

文章编号:1005-0523(2018)04-0008-07

基于相对差异函数的砌石隧道安全性评价

陈朝辉

(许昌市市政实业有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:砌石衬砌隧道作为铁路线路上的重要工程,运营过程中受到多种因素的共同作用,隧道内经常出现影响运营安全的衬砌病害。以成都局砌石衬砌病害资料为基础,统计分析砌石衬砌病害分布情况,根据层次分析法原理建立了砌石衬砌隧道安全评价指标体系,引入相对差异函数确定指标对各安全等级的隶属度,通过可变识别模型计算砌石衬砌隧道的安全评价值。通过对典型隧道进行评价表明,引入相对差异函数对砌石衬砌隧道安全进行评价是可行的,而且评价结果更加合理,可为砌石衬砌隧道的维护提供依据。

关键词:运营铁路隧道;砌石衬砌,模糊综合评价;相对差异函数

中图分类号:U457

文献标志码:A

铁路隧道一般修建于崇山峻岭之间,在隧道工程的发展过程中,砌石因为其可就地取材、耐久性较好的优点,加之混凝土未广泛应用,砌石衬砌曾被大规模应用于隧道施工。由于砌石衬砌的稳定性是砌块与砂浆共同作用的结果,随着运营时间的增加而呈现劣化趋势,加之衬砌周围环境的影响,多数砌石衬砌隧道出现砌缝砂浆脱落,渗漏水,衬砌背后空洞等病害^[1-3],降低了隧道承载性能,给隧道内行车的安全造成严重影响。

砌石衬砌的安全直接影响隧道整体结构的安全。J Idris, T Verdel, 等^[4]利用理论推导和数值模拟分析了砌石衬砌的受力特性和承载特点。晏启祥, 等^[5]利用地质雷达对条石衬砌隧道进行了检测,分析了在不同空洞、不同衬砌厚度以及渗漏水的情况下,隧道整体安全性的变化规律。罗鑫^[6]系统的分析了公路隧道健康状态的影响因素,建立了较为全面的隧道健康评价体系,对隧道当前状态进行了量化评价。洪平, 等^[7]人以层次分析法为基础,结合铁路隧道病害特点,对铁路混凝土衬砌隧道的安全状态进行了综合模糊评判。砌石衬砌由砌块和砂浆砌筑而成,其安全状态受到多种病害的作用,这与混凝土衬砌在形式上有所不同。因此有必要分析砌石衬砌病害的特点,对砌石衬砌隧道进行全面、合理、客观、科学的分析和评价,为砌石衬砌隧道的维护提供参考和依据。

1 砌石衬砌评价指标体系的建立

砌石衬砌隧道的整体状态是多种病害的综合体现,分析砌石衬砌隧道的安全状态需要考虑砌石衬砌的病害特点。通过分析成都铁路局下成渝铁路和川黔铁路共 118 座隧道,全砌石衬砌、拱圈或边墙砌石衬砌隧道有 87 座,占 73.73%,进一步统计砌石衬砌隧道的病害分布,可知在砌石衬砌隧道中主要包含衬砌开裂或错动、衬砌变形或移动、渗漏水和衬砌材质劣化 4 种结构性病害,且各病害分布占比如图 1 所示^[8]。

收稿日期:2018-04-05

作者简介:陈朝辉(1974—),男,高级工程师,研究方向为建设施工及工程项目管理。

通过对砌石衬砌隧道进行地质雷达检测发现,砌石衬砌隧道拱顶、拱腰等区域均出现不同大小的空洞,并且延续长度较大。空洞的出现改变了衬砌的受力状态,给隧道的安全造成严重的影响,在对隧道安全评价时,需要考虑空洞对隧道安全的影响^[9]。

根据成都铁路局隧道秋季检查资料和现场调研结果,综合考虑我国《铁路隧道设备劣化评定标准—隧道》,从砌石衬砌隧道安全角度出发,确定出该类隧道安全影响因素为渗漏水 and 衬砌的材质劣化、裂缝、背后空洞、变形或位移 5 种病害,并建立砌石衬砌隧道安全状态三级评价指标体系,如图 2 所示。

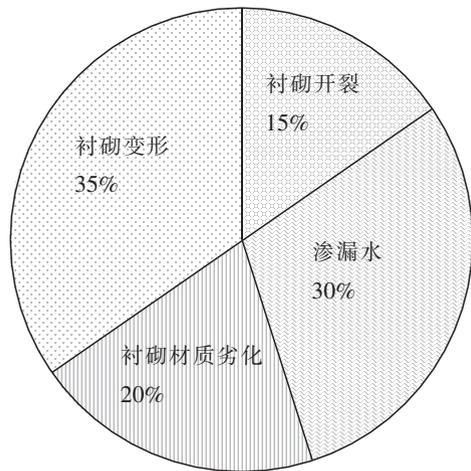


图 1 砌石衬砌隧道典型病害分布
Fig.1 Distribution of typical diseases of masonry lining tunnel

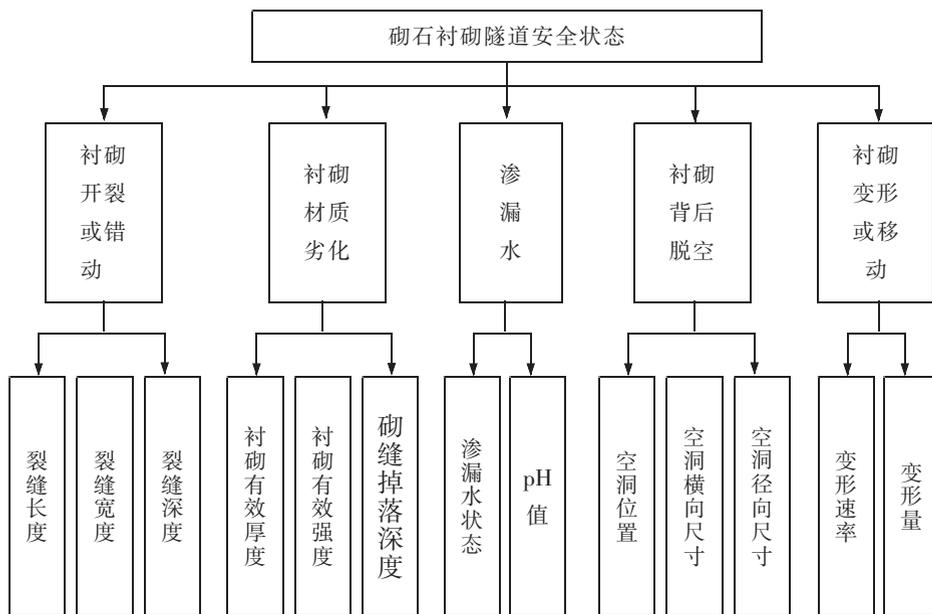


图 2 砌石衬砌隧道安全评价指标体系
Fig.2 Safety evaluation index system of masonry lining tunnel

目标层为砌石衬砌隧道安全状态 u ; 准则层因素 $u=(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ 包含砌石衬砌隧道内主要的病害类型; 指标层因素 $u_i=(u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})$ 包含隧道衬砌病害的主要检测指标; u_{in} 表示准则层第 i 个因素中的第 n 个检测指标。通过对检测指标进行定量或定性的评价,进而逐层评价隧道的安全状态。

2 砌石衬砌隧道安全评估方法

2.1 评级的确定

目前四级评定标准已经在公路和铁路隧道得到广泛应用,本文依据铁路隧道维护相关规定,采用四级划分法将砌石衬砌隧道安全状态划分为安全、较安全、危险、极危险四个等级,分别以符号 I、II、III、IV 表示,确定砌石衬砌隧道安全状态等级,如表 1 所示。

表1 砌石衬砌隧道安全状态等级划分表
Tab.1 Classification of safety state of masonry lining tunnel

安全等级	隧道整体状况	健康值 F
I (安全)	结构无破损或存在轻微破损	$3.5 \leq F \leq 4.5$
II (较安全)	结构存在破坏	$2.5 \leq F \leq 3.5$
III (危险)	结构存在较严重破坏	$1.5 \leq F \leq 2.5$
IV (极危险)	结构存在严重破坏	$0.5 \leq F \leq 1.5$

2.2 指标权重的确定

运营铁路隧道健康评价体系是一个多项目、多层次的复杂系统,各评价指标在砌石衬砌安全评价中的影响程度也不同,要想得到隧道整体的安全状态,就需要确定各层评价指标的“相对影响程度”,即权重。因传统权重确定基本为相关专家的经验总结,具有较大的主观性与随意性。故本文采用改进的层次分析法确定指标权重,即利用乘积标度法确定各指标的相对权重,以此为基础较为灵活的对指标展开递进乘积分析。通过建立判断矩阵,计算出判断矩阵对应的特征向量和最大特征值,然后进行一致性检验,得到各指标权重结果如下所示:

1) 准则层指标权重(衬砌开裂、材质劣化、渗漏水、空洞、变形)

$$W=(0.183 \ 6:0.248 \ 6:0.248 \ 6:0.183 \ 6:0.135 \ 6)$$

2) 指标层指标权重

衬砌开裂或错动(长度、宽度、深度): $W_1=(0.365 \ 2:0.365 \ 2:0.269 \ 7)$

衬砌材质劣化(有效强度、有效厚度、掉灰深度): $W_2=(0.298 \ 1:0.298 \ 1:0.403 \ 7)$

渗漏水(漏水状态、pH 值): $W_3=(0.575 \ 2:0.424 \ 8)$

衬砌背后空洞(位置、横向尺寸、径向尺寸): $W_4=(0.323 \ 4:0.238 \ 8:0.437 \ 9)$

衬砌变形或移动(变形速率、变形量): $W_5=(0.424 \ 8:0.575 \ 2)$

2.3 隶属函数的确定

1) 相对差异函数定义。相对差异函数:设一论域 U ,论域上存在事物和现象的对立模糊概念 \underline{A} ,对于任意一个元素 $u, u \in U$,在相对隶属函数的连续数轴任一点上, u 对 \underline{A} 表示吸引和排斥性质的相对隶属度分别为 $\mu_d(u), \mu_g(u)$, 设

$$D_{\underline{A}}(u)=\mu_d(u)-\mu_g(u) \quad (1)$$

则 $D_{\underline{A}}(u)$ 称为 u 对 \underline{A} 的相对差异度。

映射

$$\begin{cases} D_{\underline{A}}: D \rightarrow [-1, 1] \\ u \mapsto D_{\underline{A}}(u) \in [-1, 1] \end{cases} \quad (2)$$

称为 u 对 \underline{A} 的相对差异函数。

当 $\mu_d(u) > \mu_g(u), 0 < D_{\underline{A}}(u) < 1$; 当 $\mu_d(u) = \mu_g(u), D_{\underline{A}}(u) = 0$; 当 $\mu_d(u) < \mu_g(u), -1 < D_{\underline{A}}(u) < 0$, 如图 3 所示。

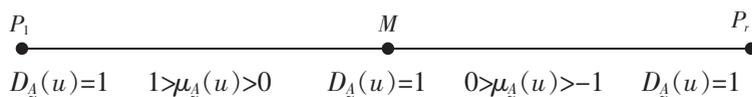


图3 相对差异函数示意图

Fig.3 Schematic diagram of relative difference function

2) 相对隶属函数模型。若实轴上模糊可变集合 \tilde{V} 的吸引域设定为 $X_0=[a, b]$, 即 $0 < D_{\Delta}(u) < 1$ 区间, 则 $X=[a, b]$ 为包含 $X_0 (X_0 \subset X)$ 的某一上、下界范围域区间, 其位置关系如图 4 所示。



图 4 点 x, M 与区间 X_0, X 的位置关系

Fig.4 The position relationship between point x, M and interval X_0, X

由模糊可变集合 \tilde{V} 定义可知, $[c, a]$ 和 $[b, d]$ 为 \tilde{V} 的排斥域区间, 即 $-1 < D_{\Delta}(u) < 1$ 区间。假定 M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D_{\Delta}(u)=1$ 的点值, 通过采用相对隶属函数公式, 依照实际情况就能判断 M 点位置。其中 x 为区间 $[c, d]$ 内任意点的量值, 则当 x_c 处于 M 点左侧时的相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_{\Delta}(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^{\beta}; & x \in [a, M] \\ D_{\Delta}(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^{\beta}; & x \in [c, a] \end{cases} \quad (3)$$

而当 x_c 处于 M 点右侧时的函数模型为

$$\begin{cases} D_{\Delta}(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^{\beta}; & x \in [M, b] \\ D_{\Delta}(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b}\right)^{\beta}; & x \in [b, d] \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)和公式(5)中 β 均为非负实数, 通常情况下可取 $\beta=1$, 即相对差异函数模型为线性函数, 两式满足: ① 当 $x=a, x=b$ 时, $D_{\Delta}(u)=0$; ② 当 $x=M$ 时, $D_{\Delta}(u)=1$; ③ 当 $x=c, x=d$ 时, $D_{\Delta}(u)=-1$ 。满足相对差异函数的定义要求。

确定 $D_{\Delta}(u)$ 后, 可通过公式(5)求得相对隶属度 $\mu_{\Delta}(u)$

$$\mu_{\Delta}(u) = [1 + D_{\Delta}(u)] / 2 \quad (5)$$

显然, 有

$$\mu_{\Delta}(u) = 0, \quad x \notin [c, d] \quad (6)$$

3) 模糊可变评价模型。在对模糊定义的概念下, 可变识别模型公式^[9]

$$\mu_{\Delta}(u)_j = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - \mu_{\Delta}(u)_{ij})]^p}{\sum_{i=1}^m [\omega_i \mu_{\Delta}(u)_{ij}]^p} \right]^{\frac{a}{p}}} \quad (7)$$

式中: $\mu_{\Delta}(u)_j$ 为指标对 j 级的相对隶属度; ω_i 为指标 i 的相对变权权重; a 为模型优化准则参数; p 为距离参数。

通常情况下, 根据 a 和 p 取值的不同, 可以确定不同的模糊评估计算模型, 如表 2 所示。

表 2 可变模糊评估计算模型

Tab.2 Variable fuzzy evaluation model

模型类型	模型说明
$a=1, p=1$	描述为模糊综合评判线性模型
$a=1, p=2$	描述为 TOPSIS 理想点模型
$a=2, p=1$	描述为神经网络系统中神经元的激励函数模型
$a=2, p=2$	描述为多目标模糊优化模型

3 砌石衬砌安全评价在工程中的应用

通过对该砌石隧道进行检测和调研, 得到该隧道的检测值, 如表 3 所示。

表3 砌石衬砌隧道实测值及调研情况
Tab.3 Actual values and investigation of masonry lining tunnel

安全评估指标		实测值
衬砌开裂或错动	长度/mm	2 000
	宽度/mm	1.6
	深度/mm	250
衬砌变形或移动	变形量/mm	2.4
	变形速率/(mm/year)	—
衬砌材质劣化	检测强度/MPa	45
	设计强度/MPa	50
	检测厚度/mm	550
	设计厚度/mm	600
	砌缝掉灰深度/mm	170
衬砌背后空洞	空洞位置	拱顶
	横向尺寸/mm	—
	径向尺寸/mm	—
渗漏水	状态	滴水
	pH 值	—

根据我国《铁路隧道设备劣化评定标准-隧道》和《铁路桥隧建筑物修理规则》，建立隧道安全评价指标标准，汇总如表4所示。

表4 砌石衬砌隧道指标等级评价标准
Tab.4 Evaluation criteria for index grades of masonry lining tunnels

安全评估指标	安全等级				
	安全	较安全	危险	极危险	
衬砌开裂或错动	长度/mm	0~100	100~5 000	5 000~10 000	>10 000
	宽度/mm	0~1	1~3	3~5	>5
	深度/mm	0~3.33	3.32~5	5~6.66	6.66~10
渗漏水	状态/mm	0~2.5	2.5~5	5~7.5	7.5~10
	pH	7.9~6	6~5	5~4	4~0
衬砌材质劣化	衬砌强度/MPa	1~0.85	0.85~0.75	0.75~0.65	0.65~0
	衬砌厚度/mm	10~9	9~7.5	7.5~6	6~0
	砌缝掉灰深度/mm	0~1	1~2	2~4	4~10
衬砌背后空洞	位置/mm	0~2.5	2.5~5	5~7.5	7.5~10
	横向尺寸/mm	0~500	500~1 000	1 000~1 500	1 500~2 000
	径向尺寸/mm	0~250	250~500	500~750	750~1 000
衬砌变形或移动	变形量/mm	0~2.5	2.5~5	5~7.5	7.5~10
	变形速率/(mm/year)	0~1	1~3	3~10	>10

根据表4中的评估标准,构造模糊评价隶属函数的各项参数 (a, b, c, d, M) ,建立标准区间矩阵 I_{cd} 、范围区间矩阵 I_{cd} 、点值矩阵 M 。分别对定性指标和定量指标进行隶属度的判定。对于定性指标,由于指标值没有明确的界定区间,无法计算其相对隶属度函数,可根据调查描述进行定性的判定,直接确定其特征值对应的安全等级的相对隶属度为1,则其余各评估等级的相对隶属度为0。对于定量指标,首先根据实际检测值,利用相对差异函数原理,确定出指标值 x 处于 M 值左侧还是右侧,然后运用相关公式计算出指标对评估等级标准的差异函数 $D_{\Delta}(u)_{ij}, i=1, 2, \dots, m$ 为指标数量, $j=1, 2, \dots, n$ 为安全评估等级。根据公式5计算指标相对各评估等级的相对隶属度 $\mu_{\Delta}(u)_{ij}$ 。

根据以上分析,逐级计算砌石衬砌隧道的隶属值,根据级别特点确定如下判别式

$$\begin{cases} 1.0 \leq H \leq 1.5, \text{属于 I 级} \\ j-0.5 \leq H \leq j, \text{属于 } j \text{ 级, 偏 } (j-1) \text{ 级} \\ j \leq H \leq j+0.5, \text{属于 } j \text{ 级, 偏 } (j+1) \text{ 级} \\ n-0.5 \leq H \leq n, \text{属于 } n \text{ 级} \end{cases} \quad (8)$$

根据以上分析,利用可变识别模型计算该砌石衬砌隧道的安全状态值,并判定其隶属等级,汇总于表5。

表5 砌石衬砌隧道安全评价结果
Tab.5 Results of safety assessment of masonry lining tunnels

模型类型	$a=1, p=1$	$a=1, p=2$	$a=2, p=1$	$a=2, p=2$
计算结果	3.084 7	2.972 2	3.065 1	3.047 8
状态判定	较安全(II)级 偏安全(I)级	较安全(II)级 偏危险(III)级	较安全(II)级 偏安全(I)级	较安全(II)级 偏安全(I)级

根据表5的结果,最终判定该砌石衬砌隧道属于较安全级别,但是需要加强监视,以防影响隧道运营安全的病害发生。

4 结论

1) 通过对病害统计分析及调研可以发现,砌石衬砌隧道在运营隧道中占有较大比例,其主要衬砌病害包含衬砌开裂或错动,衬砌变形或移动,渗漏水 and 衬砌材质劣化4种,严重影响隧道结构的安全。

2) 相对差异函数可确定4种不同类型的评价模型,利用不同的模型分别对隧道进行评价,可以更加准确科学的判定隧道的安全状态。根据评价结果与现场调研情况对比,说明该评价模型的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 周光裕. 考虑参数相关性的隧道围岩稳定性分析[J]. 公路工程, 2017, 42(6): 283-286.
- [2] RICHARDS J A. Inspection, maintenance and repair of tunnels: International lessons and practice[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 1998, 13(4): 369-375.
- [3] 王复华. 渠道砌石衬砌的现状和问题[J]. 中国农村水利水电, 1991(2): 11-13.
- [4] IDRIS J, VERDEL T, ALHEIB M. Numerical modelling and mechanical behaviour analysis of ancient tunnel masonry structures[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2008, 23(3): 251-263.
- [5] 晏启祥, 郑俊, 刘记, 等. 条石衬砌公路隧道病害检测及安全性评估[J]. 公路, 2010(6): 228-233.

- [6] 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.
- [7] 洪平, 刘鹏举. 层次分析法在铁路运营隧道健康状态综合评判中的应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 28-32.
- [8] 李明, 陈洪凯, 熊峰伟. 隧道衬砌背后空洞健康判据试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 398-402.
- [9] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994.

Safety Evaluation of Masonry Lining Tunnels Based on Relative Difference Function

Chen Zhaohui

(Xuchang Municipod Industry Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Masonry lining is very important in railway line, and it is influenced by many factors in operating process. Lining diseases may often have negative effects on running safety. Based on masonry lining disease information of Chengdu Bureau, by analyzing the distribution of masonry lining diseases, this paper established masonry lining tunnel safety evaluation system according to AHP, introduced relative difference function to identify indicators for each membership level of security and obtained the value of the safety evaluation masonry lining of the tunnel through a variable recognition model. The evaluation of typical tunnel shows that using relative difference function masonry lining tunnel safety evaluation is feasible, and the evaluation results are more reasonable, which can provide the basis for the maintenance of masonry lining of the tunnel.

Key words: railway operation tunnel; masonry lining; fuzzy comprehensive evaluation; relative difference function