

浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物安全风险 分析及评估

侯艳娟, 张顶立

(北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 城市隧道开挖引起的环境安全问题越来越受到人们的广泛关注, 如何减小隧道暗挖施工对既有结构, 尤其是既有地表建筑物的影响非常重要。与一般结构物不同, 地表建筑物在结构上更具有复杂性和特殊性, 对变形更敏感, 破坏机制复杂, 一旦发生破坏后果也更加严重。厦门机场路一期工程在浅埋、大跨及复杂地质工程条件下穿越地表密集建筑物群, 建筑物的安全是决定隧道施工环境安全乃至工程顺利进行的关键。在简要分析隧道开挖对建筑物的影响机制及因素的基础上, 依据本工程暗挖隧道穿越的 63 栋建筑物的查勘结果对其进行详细分类, 而后引入模糊数学综合评判方法, 总结了两大类 9 种主要作用因素, 分别建立隶属函数并选取不同权重, 对建筑物风险的不同程度用模糊语言进行评价, 最终划分为 5 个等级, 对工程施工具有一定的指导和借鉴意义。

关键词: 隧道工程; 浅埋大跨; 建筑物; 风险; 模糊综合评判

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 3718 - 09

SAFETY RISK ANALYSIS AND ASSESSMENT OF COMPLEX BUILDINGS IN SHALLOW-BURIED LARGE-SPAN TUNNEL CONSTRUCTION

HOU Yanjuan, ZHANG Dingli

(*Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: Increasing attention to urban environment safety due to urban tunnel excavation is focused in recent years. Therefore, it is significant to minimize the impact of tunnel construction on existing structures, facilities and especially some buildings. Compared with other structures, buildings are more sensitive to external effects because of particularity and complexity of structure; and their deformation mechanisms are more complicated, thus the accident consequences are more serious correspondingly. The 1st-stage Xiamen Airdrome project passes through a large number of buildings with shallow-buried large-span tunnel in complex geology strata, making the buildings protection crucial to assure environment safety and successful tunneling. Consequently, the mechanism and factors of tunneling-induced influence on buildings should be analyzed first, and then, after foundation and structure type, height and current damage condition, etc., are classified, the safety evaluation of all the 63 buildings is then performed. Fuzzy-synthetic evaluation method is introduced in risk assessment and rating here. Nine key affecting factors of two general kinds are selected and the member function and weight of these factors are also determined. It is predicted that anticipated safety target of these buildings of different risk levels could be achieved with this specific guiding meaning.

Key words: tunneling engineering; shallow-buried large-span; buildings; risk; fuzzy-synthetic evaluation method

收稿日期: 2007 - 07 - 04; **修回日期:** 2007 - 07 - 26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA11Z119)

作者简介: 侯艳娟(1982 -), 女, 2004 年毕业于北京交通大学土木工程系, 现为博士研究生, 主要从事地下空间的开发利用和隧道及地下工程施工技术应用方面的工作。E-mail: hou_yanjuan@sina.com

1 引言

城市隧道开挖具有不同于一般山岭隧道的特殊性, 大多具有浅埋、大跨等特点, 其施工风险高、施工难度大。大量工程实践经验及理论分析表明, 风险的发生存在多方面原因, 既有内在因素也有外在因素, 而工程建设周边环境(如建筑物、道路、地下管线等)的复杂性是外在的关键因素之一^[1]。城市隧道施工对地表建筑物的影响是科研工作者当前面临的重要课题。建筑物是一个地基基础与上部结构密切作用的整体, 对外界变形影响敏感, 变形破坏机制复杂, 受不均匀沉降和沉降速率变化的影响很大, 破坏后果也更加严重。通过对隧道施工引起的建筑物风险进行分析和评估, 掌握建筑物当前的风险状态, 是后续施工过程中各种控制工作的基础, 对保护建筑物的安全至关重要。

厦门机场路一期工程全长 10.532 km, 沿线工程地质与水文地质情况以及周边地表环境极其复杂。在谊爱路至浦南片区段(长度约 1 000 m, 含明挖和暗挖段), 尤其在隧道暗挖穿越莲前西路至大厝山段军事管理区段, 地表建筑物数量达 63 栋之多, 分布密集、情况复杂, 同时鉴于不同建筑物的不同特点, 对安全控制要求十分严格, 无疑给隧道施工带来极大难度和挑战。如何在确保建筑物安全的前提下顺利进行隧道施工是本段工程的重点和难点。

本文针对 63 栋建筑物的安全控制, 在简要阐述隧道开挖对建筑物的影响机制及因素的基础上, 依据建筑物现状调查结果, 从基础结构形式、完好状态及其与隧道工程的位置关系等方面进行分类分析, 并从模糊数学的角度出发, 将风险大小的影响因素确定为风险判别的指标系统, 对建筑物的风险等级进行综合评判, 较好地为工程实际提供了指导。

2 隧道开挖对建筑物的影响分析

2.1 影响机制及因素

隧道施工扰动地层, 使原有的平衡状态发生改变, 自洞室临空面向地层深处一定范围内地层应力将发生调整, 宏观表现为地层的移动与变形。将因开挖形成的应力调整涉及有明显位移的地层范围称为施工影响范围, 对于浅埋隧道情况, 这一范围波及到地表, 形成施工沉降槽^[2]。这一过程可简述为: 开挖扰动→洞周原有应力改变→地层变形向外传

递→作用于地表建筑物地基基础及上部结构。对于隧道施工在短时间内引起较大位移的情况, 所产生的快速变形对建筑物的危害性更大。

建筑物发生沉降尤其是不均匀沉降的机制和过程是十分复杂的。微观上, 开挖扰动可能使土体孔隙中水和空气被挤出而导致孔隙体积减小, 从而在宏观上表现为地层压密固结。在隧道开挖卸载作用下, 建筑物地基土体原有的稳定状态遭到破坏, 若土层性质不均匀, 加之既有基础下部土体不密实即地基存在弱化位置等因素, 则必然造成不同位置处土体压缩变形量不同。简言之, 地层的不均匀沉降从本质上改变了建筑物下支承反力的分布, 最终导致建筑物的不均匀沉降。

隧道穿越既有建筑物施工时, 隧道和既有建筑物之间的作用是相互的。仅从隧道施工对建筑物产生影响单方面分析, 建筑物沉降大小受隧道结构、地层特点、开挖方法、隧道埋深及隧道与建筑物之间的水平距离等多种因素的影响。

通常情况下, 隧道埋深越深, 开挖产生的地表最大沉降量越小而影响范围越大(沉降槽宽度增大); 地层条件越好, 开挖对周围环境的影响相对越小; 建筑物与隧道的不同水平距离对应着地表沉降槽的不同位置, 从而出现不同形态的响应, 但很显然, 建筑物受隧道施工影响随距离增大而逐渐衰减, 对其安全越有利。这一特点可表现为隧道穿越建筑物的不同方式, 见图 1。

2.2 建筑物的破坏模式

建筑物地基的变形特征包括沉降量、沉降差、倾斜和局部倾斜^[3], 不同的变形将导致建筑物出现不同方式和大小的损害, 通常表现为均匀沉降损害、倾斜损害、曲率损害及水平变形损害等。一般情况下, 地表的拉伸和正曲率同时出现, 而地表的压缩和负曲率同时发生, 而实际中建筑物的变形往往是几种形式的综合表现, 其中以倾斜、曲率及水平变形(拉伸和压缩)对建筑物的损害更为明显, 建筑物将出现不同程度的沉陷、扭曲或开裂^[4]。图 2 为建筑物破坏的不同形态; 图 3 为建筑物水平变形损害示意图。

2.3 建筑物的破坏等级

目前建筑物的破坏等级通常分为广义破坏和一般破坏两种。前者是根据建筑物功能属性的破坏进行划分的, 属于“质”的界定, 一般分为建筑破坏、功能破坏、结构破坏和倒塌 4 个等级; 后者则是根

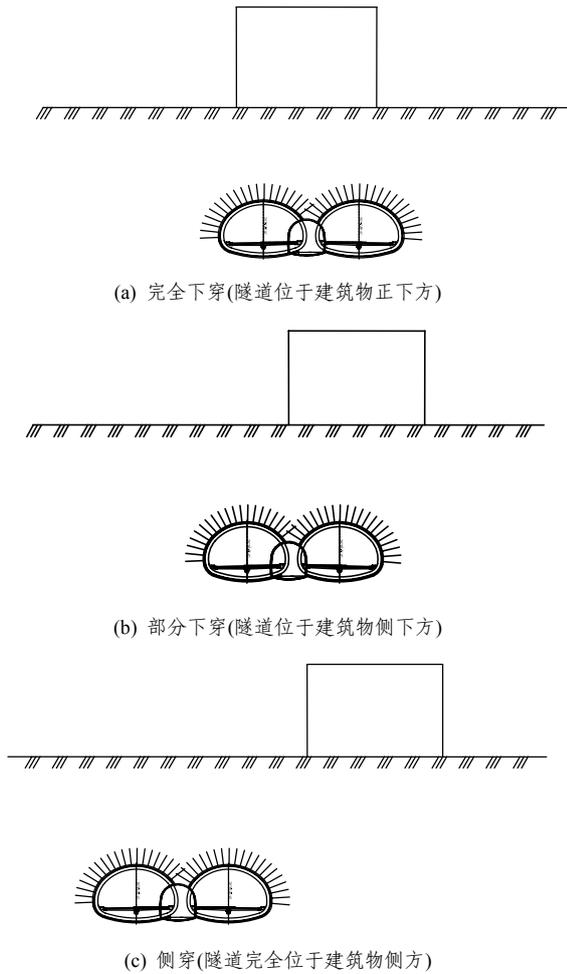


图1 厦门机场路小间距段暗挖隧道穿越建筑物的不同方式
Fig.1 Relative position between small-space tunnel and existing building in Xiamen Airdrome route project

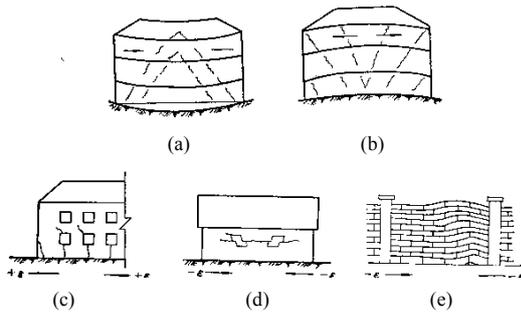


图2 建筑物破坏的不同形态
Fig.2 Different failure types of buildings due to ground deformation

据建筑物破坏的轻重程度进行划分的,属于“量”的界定。我国上海市制订的建筑物破坏等级与破坏特征见表1。

对于砖石结构,我国原煤炭工业部在20世纪60年代参考国外有关规定制定了地下采矿地表构筑物及其他保护对象等级的划分规范(见表2),但

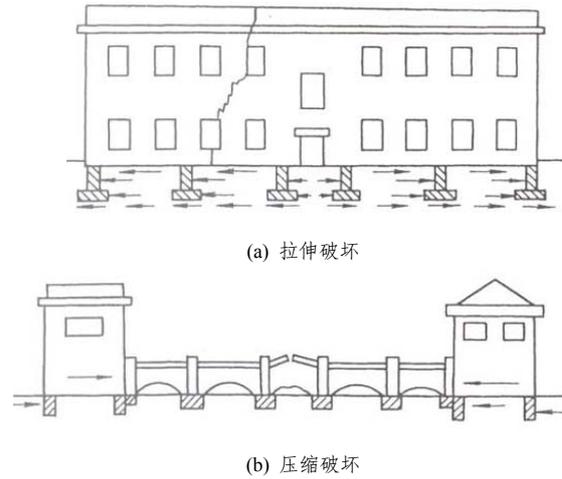


图3 建筑物水平变形损害示意图
Fig.3 Sketch of building horizontal damage

表1 建筑物的破坏等级与破坏特征

建筑物长度 /m	破坏等级	典型破坏描述
<0.03	非常轻微	墙上有头发丝般的细小裂缝
0.03~0.06	轻微	有多条小裂缝,门窗轻微凸出
0.06~0.12	中等	门窗凸出,自来水管可能断开
0.12~0.18	严重	自来水管断开,墙上有张开性裂缝,门窗歪斜,墙倾斜而失去某些支撑,屋顶隆起、砖砌体隆起,出现水平裂缝
>0.18	极严重	损坏如上,但更厉害,需要部分或全部加固,梁鼓起,墙歪斜需支撑,墙和屋顶严重弯曲或隆起

表2 砖石结构建筑物破坏等级

破坏等级	建筑物可能达到的破坏程度	地表变形值			处理方式
		倾斜 / $(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	曲率 / $(10^{-3} \cdot \text{m}^{-1})$	水平变形 / $(\text{mm} \cdot \text{m}^{-1})$	
1	墙壁上不出现或者仅出现少量宽度小于4mm的细微裂缝	≤ 3.0	≤ 0.2	≤ 2.0	不修
2	墙壁上出现4~15mm宽的裂缝,门窗略有歪斜,墙皮局部脱落,梁支撑处稍有异样	≤ 6.0	≤ 0.4	≤ 4.0	小修
3	墙壁上出现16~30mm宽的裂缝,门窗严重变形,墙身倾斜,梁头有抽动现象,室内地面开裂或鼓起	≤ 10.0	≤ 0.6	≤ 6.0	中修
5	墙身严重倾斜、错动、外鼓或内凹,梁头抽动较大,屋顶、墙身挤坏,严重有倒塌危险	> 10.0	> 0.6	> 6.0	大修、重建或拆除

该规范所确定的破坏等级仅适用于长度或者沉降缝区段小于20m的砖石结构建筑物,而对于本工程中大部分建筑物长度在30m以上甚至超过50m,因此该规范仅可视具体情况作为参考。

3 穿越复杂建筑物工程概况及特点

3.1 工程概况

厦门机场路一期工程下穿道浦南暗挖段穿越地表上的复杂建筑物, 左线长 689.686 m, 右线长 685.204 m, 由连拱隧道及小净距隧道组成, 左线连拱隧道长 415.37 m(右线 415.072 m); 小净距隧道长 274.316 m(右线 270.132 m), 设计纵坡为-2.44%。起点接明挖下穿道, 终点与分离式梧村山隧道相连。该路段地形较平缓, 进口段 560 m 以内隧道埋深浅, 为 9~27 m。洞身段围岩以残积亚黏土、砂砾状~碎块状的全~强风化正长岩和花岗岩为主, 地下水埋深 2~4 m。

3.2 工程特点和难点

厦门机场路隧道暗挖穿越复杂建筑物工程具有以下特点:

(1) 隧道浅埋、大跨, 不同地段采用连拱与小间距两种方法进行施工, 连拱开挖跨度最大可达 34 m, 而隧道埋深仅 15~30 m; 小间距段两条隧道间距最大不足 2 m。连拱和小间距隧道都具有施工难度大、技术要求高、施工安全和质量控制难度大的特点, 无疑在很大程度上增大了施工风险。

(2) 周边施工环境复杂: 建筑物集中分布在施工影响范围内, 且大部分隶属于军事管制区, 具有不同于一般建筑物的重要性和特殊性, 对变形控制提出了更高要求。

(3) 地质条件差: 洞身围岩以残积亚黏土、砂砾状~碎块状的全~强风化正长岩和花岗岩为主, 地下水埋深 2~4 m, 对施工安全产生很大不利影响。

由此可见, 厦门机场路一期工程浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物施工, 施工环境安全控制至关重

要, 尤其以既有建筑物的安全控制为工程重点和难点。

4 建筑物调查及分类

总体上, 63 栋建筑物为密集的居民区及军管用, 大多与隧道走向正交或斜交, 楼层为 3~7 层, 基础多为扩大条形基础或独立基础, 主体结构以砖混结构为主。进一步从基础形式、结构类型、层数高度等方面进行详细分类, 以方便后续评估工作。

(1) 基础形式、结构类型分类

据现有基础资料(不完整)将基础类型大致分为: 砖混/毛石、条石、毛石混凝土/素混凝土、钢筋混凝土和桩基础, 见表 3。建筑物结构型式包括砖(石)混结构、混凝土结构、框架结构和钢筋混凝土排架结构, 见表 4。图 4 为下穿道浦南暗挖段沿隧道走向地表建筑物分布示意图, 图中黑线为隧道结构线。

表 3 基础型式分类及数量

Table 3 Classification of foundation types and numbers

基础型式	砖混/毛石	条石	毛石混凝土/素混凝土	钢筋混凝土	桩
数量	12	2	0	29	1

表 4 结构类型分类及数量

Table 4 Classification of structures and numbers

结构类型	砖(石)混	混凝土	框架	钢筋混凝土排架
数量	31	29	3	0

(2) 层数、高度分类

根据《住宅设计规范》, 民用建筑高度与层数的



图 4 下穿道浦南暗挖段地表建筑物分布平面图

Fig.4 Plan view of surface buildings along Punan shallow-buried tunnel

划分为：1~3 层为低层住宅，高度不超过 10 m；4~6 层为多层住宅，高度为 10~24 m；7~10 层为中高层住宅(也称小高层住宅)；11~30 层为高层住宅；30 层(不包括 30 层)以上为超高层住宅。评估范围内的 63 栋建筑物多数为低层和多层建筑物，仅少数为小高层。

(3) 完损状态调查

根据有关标准和厦门市房屋安全鉴定所提供的勘查报告，建筑物的完损状态分为完好房、基本完好房、一般损坏房、严重损坏房和危险房 5 类，表中可见大部分建筑物已处于不同程度的损坏状态。

另外，从建筑物的重要性质角度考虑，对重要建筑物发生破坏的限制更加严格，如部分军区所属建筑物的破坏必须控制在仅允许出现建筑破坏的范围内，对其他次要建筑物可适当降低控制要求。

5 建筑物安全风险分析及评估

5.1 模糊综合评判法

模糊综合评判法是一种从多目标决策中划分出来的新的数学方法，当影响事物的因素较多，又有很强的模糊性时，尤其具有明显的优势^[5]。

隧道施工影响下建筑物的安全风险研究是一项复杂的系统问题，不仅表现在建筑物抵抗外界影响能力的评估、地层条件及其变位形态的预测等方面，还表现在施工中各种影响因素因工程特点、施工技术条件等实际情况而不同等方面。

影响建筑物风险大小的因素是多方面的，且各因素的影响程度也不同，某些评判指标的选取和划分界限又具有很大的模糊性，很难做出经典数学模型加以统一量度。因此，对于此类具有模糊性的事件，有必要采用模糊数学的方法，把众多工程资料、判断及各种定性描述转化为模糊语言，对建筑物受隧道施工影响的风险大小进行综合识别和判断^[6]。

5.2 风险作用因素分析

风险作用因素主要体现在建筑物自身状况、隧道工程条件及其对建筑物的影响程度等方面。

(1) 建筑物现状

建筑物的安全现状是从建筑物的基础和结构形式、层数高度、修建年代、材质以及质量状况、完好状态等方面对建筑物进行综合评价的结果，反映了建筑物对附加影响的反应敏感程度及承受能力。表 5 归纳了不同建筑物的完损状态等级。

表 5 建筑物现状完损状态
Table 5 Current damage condition of building

完损等级	状态描述	总数
完好	承重构件和非承重构件平直牢固，无倾斜变形、裂缝、松动、腐朽、蛀蚀现象	0
基本完好	承重构件和非承重构件有少量细裂缝和损坏现象，主体结构基本牢固	31
一般损坏	承重构件和非承重构件局部产生裂缝，有较多损坏现象，主体结构强度已有所减弱	29
严重损坏	承重构件和非承重构件有明显损坏，且强度不足	3
危房	承重的主要结构严重损坏，影响正常使用，不能确保住用安全的建筑物	0

(2) 建筑物与隧道位置关系

建筑物与隧道的位置关系主要考虑二者的邻近程度，决定了建筑物受隧道开挖影响的大小。结合工程条件，平面上反映为二者的近接距离，纵断面上则反映为隧道穿越建筑物的方式及建筑物基础下的隧道埋深。在分析建筑物受隧道开挖影响的破坏时，通常考虑的是平面上建筑物与隧道轴线正交或近似正交的情况。若二者斜交或建筑物本身形状不规则，则建筑物可能受到扭曲变形的影响而发生歪斜，当隧道轴线穿过建筑拐角附近时，这些影响会更加明显。对于近似与隧道轴线平行且长度较长(如 20 m 以上)的建筑物，分析认为可能因隧道穿越施工时的时间差异而引起两端出现差异沉降。上述特点在风险分析时应加以重视。

① 平面邻近关系。显然，隧道开挖向外传播的影响随距离增大而逐渐衰减，从而建筑物距隧道越远，受到的影响越小。本文针对实际工程情况，以隧道结构外缘 50 m 的建筑红线和双线隧道结构边缘为界，将平面邻近程度划分为“极邻近、邻近、较邻近、非邻近”4 个等级，见表 6。

表 6 建筑物与暗挖隧道平面关系
Table 6 Relative plane position of buildings and tunnel

平面邻近程度	划分标准	总数
极邻近	建筑物结构横跨双线隧道中线，或建筑物完全位于双线隧道之间	26
邻近	建筑物结构一部分位于隧道边沿之外，且未跨越双线隧道中线	7
较邻近	建筑物结构位于隧道结构边沿之外，但主要或全部位于 50 m 线之内	19
非邻近	建筑物结构主要或全部位于 50 m 线之外	11

② 隧道埋深。本工程隧道设计纵坡为-2.44%，埋深沿里程逐渐增加，建筑物基本分布在埋深 10~30 m 范围内。

③ 建筑物走向。绝大多数建筑物均可近似认为与隧道正交，仅个别与隧道明显斜交，另有 5 栋建筑物坐落方向近似与隧道轴线平行且长度均在 20 m 以上。

(3) 地层条件

作为隧道开挖影响的传播介质，地层条件的好坏很大程度上决定着建筑物受影响的范围和大小，良好的地层条件更有利于降低建筑物的安全风险。本工程的围岩从 II~VI 级均有不同分布，见表 7。

表 7 建筑物所处地层条件

Table 7 Strata condition under building foundation

II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级
14	0	23	15	11

(4) 其他因素

除上述主要因素影响外，其他因素如隧道施工方法、施工技术及条件等也在一定程度上影响着建筑物的风险大小。

5.3 风险分级和评判要素的选取

参考现行应用较多的分级办法^[7~9]，考虑到本工程中涉及建筑物数量较多、且风险较大等特点，为满足工程需要，将建筑物的风险划分为很大、较大、一般、较小、很小 5 个等级，分别用 I, II, III, IV 和 V 级表示。

评判要素选取的合理与否，直接影响到建筑物风险分析和等级判别的可靠程度。建筑物风险评估应综合考虑各种因素，遵循重要性、独立性和易测性的原则，同时针对本工程实际特点，结合相关经验，最终选取 9 个主要作用因素，即建筑物完损现状(考虑建造历史及重要程度)，基础类型，结构形式，长高比；建筑物与隧道平面上位置关系(包括二者平面距离及走向交角)；地层条件(主要依据围岩等级)；建筑物下隧道埋深，隧道施工方法，施工条件(如施工技术水平、外界环境因素及工期影响等)，见表 8。

5.4 隶属函数和权重的确定

从表 8 可以看到，所取因素指标有定量指标和定性指标两种，且以定性指标居多(见表 9)。对于定量指标，可通过合理选取隶属函数确定其对不同评判级别的隶属度，而将定性指标转化为定量指标正是模糊数学的特长^[10]。

表 8 作用因素及评判等级表

Table 8 Grades of affecting factors and evaluation

建筑物安全风险等级	建筑物自身状况				隧道工程条件及其影响				
	完损现状	基础类型	结构形式	长/高	与建筑物平面上位置关系	地层条件	隧道埋深/m	施工方法	施工技术条件
1	很不利	很不利	很不利	>3.5	很不利	很不利	<10.0	很不利	很不利
2	不利	不利	不利	3.0~3.5	不利	不利	10.0~15.0	不利	不利
3	一般	一般	一般	2.5~3.0	一般	一般	15.0~20.0	一般	一般
4	有利	有利	有利	2.0~2.5	有利	有利	20.0~30.0	有利	有利
5	很有利	很有利	很有利	<2.0	很有利	很有利	>30.0	很有利	很有利

表 9 定性影响因素分类

Table 9 Classification of qualitative affecting factors

作用因素	很不利(A)	不利(B)	一般(C)	有利(D)	很有利(E)
完损现状	危险房	严重损坏	一般损坏	基本完好	完好
基础类型	砖混/毛石	条石	毛石混凝土/素混凝土	钢筋混凝土	桩
结构形式	砖/石混	混凝土(基础较差)	混凝土(基础较好)	框架/排架	钢筋混凝土
建筑物与隧道平面上位置关系	极邻近	邻近	较邻近	II~III级	非邻近
地层条件	VI级围岩	V级围岩	IV级围岩	III级围岩	II级围岩
隧道施工方法	隧道施工方法不合理，不利于保持围岩稳定及控制变形，断面形状及其受力条件很差，在洞室周边出现很大的应力集中	I~III级围岩	隧道施工方法较合理，断面形状及其受力条件较合理，出现局部应力集中	III~V级围岩	隧道施工方法合理，有利于保持围岩稳定及控制变形，断面形状及其受力条件合理，无过大的应力集中
施工技术条件	施工技术水平不高，开挖方式不合理或多次重复爆破，岩体暴露时间很长，工期过于紧张，外界环境恶劣，不利于施工	I~III级围岩	施工技术水平一般，开挖施工方式较合理，爆破影响较大，岩体暴露时间长，工期较紧张，外界环境一般	III~V级围岩	施工技术水平较高，开挖方式适当，爆破效果好，岩体暴露时间短，无过高的工期要求，且外界环境很有利于施工

为了在一定程度上避免折线具有固定斜率的欠缺，本文采用岭形隶属函数^[11, 12]描述定量指标，即

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & (1 \leq x < a_1) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_2 + a_1}{2} \right) & (a_1 \leq x < a_2) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} \left(x - \frac{a_3 + a_2}{2} \right) & (a_2 \leq x < a_3) \\ 0 & (a_3 \leq x) \end{cases} \quad (1)$$

以定量指标隧道埋深为例，将其隶属函数（建筑物长高比隶属函数可类似确定，本文略）表示为

$$\mu_I(x) = \begin{cases} 1 & (x < 10) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2} (x - 11) & (10 \leq x \leq 12) \\ 0 & (x > 12) \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{II}(x) = \begin{cases} 0 & (x < 10) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2} (x - 11) & (10 \leq x < 12) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{6} (x - 15) & (12 \leq x \leq 18) \\ 0 & (x \geq 18) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{III}(x) = \begin{cases} 0 & (x < 12) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{6} (x - 15) & (12 \leq x < 18) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{7} (x - 21.5) & (18 \leq x < 25) \\ 0 & (x \geq 25) \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & (x < 18) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{7} (x - 21.5) & (18 \leq x < 25) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{5} (x - 27.5) & (25 \leq x < 30) \\ 0 & (x \geq 30) \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_V(x) = \begin{cases} 0 & (x < 25) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{5} (x - 27.5) & (25 \leq x < 30) \\ 1 & (x \geq 30) \end{cases} \quad (6)$$

对于定性的指标，本文按一定准则进行量化处理。经分析后采用分级法评定其模糊矩阵，即将因素分成 5 个等级：优(0.9)、良(0.7)、中(0.5)、差(0.3)及劣(0.1)，并按赋值标准给出评定值，采用梯形隶

属函数，最终构建隶属函数为

$$\mu_I(x) = \begin{cases} 1 & (x < 0.15) \\ 2.5 - 10x & (0.15 \leq x \leq 0.25) \\ 0 & (x > 0.25) \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{II}(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.15) \\ 10x - 1.5 & (0.15 < x \leq 0.25) \\ 1 & (0.25 < x \leq 0.35) \\ 4.5 - 10x & (0.35 < x \leq 0.45) \\ 0 & (x > 0.45) \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{III}(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.35) \\ 10x - 3.5 & (0.35 < x \leq 0.45) \\ 1 & (0.45 < x \leq 0.55) \\ 6.5 - 10x & (0.55 < x \leq 0.65) \\ 0 & (x > 0.65) \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.55) \\ 10x - 5.5 & (0.55 < x \leq 0.65) \\ 1 & (0.65 < x \leq 0.75) \\ 8.5 - 10x & (0.75 < x \leq 0.85) \\ 0 & (x > 0.85) \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_V(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.75) \\ 10x - 7.5 & (0.75 < x \leq 0.85) \\ 1 & (x > 0.85) \end{cases} \quad (11)$$

鉴于该评判系统具有多因素的复杂性，故需考虑各因素对评定等级的影响程度，即分别赋予不同权重： $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ ，其中： α_i 为论域 U 集中第 i 个因素 U_i 所对应的权， $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ，且 $\sum \alpha_i = 1$ 。依据现有工程经验及本工程实际特点，权值的选取见表 10。

表 10 各因素对应的权值
Table 10 Weight values of affecting factors

名称	序号	作用因素	权重分配
建筑物自身状况	1	完损现状	0.150
	2	基础类型	0.165
	3	结构形式	0.125
	4	长/高(L/H)	0.060
	5	与建筑物平面上位置关系	0.225
	6	地层条件	0.100
隧道工程条件及其影响	7	隧道埋深	0.010
	8	施工方法	0.125
	9	施工技术条件	0.040

5.5 评判模型

根据表 8 所示的 2 大类因素和 5 个等级, 可得到因素论域^[13~18]为

$$U = \{u_1, u_2\} \quad (12)$$

式中: u_1 代表建筑物本体因素, 包括 4 个子因素; u_2 为隧道工程条件因素, 包括 5 个子因素。

评判集即等级论域为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{I, II, III, IV, V\} \quad (13)$$

相应的模糊子集为 $\tilde{R}_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}\}$,

从而组成模糊矩阵为

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{91} & \cdots & \mu_{95} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: μ_{ij} 为第 i 项因素指标对第 j 等级的隶属度。

将权重向量带入, 进行一级模糊综合评判:

$\tilde{B} = \tilde{A} \circ \tilde{R}$, 最终得到评价集 V 的模糊子集 $\tilde{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_5\}$, 根据最大隶属原则, 取分向量中最大值对应位置在 V 中的位置作为建筑物风险的评判等级。

5.6 应用实例

以位于东浦路 194[#]~200[#]辖区内的 34[#]楼为例, 对其进行隧道暗挖施工安全风险的模糊综合评判。该建筑物产权归属于 31 军部队家属区, 为 6 层混凝土结构, 1994 年建造, 基础为浆砌整毛石, 长度 55.8 m, 高度 17.2 m, 完损现状鉴定结果为情况较严重的一般损坏(屋面檐口处外挑柱保护层剥落、露筋); 在平面上近似正交于与双线隧道结构, 基础下地层为 VI 级围岩, 隧道埋深 15 m, 设计拟采用 CRD 法施工。

根据评判等级可表示为评判矩阵, 其具体的评判矩阵为

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

进行一级模糊综合评判并作归一化处理, 所得评价集为: $\tilde{B} = \{0.429, 0.286, 0.285, 0, 0\}$ 。按最大隶属度原则, 可知建筑物 34[#]楼安全风险等级为一级, 即认为施工中“建筑物承受风险很大”。类似地, 可采用上述评判方法体系对其余建筑物的安全风险进行分析、评估和分级, 最终将 63 栋建筑物大体上划分为如表 11 所示的风险等级。值得注意的是, 每栋建筑物因其个体差异可能在具体细节操作上存在某些不同。经评估后认为, 该建筑物群总体上风险较大, 将其中的 10 栋建筑物作为一级风险点进行控制。

表 11 建筑物的安全风险分级
Table 11 Safety risk rating of buildings

风险分级	状态简述	总数
I	建筑物承受风险很大	10
II	建筑物承受风险较大	19
III	建筑物承受风险一般	10
IV	建筑物承受风险较小	12
V	建筑物承受风险很小	12

6 结 论

本文在工程现有勘察资料基础上, 对复杂地表建筑物进行了统计和分类, 引入模糊综合评判法对各个建筑物的安全风险进行了分析评估, 而后进行分级, 所得结果已作为重要组成部分纳入厦门机场路一期工程穿越密集建筑物段的前期研究报告中, 并已开始指导现场施工。

(1) 研究表明: 采用模糊综合评判法对受多种因素影响的事物进行评价, 突破了单一指标的局限性和片面性, 可较好地解决复杂的工程实际问题, 具有普遍适用性。

(2) 在具体应用时须充分考虑工程特点, 尤其是建筑物分布及自身状况、隧道工程条件及其施工影响程度的预测等, 相应地, 其中个别作用因素的分类界定标准、权重分配等可做适当调整, 以最大限度符合实际工程情况, 从而有效发挥该评判方法的可靠性和实用性。

(3) 对于本工程而言, 建筑物的相关资料不够完善, 给评估工作带来了诸多不便, 因此在今后实际工程中, 要尽可能充分全面地搜集完备的勘察资料, 从而有利于建筑物现状评估和风险分级的进一步细化和明确, 提高工程实际可操作性。

参考文献(References):

- [1] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 13 - 20.(HUANG Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13 - 20.(in Chinese))
- [2] 吴波. 复杂条件下城市地铁隧道施工地表沉降研究[博士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2003.(WU Bo. Study on ground subsidence induced by urban subway tunneling on complicated conditions[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.(in Chinese))
- [3] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.(GU Xiaolu, QIAN Jinhong, LIU Huishan, et al. Ground soil and foundation[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003.(in Chinese))
- [4] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(YANG Junsheng, LIU Baochen. Ground movement and deformation induced by urban tunnel construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [5] 许传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 852 - 1 855.(XU Chuanhua, REN Qingwen. Fuzzy-synthetic evaluation on stability of surrounding rock masses of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 852 - 1 855.(in Chinese))
- [6] 楼世博, 张爱云, 李秋水, 等. 模糊数学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.(LOU Shibao, ZHANG Aiyun, LI Qiushui, et al. Fuzzy mathematics[M]. Beijing: Science Press, 1983.(in Chinese))
- [7] STUZK R, OLSSON L, JOHANSSON J. Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the Stockholm ring road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 157 - 164.
- [8] 陈龙. 城市软土盾构隧道施工期风险分析与评估研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2004.(CHEN Long. Risk analysis and assessment during construction of soft soil shield tunnel in urban area[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2004.(in Chinese))
- [9] 毛儒. 有效的风险管理[J]. 都市轨道交通, 2004, 17(3): 4 - 7.(MAO Ru. The effective risk management[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2004, 17(3): 4 - 7.(in Chinese))
- [10] 原国红, 陈剑平, 马琳. 可拓评判方法在岩体质量分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 539 - 1 544.(YUAN Guohong, CHEN Jianping, MA Lin. Application of extenics in evaluating of engineering quality of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 539 - 1 544.(in Chinese))
- [11] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科技出版社, 1981.(HE Zhongxiong. Fuzzy mathematics and its application[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1981.(in Chinese))
- [12] 赵晓冬, 赵静一. 模糊思维与广义设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.(ZHAO Xiaodong, ZHAO Jingyi. Fuzzy thought and generalized design[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.(in Chinese))
- [13] 陈守煜. 模糊最优归类理论模型及其在围岩稳定性分类与场地土类别评定中的应用[J]. 水利学报, 1993, (12): 26 - 36.(CHEN Shouyu. The application of blur theory to surrounding rock stability and field class of soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, (12): 26 - 36.(in Chinese))
- [14] 王之汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493 - 501.(WANG Zhihan, LI Wodong, LI Qiguang, et al. Fuzzy mathematics synthetical evaluation method in rock burst forecast[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493 - 501.(in Chinese))
- [15] 刘端伶, 谭国焕, 李启光, 等. 岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 170 - 175.(LIU Duanling, THAM L G, LEE P K K, et al. The stability of rock slope and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 170 - 175.(in Chinese))
- [16] 郑明新, 殷宗泽, 吴继敏, 等. 滑坡防治工程效果的模糊综合后评价研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1 224 - 1 229.(ZHENG Mingxin, YIN Zongze, WU Jimin, et al. Post-fuzzy comprehensive evaluation of effectiveness of landslide control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1 224 - 1 229.(in Chinese))
- [17] 张淑娜, 孙韧. 模糊数学法在环境质量评价中的应用——以天津滨海新区为例[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(2): 141 - 142.(ZHANG Shuna, SUN Ren. Application of environment quality evaluation with fuzzy mathematics method—case study of Binhai New District in Tianjin[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(2): 141 - 142.(in Chinese))
- [18] 刘春, 白世伟. 岩体风化程度两级模糊综合评判研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 252 - 256.(LIU Chun, BAI Shiwei. Fuzzy mathematics method for analysis of the weathering degree of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 252 - 256.(in Chinese))