

文章编号: 1000-7598(2009)09-2733-04

地铁施工环境影响定量风险指标研究

李兴高¹, 孙河川²

(1. 北京交通大学 土建学院, 北京 100044; 2. 中国中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

摘要: 地铁施工邻近建筑物和构筑物受施工影响的安全风险评价是急需解决的关键技术问题之一。考虑实际工程中地层参数呈区间分布的特点, 建议借助于区间分析理论估计建筑物和构筑物对于地铁施工的响应。在此基础上, 通过引入风险评价函数定义了风险指标 η_1 , 在假定环境响应均匀分布的前提下定义了风险指标 η_2 。通过这两个指标可以将建筑物和构筑物受施工影响是否安全分为不可能事件、风险事件和必然事件。将风险事件分为3个等级, 并建议了相应的应对措施。举例说明了定义的风险指标在实际工程中的应用。

关键词: 地铁施工; 环境影响; 风险评价; 定量指标

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of quantitative risk index of metro tunneling-induced effects on surroundings

LI Xing-gao¹, SUN He-chuan²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China CREC Railway Electrification Bureau Group Co. Ltd, Beijing 100036, China)

Abstract: The safety risk evaluation of metro tunneling-induced effects on adjacent buildings and structures is one of the problems urgently to solve. Considering the interval distribution characteristic of ground parameters in engineering, the interval analysis theory is suggested to estimate the interval of the response of buildings and structures. Based the response interval, a risk index η_1 is defined by introducing the risk evaluation function; and the other risk index η_2 is defined by assuming the response is the uniform distribution. With the two risk indexes, the event that whether the buildings and structures adjacent tunneling are safe or not is classified into the impossible event, the risk event and the sure event. The risk event is further classified into 3 classes, and responding measures are recommended. In the end, the application of the defined risk indexes to engineering is explained in an example.

Key words: metro tunneling; effects on surroundings; risk evaluation; quantitative index

1 引言

近年来, 为了解决城市发展过程中的环境交通问题, 我国的地铁建设快速发展。地铁施工对邻近桥梁、建筑、管线、既有线路等的邻近施工环境影响问题愈来愈多, 直接关系到市民的生产生活和城市的正常运行。因而, 急需对这些桥梁、建筑、管线和既有线路结构等受施工影响的风险进行分析和评价, 以期采用安全可靠和经济合理的控制措施。以北京为例, 目前在建的地铁线均经过市中心繁华地区, 未来规划的线网也部分在城市中心区穿过, 这些地域已经建成各类高架桥、人行天桥、高层建

筑、地下管线和既有地铁线路, 存在大量年久失修的单层或多层建筑, 形成了有别于生态环境的城市建筑环境。新建的地铁不可避免地要从这些高架桥、人行天桥的桩基侧面或下方穿过、或从高层建筑下、管线下通过、或从既有线路的下方、侧面穿过。不论采用浅埋暗挖法还是盾构法, 施工作业必将对这些建筑物和构筑物的安全构成威胁。因此, 如何在地铁建设中保证这些桥梁、建筑、管线和既有线路的安全, 降低它们受邻近地铁施工影响的风险是十分重要的课题, 急待解决。

目前, 对于工程建设中的风险评价大多还停留在定性和定量相结合的水平上, 完全进行定量分析

收稿日期: 2008-04-11

第一作者简介: 李兴高, 男, 1971年生, 博士, 副教授, 现主要从事地铁施工环境影响方面的研究工作。E-mail: lxx_njtu@163.com

的还不多见, 风险评价指标确定的人为因素很大, 即使应用 Bayes 理论, 提取样本更新先验概率得到后验概率进行评价, 但观其先验概率, 仍具有很大的主观性^[1]。鉴于此, 有些学者^[2-4]基于可靠度理论确定风险评价指标在一定程度上消除了人为因素的影响。但地铁施工对邻近环境影响计算分析中涉及到的土层性质参数, 在实际工程中一般很难验证其统计特征, 通常采用模糊的区间描述方法。与国际通用的岩体分类 RMR 法类似, 仅给出土层性质参数取值的上下界, 即用取值范围来描述地层空间特性。在实际中只能根据经验在上下区间内选取计算参数 (为了安全起见, 对于有些计算参数, 也常在上下界区间外选取)。通过这种方式得到的定值计算结果肯定具有很强的主观臆断性, 同时它也忽视了各计算参数客观存在的离散性和变异性。因而, 很有必要借助区间分析理论对地铁施工环境影响给出合理的区间估计, 并结合环境控制标准定义邻近建筑物和构筑物受施工影响的风险评价的定量指标, 从而也便于实现统一的风险管理。本文论述了这种方法的具体实现。

2 地铁施工环境影响的区间估计

从实际工程中地质参数分布的区间特征来看, 地铁施工邻近环境影响问题实质上是一类不确定性问题。事实上, 对于不确定性问题的研究, 一般来说主要有两种解决方法。一种是点估计; 另一种是区间估计。现有计算方法给出了地表沉降的单一数值解, 是一种点估计的方法。从统计意义上, 区间估计比点估计更反映实际情况, 但也更为复杂。不确定性分析的目的就是在设计参数的给定变化范围内找环境响应的上界值和下界值, 即确定环境响应的区间范围。地铁施工环境影响的区间可借助于区间分析理论得到。区间分析理论是由 Moore 于 1966 年首次提出的, 源出工程技术人员对计算数学误差分析的研究^[5-6], 通常是指一个问题的原始数据并不能精确知道, 而只知道包含在给定的界限范围之内。有时一个给定过程的理论原理并不完整, 但近似描述过程的方程已知, 对于这些情况, 区间分析理论能够给出这些问题的未知解的界限。在文献[7]中, 基于区间分析理论并结合响应面法, 建立起了地表沉降区间范围的预测模型, 较好地处理了地层参数的不确定性, 并对地表沉降的区间范围做出合理的估计。参照文献[7], 可对邻近建筑物和构筑物

受施工影响所产生附加应力和变形给出合理的估计。从工程便于量测的角度来看, 基于附加变形定义的风险评价指标更加合理。本文在假定地铁施工邻近建筑物和构筑物附加变形得到的基础上, 定义相应的风险评价指标。

3 风险指标的定义

根据计算得到的建 (构) 筑物附加变形区间量 D 与对应的环境控制标准 d_s (包括桥梁、建筑、管线和既有线结构等能够抵抗的附加变形指标), 可以建立如下两种风险评价指标。

(1) 风险评价指标 η_1

建立如下风险评价函数

$$M = g(D) = D - d_s \quad (1)$$

其中:

$$D = [\underline{d}, \bar{d}] \quad (2)$$

$$d_s = [d_s, d_s] \quad (3)$$

式中: D 为建 (构) 筑物附加变形的区间估计, 为区间数; d_s 为点区间变量, 即建 (构) 筑物变形控制标准。显然, 功能函数值 M 也为区间函数值。设其均值和离差分别为 M^c 和 M^r , 定义无量纲量 η_1 为

$$\eta_1 = \frac{M^c}{M^r} \quad (4)$$

为了说明 η_1 的含义, 将式 (4) 展开。令

$$M = [\underline{m}, \bar{m}] \quad (5)$$

则

$$\eta_1 = \frac{M^c}{M^r} = \frac{(\bar{m} + \underline{m})/2}{(\bar{m} - \underline{m})/2} = \frac{(\bar{m} + \underline{m})}{(\bar{m} - \underline{m})} = \frac{[(\bar{d} + \underline{d})/2 - d_s]}{[(\bar{d} + \underline{d})/2]} \quad (6)$$

式 (6) 说明, 当 $\eta_1 > 1$ 时, $\underline{js} > js_s$, 预估建 (构) 筑物附加变形量大于控制标准, 为不可能事件, 也就是说在现有施工水平和施工工艺条件下, 控制标准不可能实现, 必须改善施工工艺, 提高施工水平; 当 $1 > \eta_1 > -1$ 时, $\underline{js} > js_s > \bar{js}$, 控制标准在建 (构) 筑物附加变形量的区间估计之内, 控制标准有可能实现, 但存在一定的风险; 当 $\eta_1 < -1$ 时, $\bar{js} < js_s$, 预估发生的建 (构) 筑物附加变形量小于控制标准, 控制标准必定能实现。如图 1 所示, η_1 把建 (构) 筑物变形的控制标准 d_s 分成 3 个区域。因此, 可以对建 (构) 筑物变形的控制标准 d_s 实现的可能性做

出科学合理的评价, 作为风险性度量是客观可行的。从以上分析可以看出, 综合考虑施工方案的安全可靠性、技术可行性、经济合理性, 特定施工方案下的建(构)筑物附加变形区间估计范围应当包括控制标准, 相应的风险指标界定在 $-1 \sim 1$ 之间, 越接近 $+1$, 施工方案的风险越大; 而越接近 -1 , 施工方案的风险越小。

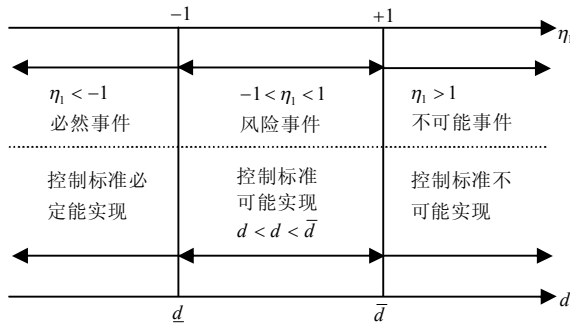


图1 风险指标的 η_1 含义
Fig.1 Meaning of risk index η_1

(2) 风险评价指标 η_2

从工程应用的角度来说, 总是希望实际发生的建(构)筑物附加变形量 d 小于控制标准 d_s , 其风险愈低, 说明实际工程愈安全。据此, 采用概率与数理统计方法建立风险评价指标 η_2 。

从概率与数理统计理论上讲, 在数据足够多的情况下, 建(构)筑物附加变形量 d 的概率分布函数是可以获得的, 然而在实际工程应用中很难做到。因此, 在数据不全的情况下, 可以假设其为均匀分布, 概率密度函数 f 为

$$f(d) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{d} - \underline{d}} & \underline{d} < d < \bar{d} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

因此, 随机变量 d 的分布函数为

$$F(d) = \begin{cases} 0 & d < \underline{d} \\ \frac{d - \underline{d}}{\bar{d} - \underline{d}} & \underline{d} < d < \bar{d} \\ 1 & d > \bar{d} \end{cases} \quad (8)$$

如果用 P 表示安全概率, 那么风险概率为 $1 - P$, 由此建立风险评价指标 η_2 为

$$\eta_2 = 1 - P = \begin{cases} 1 & d < \underline{d} \\ \frac{\bar{d} - d}{\bar{d} - \underline{d}} & \underline{d} < d < \bar{d} \\ 0 & d > \bar{d} \end{cases} \quad (9)$$

其实际意义为实际发生的建(构)筑物附加变形量小于建(构)筑物附加变形区间估计量的概率。如果以建(构)筑物变形控制标准 d_s 作为实际发生的建(构)筑物变形量, 就可以得到特定建(构)筑物变形控制标准和特定施工水平、施工工艺条件下的风险概率, 即

$$\eta_2 = 1 - P = \begin{cases} 1 & d_s < \underline{d} \\ \frac{\bar{d} - d_s}{\bar{d} - \underline{d}} & \underline{d} < d_s < \bar{d} \\ 0 & d_s > \bar{d} \end{cases} \quad (10)$$

如图2所示, $\eta_2 = 1$ 表示预估建(构)筑物附加变形量肯定大于建(构)筑物变形控制标准, 施工方案满足建(构)筑物变形控制标准为不可能事件; $\eta_2 = 0$ 表示预估建(构)筑物附加变形量肯定小于建(构)筑物变形控制标准, 施工方案满足地表沉降标准为必然事件; 而当 $0 < \eta_2 < 1$ 时, 预估建(构)筑物附加变形区间范围包括建(构)筑物控制标准, 施工方案有可能满足控制标准, 但有一定的风险, η_2 的取值越大, 施工方案的风险越大, 需要在安全可靠和经济合理之间进行选择。

可以看出, 上面根据不同需要建立起来的两个风险评价指标的实际意义基本相同, 都可以用于工程决策。在实际工程中, 可任意选用。

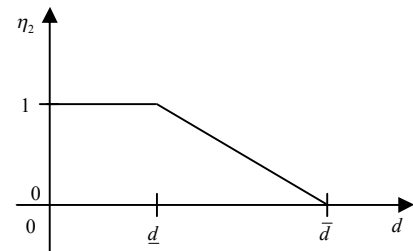


图2 风险指标的 η_2 含义
Fig.2 Meaning of risk index η_2

4 建(构)筑物受施工影响风险分级

前文定义的风险评价指标 η_1 和风险评价指标 η_2 把建(构)筑物受施工影响可能出现的结果用定量的指标分为不可能事件、风险事件和必然事件。不可能事件和必然事件对于建(构)筑物受施工影响出现的结果给出了确定性的回答, 而风险事件则说明了建(构)筑物受施工影响是否安全具有不确定性, 为进一步描述这种不确定性的程度且便于施工控制, 需要将风险事件进一步细分, 依据风险评价指标 η_1 和风险评价指标 η_2 的不同计算结果, 将可

能出现的风险事件划分为 3 个级别, 见表 1。

表 1 风险等级的划分
Table 1 Classification of risk class

风险等级	风险评价指标 η_1	风险评价指标 η_2	应对措施原则
I	$[-1.0 -1/3)$	$(0.0 1/3)$	先施工, 后加固
II	$[-1/3 1/3)$	$[1/3 2/3)$	边施工, 边加固
III	$[1/3 1.0]$	$[2/3 1.0)$	先加固, 再施工

由表可以看出, 风险的等级越高, 建(构)筑物受施工影响的风险越大, 需要采取的措施更加严格。对于 III 级风险, 需要对建(构)筑物先行采取加固措施, 然后才能施工通过; 对于 II 级风险, 可随着施工的进行采取加固措施; 对于 I 级风险, 可以先施工, 然后根据监测的结果决定是否采取加固措施。

5 示 例

假定某地铁隧道工程附近存在一个钢筋混凝土框架结构, 按照相关规范和标准, 钢筋混凝土框架结构允许的 δ/L 为 $1/150$ (δ 为差异沉降, L 为建筑物的长度)。试分别对地铁施工引起此结构的不同的附加变形情况下, 对结构的安全状况做出简要评价及采取的应对措施。设地铁施工引起结构附加变形的区间为 $[\Delta_F \Delta_U]$ 。

解: 若 $\Delta_U < 1/150$, 则可以确定在地铁施工过程中, 此钢筋混凝土结构是安全的, 不需采取任何措施。若 $\Delta_F > 1/150$, 则可以确定在地铁施工过程中, 此钢筋混凝土结构是不安全的, 为确定施工安全, 需要将此结构拆除或对结构采取完备的加固措施以提高结构抵抗附加变形的能力。若 $\Delta_F < 1/150 < \Delta_U$, 则可以判定, 在地铁施工过程中, 此钢筋混凝土结构是存在风险的。对于其风险等级的判定, 下面分别利用指标 η_1 和指标 η_2 , 给出论述。

(1) 当采用风险指标 η_1 时, 若 $-1.0 \leq \eta_1 < -1/3$, 则为 I 级风险, 可以先施工, 再加固; 若 $-1/3 \leq \eta_1 < 1/3$, 则为 II 级风险, 可以边施工、边加固; 若 $1/3 \leq \eta_1 < 1$, 则为 III 级风险, 要先加固, 再施工。这其中 $\eta_1 = (\Delta_U + \Delta_F - 2/150)/(\Delta_U - \Delta_F)$ 。

(2) 当采用风险指标 η_2 时, 若 $0 < \eta_2 < 1/3$, 则为 I 级风险, 可以先施工, 再加固; 若 $1/3 \leq \eta_2 < 2/3$, 则为 II 级风险, 可以边施工、边加固; 若 $2/3 \leq \eta_2 < 1$, 则为 III 级风险, 需要先加固, 再施工。这其中 $\eta_2 = (\Delta_U - 1/150)/(\Delta_U - \Delta_F)$ 。可以看出, 采

用 η_1 或 η_2 其评价结果是一致的。

6 结 语

对建(构)筑物受邻近地铁施工的风险进行定量评价是实践中提出的新课题。本文在建(构)筑物受邻近地铁施工影响产生附加变形区间估计基础上提出了两种定量的风险评价指标, 可以较为完备地反映建(构)筑物受施工影响后的 3 种安全状态, 即 (1) 建(构)筑物为安全的, (2) 建(构)筑物存在风险的, (3) 建(构)筑物是不安全的, 并可以对建(构)筑物的风险等级进一步明确。对于每一风险等级, 都给出了相应的应对措施控制原则。文中给出的两类指标涉及的参数少, 计算快捷, 更易于工程应用。

本文提出的风险评价指标, 对其他风险进行定量评价也提供了很好的借鉴, 丰富了风险分析和风险评估理论。

参 考 文 献

- [1] 言茂松. 贝叶斯风险决策工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [2] WHITEMAN R V. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1989, 110(2): 145—188.
- [3] 白峰青, 卢兰萍, 姜兴阁. 地下工程的可靠性与风险决策[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(3): 237—239.
BAI Feng-qing, LU Lan-ping, JIANG Xing-ge. The decision of the reliabilities and risks for underground project[J]. *Journal of Liaoning Technological University* (Natural Science Edition), 2000, 19(3): 237—239.
- [4] 刘宁, 贾超, 陈进. 基于可靠度的工程风险决策初探[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1297—1301.
LIU Ning, JIA Chao, CHEN Jin. Preliminary research on engineering decision-making based on reliability theory and risk analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1297—1301.
- [5] MOORE R E. Interval analysis[M]. Englewood Cliffs'NJ: Prentice-Hall, 1966.
- [6] MOORE R E. Methods and applications of interval analysis[M]. Philadelphia: SLAM. Publications, 1979.
- [7] 孙河川. 地铁浅埋暗挖车站设计安全风险分析[博士学位论文 D]. 北京: 北京交通大学, 2006.