

基于模糊理论的地铁结构安全评估研究

林楠

(上海建科建设监理咨询有限公司, 上海 200032)

【摘要】 随着地铁隧道的运营, 地铁结构出现的安全问题也将越来越多。通过研究影响地铁结构安全的因素, 确定了适于上海软土地区的、能够全面反映盾构隧道结构受力特点的、并综合考虑使用功能的评估指标, 确立运营期地铁结构安全评估指标体系, 利用模糊综合评判、层次分析法和模式识别理论, 建立了地铁结构安全评价模型, 并通过典型实例进行定量化综合分析评价。通过运营期地铁结构安全评估指标体系和评价方法的研究和探索, 对正确评价地铁结构运营安全现状、修正偏差、提高地铁系统安全总体水平具有十分重要的意义。

【关键词】 地铁结构; 安全评估; 指标体系; 层次分析法; 模糊理论

【中图分类号】 U 458.1 **【文献标识码】** A

doi: 10. 3936/j. issn. 1007-2993. 2010. 03. 004

Study on Safety Assessment Index System for Subway Structure Based on Fuzzy Theory

Lin Nan

(Shanghai Jianke Project Management Co., Ltd. Shanghai 200032, China)

【Abstract】 With the operation of the subway tunnel, more and more safety problems will appear. Considering the selection principles of the evaluation index and the causes of safety problems existed in the shield tunnel structure, the paper determines the evaluation index and establishes the safety assessment index system for subway structure which can be applied in Shanghai soft-soil areas and reflects the stress characteristics of the shield tunnel structure comprehensively. Applying the fuzzy comprehensive evaluation, the analytical hierarchy process and the pattern recognition theory, the paper then establishes the evaluation model of the subway structure and conducts the quantitative synthetic analysis and evaluation through a typical example. Very important significance will be made to evaluate the safety situation of the subway structure, modify the deviation and improve the overall safety level of subway system.

【Key words】 subway structure; safety assessment; index system; AHP; fuzzy theory

0 引言

随着我国经济的快速发展, 交通拥堵问题越来越严重。要解决大城市的交通问题, 就必须大力发展公共交通, 尤其是发展地铁轨道交通^[1]。作为城市轨道交通的重要组成部分, 地铁隧道在给交通运输业做出贡献的同时, 其内频繁发生的各种安全事故, 也给社会造成了巨大的负面影响、经济损失和人员伤亡。因此, 如何降低地铁结构运营期安全事故及其带来的损失, 是值得深入研究的问题。地铁结构的安全性事故, 往往会对地铁的运营造成很大的影响, 而且国内外关于地铁结构安全评估问题的研究主要针对结构渗漏水、结构纵横断面变形、结构裂缝、管片材质老化等某一单方面, 但各个单项事故之间的关系从表面上看是互相独立的, 实际上相互

之间有一定的联系, 这就导致了单项分析有时将难于准确判断地铁结构的安全状态; 影响地铁结构安全状态的各个因素, 有可能原来是次要的转化为主要影响因素的情况, 若不考虑这些变化, 将得出不符合实际情况的结论。因此, 对地铁结构安全状态的判定, 不仅要考虑单个项目所反映的局部性态, 还要考虑多个项目所反映的整体性态。因此, 地铁结构的安全评估问题是一个多项目、多层次的递阶分析问题。

根据现代安全管理理论, 对地铁结构这一系统中存在的安全性事故进行充分的辨识与定性和定量的分析, 同时采用有针对性的、适用的安全评价方法, 得到客观综合的评价指标, 科学地建立地铁结构安全评估指标体系, 对正确评价地铁结构系统运营安全现状、修正偏差, 确定运营期地铁的养护措施, 提高

地铁结构系统安全总体水平具有十分重要的意义。

1 地铁结构安全评估指标体系

1.1 体系中评价指标选取原则

为了全方位地反映运营期地铁结构的安全状态,评价指标的正确选择必须基于对地铁隧道结构安全系统进行的正确分析,并能最大限度地客观反映各种因素的影响。经过分析评价,结合与地铁隧道安全相关学科的紧密关系,所选的评价指标应遵循以下原则:科学客观性、相对完备性、简捷性、相对独立性、层次性、可操作性等。

1.2 地铁结构安全评估指标体系的建立

地铁隧道深埋于土层之中,在运营过程中影

响其设计使用年限内安全的因素错综复杂。侵蚀性地下水的渗漏、隧道内有害气体的侵蚀,加上结构裂缝的产生与开展,均会导致隧道断面变形、钢筋锈蚀及结构混凝土腐蚀等多种病害产生。鉴于篇幅限制,影响地铁结构安全的因素在此不做赘述。^[2-7]

地铁结构的安全评估是一个典型的多指标、多属性的问题,应用系统工程的层次分析法进行分析十分有效,在对影响地铁结构安全因素进行充分的分析之后,结合选取评价指标的原则,重点考虑实际地铁运营过程中评价指标的可测性,建立地铁结构安全评估指标体系(见图1)。

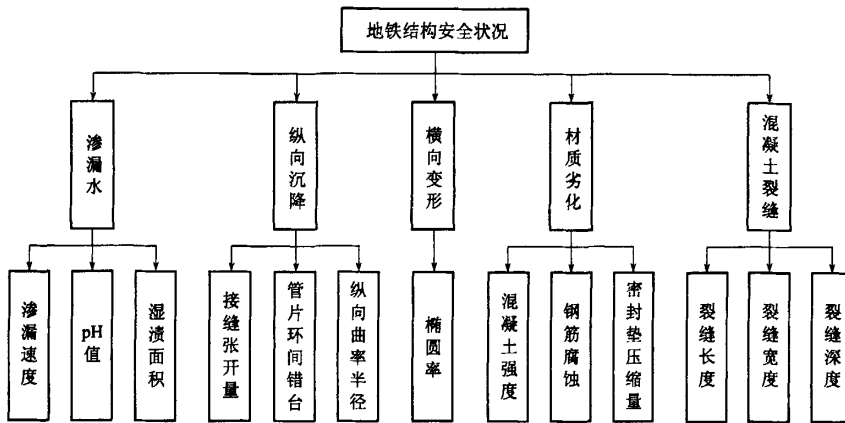


图1 地铁结构安全评估指标体系框图

1.3 体系评价集的建立

要对地铁结构安全状态进行判定,必须对所拟定的评价指标特性的“优”、“劣”状况做出评价。各层评价指标和最终评估目标的安全等级划分的多少,是一个实践性很强的问题,它涉及到相应规范、已有方法、实践经验等多方面因素。若划分的安全等级数目过少将失于简略,则很可能在评估结果中“淹没”某些重要信息;若安全等级数目划分过多、过细,则又会使相邻等级区间界限不易确定,给操作者带来难度^[8]。参照铁路隧道与公路隧道安全状态等级的划分,结合地铁结构系统自身特点,对地铁结构安全等级的划分采用四级划分法。

2 地铁结构安全评估模型

2.1 评价指标权重确定方法

在具体建模时采用层次分析法和模糊数学相结合的方法,避免了单纯采用层次分析法计算各层次指标权重的局限性^[9]。为此,首先根据地铁结构安全评估指标体系中评价指标两两比较时的具体特点,在分析层次分析法的基础上,采用一种改进的层次分析法—乘积标度法,来确定指标层指标和准则层指标的权重。

2.2 地铁结构安全状态模糊综合评价模型

地铁结构安全评估指标体系是一个三层指标体

系,因此采用两级模糊综合评价模型。多级模糊综合评价是从最低层开始逐层向上做出综合评价,直至最高的目标层以得到原问题的综合评价结果。这里从指标层出发,先对准则层各因素进行一级模糊综合评价,再对目标层进行二级模糊综合评价^[10]。

2.2.1 一级模糊综合评价

1) 建立评价指标集

根据地铁结构安全评估指标体系,有 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_6\}$, C_i 表示指标层各指标。

2) 建立评价集合

如前所述,设地铁结构安全状态评价集的安全等级向量为 $V = [v_1, v_2, v_3, v_4]$, v_1, v_2, v_3, v_4 依次代表安全、较安全、较不安全、不安全。

3) 确定单因素评价矩阵

关于隶属函数的选取,本文采用比较常用的正态型隶属函数形式:

$$u(x) = e^{-[(x-r_0)/c]^2}$$

利用隶属函数建立评价指标对评价集合 V 的隶属向量为:

$$R_{ci} = (r_{ci1} \ r_{ci2} \ r_{ci3} \ r_{ci4}), i=1, 2, \dots, n$$

由隶属向量 R_{ci} 即可建立准则层各因素的单因素评价矩阵 R'_{bi} 。

4)一级模糊综合评价

模糊综合评价是通过模糊算子建立模糊综合评价模型的过程。根据理论分析,这里选用加权平均型模糊综合评价模型,此模型不但考虑了所有因素的影响,而且还保留了单因素评价的全部信息,适用于需要全面考虑各个因素影响和全面考虑单因素评价结果的情况,该模型的建立过程相当于矩阵相乘,由各单因素评价矩阵 R'_{bi} 与其相应的权重向量 ω_{bi} , 可得到各因素 B_i 对评价集合 V 的隶属向量为 $R_{bi} = \omega_{bi} \times R'_{bi}$ 。

2.2.2 二级模糊综合评价

将一级模糊综合评价结果 R_{bi} 视为单因素评判集,由 R_{bi} 可组成二级模糊综合评价的单因素评价矩阵,由相应的权重向量和单因素评价矩阵通过矩阵相乘可得到二级模糊综合评价结果——目标因素对评价集合的隶属向量为

$$Z = \omega_a \times (R_{b1}^T, R_{b2}^T, \dots, R_{bn}^T)^T$$

2.2.3 模糊向量单值化

分别给评价集中的 v_1, v_2, v_3, v_4 赋以 4、3、2、1, 则 $F = \frac{4 \times Z_1 + 3 \times Z_2 + 2 \times Z_3 + 1 \times Z_4}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}$, 地铁结构安全等级量化见表 1。

表 1 地铁结构安全状态等级表

| 等级 | 安全状态 | 健康值 |
|----|------------------|--------------------|
| 1 | 安全(结构无破损或存在轻微破损) | $3.5 < F \leq 4.0$ |
| 2 | 较安全(结构存在破坏) | $2.5 < F \leq 3.5$ |
| 3 | 较不安全(结构存在较严重破坏) | $1.5 < F \leq 2.5$ |
| 4 | 不安全(结构存在严重破坏) | $1.0 < F \leq 1.5$ |

3 应用实例

某地铁盾构隧道覆土深度在 9~10 m 之间不等,全长 857.35 m,沿线地质条件复杂,多为软弱的淤泥质粘土和淤泥质粉质粘土层,正式投入商业运营 13 年时间,为了全面了解该地铁结构的实际安全状况,拟采用本文所述方法对其进行安全评估。根据隧道现场监测与检测结果得到的指标结果见表 2。

3.1 一级模糊综合评判

该地铁隧道中,对于渗漏速度,通过构造正态型隶属函数,并结合现场监测和检测的结果,经过归一化之后可以得到渗漏速度 c_1 对评语集合的隶属向量: $R_{c1} = (0.246 \ 0.754 \ 0 \ 0)$ 。

同理,可以得到 pH 值指标 c_2 对评语集合 V 的隶属向量 $R_{c2} = (0.221 \ 0.779 \ 0 \ 0)$, 由于该区段无湿渍现象,因此湿渍面积 c_3 对评语集合 V 的隶属向量 $R_{c3} = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$ 。

由上述指标隶属向量为行组成单因素评判矩阵 R'_{b1}

$$R'_{b1} = (R_{c1} \ R_{c2} \ R_{c3})^T = \begin{pmatrix} 0.246 & 0.754 & 0 \\ 0.221 & 0.779 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

通过权重向量 ω_{b1} 和单因素评判矩阵 R'_{b1} 合成,可确定主体结构因素 B_1 对评语集合 V 的隶属向量 R_{b1} 。其中权重向量 ω_{b1} 通过乘积标度法算得, $\omega_{b1} = (0.438 \ 0.323 \ 0.239)$, 则有:

$$R_{b1} = \omega_{b1} \times R'_{b1} = (0.438 \ 0.323 \ 0.239) \times \begin{pmatrix} 0.246 & 0.754 & 0 \\ 0.221 & 0.779 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (0.179 \ 0.582 \ 0)$$

仍记 R_{b1} 为 R_{b1} 的归一化, 则有:

$$R_{b1} = (0.235 \ 0.765 \ 0 \ 0)$$

同理可得

$$R_{b2} = (0 \ 0.482 \ 0.518 \ 0)$$

$$R_{b3} = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$R_{b4} = (0.847 \ 0.153 \ 0 \ 0)$$

$$R_{b5} = (0.490 \ 0.510 \ 0 \ 0)$$

表 2 地铁结构某区段指标值

| 渗漏水 | | 纵向沉降 | |
|---------------|------|--------------|------------|
| 渗漏速度/ 每分钟滴 | pH 值 | 接缝张开量 /mm | 曲率半径 /m |
| 15 | 5.8 | 2 | 6735 |
| 混凝土裂缝 | | 混凝土强度 | |
| 长度/m | 宽度/m | 实际强度/MPa | 设计强度/MPa |
| 3.7 | 4 | 21.1 | 23.1 |

3.2 二级模糊综合评判

由权重向量 ω_a 和评判矩阵 R_a 确定地铁结构安全因素 A 对评语集合 V 的隶属向量 Z , 其中权重向量 ω_a 通过乘积标度法算得:

$$\omega_a = (0.228 \ 0.309 \ 0.169 \ 0.125 \ 0.169)$$

$$Z = \omega_a \times R_a = \omega_a \times (R_{b1} \ R_{b2} \ R_{b3} \ R_{b4} \ R_{b5}) = (0.242 \ 0.429 \ 0.160 \ 0)^T$$

最终可得地铁结构安全体系的综合评价分值为 $F = \frac{4 \times Z_1 + 3 \times Z_2 + 2 \times Z_3 + 1 \times Z_4}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} = 3.1$

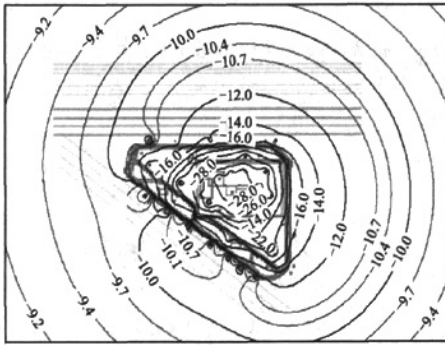
根据以上评估结果可知,该地铁结构的安全状态登记属于 II 级,地铁结构存在破损,应准备采取对策措施。

4 结 语

本文通过实例分析对地铁结构安全指标体系及评估该体系所运用的改进层次-模糊综合评判方法进行介绍,对该体系及评估方法的特点总结如下:

1) 该指标体系是在对影响地铁结构安全的因素

(下转第 160 页)



13 16口井回灌条件下计算等值线图(单位:m)

采用不同的回灌方案进行人工地下水回灌,其回灌效果见表1。

表1 回灌效果对比表

| 位置 | (承压水位埋深预测值/水位回升值)/m | | | |
|-----|---------------------|--------------|---------------|---------------|
| | 方案一 无回灌 | 方案二 7口井回灌 | 方案三 12口井回灌 | 方案四 16口井回灌 |
| 4号线 | -15.80 | -14.50/1.30 | -13.30/2.50 | -11.20/4.60 |
| 9号线 | -19.00 | -17.70/1.30 | -16.50/2.50 | -15.00/4.00 |
| 2号线 | -13.50 | -13.00/0.50 | -12.00/1.50 | -11.80/1.70 |

计算表明,回灌效果与单井回灌水量、回灌井数量密切相关。采用7口井回灌,承压水位回升值可达1.30m;采用12口井回灌,承压水位回升值可达2.50m;采用16口井回灌,承压水位回升值可达4.60m。

(上接第125页)

进行充分分析的基础上建立的,是能够全面反映盾构隧道结构受力特点的、并综合考虑使用功能的评估指标体系,具有一定的科学性和系统性。

2)该评估方法将定性分析以定量的形式表现出来,将不精确的表达和处理数字化,使评估过程更趋科学化。

3)该指标体系的建立及相应评估方法的运用,具有很强的理论性和实用性,它为建立科学合理的评估模型提供思路,不但可以用于地铁结构系统的安全评估,还可以广泛地用于其它工程之中。

参考文献

- [1] 王山,等. 地铁安全评价研究[J]. 华北科技学院学报, 2006, 3(1): 1-3.
- [2] 房春光,方引晴. 城市地下工程安全性问题分析及病害防治方法[J]. 广东工业大学学报, 2001, 18(3): 1-5.
- [3] 叶耀东,朱合华,王如路. 软土地铁运营隧道病害现

5 结论

1)通过回灌试验知,单井回灌引起的基坑外承压水位回升值可达0.44m,表明人工回灌地下水对承压水位控制具有一定的效果。

2)在有止水帷幕的情况下,回灌井深度应不超过止水帷幕底部,使得进入基坑内的回灌水量尽量少。

3)因回灌井成井结束后的间隙时间较短,井管外止水封闭层尚未充分密实,且回灌井深度较浅,井管外止水封闭层垂向厚度小,因此回灌试验采用常压回灌,以避免井管外水或泥水混合物喷出地面。

4)数值模拟结果表明,坑内减压降水,在有止水帷幕的情况下,坑外设置回灌井可以减小坑外承压水位的降幅,回灌效果与单井回灌水量、回灌井数量密切相关。

参考文献

- [1] 李文广,胡长明. 深基坑降水引起的地面沉降预测[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 24(1): 181-184.
- [2] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
- [3] 骆祖江,李朗,等. 复合含水层地区深基坑降水三维渗流场数值模拟[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 72-77.

收稿日期:2010-03-11

状及成因分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 157-166.

- [4] 陈勇,朱继文. 上海地铁区间隧道渗漏水发生的机理与防治[J]. 地下空间, 2001, 21(1): 55-61.
- [5] 郑永来,潘杰,韩文星. 软土地铁隧道沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 67-74.
- [6] 庄丽,张银屏. 软土地层盾构隧道渗水量与沉降关系的模拟分析[J]. 中国建筑防水, 2006(6): 13-15.
- [7] 王如路,刘建航. 上海地铁长期运营中纵向变形的监测与研究[J]. 地下工程与隧道, 2001(4): 6-11.
- [8] 张琳琳. 重大水工混凝土结构健康诊断综合分析理论和方法[D]. 南京: 河海大学, 2003: 35-38.
- [9] 罗鑫. 公路隧道健康状态诊断及系统的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 52-57.
- [10] 王岩,黄宏伟. 地铁区间隧道安全评估的层次一模糊综合评判法[J]. 地下空间, 2004, 9(3): 1-4.

收稿日期:2010-03-31