

隧道服役性能指标在广州地铁盾构隧道健康状态评估中的应用*

翟利华^{1,2} 袁 泉^{1,2} 李晓军³ 林晓东³

(1. 广州地铁设计研究院有限公司, 510010, 广州; 2. 广东省城市轨道交通工程建造新技术企业重点实验室, 510010, 广州; 3. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 提出一种定量的隧道服役性能指标(T_{SI})的计算方法。首先在分析指标获取难度和指标关联性的基础上,选取相对沉降、差异沉降、收敛变形、渗漏水、裂缝和剥落 6 个变量为评估指标体系;然后在收集 40 个地铁盾构隧道样本的基础上,利用专家评估与偏最小二乘回归法,对盾构隧道健康状态进行评估拟合,建立 T_{SI} 公式。该公式存在两个适用条件:一是评估对象为与本文类似的地铁盾构隧道,二是隧道的运营时间在 20 年以内。最后,以广州某地铁盾构隧道区间为工程案例,说明 T_{SI} 公式在隧道健康状态评估中的应用。可为盾构隧道的养护维修决策提供指导作用。

关键词 地铁; 盾构隧道; 服役性能指标; 健康状态评估
中图分类号 U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.12.034

Application of Tunnel Serviceability Index in Guangzhou Metro Health Assessment

ZHAI Lihua, YUAN Quan, LI Xiaojun, LIN Xiaodong

Abstract The calculation method of a quantitative tunnel serviceability index (T_{SI}) is put forward. Firstly, by analyzing the index acquisition difficulties and index relevance, six variables are taken as the assessment index, including relative settlement, differential settlement, convergence deformation, water leakage, cracking and spalling. Secondly, by collecting 40 samples of metro shield tunnel, expert assessments and partial least squares regression method are used to evaluate and fit the tunnel health, a T_{SI} formula is established. There are two applicable conditions for this formula: (1) the evaluated tunnel should be similar to the tunnel discussed in the paper; (2) the tunnel operation time should be less than 20 years. Finally, taking a metro shield tunnel section in Guangzhou metro as the background, the application of T_{SI} in tunnel health assessment is explained, the result provides a guidance for tunnel maintenance policies.

Key words metro; shield tunnel; serviceability index; health assessment

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

盾构隧道所处岩土赋存条件复杂、周边环境敏感及使用条件苛刻,结构自身在多种因素长期作用下状态逐步退化,一旦损坏不易或不可更换,并将诱发地下工程灾害,因此对盾构隧道结构健康状态提出了极高的要求。

目前,盾构隧道的健康状态评估方法主要分为单项指标判定法、数学模型法和力学模型法 3 种。其中,项指标判定法是最简单也是实际中应用最广泛的方法,如文献[1]规定了结构变形、渗漏水、裂缝和剥落的极限值,文献[2]规定了隧道检查指标和单项评估等级,文献[3]列举了不同隧道病害的分级。单项指标判定法虽然简单实用,但由于其不能体现隧道结构的综合健康状态,选取不同的单项指标可能会得出不同的结论,因而最终还是要依赖于专家的经验判断。数学模型法主要是采用模糊综合评判与层次分析的方法,如文献[4-6]分别选取不同指标,采用模糊综合评判与层次分析方法来评价病害对盾构隧道状态的影响,但此类方法的缺陷在于未考虑病害之间的相关性。近年来亦有学者利用力学方法评估隧道健康状态,文献[7]根据结构极限状态来划分隧道状态级别,文献[8]提出全寿命周期可靠度方法用于计算隧道状态,这类方法的缺点在于建立考虑隧道病害的力学模型十分困难,且计算分析复杂耗时,在工程实践中难以实施。

* 国家重点研发计划资助(2017TFB1201102);广东省城市轨道交通工程建造新技术企业重点实验室资助(2017B030302009)

在道路工程方面,文献[9]在1962年对72段道路进行专家打分,通过回归分析得到道路服役性能指标公式,用作评估道路服役性能的标准;在桥梁工程方面。文献[10]采用德尔菲方法对已有桥梁进行评估打分,建立了桥梁状态与桥梁测量数据之间的联系。但对于盾构隧道状态的评估,尚未有类似研究的报道。

本文在研究分析地铁盾构隧道监测指标的基础上,选择相对沉降、差异沉降、收敛变形、渗漏水、裂缝和剥落6个常用指标,利用专家打分与偏最小二乘法回归评估结果,建立盾构隧道状态与评估指标之间的定量关系,得出盾构隧道服役性能指标(T_{SI})的计算公式,并以广州地铁盾构隧道为示范工程,阐述了 T_{SI} 在隧道健康评估中的应用。

1 盾构隧道健康状态评估指标体系

综合考虑盾构隧道结构、内外周围环境、日常监测及检测数据等因素来确定评估指标,可供选择的评估指标包括水土压力、地下水腐蚀性、线路曲线半径、注浆压力、混凝土碳化、钢筋锈蚀、螺栓锈蚀、沉降、收敛、渗漏水、剥落、裂缝、接缝张开、错台及空气离子浓度等。上述指标都能在一定程度上反映盾构隧道的服役性能,但结合实际情况,并不是所有的指标都适合作为评估指标,原因如下:①地下水腐蚀性及空气中的离子浓度等数据获取困难,一般未被列入隧道日常检查项目,故此类数据缺失;②隧道周围水土压力、结构内力的监测传感器在地下复杂环境下,因工作寿命短、损坏率高,以及后期的维修更换难度大,这类数据的获取并不可持续;③混凝土碳化深度、钢筋锈蚀、螺栓锈蚀等检查成本较高,且检查本身有可能对隧道结构造成破坏。

综上所述,确定可选的评估指标为沉降、收敛、渗漏水、裂缝、剥落、错台和接缝张开等。

1.1 纵向变形

根据现场监测,由于大地沉降、土体扰动、地下水流动和循环荷载等因素,盾构隧道在运营期间发生较大纵向变形^[11]。盾构隧道的绝对沉降量有一部分是由于大地整体沉降组成的,而整体沉降对隧道自身危害不大,故本文选取相对沉降平均值和差异沉降平均值2个评估指标,计算公式如下:

$$S_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^m S_{r,i}}{m} \quad (1)$$

$$S_{\text{diff},i} = \frac{|S_{r,i} - S_{r,i-1}|}{l_{i,i-1}} \quad (2)$$

$$S_{\text{diff,ave}} = \frac{\sum_{i=2}^m S_{\text{diff},i}}{m-1} \quad (3)$$

式中:

S_{ave} ——相对沉降平均值;

m ——监测点数量;

$S_{r,i}$ ——第 i 个相对沉降监测值;

$S_{\text{diff},i}$ ——第 i 个差异沉降计算值;

$l_{i,i-1}$ ——第 i 个监测点与第 $i-1$ 个监测点之间的距离;

$S_{\text{diff,ave}}$ ——差异沉降平均值。

1.2 横向变形

选取盾构隧道衬砌收敛平均值作为横向变形的评估指标,计算公式如下:

$$C_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^m |D_i - D|}{Dm} = \frac{\sum_{i=1}^m |\Delta_i|}{Dm} \quad (4)$$

式中:

C_{ave} ——衬砌收敛率平均值;

m ——监测点数量;

D_i ——第 i 个隧道外直径测量值;

D ——隧道外直径的设计值;

Δ_i ——第 i 个测量横向变形。

1.3 病害指标

对于错台和接缝张开两项指标,盾构隧道允许的变形较小,目前在人工检查时难以辨别,很少有相关的记录;另一方面,许多学者的研究结论表明,错台和接缝张开与隧道的沉降和收敛变形之间存在显著的关联性^[12-13]。因此,渗漏水 d_l 、裂缝 d_c 和剥落 d_s 也需作为病害评估指标。

综上所述,本文选取6个评估指标,分别为 S_{ave} 、 $S_{\text{diff,ave}}$ 、 C_{ave} 、 d_l 、 d_c 和 d_s 。

2 建立盾构隧道服役性能指标的步聚

2.1 专家评估方法

专家评估方法是获取盾构隧道健康状态的有效方法,一般步骤如下:

1) 成立评估专家组。专家组应涵盖相关行业各层次人员,应能代表行业内意见。

2) 举行评估说明会。包括向专家说明盾构隧道状态的定义,明确评分内容和评分标准,以及在

正式评分前在专家内部开展讨论和提问。盾构隧道状态分为很好(1级)、好(2级)、一般(3级)、差(4级)和很差(5级)总共5个等级,每个等级的评估标准如表1所示。

3) 设计评估样本。包括评估样本选取、样本数据收集等,选取样本应涵盖研究对象的各种情况,具有充分的代表性。

4) 专家组对样本隧道状态评分。评分可采取现场巡视和问卷调查等形式,每个专家应独立评分。

本文选取了40个区段作为评估样本,每个评估区段为200环盾构管片。样本展示了该隧道区段的渗漏水、剥落、裂缝病害的大小、位置,以及当前沉降、收敛的监测数值。专家组由9名盾构隧道相关专家组成。选取200环盾构管片作为评估单位主要是因为部分隧道的指标采集间距较大,例如沉降数据,若评估长度选取较短,因监测数据量过少会导致误差较大;若评估长度选取过长,又不能保证隧道的服役性能不发生变化,经综合考虑选取200环盾构管片作为评估单位。

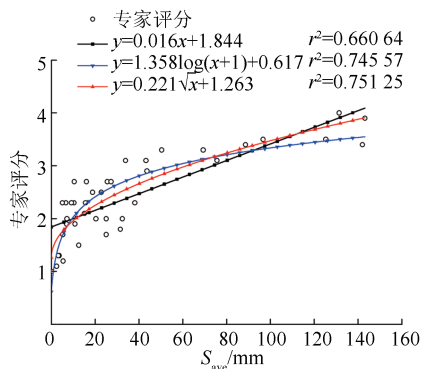
表1 盾构隧道健康状态评估标准

隧道状态等级	状态	评定因素	
		病害程度	对运营安全的影响
1	很好	无或者非常轻微	无影响
2	好	轻微	目前尚无影响
3	一般	中等	将来影响运营安全
4	差	较严重	已经影响运营安全
5	很差	严重	严重影响运营安全

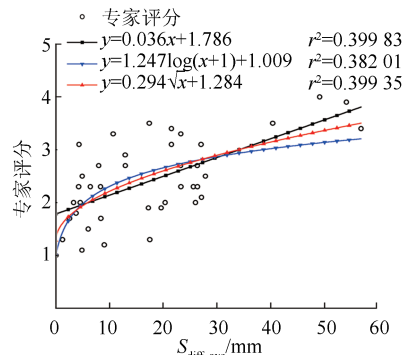
2.2 专家评估结果

根据专家对样本隧道健康状态的评分结果,回归拟合出隧道健康状态与评估指标的定量关系。拟合采用偏最小二乘回归方法。偏最小二乘回归方法综合运用了主成分分析、典型相关分析和多元线性回归分析,能够在自变量存在严重多重相关性的条件下进行回归建模。

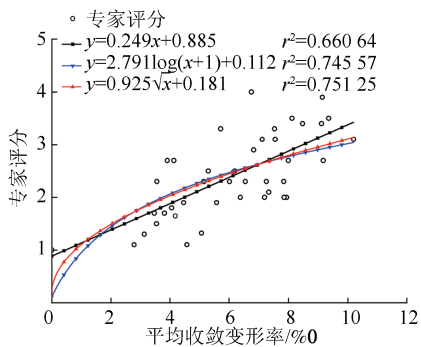
由于偏最小二乘回归属于线性回归法,回归分析前应对每个评估指标作线性化处理。图1所示为40个样本评估结果的指标线性化处理图,该图分别采用线性函数、对数函数和开平方函数进行拟合。图1a)中开平方函数的拟合度最高,为0.75。图1b)和图1c)表明 $S_{\text{diff,ave}}$ 和 C_{ave} 均用线性函数进行回归分析即可。采用同样方法对隧道病害的3个评估指标进行分析,结果表明病害指标可按线性关系参与回归。



a) 专家评分与 S_{ave} 的关系



b) 专家评分与 $S_{\text{diff,ave}}$ 的关系



c) 专家评分与平均收敛变形率的关系
注: r^2 为拟合度

图1 隧道健康状态40个样本评估指标线性化处理图

2.3 盾构隧道服役性能指标的计算方法

设 $x = [\sqrt{S_{\text{ave}}}, S_{\text{diff,ave}}, C_{\text{ave}}, d_1, d_c, d_s]$, $y = T_{\text{SI}}$, 基于40个评估样本,采用偏最小二乘回归方法,得出标准化隧道健康状态的计算公式为:

$$T_{\text{SI},0} = 0.62\sqrt{S_{\text{ave},0}} + 0.13S_{\text{diff,ave},0} + 0.25C_{\text{ave},0} + 0.19d_{1,0} + 0.06d_{c,0} + 0.03d_{s,0} \quad (5)$$

其中: $S_{\text{ave},0}, S_{\text{diff,ave},0}, C_{\text{ave},0}, d_{1,0}, d_{c,0}, d_{s,0}, T_{\text{SI},0}$ 分别为 $S_{\text{ave}}, S_{\text{diff,ave}}, C_{\text{ave}}, d_1, d_c, d_s, T_{\text{SI}}$ 标准化后的结果。

由标准化数据转化为原始数据,可得:

$$T_{\text{SI}} = 0.77 + 0.16\sqrt{S_{\text{ave}}} + 0.01S_{\text{diff,ave}} + 0.09C_{\text{ave}} + 0.08d_1 + 0.05d_c + 0.50d_s \quad (6)$$

式(6)对 40 个样本进行了评估,如图 2 所示。由图 2 可知,隧道状态的拟合度 r^2 为 0.841。这也说明了式(6)能代表 84.1%的专家评估结果。

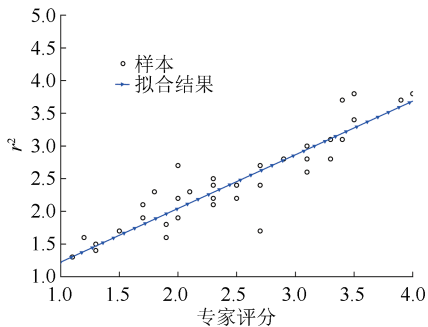


图 2 隧道状态拟合结果

3 T_{SI} 计算公式讨论

实际工程中,收集隧道的监测、检测数据,并代入式(6),即可计算得到 T_{SI} ,但式(6)有以下两个适用条件:

1) 评估的盾构隧道应与本文研究的盾构隧道对象相似,可参考表 2 所示的评估指标统计量,统计评估样本来源的所有盾构隧道。考虑到我国地铁盾构隧道的直径、厚度和埋深等较为相似,广义上可认为式(6)适用于地铁盾构隧道。

表 2 本文盾构隧道评估指标统计量

指标	最小值	中位数	最大值	平均值
S_{ave}/mm	1.2	19.60	130.10	27.80
$S_{diff,ave}/(\text{mm}/100\text{ m})$	1.5	9.50	58.00	12.50
$C_{ave}/\%$	2.4	7.30	12.00	1.50
$d_1/(\text{m}^2/100\text{ 环})$	0	0.42	5.74	0.86
$d_c/(\text{m}/100\text{ 环})$	0	0	5.67	0.76
$d_s/(\text{m}^2/100\text{ 环})$	0	0	1.30	0.08

2) 式(6)只适用于评估建成 20 年内的盾构隧道。因为本文研究的地铁盾构隧道运营年限最长为 20 年,即样本只覆盖了隧道全寿命期的前 20 年。对于未来超过 20 年的隧道结构,可重新收集样本数据,进行评估拟合;或者可考虑指标的劣化对服役性能的影响,如对公式的权重进行修正,或建立服役性能的退化模型。

4 T_{SI} 计算公式在广州某地铁盾构隧道区间工程的应用

选取广州某地铁盾构隧道鹭江站至客村站区间为工程案例。该区间于 1998 年开始建设,2003

年投入运营,至今运营达 15 年。区间为双向隧道(分左线和右线),右线里程为 YCK5+311.95—YCK6+285.50,长 973.55 m。其中盾构段为 486 环,采用错缝拼装,衬砌外径为 6.0 m、内径为 5.4 m、厚度为 0.3 m,环宽为 1.5 m。

区间高程为 13.11~18.24 m,中部地形较高,两侧稍低,在地貌上大部分属于平缓坡地。隧道所处地层主要包括砂层、冲积-洪积土层、残积土层以及岩石全风化带。

盾构隧道的监测数据如图 3 所示。由图 3 可知,区间总体沉降幅度不大,为 0~6 mm;沉降模式呈中间大、两头小的形式,即靠近车站的衬砌沉降约为 1 mm,而隧道中间的衬砌沉降约为 6 mm;收敛数值均在 (1‰~7‰) D 范围内。

隧道病害检测结果中,渗漏水总共有 6 处,最大渗漏面积为 0.07 m^2 ,发生在第 266 环,最小渗漏面积为 0.01 m^2 ;剥落总共有 11 处,最大面积达 0.04 m^2 ,发生在第 306 环,最小面积有 0.000 1 m^2 ;该区间未发现裂缝病害。

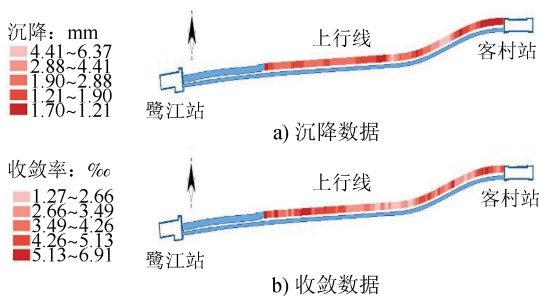


图 3 盾构隧道区间监测数据

将隧道以 200 环管片作为划分单位,计算各指标的数值大小,并将结果代入式(6)得到 T_{SI} 为 1.41,由此可知,盾构隧道基本处于“很好”的级别。不同级别对应的盾构隧道养护维修措施如表 3 所示。

表 3 盾构隧道养护维修措施

状态等级	状态	措施
1	很好	无
2	好	在下次检查中重点调查
3	一般	尽快实施特殊监测,依据监测结果确定是否采取维修措施
4	差	按需要限制使用,尽快采取维修措施,维修完成前实施特殊监测
5	很差	立即限制使用并进行维修、更换或重建,同时实施特殊监测

5 结论

1) 在统计地铁盾构隧道已有监测、检测指标,

以及考虑指标的获取难度与指标之间的关联性基础上,建立隧道服役性能评估的指标体系,包括相对沉降平均值、差异沉降平均值、收敛平均值、渗漏水、裂缝和剥落,并给出指标的具体计算方法。

2) 提出建立盾构隧道服役性能指标的具体步骤和理论,具体包括建立评估指标体系、收集评估样本、由专家评估服役性能及采用偏最小二乘方法拟合评估结果。本文得出的 T_{SI} 计算公式如式(6)所示,该式能代表 84.1% 的专家评估结果。

3) 讨论了式(6)的适用范围,包括评估对象为与本文类似的地铁盾构隧道,以及隧道的运营年限应在 20 年以内。以广州某地铁盾构隧道某区间为依托,描述了 T_{SI} 计算公式在隧道健康评估中的应用。

目前 T_{SI} 计算公式的局限性主要在于其对运营年限的要求,后续可采用指标变权理论或者建立马尔科夫链和时间序列等模型,同时考虑指标随运营年限的退化对公式权重进行修正。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] Federal Highway Administration. Highway and rail transit tunnel inspection manual[M]. Washington D.C.: [s.n.], 2005.
- [3] 罗鑫,夏才初.隧道病害分级的现状及问题[J].地下空间与工

程学报,2006(5): 877.

- [4] 伍振志,杨林德,时蓓玲,等.裂缝对隧道管片结构耐久性影响及其模糊评价[J].地下空间与工程学报,2007(2): 224.
- [5] 叶耀东.软土地区运营地铁盾构隧道结构变形及健康诊断方法研究[D].上海:同济大学,2007.
- [6] 胥森,王华牢,夏才初.盾构隧道结构病害状态综合评价方法研究[J].地下空间与工程学报,2010(1): 201.
- [7] YUAN Y, BAI Y, LIU J. Assessment service state of tunnel structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012(1): 72.
- [8] SPYRIDIS P. Adjustment of tunnel lining service life through appropriate safety factors[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014(3): 24.
- [9] BOARD H R. The AASHTO roads test: pavement research. report 5[M]. Washington D.C.: National Academy of Sciences-National Research Council, 1962.
- [10] SAITO M, SINHA K C. Delphi study on bridge condition rating and effects of improvements[J]. Journal of Transportation Engineering, 1991(3): 320.
- [11] SHEN S L, WU H N, CUI Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014(3): 9.
- [12] LI X, YAN Z, WANG Z, et al. Experimental and analytical study on longitudinal joint opening of concrete segmental lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015(6): 52.
- [13] 王如路,张冬梅.超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J].岩土工程学报,2013(6): 1092.

(收稿日期:2018-01-23)

(上接第 139 页)

据采集处理器采用无线连接,具有实时检测超限报警、事后回放、报告生成等功能,便于现场作业人员和管理人员对钢轨状态的统计分析。

3) 所制钢轨检测仪的示值误差为 $-0.016 \sim +0.003$ mm,测量重复性精度达到了 0.018 mm,远高于其他同类仪器,可适用于城市轨道交通及高铁的工务作业。

参考文献

- [1] 李海锋,陈文,陈雯.高速铁路钢轨型面变化的跟踪观测及仿真分析[J].城市轨道交通研究,2012(2): 61.
- [2] 郭雁一夫.钢轨轮廓检测系统的设计与实现[D].长沙:湖南大学,2016.
- [3] 胡庆丰,安博格 GRP1000 轨检小车进行无碴轨道检测的作业方法[J].铁道勘察,2008(3): 17.

(收稿日期:2018-02-23)

长三角高铁、动车全部迈入电子客票时代

记者从中国铁路上海局集团有限公司获悉,长三角铁路第三批 24 个车站已于 11 月 26 日启用电子客票。至此,长三角高铁和动车停靠站全部迈入电子客票时代。电子客票是提升铁路智能化水平的重要途径,与旅客出行体验密切相关。今年以来,按照中国国家铁路集团有限公司的要求,长三角铁路有序推进电子客票应用试点和推广工作。按照计划,即将开通的郑阜、商合杭(北段)、徐盐、连镇(北段)4 条新线共 23 个车站将于开通之日起同步启用电子客票。届时,长三角铁路所有高铁线路和 160 个动车组停靠车站将实现电子客票应用,为 2020 年铁路春运打下坚实基础。

(摘自 2019 年 11 月 30 日新华网,记者 贾远琨报道)