

城市隧道施工期间既有建筑物安全性模糊综合评判

孔文涛¹ 何亚伯¹ 李 祺² 王 浩³ 覃卫民³

(1 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2 武汉中科智创岩土技术有限公司, 武汉 430071; 3 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, 武汉 430071)

摘 要 城市暗埋隧道一般埋深浅、断面大, 围岩条件差, 隧道上方有密集建筑群, 施工风险很大。文章针对既有建筑物在隧道施工期间的安全风险问题, 综合考虑建筑物自身性能、隧道条件和工程现场实时监测数据三方面影响因素, 建立了二级模糊综合评价模型, 对既有建筑物的安全性进行了全面、动态评判, 根据评判结果确定了合理的建筑物安全防护措施; 结合厦门市成功大道梧村山隧道下穿既有建筑物工程实例, 对其进行安全评判, 并根据评判结果分别采取了不同的应对措施, 取得了很好的效果, 验证了该方法的实用性和有效性。

关键词 城市隧道 既有建筑物 安全性 实时动态 模糊综合评判

中图分类号: U456.3; TU311.2 **文献标识码**: A

1 引言

城市暗埋隧道一般具有浅埋大跨的特点, 浅埋大跨使得施工风险增大, 对周围环境特别是地面既有建筑物的危害也随之增大。因此, 在隧道施工期间, 对地面既有建筑物的安全性进行评价就显得尤为重要。目前, 已有许多专家学者进行了这方面的研究, 如: 柳承茂等^[1]对结构安全性评估方法进行了研究, 分析了实用鉴定方法的局限性; 徐礼华等^[2]通过对现场监测数据的分析和有限元模拟, 研究了隧道施工对地表砌体结构建筑物安全性的影响因素; 周国恩^[3]针对寒区隧道冻害的风险进行了研究, 并用模糊综合评价法进行了风险评价; 田四明等^[4]进行了城际铁路隧道施工对邻近建筑物的影响研究, 针对不同的施工工法和不同的地质情况进行了敏感性分析, 并对各类工程措施的效果进行了评估; 候艳娟等^[5,6]分析了隧道施工影响下地层与建筑物结构的动态关系, 并对建筑物安全风险进行了评估。

隧道施工是一个动态的过程, 周围环境复杂, 而且影响既有建筑物安全性的因素很多, 涉及面广, 受现场条件的限制, 许多因素信息模糊。如何综合考虑

诸多影响因素, 对建筑物进行实时、全面、快速的安全评判, 并根据评判结果及时指导现场施工尤为迫切, 而目前国内外还很少见诸这方面的研究报道。

模糊综合评判法是从多目标决策中划分出来的一种新的数学方法, 对于影响因素较多、模糊性又有很强的情况具有明显的优势, 因此用模糊数学的理论对既有建筑物的安全性进行评判是合理的。本文根据模糊数学的理论和方法^[7], 综合考虑建筑物性能、隧道条件以及工程变形现状等因素, 对隧道施工期间既有建筑物的安全性进行了评判, 并确定了建筑物的安全风险等级。根据综合评判结果指导后续施工方案, 确定建筑物的安全防护措施, 可保证建筑物的安全, 又可最大限度地减小对工程正常施工、建筑物正常使用的影响。

2 建筑物安全性模糊综合评判

2.1 安全性评判评语集的建立

既有建筑物的安全性可按照所承受的风险大小划分, 本文将其分为风险很大、风险较大、风险一般、风险较小、风险很小 5 个等级, 分别用 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5

修改稿返回日期: 2013-07-02

作者简介: 孔文涛(1973-), 男, 讲师, 主要从事施工管理和信息化管理的教学和研究工作, E-mail: kongwt73@163.com.

表示。即:

$$V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} \quad (1)$$

2.2 安全性评判指标体系的建立

根据已有的研究成果^[5,8,9],结合工程现场资料^[10],本文采用二级模糊综合评判,指标体系包括建筑物性能、隧道条件、工程变形现状3个一级指标和相应的13个二级指标。具体指标体系见表1。

表1 既有建筑物安全性评判指标体系
Table 1 Index system of safety evaluations of existing buildings

U_i 一级指标	u_{ij} 二级指标
U_1 建筑物性能	u_{11} 建筑结构类型 u_{12} 建筑基础形式 u_{13} 建筑完损情况 u_{14} 建筑物与隧道平面距离
U_2 隧道条件	u_{21} 围岩等级 u_{22} 隧道埋深 u_{23} 隧道跨度 u_{24} 隧道开挖方法 u_{25} 隧道支护方法 u_{26} 施工现场管理
U_3 工程变形现状	u_{31} 建筑物累积沉降 u_{32} 建筑物裂缝 u_{33} 建筑物累计差异沉降

根据公式(1),将指标体系中的二级指标按5个等级划分,分别对应模糊评判评语集等级,具体划分见表2。

2.3 安全性评判隶属函数的选择

隶属函数的选取既要反映实际情况,又要简便易行,由前文所建立的评判指标体系可知,诸如隧道埋深、隧道跨度、建筑物累积沉降、建筑物差异沉降、建筑物裂缝等指标可以进行定量描述。对于这些定量指标,可以采用岭形隶属函数进行描述^[11]。岭形隶属函数可以在一定程度上避免折线具有固定斜率的欠缺。

评判指标体系中还有一些指标是定性指标,如建筑物基础形式、建筑物结构类型、建筑物完损情况、隧道开挖方法等。对于这一类指标,可以采用类比的方法建立其隶属函数,其主要思路是,对于每个指标的5个评价等级,根据其实际情况,每个评价等级按照指标符合程度分为“完全符合”、“基本符合”、“部分符合”、“基本不符合”、“完全不符合”5种情

表2 二级指标体系评判等级划分

Table 2 Classification of the two-level index system

评判指标		评判等级				
		v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
建筑结构类型		砖木结构	砖混结构	框架结构(装配)	框架结构(现浇)	框剪结构
建筑基础形式	砖混结构	乱毛石条基	整毛石条基	砖石条基	素混凝土条基	钢筋混凝土条基
	非砖混结构	素混凝土独立基础	钢筋混凝土独立基础	钢筋混凝土独立基础+毛石条基	钢筋混凝土独立基础+砖石条基	桩基础
建筑物完损情况		危险	严重损坏	一般损坏	基本完好	完好
与隧道平面关系		完全穿越	部分穿越	邻近	较邻近	非邻近
围岩等级		级	级	级	级	级
隧道埋深		< 10 m	10~15 m	15~20 m	20~30 m	> 30 m
隧道跨度		> 20 m	15~20 m	10~15 m	5~10 m	< 5 m
隧道开挖方法		全断面法	台阶法	中隔壁法	交叉中隔壁法	双侧壁导洞法
隧道支护方法		无支护	喷混凝土初期支护	钢筋网或锚杆初期支护	复合式支护	复合式支护+超前支护
施工现场管理		很差	较差	一般	较好	很好
建筑物累积沉降	桩基础	> 10 mm	9~10 mm	7~9 mm	4~7 mm	< 4 mm
	天然基础	> 30 mm	27~30 mm	21~27 mm	12~21 mm	< 12 mm
建筑物裂缝	开展速率	> 0.8 mm/d	0.72~0.8 mm/d	0.56~0.72 mm/d	0.32~0.56 mm/d	< 0.32 mm/d
	累计宽度(承重构件)	> 1.5 mm/d	1.4~1.5 mm	1.1~1.4 mm	0.6~1.1 mm	< 0.6 mm
	累计宽度(非承重构件)	> 5 mm	4.5~5.0 mm	3.5~4.5 mm	2.0~3.5 mm	< 2 mm
建筑物累计差异沉降		> 2‰	1.8‰~2‰	1.4‰~1.8‰	0.8‰~1.4‰	< 0.8‰

况,分别对应数字 1、0.75、0.5、0.25、0,据此建立起每个指标相对于 5 个评价等级的单因素评价矩阵。

2.4 安全性评判指标权重的确定

首先,根据前文所述二级评判模型,用 T.L.Saaty 提出的标度(1~9)及其倒数标度法^[12],将两两因素之间的比值评定后构成判断矩阵;其次,采用特征根法解得判断矩阵的最大特征根及其所对应的特征向量,正规化后即指标权重;最后,为了防止判断矩阵偏离一致性以致影响最终决策,需进行一致性检验。

2.5 计算模糊综合评判向量

首先,根据评判指标体系的隶属函数,求出各指标对应各评判等级的隶属度,构造模糊综合评判矩阵;其次,采用加权平均型模糊算子 $M(\cdot, +)$ 分别进行计算,求出模糊综合评判向量 B ;最后,按照最大隶属度原则选择最大的 b ; 所对应的判断元素 v_i 作为模糊综合评判的结果。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

厦门市成功大道梧村山隧道为双向六车道隧道,暗埋段洞身围岩等级为 ~ 级,地质条件差。隧道穿越的莲前西路至浦南工业区,人口稠密,建筑林立;地面邻近既有建筑物有 95 栋,且多为上世纪 70,80 年代建造,结构自身有不同程度的老化,基础埋深约 2m。隧道开挖方法采用交叉中隔壁法,开挖前进行锚杆超前支护,施工过程中采用钢筋网、钢拱架喷混凝土初期支护,随后进行模筑混凝土衬砌。

本文以位于浦南二路上的 40# 楼和浦南一路上的 57# 楼为例,分别选取隧道穿越 40# 楼和 57# 楼时的两组实时变形数据,并结合现场的相关资料,对其进行安全性模糊综合评判。

3.2 40# 楼安全性模糊综合评判

(1) 40# 楼基本情况

40# 楼是一栋 3 层厂房,结构形式主体为框架结构,部分结构构件预制后装配,基础形式为钢筋混凝土独立基础,根据厦门市房屋鉴定所提供的房屋调查报告,40# 楼被评定为一般损坏房屋。本文结合现场对 40# 楼的调查,最终认为 40# 楼属于一般损坏房屋中质量较好的房屋。40# 楼与隧道之间,介于部分穿越和完全穿越之间,偏于部分穿越,其平面邻近关系如图 1 所示。

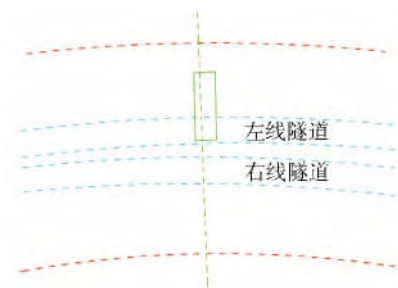


图 1 40# 楼与隧道平面关系示意

Fig.1 Relationship between the 40th building and the tunnel

40# 楼所在位置岩层以 级围岩为主,少部分是 级围岩,该处隧道埋深 18m,单洞隧道实际跨度 12.6 m。40# 楼本组工程变形数据中,建筑物的最大累计沉降量为 103.7 mm;建筑物裂缝最大开展速率为 0.028 mm/d,最大裂缝宽度为 3.18mm,位于非承重构件上两者取不利数据,即最大裂缝宽度 3.18 mm;建筑物最大累计差异沉降为 1.64‰,其中 40# 楼最大累计沉降量已超过现场监测报警值,需要及时对其进行安全评判,为后续应对措施提供科学指导。

(2) 40# 楼安全性模糊综合评判

根据前文确定的隶属函数,计算 U_1 (建筑物性能)、 U_2 (隧道条件)、 U_3 (工程变形现状)的模糊评判矩阵如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.25 & 0.75 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.75 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.99 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.98 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.36 & 0.74 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

各二级评判指标的权重如下:

$$w_1 = (0.108 \quad 0.165 \quad 0.255 \quad 0.472)$$

$$w_2 = (0.214 \quad 0.065 \quad 0.112 \quad 0.357 \quad 0.194 \quad 0.058)$$

$$w_3 = (0.129 \quad 0.277 \quad 0.595)$$

按单因素模糊评价模型进行初级评判,评判结果如下:

$$U_1 = w_1 \cdot R_1 = (0.118 \quad 0.519 \quad 0.218 \quad 0.145 \quad 0)$$

$$U_2=w_2 \cdot R_2=(0.054 \quad 0.160 \quad 0.173 \quad 0.419 \quad 0.194)$$

$$U_3=w_3 \cdot R_3=(0.129 \quad 0.595 \quad 0.100 \quad 0.205 \quad 0)$$

一级评判指标的权重 w :

$$w=(0.581 \quad 0.309 \quad 0.110)$$

将上述初级评判结果组合成新的评判矩阵 R :

$$R=\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0.118 & 0.519 & 0.218 & 0.145 & 0 \\ 0.054 & 0.160 & 0.173 & 0.419 & 0.194 \\ 0.129 & 0.595 & 0.100 & 0.205 & 0 \end{bmatrix}$$

40#楼可靠性的最后评判结果如下:

$$B=w \cdot R=(0.099 \quad 0.416 \quad 0.191 \quad 0.234 \quad 0.060)$$

根据最大隶属度原则,可知40#楼在这个阶段的安全等级属于风险较大等级。

现场根据评判结果及时进行了补偿注浆和抬升注浆,直至房屋的沉降趋于稳定,确保沉降量、特别差异沉降量始终在可控范围内。进一步对建筑物基础进行加固,对建筑物开裂严重处进行修补,同时加强对40#楼的监测分析,最终安全地完成了隧道穿越40#楼的施工。

3.3 57#楼安全性模糊综合评判

(1) 57#楼基本情况

57#楼是一栋3层厂房,结构形式主体为预制装配式框架结构,基础形式为钢筋混凝土独立基础,根据厦门市房屋鉴定所提供的房屋调查报告,57#楼被评定为一般损坏房屋。本文结合现场对57#楼的调查,最终认为57#楼属于一般损坏房屋中质量较好的房屋。57#楼与隧道的平面邻近关系如图2所示。

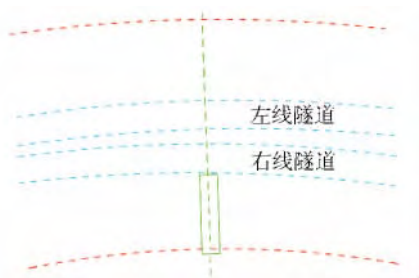


图2 57#楼与隧道平面关系示意

Fig.2 Relationship between the 57th building and the tunnel

57#楼所在位置岩层以Ⅱ级围岩为主,少部分是Ⅲ级围岩,该处隧道埋深22 m,隧道跨度12.6 m。57#楼本组工程变形数据中,建筑物的最大沉降量为98 mm;建筑物裂缝最大开展速率为0.016 mm/d,最大裂缝宽度为2.60 mm,位于非承重构件上两者取

不利数据(裂缝宽度为2.60 mm);建筑物最大累计差异沉降为1.17‰。57#楼最大累计沉降量同样也超过现场监测报警值,需要及时对其进行安全评判,确定合适的处理措施。

(2) 57#楼安全性评判

对57#楼进行了二级模糊综合评判,其最后评判结果如下:

$$B=w \cdot R=(0.064 \quad 0.113 \quad 0.476 \quad 0.284 \quad 0.063)$$

根据最大隶属度原则,可知57#楼在这个阶段的安全等级属于风险一般等级,可保持原施工方案不变,但应加强现场监测,最终,57#楼也安全地通过了隧道的穿越施工。

3.4 对比分析

40#楼、57#楼的两组工程变形数据中,建筑物累计沉降数据相差不大,都超过了现场监测报警值,根据相关文件要求,现场应采取相同程序进行处理。但根据模糊综合评判结果可知,40#楼的评判结果为风险较大,现场应调整施工方案,对40#楼进行加固处理,加强现场巡视和监控量测。而57#楼的评判结果为风险一般,则可按原施工方案继续施工,但应加强现场巡视和监控量测,根据后续发展情况采取相应的对策。现场根据评判结果,分别采取了不同处理措施,最终都安全地完成了隧道穿越两栋建筑物的施工。

同为超过报警值的工程变形结果,通过模糊综合评判后,建筑物风险等级不同,因此可以分别采取更为合理的、具有针对性的处理方法,既可确保建筑物的安全,又可减少对隧道正常施工和建筑物正常使用的影响。

4 结 论

(1) 结合现场变形数据,综合考虑多方面影响因素,建立了城市隧道施工期间既有建筑物安全性评判指标体系,并给出了相应的分级标准。实践证明,该体系能有效识别既有建筑物的主要风险因素,为后续的安全评价奠定基础。

(2) 建立了二级模糊综合评判模型,在不影响隧道正常施工和既有建筑物正常使用的基础上,对各建筑物的安全性进行快速、有效的评判,为工程安全施工提供了科学指导。

(3) 以量化的形式给出评价结果,评判结果更加客观合理;并能及时进行反馈,为现场管理者进行科学决策提供理论依据。

参考文献

References

- [1] 柳承茂, 刘西拉. 结构安全性综合评估方法的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30 (4): 46-48
Liu Chengmao, Liu Xila. Study on the Comprehensive Assessment Method of Structural Reliability [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30 (4): 46-48
- [2] 徐礼华, 艾心莹, 余佳力, 等. 厦门机场路隧道施工对砌体结构建筑物的影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (3): 583-592
Xu Lihua, Ai Xinying, Yu Jiali, et al. Analysis of Impact of Tunnel Construction on Masonry Buildings in Xiamen Airport Road [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (3): 583-592
- [3] 周国恩. 基于 ANP 与模糊理论的寒区隧道冻害风险评估与管理研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50 (1): 60-66
Zhou Guoen. On Risk Assessment and Management of Frost Damage in a Tunnel Located in a Cold Region Based on ANP and Fuzzy Theory [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50 (1): 60-65
- [4] 田四明, 黄胜, 陈立保. 城际铁路隧道与邻近建筑物的相互影响研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (3): 67-76
Tian Siming, Huang Sheng, Chen Libao. Research on the Interrelationship of an Intercity Railroad Tunnel and Adjacent Building [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49 (3): 67-76
- [5] 侯艳娟, 张顶立. 浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物安全风险分析及评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (增 2): 3718-3726
Hou Yanjuan, Zhang Dingli. Safety Risk Analysis and Assessment of Complex Buildings in Shallow-buried Large-span Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (Supp.2): 3718-3726
- [6] 侯艳娟. 城市隧道施工影响下地层与建筑物结构的动态作用关系及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 博士论文, 2010
Hou Yanjuan. Dynamic Interaction between Strata and Building Induced by Urban Tunnel Construction and Its Application [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, Doctorial Thesis, 2010
- [7] 杨伦标, 高英仪. 模糊数学原理及其应用(第二版)[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998
Yang Lunbiao, Gao Yingyi. Principle and Applications of Fuzzy Mathematics (Second Edition) [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1998
- [8] 梁吉. 基于模糊评判方法的铁路隧道施工风险评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 硕士论文, 2010
Liang Ji. Study on Railway Tunnel Construction Risk Assessment Based on Fuzzy Judgment Method [D]. Hangzhou: Zhejiang University, Master Thesis, 2010
- [9] 曹文贵, 翟友成, 张永杰. 新奥法隧道施工风险非线性模糊评判方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (7): 105-112
Cao Wengui, Zhai Youcheng, Zhang Yongjie. Nonlinear Fuzzy Judgment Method of Construction Risk for NATM Tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (7): 105-112
- [10] 厦门路桥建设集团有限公司. 厦门机场路一期工程 JC2, JC3 标段土建施工第三方监测招标文件[R]. 厦门: 厦门路桥建设集团有限公司, 2007
Xiamen Road & Bridge Construction Group Co., Ltd. Tendering Documents for Third-party Monitoring and Measurement in Civil Construction of Lot JC2 and JC3 in Xiamen Airport Road Project [R]. Xiamen: Xiamen Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., 2007
- [11] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科技出版社, 1985
He Zhongxiong. Fuzzy Mathematics and Its Application [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1985
- [12] Saaty. TL. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15 (3): 234-281

Comprehensive Fuzzy Evaluation of the Safety of Existing Buildings During Tunneling Construction in Urban Areas

Kong Wentao¹ He Yabo¹ Li Qi² Wang Hao³ Qin Weimin³

(1 School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072; 2 Wuhan RSM Intelligence Geotechnique Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430071; 3 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Generally, bored tunnels in urban areas are characterized by a shallow depth, a large section, poor surrounding rock, dense buildings above the tunnel, and high-risk construction. Aiming at the safety risk to existing buildings during tunneling construction, the three influential factors of building performance, tunnel condition, and in-situ monitoring data are considered and a two-level fuzzy comprehensive model is established to dynamically evaluate the safety of existing buildings and determine reasonable safeguarding measures for buildings according to evaluation consequences. Using the case of the Wushancun tunnel passing under existing buildings on Chenggong avenue in Xiamen, construction safety was evaluated and relevant measures were adopted according to evaluation consequences, and sound results were achieved.

Keywords Urban tunnels; Existing buildings; Safety; Real-time and dynamic; Fuzzy evaluation

中铁西南科学研究院科技信息研究所 竭诚提供科技翻译服务

中铁西南科学研究院科技信息研究所长期从事科技文献集资料的收集、整理、翻译、编辑出版工作。编辑出版的《隧道译丛》(现为《现代隧道技术》)杂志对吸收、引进国外先进技术、推动我国隧道及地下工程专业技术进步做出了突出贡献,深受国内隧道及地下工程专业人员喜爱。在长期的翻译、编辑出版工作中,科技信息研究所锻炼、发展了一支既具专业背景又通晓外语的翻译人才队伍。语种涵盖英语、日语、德语等,可为各企事业单位和个人提供高水平、专业化和全方位的科技翻译服务。"高效、专业"是我们长期追求的服务宗旨。

翻译收费标准

译文字数	英语		日、德	
	外译中	中译外	外译中	中译外
每千字符(汉语文件不计空格字符)	150~200	180~230	200~260	230~280
备注:不满一千字按一千字计算。				

联系电话:028-67580049

工作QQ:30957340;506905207