

DOI : 10.11779/CJGE2017S2019

考虑参数空间变异性的隧道下穿建筑物安全性评价

程红战^{1,2}, 陈 健^{1,2}, 胡之锋^{1,2}, 李建斌^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 考虑土性参数的空间变异性, 构建了基于随机场理论和数值分析手段的隧道下穿建筑物安全概率评价方法。将土体参数弹性模量视为随机场模型, 采用应力释放方法模拟隧道施工, 并基于地表建筑物为柔性简支梁的假设, 利用极限拉应变作为判定指标对建筑物安全进行概率性评价。结果表明, 所提出方法能够在考虑土性参数空间变异性的前提下有效地评价隧道下穿建筑物的安全性。土体弹性模量变异系数和自相关距离对隧道下穿建筑物安全性具有显著的影响; 弹性模量的变异程度越高造成建筑物内最大拉应变的概率分布越离散, 达到较高破坏等级的概率也越大。
关键词: 隧道; 随机场; 建筑物; 拉应变; 安全性

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0075-04

作者简介: 程红战(1990-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要从事随机场理论及其在盾构隧道变形方面的研究。

E-mail: cheng2217@126.com。

Evaluation of safety of buildings above tunnels accounting for spatial variability of soil properties

CHENG Hong-zhan^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, HU Zhi-feng^{1,2}, LI Jian-bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan 430071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Considering the spatial variability of soil properties, a probabilistic evaluation method is proposed for the safety of buildings above tunnels based on the random field theory and the numerical analysis method. The elasticity modulus of soils is considered as the random fields, and the stress release method is employed to simulate the tunnel excavation. Then based on the assumption that the surface buildings are treated as the flexible beam model, the safety of buildings can be probabilistically assessed through the method of limit tensile strain. It is shown that the proposed method can properly evaluate the safety of buildings in variable soils. In addition, there is a significant influence of coefficients of variation and auto-correlation length of elasticity modulus on the safety of buildings. The higher the variability of elasticity modulus, the more scattering the distribution of the maximum tensile strain in buildings, and the larger the probability of higher category of building damages.

Key words: tunnel; random field; building; tensile strain; safety

0 引 言

城市隧道施工不可避免地会对周边地层产生扰动并引发地表变形, 进而导致邻近建筑物产生不均匀沉降, 影响邻近建筑物的正常使用。目前关于隧道施工对地表上方建筑物变形影响规律的研究方法主要有理论分析法、数值模拟法和实测数据分析法等。无论是理论分析法还是数值模拟法基本将土体看作均质的材料, 各种物理力学参数的取值都是平均效应得到的, 并没有考虑土体参数的空间变异性特征。隧道施工引起的地层变形是造成建筑物发生位移的根本原因, 因此, 研究隧道施工引起的地层变形是分析建筑物变形规律的前提条件。针对这一问题, Mollon 等^[1]将土性参数视为随机变量研究了参数不确定性对地表变形规

律的影响。Miro 等^[2]分析了分别服从正态分布和对数正态分布的土性参数对地表变形的影响, 分析结果显示当变异系数较小时, 土性参数概率分布类型的影响并不明显。程勇刚等^[3]研究岩体弹性模量和侧压力系数的空间变异性对围岩变形的影响。Huber 等^[4]结合随机有限元的方法探索了土体的非均质性对隧道上方建筑物差异沉降的影响规律, 得出土体弹性模量的变异系数在其中起着非常重要的作用。为此, 本文结合随机场理论和数值分析的手段, 建立了考虑土性参数变异性的隧道下穿建筑物安全概率评价方法。考虑土

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划 (STS) (KFJ-EW-STS-122)

收稿日期: 2017-08-02

体弹性模量这一参数的空间变异性特征,首先探讨了该参数的变异系数和自相关距离对地表变形的影响规律,进而基于柔性简支梁模型的假设,采用极限拉应变作为控制指标对建筑物的安全进行概率性评价。

1 土体参数空间变异性的随机场模拟

岩土体的复杂形成过程,导致岩土体参数的空间变异性表现出局部随机性与整体结构性的双重特征。Vanmarcke 等^[5]引入随机场的理论,建立了描述土性参数空间变异性的随机场模型。模型中将空间任意点处的土性参数看作是于其位置的变量。假设该变量服从某项概率分布,同时引入自相关函数和自相关距离使得空间不同点之间满足一定的相关关系。在随机场建模方法中,协方差矩阵分解法^[6]具有简便、高效的特点,因此,本文选用该方法作为土体参数随机场模型的离散方法。

2 建筑物安全性评价方法

借鉴在英国 Jubilee 延长线施工中采用的建筑物的评价方法^[7]。该方法假设长度为 L 、高度为 H 的地表建筑物为柔性简支梁模型^[8],不计其重量,地表变形全部施加于建筑物上。受到隧道施工引起地表变形的影响,在建筑物内会产生弯曲拉应变 ε_{br} 和剪切拉应变 ε_{dr} ,拉应变较大建筑物内部开始出现裂隙,裂隙继续扩张进而导致建筑物发生破坏。

根据隧道上方建筑物与地表沉降曲线中反弯点的相对位置关系,可以将建筑物划分为中拱段(l_{h1} 和 l_{h2})和中垂段(l_s),如图 1 所示, i 表示沉降槽宽度系数。Mair 等^[9]提出将 1 mm 沉降量线作为地表沉降的影响边界,对于地表沉降量小于 1 mm 的区域可以不考虑地表变形对上方建筑物的影响。

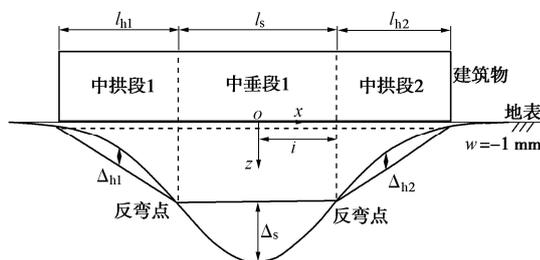


图 1 建筑物变形示意图

Fig. 1 Sketch of building deformation

Burland^[10]提出了由地表沉降引起的建筑物内弯曲拉应变 ε_b 和剪切拉应变 ε_d 计算方法:

$$\frac{\Delta}{l} = \left(\frac{l}{12t} + \frac{3I}{2tlH} \frac{E}{G} \right) \varepsilon_b \quad (1)$$

$$\frac{\Delta}{l} = \left(1 + \frac{Hl^2}{18I} \frac{G}{E} \right) \varepsilon_d \quad (2)$$

式中: Δ/l 为挠度比,等于弯曲段挠度差与弯曲段长度的比值; H 为建筑物高度; I 为单位宽度弹性梁的惯性矩; E 和 G 分别为建筑物的弹性模量和剪切模量; t 为弹性梁中性轴距梁边界的最大距离,中拱段 $t=H$,中垂段 $t=H/2$ 。在计算 ε_b 和 ε_d 时,需要分别计算建筑物中拱段和中垂段的拉应变值 ε_b^{h1} , ε_b^{h2} , ε_b^s , ε_d^{h1} , ε_d^s 。如 ε_b^{h1} 可表示为

$$\frac{\Delta_{h1}}{l_{h1}} = \left(\frac{l_{h1}}{12H} + \frac{3I}{2tl_{h1}H} \frac{E}{G} \right) \varepsilon_b^{h1} \quad (3)$$

本文针对二维平面问题开展研究,仅考虑在隧道横断面方向上的水平变形情况,地表水平位移引起的水平应变 ε_h 计算公式如下:

$$\varepsilon_h = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{z_0 - z} w \left(\frac{x^2}{i^2} - 1 \right) \quad (4)$$

$$U = \frac{x}{z_0 - z} w \quad (5)$$

式中 z_0 为隧道轴线埋深, $z_0=15$ m; U 表示沿 x 方向的水平位移函数; w 表示关于 x 的地表沉降曲线函数; i 为沉降槽宽度系数。

隧道施工引起地表变形在建筑物内产生的弯曲拉应变 ε_{br} 和剪切拉应变 ε_{dr} 可表示为

$$\varepsilon_{br} = \varepsilon_h + \varepsilon_b \quad (6)$$

$$\varepsilon_{dr} = \varepsilon_h \left(\frac{1-\nu}{2} \right) + \sqrt{\varepsilon_h^2 \left(\frac{1+\nu}{2} \right)^2 + \varepsilon_d^2} \quad (7)$$

式中 ν 为泊松比;在式(6)、(7)中应分别计算建筑物内中垂段和中拱段的弯曲拉应变和剪切拉应变。

采用极限拉应变 ε_{lim} 的方法评估建筑物的破坏等级,如表 1 所示^[11]。取弯曲拉应变 ε_{br} 和剪切拉应变 ε_{dr} 之间的最大值与极限拉应变 ε_{lim} 进行比较,根据表 1 可以确定建筑物的破坏级别。

表 1 建筑物损坏级别表^[11]

Table 1 Categories of building damages^[11]

| 破坏等级 | 严重性程度 | 极限拉应变% |
|------|---------|--------------|
| 0 | 可忽略的 | 0 ~ 0.05 |
| 1 | 非常轻微 | 0.05 ~ 0.075 |
| 2 | 轻微 | 0.075 ~ 0.15 |
| 3 | 中等 | 0.15 ~ 0.3 |
| 4, 5 | 严重至非常严重 | > 0.3 |

3 考虑参数空间变异性的建筑物安全概率评价方法

将参数随机场建模方法和建筑物安全性评价方法有机结合,本文建立了基于随机场理论的建筑物安全概率评价方法,其分析过程可以总结为以下 5 个步骤:

(1) 确定待分析隧道模型尺寸以及土层、衬砌材料参数和不确定性参数特征统计量。

(2) 采用有限差分软件 FLAC^{3D} 将模型进行网格

剖分, 提取所有网格单元的中心点坐标。

(3) 采用协方差矩阵分解法实现不确定性土体参数随机场模型的生成。

(4) 利用 FLAC^{3D} 中内嵌 FISH 语言编写程序, 建立随机场模型与有限差分网格单元的一对一映射关系, 实现随机场模型到数值分析模型的转换。

(5) 借助于 Monte-Carlo 策略, 多次重复步骤(3)和(4)进行隧道施工的随机分析, 提取每次随机分析得到的地表变形并进行建筑物安全概率性分析。

4 算例分析

选取模型尺寸为 60 m × 40 m (宽 × 高), 在隧道轴线方向上取 1 m。隧道直径 D 为 6 m, 埋深 C 为 12 m。土体视为理想弹塑性材料, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。隧道衬砌结构假定为线弹性材料, 采用 Shell 结构单元进行模拟。在土性参数当中, 本文主要考虑了弹性模量 E 的变异性对隧道下穿建筑物安全性的影响。本文假定弹性模量服从对数正态分布, 均值为 12 MPa。土体重度为 18 kN/m³, 内摩擦角为 8.5°, 黏聚力为 13 kPa。采用指数自相关函数形式表示土体中不同点处弹性模量之间的相关性。

4.1 隧道施工引起的地表变形规律

研究隧道施工引起的地表变形是对上部建筑物进行安全性评价的前提条件。隧道开挖后势必导致开挖边界上的节点应力释放, 因此可以采用应力释放方法模拟隧道开挖的整个过程。隧道开挖后, 在开挖边界节点上施加一个作用力, 并通过一个应力释放系数 λ 控制开挖边界点上不平衡力的释放大小。从探索规律性的角度出发, 在计算本文分析过程中可取 $\lambda = 0.1$ 。借助于 Monte-Carlo 策略开展随机性分析, 选取了 500 次作为各工况模拟次数。

取自相关距离 $\theta/D = 1/6$, 图 2 分别给出了弹性模量变异系数 COV 分别为 0.3 和 0.5 的随机计算得到的地表沉降曲线, 图中粗实线表示确定性计算结果, 即不考虑 E 空间变异性的地表沉降曲线。从图上可以看出, 由于每一次生成的参数随机场模型不同, 计算结果表现出一定程度的离散性。随着 COV 的增大, 地层的不均匀性逐渐增加, 地表沉降曲线的离散程度也会增大。

取 COV=0.4, 图 3 给出了自相关距离与隧道直径比 θ/D 分别为 1/2 和 2 时的随机计算得到的地表沉降曲线。可以看出, θ/D 越大, 随机计算结果的离散性也逐渐增加。同时 θ/D 还会在一定程度上影响地表沉降曲线的形式。当 $\theta/D = 2$ 时, 部分随机计算结果得到的地表沉降曲线形式出现明显的变化, 不再是关于隧道轴线对称的曲线。由于考虑了 E 空间变异性的作用, 在随机计算模型中出现了高刚度或低刚度单元集中的

区域。开挖引起的应力释放, 沿着高刚度单元集中的区域传递至地表引起的变形量较小, 相反沿着低刚度单元集中的区域传递就会引起较大的地表变形, 从而造成地表变形曲线的形式出现不规则的变化。

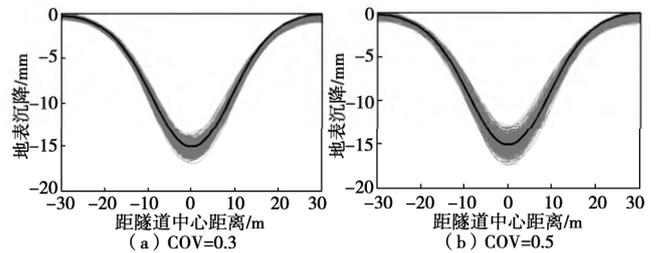


图 2 不同 COV 下地表沉降曲线

Fig. 2 Surface settlements under various values of COV

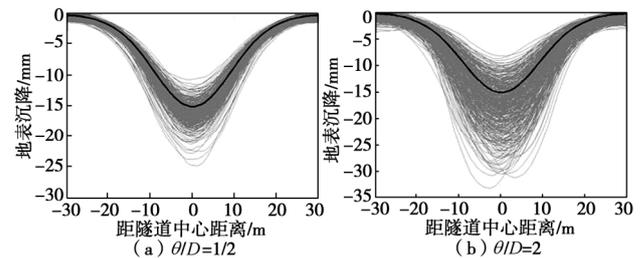


图 3 不同 θ/D 下地表沉降曲线

Fig. 3 Surface settlements under various values of θ/D

4.2 建筑物安全概率性评价

假设地表上方建筑物高度 H 为 10 m 的砌体结构建筑物 ($E/G=2.6$), 长度 L 大于地表沉降影响范围。根据式 (1) ~ (7), 可以得到不考虑弹性模量空间变异性的弯曲拉应变 ε_{br} 和剪切拉应变 ε_{dr} 分别为

$$\varepsilon_{br} = 0.088\% \quad (8)$$

$$\varepsilon_{dr} = 0.048\% \quad (9)$$

根据表 1 可知该建筑物破坏等级为 2 级, 属于轻微破坏。考虑弹性模量空间变异性的影响, 在多次随机计算结果中建筑物内最大拉应变超出极限拉应变 ε_{lim} 的概率可以表示为 N 次随机计算中建筑物内最大拉应变超出 ε_{lim} 的次数所占的比例。

图 4 给出了当 $\theta/D = 1/6$ 时, 不同 COV 下建筑物内产生的最大拉应变超出 ε_{lim} 的概率。可以看出, 与确定性结果不同, 随机分析结果相对离散, 且随着 COV 的增大, 离散程度逐渐增加, 这与地表变形规律保持一致。但是, 在 θ 取值较小的时, 变异系数对建筑物内最大拉应变的概率分布并无较为明显的影响, 根据表 2 可知计算结果均在 2 级范围以内, 与确定性分析结果相同均位于轻微破坏范围内。

以 COV=0.4 为例, 图 5 给出了建筑物内最大拉应变超出 ε_{lim} 的概率随 θ/D 的变化关系。可以看出, 建筑物内最大拉应变对 θ/D 的大小较为敏感, 并且随着 θ/D 的增大, 最大拉应变的概率分布越离散。当 $\theta/D = 2$ 时, 建筑物破坏等级达到中等破坏 (3 级) 的概率不再为 0。对于表 1 中定义的 6 个建筑物破坏等级, 有

关学者^[9]指出, 建筑物破坏等级 2 级和 3 级的划分标准 ($\epsilon_{lim}=0.15\%$) 是非常重要的, 因为造成建筑物破坏等级达到 2 级的原因可能有多种, 包括收缩、温度效应等, 不一定是由于地表变形引起的, 但是这些因素一般不会致使建筑物达到 3 级破坏。因此, 一旦建筑物的破坏等级达到了 3 级, 可以认为地表变形已经对建筑物的安全性造成一定程度的影响。

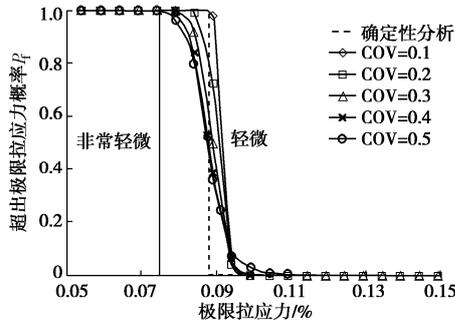


图 4 超出 ϵ_{lim} 的概率与 COV 的关系

Fig. 4 Probability of exceeding ϵ_{lim} under various values of COV

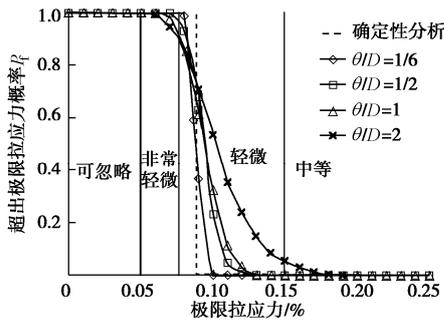


图 5 最大拉应变超出 ϵ_{lim} 的概率与 θ/D 的关系

Fig. 5 Probability of exceeding ϵ_{lim} under various values of θ/D

5 结 论

考虑土性参数的空间变异性特征, 提出了隧道下穿建筑物安全的概率性评价方法, 探讨了土体参数弹性模量变异系数和自相关距离对隧道上方建筑物安全性的影响, 得到以下两点结论:

(1) 弹性模量的变异系数对地表变形规律的影响主要体现在变形量上; 自相关距离对地表变形量和变形形式上都有影响。

(2) 基于以极限拉应变作为指标的建筑物破坏等级判断方法, 得出随着变异系数和自相关距离的增大, 建筑物内最大拉应变的概率分布越分散, 同时建筑物达到较高破坏等级的概率也越大。

参考文献:

[1] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements[J]. Acta

Geotechnica, 2013, 8(2): 181 – 199.

[2] MIRO S, KÖNIG M, HARTMANN D, et al. A probabilistic analysis of subsoil parameters uncertainty impacts on tunnel-induced ground movements with a back-analysis study[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 68: 38 – 53.

[3] 程勇刚, 常晓林, 李典庆. 考虑岩体空间变异性的隧洞围岩变形随机分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2767 – 2775. (CHENG Yong-gang, CHANG Xiao-lin, LI Dian-qing. Deformation stochastic analysis of tunnel surrounding rock considering its spatial randomness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2767 – 2775. (in Chinese))

[4] HUBER M, HICKS M A, VERMEER P A, et al. Probabilistic calculation of differential settlement due to tunneling[C]// Proceedings of the 8th International Probabilistic Workshop. Szczecin, 2010: 1 – 13.

[5] VANMARCKE E, YADRENKO M I. Random fields: Analysis and synthesis[J]. Cambridge Ma Mit Press P, 1983.

[6] EL-KADI A I, WILLIAMS S A. Generating two-dimensional fields of autocorrelated, normally distributed parameters by the matrix decomposition technique[J]. Groundwater, 2000, 38(4): 530 – 32.

[7] BURLAND, JOHN B, JAMES R, et al. Building response to tunnelling: case studies from construction of the Jubilee Line Extension[M]. London: Thomas Telford, 2001.

[8] POLSHIN D E, AND R A TOKAR. Maximum allowable non-uniform settlement of structures[C]// Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Butterworth's Scientific. London, 1957: 402 – 405.

[9] MAIR R J, TAYLOR R N, BURLAND J B. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling[C]// Fourth International Symposium of International Conference of Geotechnical Aspects of on Underground Construction in Soft Ground. London, 1996: 713 – 718.

[10] BURLAND J B, WROTH C P. Settlement of buildings and associated damage[C]// Proceedings of Conference on Settlement of Structures. Cambridge. London, 1975: 611 – 654.

[11] BURLAND J B, BROMS B B, MELLO V F B D, et al. Behaviour of foundations and structures[C]// Proc 9th Int Conf S M F E. Tokyo, 1977, : 495 – 546.

(本文责编 黄贤沙)