

膨胀土矿山法地铁隧道下穿既有车站的 施工风险定量评估*

施有志¹, 林联泉², 车爱兰³, 秦佳佳⁴

1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024
2. 厦门市建设工程质量安全监督站, 福建 厦门 361003
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240
4. 中铁二十四局集团安徽工程有限公司, 安徽 合肥 230011

摘要: 以合肥地铁 5 号线下穿既有车站隧道工程作为研究对象, 考虑膨胀土的胀缩性及裂隙性等特性和现场施工方案, 构建了以“上覆地铁车站变形破坏”为顶上事件的风险评价模型; 并确定了顶上事件发生的模糊概率和各影响因素的重要度, 然后利用模糊层次分析法对上覆地铁车站的破坏风险进行了综合评价和风险等级评定。研究表明, 文章建立了一套完整的下穿既有地铁车站的施工风险定量评估体系, 可为类似工程提供参考。

关键词: 膨胀土; 下穿隧道; 风险评估; 模糊层次分析法

中图分类号: U459.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 02-0131-09

Quantitative evaluation of construction risk of expansive soil tunnel under existing subway station

SHI Youzhi¹, LIN Lianquan², CHE Ailan³, QIN Jiajia⁴

1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China
2. Xiamen City Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Xiamen 361003, China
3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
4. China Railway 24th Bureau Group Anhui Engineering Co. Ltd., Hefei 230011, China

Abstract: Taking the tunnel under the station of Hefei Metro Line 5 as object, considering the characteristics of expansive soil, such as dilatancy, crevice and et al, and the construction scheme on site, a risk assessment model based on “overlying metro station deformation and failure” as the top event is builded. The probability of incident and the importance of influencing factors are determined. Then, the risk of damage to the overlying metro station is evaluated and risk lever is rated by the fuzzy AHP method. The results show that this paper provides a complete quantitative evaluation system for the construction risk assessment of underpass of an existing subway station.

Key words: expansive soil; underpass; risk assessment; fuzzy AHP method

地铁工程因其地理位置特殊、地下作业多、涉及工程专业多等特殊性质, 导致建设过程中的不确定因素较多, 安全风险大^[1]。随着地铁建设规

模的大力发展, 新建地铁线路穿越既有地铁结构或轨道线路已不可避免^[2]。当新线近距离穿越既有线或车站时, 必然对既有结构产生扰动, 影响

* 收稿日期: 2020-03-08

录用日期: 2020-04-20

网络首发日期: 2021-05-21

基金项目: 厦门市科技计划项目 (3502Z20183043); 厦门市建设局科技项目 (XJK-2019-01-04)

作者简介: 施有志 (1976 年生), 男; 研究方向: 岩土与地下工程; E-mail: 2013110907@xmut.edu.cn

隧道施工及上覆既有车站运营的安全^[3-4]。此类地铁建设存在极大的风险,一旦引发安全事故,后果不堪设想^[5-6]。国内已有不少学者对近距离下穿隧道的风险评估展开了研究。吴涛等^[7]以青岛地铁3号线为例,结合地铁下穿的20栋建筑物现场检测鉴定结果,采用模糊综合评判法,评价不同程度的建筑物风险,并划分出风险等级;何梦超等^[8]以福州地铁1号线盾构隧道为案例背景,通过模糊故障树分析提出了基于模糊故障树的盾构隧道下穿既有轨道事故风险评估方法;贾剑青等^[9]依托兰州轨道交通1号线工程,考虑机械、人工操作、环境等风险,建立了下穿黄河隧道盾构施工的风险指标体系,采用层次分析法及多级模糊综合评价法,对施工风险进行了评价研究。但未见涉及下穿既有地铁车站隧道的工程案例。城市地铁下穿隧道施工条件本身就已比较复杂,如遇到膨胀土这样具有显著胀缩性,且干湿过程具有可逆性的多裂隙地质体,很可能引起隧道底部隆起、围岩开裂、支护结构变形破坏、围岩膨胀坍塌等危害^[10-11]。目前关于膨胀土地层路基^[12]、边坡^[13]、基坑^[14]施工的研究很多,也有部分学者对膨胀土隧道展开研究^[15-16],但未见关于穿越膨胀土地层,且近距离下穿既有地铁车站隧道的施工风险评估的报道。

本文以合肥市轨道交通5号线某区间隧道下穿既有地铁车站暗挖段工程为对象,构建故障树;然后,采用三角模糊函数来表征底事件的发生概率,计算出顶事件发生的概率、基本事件的重要度;最后,建立因素集和评价集,通过模糊层次分析法确定因素权重,专家打分法确定隶属度,并对上覆地铁车站破坏风险进行模糊综合评价,风险等级评定。

1 工程概况

合肥市轨道交通5号线云谷路站-华山站下穿既有车站暗挖段的隧道采用矿山法施工,右线里程为K5+172.307-K5+215.207 m,长42.9 m;左线里程为K5+172.307-K5+226.207 m,长53.9 m。区间左右线间距16 m,标准段外皮净间距7.8 m。因隧道主体结构拱顶最小覆土仅1.988 m,下穿既有结构施工必然对既有结构产生扰动,甚至引起上覆既有地铁车站变形破坏。暗挖段与既有1号线车站关系图,如图1所示。

此外,该区间穿越的黏土层具有弱膨胀潜势,

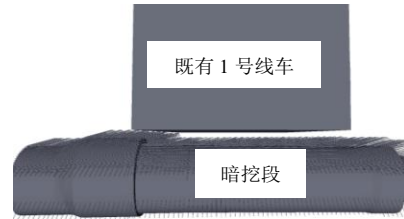


图1 暗挖段与既有1号线车站关系图

Fig. 1 The relationship between the dug section and the existing line 1 station

表现出显著的吸水膨胀和失水收缩变形性能。地下水类型主要为上层滞水,水位埋深为0.60~3.90 m。在暗挖区间隧道施工过程中,地表水容易顺着原基坑围护桩或车站外墙渗入地层中,引起隧道变形过大甚至坍塌,进而影响上覆车站的安全。

2 故障树的建立

以“上覆地铁车站变形破坏”为顶上事件,将造成上覆地铁车站变形破坏的因素分为下穿隧道因素、地质因素和上覆车站自身因素,见图2。

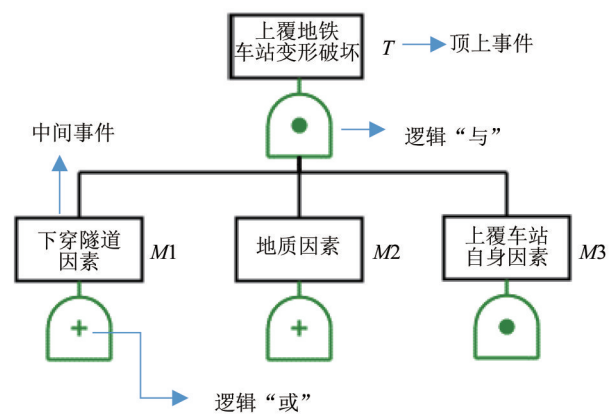


图2 上覆车站变形破坏的安全风险故障树

Fig. 2 Safety risk fault tree for deformation and failure of overlying station

2.1 下穿隧道因素

下穿隧道因素的风险故障树如图3所示。其破坏因素分为2个大类:超前支护加固和隧道变形。

2.1.1 超前支护加固 超前支护的注浆压力较难控制,当注浆压力过大时会引起土体隆起,导致上覆车站局部应力过大而变形。当大管棚或超前小导管打设角度过大,直接打入了上覆车站,将会使得上覆车站出现结构损失。而超前支护注浆加固强度不足时,还可能引起上覆车站沉降变形。

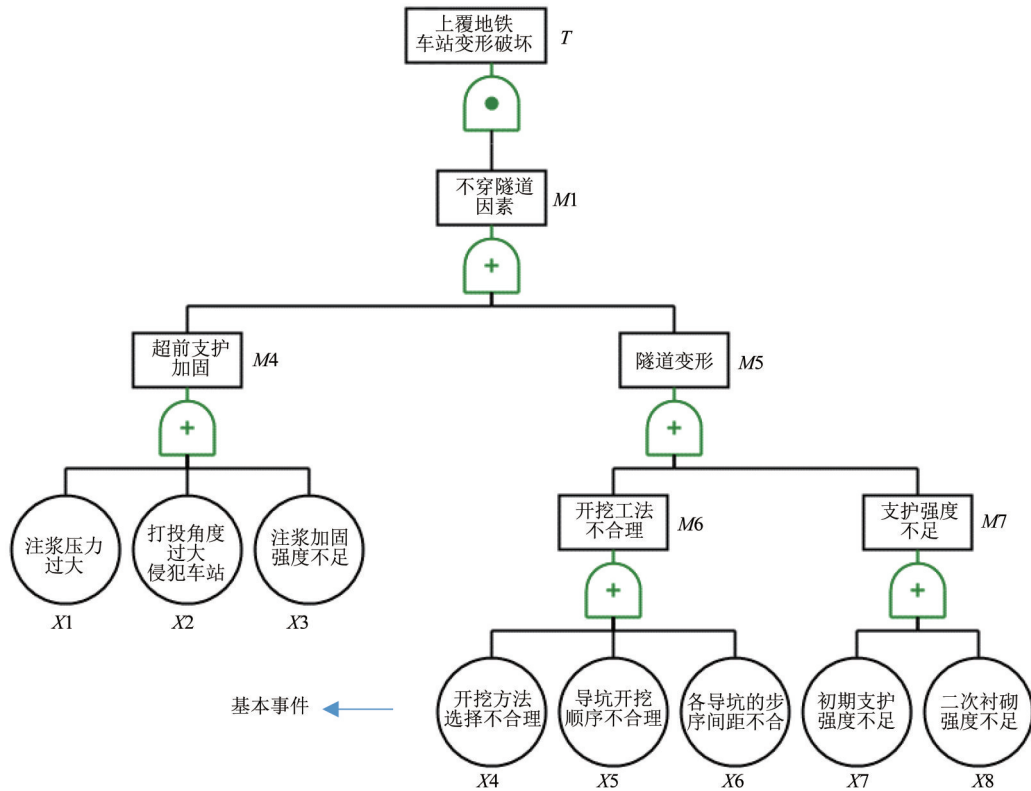


图3 下穿隧道因素子系统安全风险故障树

Fig. 3 Safety risk fault tree of factor subsystem of underpass tunnel

因此, 超前支护加固的基本事件为注浆压力过大、打设角度过大侵犯上覆车站、注浆加固强度不足。

2.1.2 隧道变形 开挖方法、导坑开挖顺序或各导坑的步序间距不合理, 都会引起隧道变形过大。而隧道施工过程中初期支护和二次衬砌的强度不足时, 也会导致隧道塌方、上覆车站变形。因此, 隧道变形的基本事件为开挖工法不合理、支护强度不足。

2.2 地质因素

地质因素包括不良土质影响和地下水位影响。不良土质影响主要包括膨胀土、湿陷性土、软土及其他不良地质。膨胀土吸水膨胀、失水干缩, 具有显著胀缩性。在微量渗水条件下, 膨胀土会发生轻微松动, 进而影响上覆车站的耐久性; 在大量渗水条件下, 膨胀土会完全松动, 失去强度, 导致隧道塌方。大量渗水一般只发生在施工阶段, 而微量渗水不仅发生于施工阶段, 运营阶段也有可能发生。

地下水位下降会引起土体固结沉降, 进而导致上覆车站沉降。地下水位上升会引起土层强度下降, 可能导致隧道塌方从而影响上覆车站稳定。地质因素的风险故障树如图4所示。

2.3 上覆车站自身因素

完损现状差和地表水渗水通道是上覆车站自身的破坏因素。我国《城市轨道交通设施养护维修技术规范》^[17]将车站结构状态总体技术评定结果分为1~5级。地铁车站在运营中很有可能会出现结构裂缝和沉降变形。而地表水会通过车站的结构(桩或墙体外侧)渗入车站下方, 形成渗水通道, 导致下面土层增湿。因此, 上覆车站自身因素的风险故障树如图5所示。

2.4 最小割集

通过“下行法”对故障树进行遍历得出224个割集, 均为四阶割集。最小割集的逻辑运算为

$$T = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3, \tag{1}$$

其中

$$\begin{aligned} M_1 &= M_4 + M_5 \\ &= X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8, \\ M_2 &= M_8 + M_9 \\ &= X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15}, \\ M_3 &= M_{11} \cdot M_{12} = (X_{16} + X_{17})(X_{18} + X_{19}). \end{aligned} \tag{2}$$

3 顶事件的概率及底事件的重要度

3.1 底事件发生概率

采用三角模糊数表征基本事件发生的概率

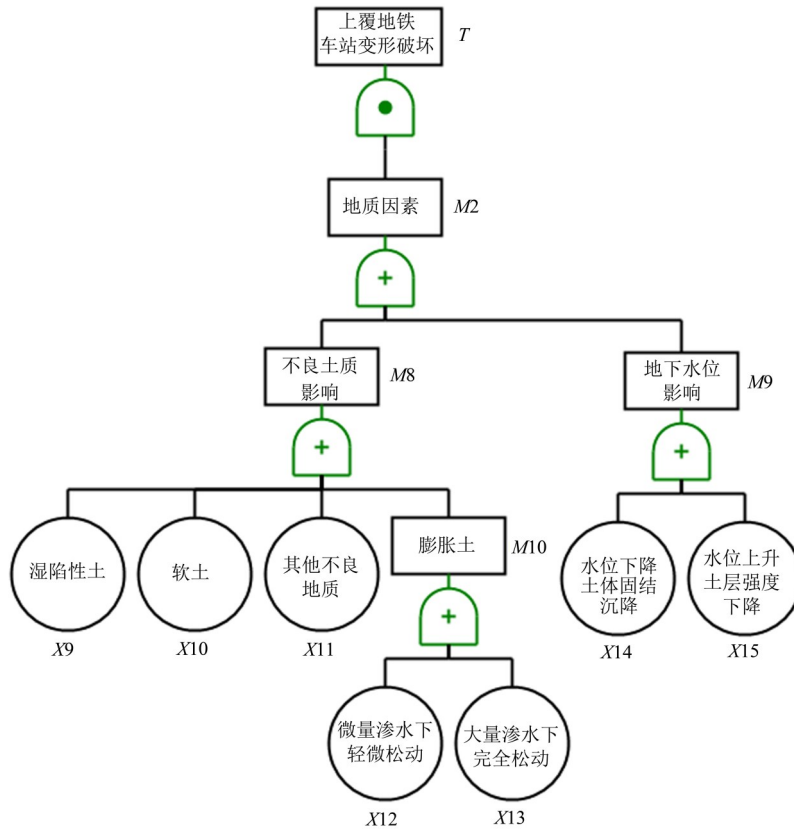


图 4 地质因素子系统安全风险故障树

Fig. 4 Safety risk fault tree of geological factor subsystem

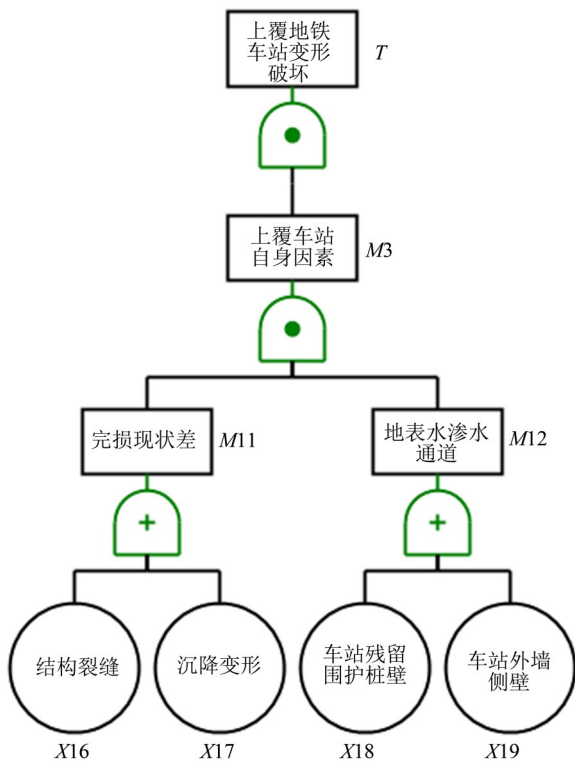


图 5 上覆车站自身因素子系统安全风险故障树

Fig. 5 Safety risk fault tree of subsystem with its own factors of overlying station

(α, m, β), 如表 1 所示。首先确定各底事件中值 m , α 和 β 为 m 的左右扩展值。在下穿隧道施工过程中, 注浆压力过大、打设角度过大侵犯车站、各导坑的步序间距不合理等事件发生的风险大, 因此取高值; 二次衬砌强度不足的风险最低, 取值最小。在地质因素的基本事件中, 由于本次研究只涉及膨胀土, 因此 X9~X11 的发生概率为 0。

3.2 顶事件发生概率

根据模糊数区间运算法则求得顶事件发生概率^[18-19], 可近似表示为 (0.134%, 0.988%, 3.690%)。顶事件故障树见图 6。

3.3 底事件的重要度分析

顶事件故障树的重要度排序为

$$\begin{aligned}
 I(X19) &= I(X18) = I(X17) \\
 &= I(X16) > I(X15) = I(X19) = I(X18) \\
 &= I(X17) = I(X16) > I(X15) = I(X14) \\
 &= I(X13) = I(X12) = I(X11) = I(X10) \\
 &= I(X9) > I(X8) = I(X7) = I(X6) = I(X5) \\
 &= I(X4) = I(X3) = I(X2) = I(X1).
 \end{aligned}$$

底事件的重要度见表 2。在所有底事件中, 上覆地铁车站的结构裂缝对顶上事件的影响最为显著。在下穿隧道因素中, 注浆压力过大、打设角

表 1 底事件发生概率

Table 1		Probability of occurrence of bottom event		
编号	基本事件名称	α	m	β
下穿 隧道 因素	X1 注浆压力过大	0.15	0.2	0.3
	X2 打设角度过大侵犯车站	0.15	0.2	0.3
	X3 注浆加固强度不足	0.05	0.1	0.15
	X4 开挖方法选择不合理	0.05	0.1	0.15
	X5 导坑开挖顺序不合理	0.05	0.1	0.15
	X6 各导坑的步序间距不合理	0.15	0.2	0.3
	X7 初期支护强度不足	0.05	0.1	0.15
	X8 二次衬砌强度不足	0	0.01	0.02
地质 因素	X9 湿陷性土	0	0	0
	X10 软土	0	0	0
	X11 其他不良地质	0	0	0
	X12 微量渗水下膨胀土轻微松动	0.05	0.1	0.15
	X13 大量渗水下膨胀土完全松动	0	0.01	0.02
	X14 水位下降土体固结沉降	0.05	0.1	0.15
	X15 水位上升土层强度下降	0.05	0.1	0.15
上覆 车站 自身 因素	X16 结构裂缝	0.15	0.2	0.3
	X17 沉降变形	0.05	0.1	0.15
	X18 车站残留围护桩壁	0.05	0.1	0.15
	X19 车站外墙侧壁	0.05	0.1	0.15

度过大侵犯车站和各导坑的步序间距不合理影响最明显; 在地质因素中, 微量渗水下膨胀土轻微

松动、水位下降土体固结沉降和水位上升土层强度下降对顶事件的影响最明显。

4 上覆车站安全风险评估

4.1 模糊层次综合评估

4.1.1 建立因素集 参考规范 [20], “上覆地铁车站变形破坏”事件的后果评价因素为

$$U = \{u_1, u_2, u_3\}$$

= {直接经济损失, 人员伤亡, 工期损失}.

4.1.2 建立评价集 事件后果分为 5 个等级, 即

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

= {灾难性, 非常严重, 严重, 需考虑的, 可忽略}

4.1.3 建立等级评价矩阵 由 10 名经验丰富的专家参加评估, 评估结果如表 3 所示。最终得到的等级评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix}$$

4.1.4 一级模糊综合评价 设 $u_{ij} = (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 个因素第 j 个等级, 相应的权重为 a_{ij} , 则对于 u_i 的等级权重集为

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}). \quad (3)$$

a_{ij} 归一化后得

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} = 1. \quad (4)$$

实际运算中取 A_i 与 u_i 等同, 得到一级模糊矩阵

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11}, \dots, b_{1k} \\ \vdots \\ b_{n1}, \dots, b_{nk} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

4.1.5 建立因素权重集 先构造两两比较判断矩

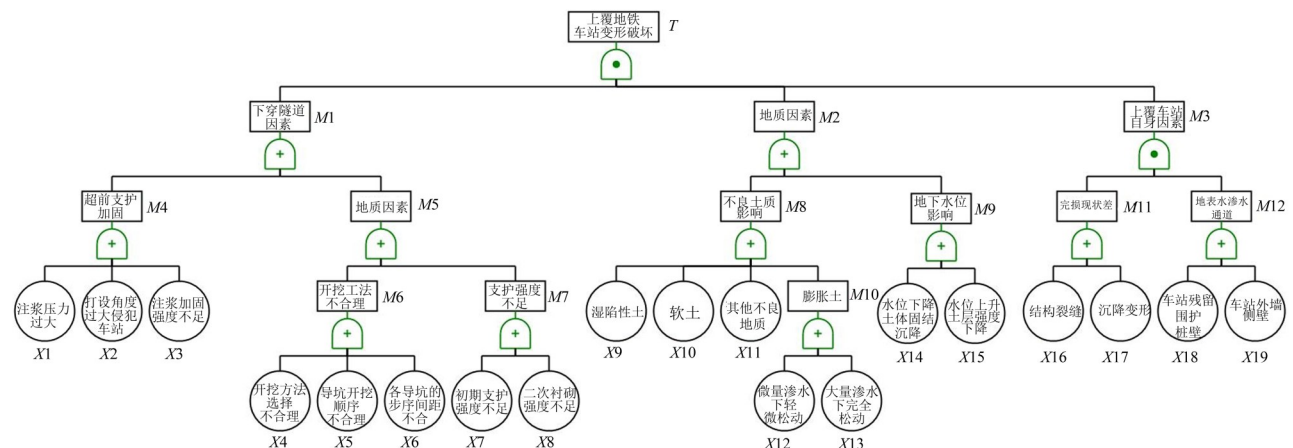


图 6 “上覆地铁车站变形破坏”故障树模型

Fig. 6 Fault tree model of "Deformation and failure of overlying subway station"

表 2 基本事件重要度
Table 2 Importance of basic events

	编号	基本事件	$P(T)/\%$ ¹⁾	概率重要度	临界重要度
下穿隧道 因素	X1	注浆压力过大	0.865	0.006	0.125
	X2	打设角度过大侵犯车站	0.865	0.006	0.125
	X3	注浆加固强度不足	0.933	0.005	0.055
	X4	开挖方法选择不合理	0.933	0.005	0.055
	X5	导坑开挖顺序不合理	0.933	0.005	0.055
	X6	各导坑的步序间距不合理	0.865	0.006	0.125
	X7	初期支护强度不足	0.933	0.005	0.055
	X8	二次衬砌强度不足	0.983	0.005	0.005
地质因素	X9	湿陷性土	0.988	0.026	0
	X10	软土	0.988	0.026	0
	X11	其他不良地质	0.988	0.026	0
	X12	微量渗水下膨胀土轻微松动	0.933	0.028	0.288
	X13	大量渗水下膨胀土完全松动	0.983	0.026	0.026
	X14	水位下降土体固结沉降	0.933	0.028	0.288
	X15	水位上升土层强度下降	0.933	0.028	0.288
上覆车站 自身因素	X16	结构裂缝	0.353	0.032	0.643
	X17	沉降变形	0.706	0.028	0.286
	X18	车站残留围护桩壁	0.520	0.047	0.474
	X19	车站外墙侧壁	0.520	0.047	0.474

1) 相应事件不发生时顶事件的发生概率。

表 3 专家打分评价矩阵
Table 3 Expert scoring evaluation matrix

因素	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
U_1	0	3	2	5	0
U_2	2	5	3	0	0
U_3	0	0	4	4	2

阵^[21], 如表 4 所示, 再由判断矩阵计算被比较因素的相对权重。具体步骤如下:

① 引入三角函数^[22], 转换成三角模糊函数表, 见表 5。

② 通过表 5 计算列向量的几何平均数 r_i 。其中

$$U_1(l, m, u) = r_1 = (2.289, 2.759, 4.000),$$

$$U_2(l, m, u) = r_2 = (0.275, 0.306, 0.437),$$

$$U_3(l, m, u) = r_3 = (1.000, 1.186, 1.817).$$

且

$$r_1 \times r_2 \times r_3 = (0.63, 1, 3.175),$$

$$(r_1 \times r_2 \times r_3)^{-1} = (1.587, 1, 0.315).$$

③ 计算每一列的模糊权重值。其中

$$\tilde{W}_1 = (2.289, 2.759, 4.000) \cdot (1.587, 1, 0.315) = (3.634, 2.759, 1.260),$$

$$\tilde{W}_2 = (0.275, 0.306, 0.437) \cdot (1.587, 1, 0.315) = (0.437, 0.306, 0.138),$$

$$\tilde{W}_3 = (1.000, 1.186, 1.817) \cdot (1.587, 1, 0.315) = (1.587, 1.186, 0.572).$$

④ 采用反三角模糊数公式解模糊化, 令

$$DF_{ij} = \frac{a + b + c}{3}, \quad (6)$$

其中 a 、 b 、 c 代表三角模糊数的下中上限 l_{ij} 、 m_{ij} 、 u_{ij} 。

$$DF_{U1} = (3.634 + 2.759 + 1.260)/3 = 2.551,$$

$$DF_{U2} = (0.437 + 0.306 + 0.138)/3 = 0.293,$$

$$DF_{U3} = (1.587 + 1.186 + 0.572)/3 = 1.115.$$

⑤ 正规化, 让各个权重归一。即

$$\sum DF_{ij} = 2.551 + 0.293 + 1.115 = 3.96.$$

则所求的特征向量为 $W = [0.644, 0.074, 0.282]^T$ 。

⑥ 计算判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 。

最后, 进行一致性检验。本算例 $CR < 0.10$,

满足要求^[23]。

表4 判断矩阵
Table 4 Judgement matrix

参数	U_1	U_2	U_3
U_1	1	7	3
U_2	1/7	1	1/5
U_3	1/3	5	1

表5 三角模糊函数表
Table 5 Trigonometric fuzzy function table

参数	U_1	U_2	U_3
U_1	(1, 1, 2)	(6, 7, 8)	(2, 3, 4)
U_2	(1/8, 1/7, 1/6)	(1, 1, 2)	(1/6, 1/5, 1/4)
U_3	(1/4, 1/3, 1/2)	(4, 5, 6)	(1, 1, 2)

4.1.6 二级模糊综合评价 将4.1.3节和4.1.5节求得的结果代入, 得

$$C = W \cdot R = (0.0148, 0.2302, 0.2638, 0.4348, 0.0564).$$

4.1.7 评价结果 采用等级评分办法确定“上覆地铁车站变形破坏”风险事件后果的等级。分值乘以权重, 总分为2.712, 事件后果等级的模糊值在(需考虑的, 严重)之间, 见表6。

表6 等级评分

Table 6 Grade score

等级	灾难性	非常严重	严重	需考虑的	可忽略
分值	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000
权重	0.0148	0.2302	0.2638	0.4348	0.0564
得分	0.0740	0.9208	0.7914	0.8696	0.0564

4.2 风险等级综合评定

因第3.2节顶事件“上覆车站变形破坏”事件的发生概率为(0.134%, 0.988%, 3.690%), 事件后果等级在(需考虑的, 严重)之间。参考规范[20], 评定出顶上事件的风险等级区间, 可以得出“上覆车站变形破坏”的风险分级分布在二级、三级之间。

5 工程实施情况

为降低下穿隧道施工对上覆地铁车站的影响, 以开挖导坑顺序为①→③→②→④, 开挖步距为0.5 m的优化方案进行施工, 在开挖前对下穿车站段上半断面土体采取袖阀管注浆加固处理(见图7); 并在工程现场布设了地表和车站结构沉降测点, 如图8所示。隧道施工过程中, 既有车站结构沉降变化曲线如图9所示。

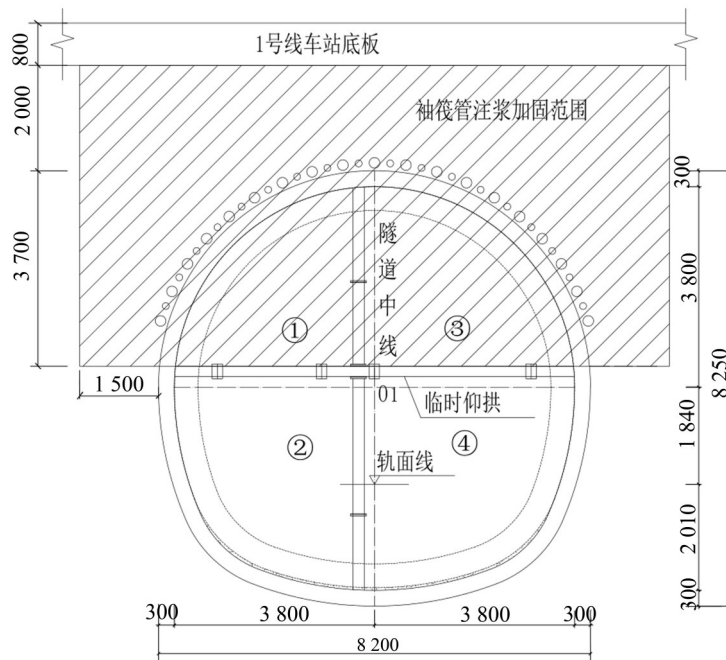


图7 注浆加固断面图(单位: mm)

Fig. 7 Grouting reinforcement section map(unit: mm)

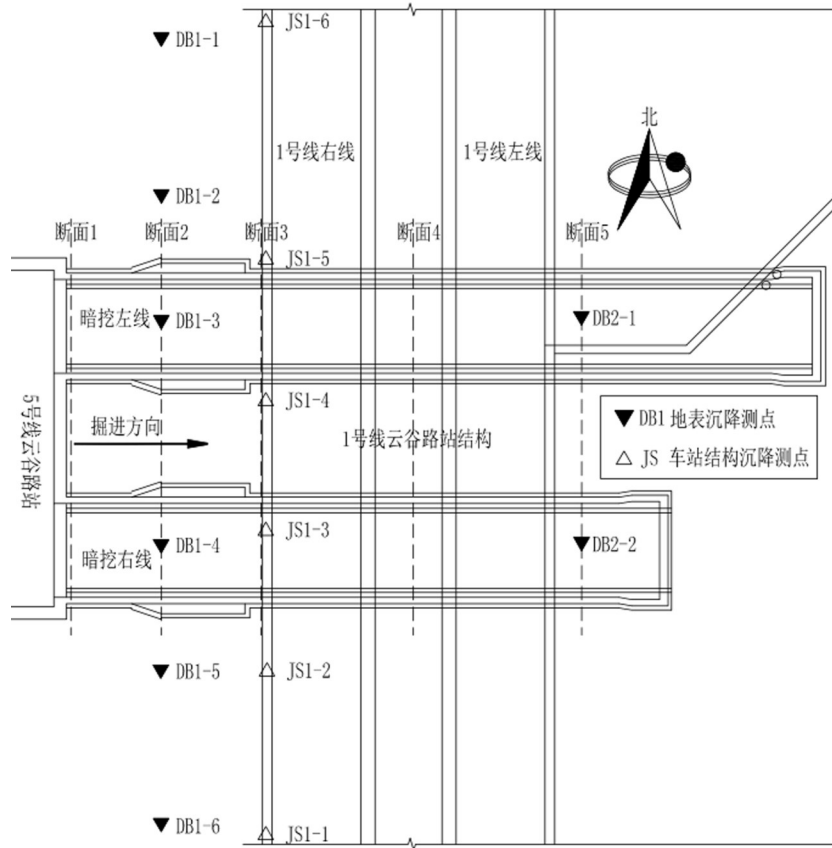


图 8 监测平面图

Fig. 8 Monitoring plan

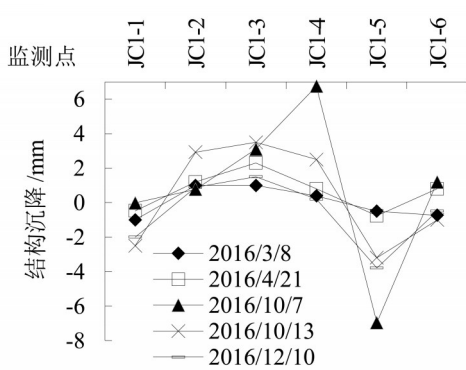


图 9 既有车站结构沉降随距离变化曲线

Fig. 9 The change curve of the existing station structure settlement with the distance

从图9中可以看出，地表沉降与既有地铁车站

结构沉降最大值均处于允许范围之内。隧道自身及既有车站结构基本处于安全稳定状态，文章提出的上覆车站安全风险评估模型正确可行。

6 结论

本文对合肥地铁5号线隧道下穿既有车站的施工风险评估进行了研究。建立了“上覆车站变形破坏”的故障树模型，得到了顶事件的发生概率和底事件的3种重要度值，并对模型进行了FTA定量分析，以确定降低风险的措施；运用模糊层次分析法，分别得到“上覆车站变形破坏”风险事件的发生概率和事故后果的严重程度，确定了风险事件的风险等级。最后，通过工程实例，验证了本文的风险评估模型的正确性和可行性。

参考文献:

[1] 李凤伟, 杜修力, 张明聚. 地铁工程建设施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 474-479.

[2] 廖少明, 杨宇恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 812-818.

[3] 许有俊, 葛绍英, 孙凤. 盾构隧道下穿地铁车站结构沉降特性研究[J]. 施工技术, 2018(7): 113-

- 118+123.
- [4] 张旭,张成平,韩凯航,等.隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J].岩土工程学报,2017,39(4):759-766.
- [5] 张娜,姚君华.城市地下隧道穿越既有车站的影响与监测研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(增刊1):1652-1656.
- [6] 李结元,余群舟,袁天海.地铁暗挖隧道下穿既有车站风险控制分析[J].施工技术,2017,46(1):70-73.
- [7] 吴涛,孟丹.地铁隧道下穿建筑物安全风险等级模糊综合评价[J].城市轨道交通研究,2014,17(9):57-61.
- [8] 何梦超,吴波,王鸣涛,等.基于FFTA的地铁盾构隧道下穿既有轨道风险评估[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(6):911-916.
- [9] 贾剑青,闫博,肖春春,等.下穿黄河隧道盾构施工风险分析与评估[J].地下空间与工程学报,2019,15(5):1582-1590.
- [10] 曾仲毅,徐帮树,胡世权,等.增湿条件下膨胀土隧道衬砌破坏数值分析[J].岩土力学,2014,35(3):871-880.
- [11] 郑俊杰,郭震山,崔岚,等.考虑非饱和渗流与增湿膨胀下的膨胀土隧道稳定性分析[J].岩土力学,2017,38(11):3271-3277.
- [12] 郑健龙.公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J].中国公路学报,2015,28(3):1-10.
- [13] 丁金华,陈仁朋,童军,等.基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J].岩土力学,2015(增刊1):159-168.
- [14] 贾磊柱,胡春林,杨新.考虑膨胀土抗剪强度衰减特性的深基坑支护工程设计研究[J].岩土工程学报,2014,36(增刊1):66-71.
- [15] 舒东利,晁峰,王明年,等.合肥地铁单线膨胀土浅埋暗挖隧道施工法研究[J].地下空间与工程学报,2017(增刊2):726-731.
- [16] 陈炜韬,董宇苍,方霖,等.合肥膨胀土地层浅埋双洞地铁隧道施工参数优化研究[J].隧道建设,2018,38(2):191-198.
- [17] 北京市质量技术监督局.城市轨道交通设施养护维修技术规范[S].北京:北京市质量技术监督局,2017.
- [18] ALIREZA E, SEYED G M. FPGA-based Monte Carlo simulation for fault tree analysis [J]. Microelectronics and Reliability, 2004, 44(6): 1017-1028.
- [19] 陈洁金,张永杰.下穿既有桥梁隧道施工风险定量评估方法[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(5):1862-1868.
- [20] 中华人民共和国建设部.地铁及地下工程建设风险管理指南[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [21] 陈洁金.下穿既有设施城市隧道施工风险管理与系统开发[D].长沙:中南大学,2009.
- [22] 尚岩.基于模糊层次分析法的工程项目投标风险评估[D].天津:天津工业大学,2017.
- [23] 夏志宏.国际工程承包风险与规避[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.

(责任编辑 王海蓉)