model of the settlement of the existing tunnel resulting from shield construction in crossing tunnels is established, and the choice of parameters for calculating was discussed. The analysis for engineering example showed that it is very effective to calculate the settlement of existing tunnel caused by the shield construction in the crossing tunnels with the stochastic medium theory. The research has certain guiding significance to the shield safety construction in crossing tunnels.

Key words: crossing tunnels; shield construction; passing through; stochastic medium model; settlement

* 收稿日期: 2015-03-18

基金项目: 广州市科技计划资助项目(20150427100454406); 广东财经大学校级课题资助项目(14ZXRW56001)

作者简介: 房明(1981年生), 女; 研究方向: 岩土工程与地下工程开挖安全预警; E-mail: 466759222@qq.com

随着城市轨道交通的发展, 地铁隧道之间的交叉穿越现象越来越多。在穿越工程中, 新建隧道盾构施工引起地层的位移会对既有隧道等各类结构产生影响, 甚至造成灾害。交叉隧道盾构施工对既有隧道的扰动影响主要以隧道的竖向沉降为主^[1], 因此, 准确预计交叉隧道盾构施工引起的既有隧道沉降对保证安全穿越和既有隧道正常使用具有十分重要的意义。

目前预测隧道变形的的方法较多, 常用的有模型试验法、弹性地基梁法及三维有限元法等。由于交叉隧道盾构施工是盾构-土体-既有隧道三者相互作用问题, 既有隧道沉降变形的影响因素错综复杂, 通过模型试验不能合理解释其机制; 采用力学方法的研究结果和现场测试结果常存在较大差异; 应用最多的三维有限元法^[2-9]计算得到的既有隧道沉降并不是一个完全定量的解答。J. Litwiniszyn 将随机介质理论引入地表变形计算, 并经刘宝琛等学者完善^[10-14], 该理论是一种准确预计地下开挖引起的地层移动的有效方法。并且随机介质理论计算模型的基本参数为综合参数, 具有鲁棒性, 代表了实际工程的综合效应, 弥补了现有计算方法的不足; 加之该方法相对于三维有限元等方法具有更高的计算效率, 这些优点使其成为预测地层移动的实用方法。由于隧道衬砌常被设计成半柔性的地下结构, 地层变位的同时必定引起埋置其中的隧道与之一同变位, 两者相互影响、密不可分; 同时大量监测数据和研究表明^[1, 3-6], 交叉隧道盾构施工引起的既有隧道沉降与地层沉降分布形式具有一致的统计规律, 均符合正态分布。从而可知交叉隧道盾构施工引起的既有隧道沉降和地层沉降具有相似的特征。鉴于以上原因, 本文提出了交叉隧道盾构施工引起既有隧道沉降计算的随机介质理论方法, 建立了交叉隧道盾构施工引起既有隧道沉降的计算模型, 并探讨了计算参数的选取方法。最后, 用工程实例验证了该方法的可靠性。

1 随机介质理论简介

随机介质理论在 5 个公理的基础上, 推导出岩土体在开挖影响下移动规律的基本方程, 即二阶抛物线型偏微分方程。该方程在形式上与随机过程的方程相同, 由此定义为: 介质的移动方程可以用随机过程来描述的介质都可以认为是随机介质。

单元开挖引起地表面发生下沉等变形, 在地面和岩土体内部形成所谓单元下沉盆地, 文献 [10] 中推导了开挖作用下单元盆地 (见图 1) 的表达

式:

$$W_e(x, z) = \frac{1}{R} \cdot \exp\left(-\frac{\pi x^2}{R^2}\right) dx dz \quad (1)$$

式 (1) 中, R 为地表面主要影响范围, 可以表示为:

$$R = h / \tan \beta \quad (2)$$

其中, h 为开挖深度。

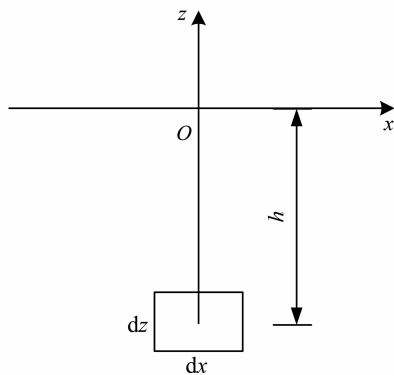


图 1 单元开挖示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elemental excavation

2 交叉隧道盾构施工引起既有隧道沉降计算的随机介质模型

2.1 随机介质模型的建立

交叉隧道盾构施工破坏了岩土应力平衡状态, 引起周围岩土体位移, 从而导致埋置其中的既有隧道产生沉降变形甚至损害。设在岩土体内有一单元开挖 $dx_0 dz_0$, 如图 2 所示, 既有隧道埋深为 z , 假设开挖单元完全塌落, 由式 (1) 开挖微元 $dx_0 dz_0$, 引起的上部既有隧道坐标点 (x, z) 的沉降公式为

$$W_e(x, z) = \frac{1}{r_{(z_0-z)}} \exp\left(-\frac{\pi x^2}{r_{(z_0-z)}^2}\right) dx_0 dz_0 \quad (3)$$

式中 $r_{(z_0-z)}$ 为单元开挖在既有隧道埋深 z 处的主要影响半径:

$$r_{(z_0-z)} = \frac{z_0 - z}{\tan \alpha} \quad (4)$$

α 定义为存在既有隧道的上部岩土体的主要影响角, 其值取决于开挖所处的地层条件, 是一个综合参数, 可根据隧道量测资料通过反分析方法计算得到。

采用盾构法施工的新建隧道, 施工断面为圆形。如图 3 所示, 盾构隧道中心距地表深度为 H , 开挖初始半径为 R , 假定断面半径均匀收缩了 ΔR 。则开挖平面区域 A_0 变形后成为 A_1 , 如图 3 所示, 既有隧道沉降值应等于开挖区域 A_0 引起的沉降与

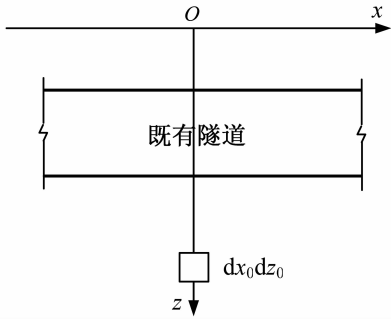


图 2 交叉隧道中单元开挖示意图

Fig. 2 Elemental excavation in the crossing tunnels

开挖区域 A_1 引起的沉降之差, 由式 (3) 可得既有隧道坐标点 (x, z) 的沉降为

$$W(x, z) = W_{A_0}(x, z) - W_{A_1}(x, z) = \iint_{A_0-A_1} \frac{\tan \alpha}{z_0 - z} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \alpha}{(z_0 - z)^2}(x - x_0)^2\right] dx_0 dz_0 \quad (5)$$

令

$$w(x, z, x_0, z_0) = \frac{\tan \alpha}{z_0 - z} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \alpha}{(z_0 - z)^2}(x - x_0)^2\right] \quad (6)$$

则式 (5) 简记为

$$W(x, z) = \iint_{A_0-A_1} w(x, z, x_0, z_0) dx_0 dz_0 = \int_a^b \int_c^d w(x, z, x_0, z_0) dx_0 dz_0 - \int_e^f \int_g^h w(x, z, x_0, z_0) dx_0 dz_0 \quad (7)$$

其中,

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

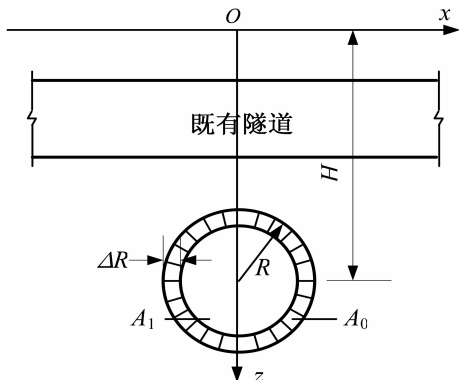


图 3 盾构隧道下穿施工示意图

Fig. 3 Shield construction in the crossing tunnels

地铁区间隧道常平行修建两条相距较近的隧道, 其相互影响往往不可忽略。对于既有隧道的最终沉降, 可利用线性叠加原理计算。双孔平行隧道盾构下穿施工, 如图 4 所示, 新建隧道中心距地表为 H , 其开挖初始半径均为 R , 两隧道中心距为 L , 设两新建隧道 I、II 的半径收敛值均为 ΔR , 由式 (7) 得新建隧道 I 盾构下穿施工引起的既有隧道坐标点 (x, z) 的沉降为

$$W_I(x, z) = \int_{a_1}^{b_1} \int_{c_1}^{d_1} \frac{\tan \alpha}{z_0 - z} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \alpha}{(z_0 - z)^2}\left(x + \frac{L}{2} - x_0\right)^2\right] dx_0 dz_0 - \int_{e_1}^{f_1} \int_{g_1}^{h_1} \frac{\tan \alpha}{z - z_0} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \alpha}{(z - z_0)^2}\left(x + \frac{L}{2} - x_0\right)^2\right] dx_0 dz_0 \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} a_1 &= H - R; \\ b_1 &= H + R; \quad c_1 = -\sqrt{R^2 - (H - z)^2} - \frac{L}{2}; \\ d_1 &= \sqrt{R^2 - (H - z)^2} - \frac{L}{2}; \\ e_1 &= H - (R - \Delta R); \quad f_1 = H + (R - \Delta R); \\ g_1 &= -\sqrt{(R - \Delta R)^2 - (H - z)^2} - \frac{L}{2}; \\ h_1 &= \sqrt{(R - \Delta R)^2 - (H - z)^2} - \frac{L}{2}. \end{aligned}$$

同理, 新建隧道 II 盾构下穿施工引起的既有隧道坐标点 (x, z) 的沉降为

$$W_{II}(x, z) = \int_{a_2}^{b_2} \int_{c_2}^{d_2} \frac{\tan \alpha}{z_0 - z} \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \alpha}{(z_0 - z)^2}\left(x - \frac{L}{2} - x_0\right)^2\right] dx_0 dz_0 - \int_{e_2}^{f_2} \int_{g_2}^{h_2} \frac{\tan \alpha}{z - z_0} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \alpha}{(z - z_0)^2}\left(x - \frac{L}{2} - x_0\right)^2\right] dx_0 dz_0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_2 &= H - R; \quad b_2 = H + R; \\ c_2 &= -\sqrt{R^2 - (H - z)^2} + \frac{L}{2}; \\ d_2 &= \sqrt{R^2 - (H - z)^2} + \frac{L}{2}; \\ e_2 &= H - (R - \Delta R); \\ f_2 &= H + (R - \Delta R); \\ g_2 &= -\sqrt{(R - \Delta R)^2 - (H - z)^2} + \frac{L}{2}; \\ h_2 &= \sqrt{(R - \Delta R)^2 - (H - z)^2} + \frac{L}{2}. \end{aligned}$$

根据叠加原理, 双孔隧道盾构下穿施工引起的

S 既有隧道沉降 $W(x, z)$ 为

$$W(x, z) = W_I(x, z) + W_{II}(x, z) \tag{10}$$

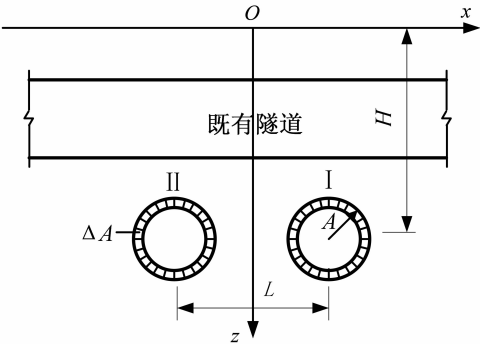


图 4 双孔平行隧道盾构下穿施工示意图
Fig. 4 Undercrossing construction of parallel shield tunnels

以上计算模型需要输入的参数有新建隧道埋深 H 、两新建隧道中心距离 L 、开挖半径 R 、收敛半径 ΔR 和地层影响角的正切 $\tan \alpha$ 。根据既有隧道的具体位置输入 x 和 z 的坐标，即可求得既有隧道的沉降曲线。

2.2 基本计算参数的选取

对于一个具体的隧道来说，需要确定 2 个基本计算参数： $\tan \alpha$ 和 ΔR 。其中， $\tan \alpha$ 决定于开挖所处的地层条件，此处地层是指存在既有隧道的岩土体； ΔR 是隧道施工条件的综合反映。这两个参数均为综合参数。可以通过既有隧道监测资料进行反分析加以确定，从而代表了实际工程的综合效应。由于既有隧道沉降计算公式，是不可积的积分表达式，因而在优化算法中梯度计算较为复杂。本文反分析所求参数较少，只有 2 个，所以优化计算中采用 Powell 法^[15]。该算法是一种适应于复杂函数极小化的先进优化算法，其迭代过程是由初始点出发沿一系列共轭方向求目标函数的极小值，该方法对于目标函数复杂时尤为适用。

根据最优化算法和前面推导的既有隧道沉降计算公式，即可通过 MATLAB 语言编制相应的程序进行计算。

3 工程实例

本文以广州市珠江新城集运系统在天河南一路附近盾构正交下穿地铁一号线工程为例进行计算^[16]。交叉隧道相对位置及地质结构图，如图 5 所示。新建隧道埋深 $H = 20.84$ m，新、旧隧道间距为 2.275 m。新建隧道左、右线间隔 $L = 13.0$ m，采用盾构法施工，盾构外径为 $R = 6.28$ m，管片厚

度 0.3 m。两既有隧道相距 16.7 m，且为运行地铁隧道，截面形状为三心圆截面，衬砌由素混凝土组成。交叉段的主导地层为杂填土层、粉质粘土层、可塑性残积土层和硬塑性残积土层等，为保障安全，穿越之前对隧道间地层进行了注浆加固。

由工程概况及既有隧道沉降实测资料，应用 MATLAB 语言编程进行计算，对于既有隧道所在地层， $\tan \alpha = 0.125$ ， $\Delta R = 12.90$ mm。则既有隧道底部节点沉降计算结果，如图 6 所示，最大沉降实测值 9.80 mm，随机介质模型计算结果为 9.21 mm，相对误差率为 6.0%，可知随机介质模型计算结果与实测值吻合较好，表明本文所建立的数学模型是可靠的。

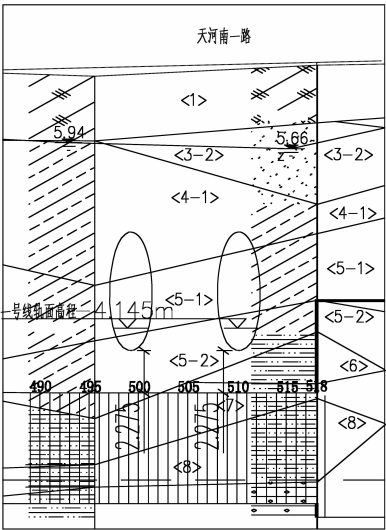


图 5 交叉隧道相对位置剖面
与地质结构图（修改自文献 [17]）
Fig. 5 Profile of relative position of undercrossing tunnels
and geological structure

<1> 人工填土层；<3-1> 粉细砂层；<3-2> 中粗砂层；<4-1> 粉质粘土层；<5-1> 可塑性残积土层；<5-2> 硬塑性残积土层

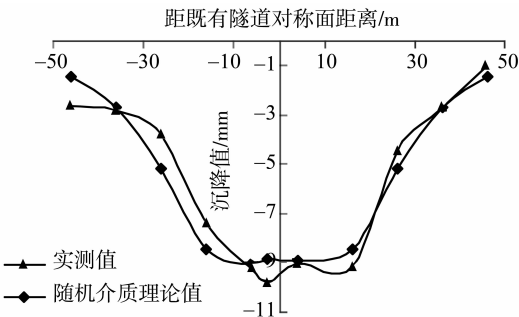


图 6 既有隧道沉降值
Fig. 6 Settlement of the existing tunnel

4 结 语

本文基于随机介质理论,建立了交叉隧道盾构施工引起的既有隧道沉降计算模型,并通过工程实例验证了本研究所提出方法的可靠性,从而对交叉隧道安全施工有一定的指导意义。

随机介质理论已成功应用于煤矿开采、隧道开挖、边坡开挖等工程引起的地层位移及变形预测问题,对于该理论在交叉隧道盾构施工引起的既有隧道沉降变形计算分析中的应用是一个有益的尝试,有待于结合更多的工程实际作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 方勇,何川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的影响分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 47-52.
- [2] 赵旭峰,王春苗,孙景林,等. 盾构近接隧道施工力学行为分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 409-414.
- [3] HAGE C F, SHAHROUR I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008(23): 210-214.
- [4] ZHENG Y C, QIU W G. 3-D FEM analysis of closely spaced vertical twin tunnel[C]// ITA2005WTC, Proceedings, Balkema Press, 2005.
- [5] SAITOH A, GOMI K, SHIRAISHI T. Influence forecast and field measurement of a tunnel excavation crossing right above existing tunnels[M]// SALAM A, ed. Tunneling and Ground Conditions, Balkema, Rotterdam, 1994: 83-90.
- [6] CHANG C T, SUN C W. Response of a Taipei Rapid Transit System TRTS tunnel to adjacent excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16: 151-158.
- [7] AMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, In relation to design and construction of parallel shield tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 289-304.
- [8] 房明,刘镇,周翠英,等. 交叉隧道盾构施工与邻近不同位置建筑物的相互影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(1): 64-69.
- [9] 刘镇,周翠英,黄子容,等. 高填土对隧道与道路复合结构稳定性的影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(6): 36-41.
- [10] 阳军生,刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动与变形[M]. 北京:中国铁道出版社, 2002.
- [11] 施成华,彭立敏,刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3310-3316.
- [12] 施成华. 城市隧道施工地层变形时空统一预测理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 5(27): 1082.
- [13] 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(25): 320-323.
- [14] 刘波,陶龙光,丁城刚,等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 3(35): 356-361.
- [15] 张光澄,王文娟,韩会磊,等. 非线性最优化计算方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
- [16] 房明,周翠英,刘镇. 交叉隧道盾构施工参数与交叉角度对既有隧道的沉降影响研究[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 133-138.
- [17] 广州市珠江新城核心区市政交通项目旅客自动输送系统土建 2 标项目部. 广州市珠江新城核心区市政交通项目旅客自动输送系统土建二标(JJJZ002): 市天区间盾构通过运营中地铁一号线施工方案[Z]. 广州:中铁隧道集团有限公司, 2007.