

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.08.022

隧道结构病害机理及理论量化方法

刘宇, 王鹏宇, 王述红, 凌爽

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 以辽宁省内高速公路隧道定期检测资料为基础,对隧道衬砌既有结构病害的分布特征与规律进行归纳.在深入研究隧道主要结构病害的基础上,采用可拓学理论,提取数个能准确反映结构健康状态的指标,进行量化分级并建立相应的物元模型,从而确定各指标所占权重以及隧道结构病害等级,将衬砌结构病害定性评价与定量研究相结合,构建隧道衬砌结构健康状态评价体系,方便管理者做出合理决策.同时结合隧道工程实际检测数据进行可拓模型的计算分析,验证模型的工程适用性.

关键词: 隧道稳定性;施工缺陷;层次分析法;量化分析

中图分类号: TU 990.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)08-1185-06

Disease Mechanism and Theoretical Quantification Method of Tunnel Structure

LIU Yu, WANG Peng-yu, WANG Shu-hong, LING Shuang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Peng-yu, E-mail: wangpengyu6666@126.com)

Abstract: The distribution characteristics and laws of existing structural defects of tunnel lining are summarized based on the regular inspection data of expressway tunnels in Liaoning Province. On the basis of in-depth study of the main structural diseases of the tunnel, the extenics theory is used to extract several indicators that can accurately reveal the health status of the structure, to quantify and classify the health status, and to establish the corresponding matter-element model, so as to determine the weight of each indicator and the grade of tunnel structure disease. A health evaluation system for tunnel lining structure is constructed by combining qualitative evaluation and quantitative research, which is convenient for managers to make reasonable decisions. At the same time, based on the actual test data of tunnel engineering, the calculation and analysis of the extension model are carried out to verify the engineering applicability of the model.

Key words: tunnel stability; construction defect; analytic hierarchy process; quantitative analysis

隧道工程的结构缺陷可能发生在全寿命周期中的任一阶段,业内常见的衬砌结构病害主要包括渗漏水、混凝土劣化、衬砌腐蚀剥落以及背后空洞等^[1-2].在同一个隧道工程主体中,各种结构病害往往不是单一存在的,它们相互影响,一种病害的发生会加剧其他病害的发展,进而降低隧道结构的承载能力与结构耐久性,威胁行车安全与舒适性^[3-5].本文结合辽宁省高速公路隧道工程的

定期检测资料,对常见的隧道病害类型进行总结,分析隧道施工缺陷及结构劣化对结构耐久性的影响,挖掘耐久性病害出现的规律与发展机理.同时结合省内典型区间隧道的病害现场检测数据,实现衬砌主要结构病害的量化处理,并构建隧道衬砌结构健康状态评价模型,进而将病害量化指标作为后续评价衬砌健康状态的依据,为深入研究隧道病害结构力学特征提供理论支撑.

收稿日期: 2018-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N17010829); 中建股份科技研发课题(CSCEC-2016-Z-20-8).

作者简介: 刘宇(1986-),男,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生; 王述红(1969-),男,江苏泰州人,东北大学教授,博士生导师.

1 公路隧道病害统计分析

1.1 公路隧道概况

辽宁省内共有普通公路隧道30余座,总长度约为22 102 m,分布于8个地级市,共20条路线。其中长隧道有6座,总长度为9 353 m,占比42.3%;中隧道有12座,总长8 862 m,占比40%;短隧道12座,总长3 887.9 m。

本次定检对分布于本溪市和抚顺市的12座隧道进行了检测,共6条线路,11 576 m。其中长隧道5座,总长7 358 m;中隧道4座,总长3 080 m;短隧道3座,总长1 138 m。

1.2 衬砌典型病害情况汇总

三架岭隧道:该隧道裂缝共计139条,总长1 169.7 m;其中隧道衬砌环向裂缝有93条,约占总数的66.9%;非环向裂缝有46条,约占总数的33.1%;非环向裂缝中有27条纵向裂缝,占非环向裂缝总数的58.7%,其他裂缝(短环向、斜向)占非环向裂缝总数的41.3%。隧道衬砌局部混凝土钢筋外露、锈蚀;施工缝处渗漏水较严重,拱圈受水侵蚀,白化现象严重;边墙与拱腰结合处渗水严重,边墙受水侵蚀;拱顶蜂窝麻面严重。

八盘岭隧道:该隧道裂缝共计211条,总长2 009 m;其中环向裂缝142条,累计长度为1 702 m,约占总数的67.3%;非环向裂缝69条,累计长度为306 m,约占总数的32.7%;非环向裂缝中有45条纵向裂缝,累计长度为267 m,占非环向裂缝总数的65.2%,斜向裂缝占非环向裂缝总数的34.8%。环向裂缝宽0.5~5 mm,非环向裂缝宽0.3~2 mm,个别裂缝位置渗水白化,环向裂缝长度分布范围为1~5 m,纵向裂缝分布长度为0.8~20 m。

铁背山隧道:衬砌共有5处渗水、泛碱病害,2处位置在左侧拱腰,3处位置在右侧拱腰,累计6.4 m²;隧道共有11条环向裂缝,长度范围1~20 m,最大裂缝宽度0.75 mm;共有30条纵向裂缝,最大裂缝宽度2 mm,长度范围5~15 m;共有2处斜向裂缝,最大裂缝宽度1 mm,长度均为10 m。在施工缝处共有5处起层剥落,总面积0.22 m²。衬砌厚度检验见图1,限于篇幅仅截取了典型结构缺陷雷达图像,出现衬砌不密实问题。

大凹岭隧道:该隧道裂缝共计39条,总长1 065.5 m;其中隧道衬砌环向裂缝有1条,约占总数的2.6%;非环向裂缝有38条,约占总数的97.4%,裂缝宽度为0.25~2 mm。非环向主要以

边墙、拱腰纵向、斜向裂缝为主,局部多条纵向与斜向裂缝形成网裂。拱部大部分裂缝存在渗水痕迹,多数白化。检测中发现,衬砌表面大部分较潮湿,路面两侧有局部积水。

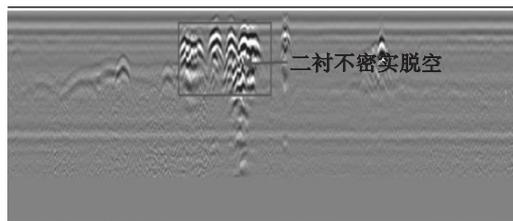


图1 铁背山隧道典型病害图

Fig. 1 Typical disease map of Tiebeishan tunnel

1.3 结构病害统计分析

受篇幅所限,上述只列举了本次定检工作中的典型隧道与相关病害,对隧道各病害主要形式、发生位置进行统计发现:

1) 隧道衬砌裂缝环向占比通常在60%以上,且多发生在衬砌浇筑分隔带处,表明裂缝以构造性裂缝居多。

2) 纵向裂缝多数存在于隧道拱腰位置,连续长度最大值小于15 m,裂缝宽度在0.1~1.5 mm之间。

3) 衬砌渗漏水问题不突出,单个隧道渗漏水病害最多为5处,最大累积面积为17.15 m²。

4) 通过地质雷达进行衬砌厚度及背后空洞检测,衬砌厚度达标率在70%以上,个别隧道存在一、二衬接触不密实的情况,存在结构空洞。

5) 单个隧道衬砌起层剥落最多为5处,位置均在拱腰施工缝处,剥落总面积为0.22 m²。

2 隧道结构病害评价模型构建

运用可拓理论对隧道结构健康状态评估,确定隧道结构病害评价因子、物元模型与各评价指标的权重,综合评估确定隧道结构的健康状态^[6-7]。

2.1 模型构建步骤

采用可拓理论与层次分析结合法来构建隧道结构病害的评价模型,具体步骤如下:确定隧道结构病害的经典域、节域及待评物元。待评物元确定后,通过层次分析法结合相对重要性判断准则,对隧道病害评价模型的评价指标进行两两比较,形成判断方阵^[8],之后计算出每行判断指标的均值或平方根等数值,随后对各指标对应数值进行归一化处理,初步得到各指标在目标问题中对应的权重大小^[9]。对各指标对应的开方数值进行正规

化处理,得到各指标在目标模型中的比重向量,进行判断矩阵的最大特征值计算,最后进行一致性检验^[10].上述所有参数均确定后,即可判定对象隧道结构病害等级.

2.2 评价指标及状况值的选取

《公路隧道养护技术规范》中根据评分情况对土建结构技术状况划分为 5 类,但评分权重表中的病害不仅包含隧道衬砌结构病害,还有路面、检修道、吊杆及预埋件、交通标志与标线等,具体见表 1.

表 1 土建结构各分项权重表

Table 1 Weight table of various subitems of civil construction

衬砌结构	分项权重 w_i	分项	分项权重 w_i
洞口	15	检修道	2
洞门	5	排水设施	6
结构破损	40	吊顶及预埋件	10
渗漏水		内装饰	2
路面	15	交通标志	5

根据资料中隧道常见病害,有侧重性地将隧道结构病害评价指标定为衬砌结构开裂、渗漏水、衬砌厚度不足与背后空洞、衬砌结构起层剥落、材料强度劣化 5 项,各评价指标技术状况对应的状况值域定为 0~4 之间,见表 2~表 7.

表 2 当裂缝存在发展时的评定标准

Table 2 Evaluation criteria for the developing of cracks

裂缝宽度 b/mm		裂缝长度 l/m		评定状况值
$b > 3$	$b \leq 3$	$l > 5$	$l \leq 5$	
√		√		3/4
√			√	2/3
	√	√		2
	√		√	2

表 3 当无法确定裂缝是否存在发展时的评定标准

Table 3 Evaluation criteria for failure to determine whether cracks develop

裂缝宽度 b/mm			裂缝长度 l/m			评定状况值
$b > 5$	$5 \geq b > 3$	$3 \geq b$	$l > 10$	$10 \geq l > 5$	$5 \geq l$	
√			√			3/4
√				√		2/3
√					√	2/3
	√		√			3
	√			√		2/3
	√				√	2
		√	√	√	√	1/2

表 4 衬砌断面劣化、起层剥落的评定标准

Table 4 Evaluation criteria of lining section deterioration and peeling

主要原因	结构	剥落可能性		劣化程度 (有效厚度/设计厚度)			状况值
		有	无	$< 1/2$	$1/2 \sim 2/3$	$> 2/3$	
		√					4
			√				1
劣化、冻害、设计或施工不当等	拱部			√			3
					√		2
						√	1
	侧墙	√					3
			√				1
				√		3	
					√	2	
						√	1

表 5 钢筋腐蚀的评定标准

Table 5 Evaluation criteria for corrosion of steel bars

主要原因	腐蚀程度	状况值
	小面积的腐蚀	1
盐害、渗漏水、酸(碱)化等	浅孔蚀或钢筋全周生锈	2
	钢材断面减小程度明显	3

表 6 隧道衬砌渗漏水的评定标准

Table 6 Evaluation criteria for leakage of tunnel lining

结构	主要异况	漏水程度		是否影响行车		状况值
		喷射涌流	滴漏浸渗	是	否	
拱部	漏水	√		√		4
			√	√		3
			√	√		2
			√		√	1
	挂冰			√		3
侧墙	漏水			√		1
		√		√		3
			√	√		2
			√		√	2
	冰柱			√		1
路面	沙土流出			√		3/4
					√	1
	积水			√		3/4
					√	1
结冰			√		3/4	
				√	1	

表 7 衬砌厚度不足与背后空洞技术状况评定标准

Table 7 Standard for evaluation of lining thickness and behind cavitation

状况值	技术状况描述
0	衬砌厚度满足要求,无空洞
1	背后存在空隙,无扩大可能
2	背后存在空隙,有扩大可能
3	混凝土有可能掉下;背面存在大的空洞,上部落石可能掉落至拱背
4	背面存在大的空洞,衬砌有效厚度很薄,空腔上部可能掉落至拱背

3 病害评价模型在隧道工程中的应用

3.1 工程概况

铁背山隧道位于黑大线抚顺市抚顺县高丽营子境内,建于 1989 年.隧道全长 178 m,隧道断面净宽 7 m,两侧各设 1.0 m 的检修道,垂直净高 5 m,纵坡 2.5%;衬砌采用钢筋混凝土,设计标准为二级公路标准.历年维修记录:2001 年对该隧道的排水设施进行维修,增设泄水管,对路面加铺混凝土进行维修;2014 年隧道进行了粘贴钢板、碳纤维布及排水系统大修.

3.2 隧道检测结果汇总

渗漏水病害与衬砌表层脱落情况:衬砌共有 5 处渗水泛碱病害,2 处位置在左侧拱腰,3 处位置在右侧拱腰,累计 6.4 m²;共有 5 处起层剥落,位置均在侧墙施工缝处,总面积 0.22 m².

衬砌开裂病害情况:环向裂缝共有 11 条,最大裂缝宽度 0.75 mm,长度范围 1~20 m;纵向裂缝共有 30 条,最大裂缝宽度 2 mm,长度范围 5~15 m;斜向裂缝共有 2 条,最大裂缝宽度 1 mm,长度 10 m.

衬砌厚度不足或背后空洞病害情况:采用探地雷达设备,雷达图像横坐标表示位置,单位为 m,即沿隧道纵向的方位;纵坐标表示测深,单位为 m,即沿隧道径向的深度.探测结果显示衬砌二衬有效厚度比设计厚度最多低 50%,且隧道出现大范围初衬、二衬结合不密实现象.限于篇幅仅截取了典型结构缺陷雷达图像,见图 2.

隧道衬砌材料强度劣化情况:在进行隧道二衬混凝土强度检测过程中,按 10 m 为一个检测构件进行抽样检测,在每个检测构件平整的混凝土衬砌表面均匀布置 10 个大小约为 200 mm × 200 mm 的测区.在每个测区内随机选择 4 个测点

进行弹击测试.经检测发现隧道衬砌混凝土实测强度为 21.1 MPa,而混凝土设计强度为 18 MPa,混凝土强度满足要求.

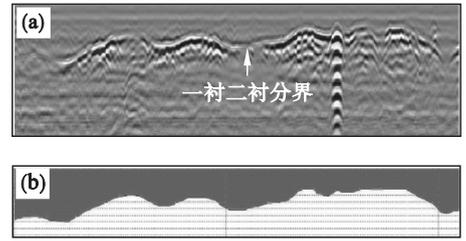


图 2 铁背山隧道衬砌厚度典型缺陷图像

Fig. 2 Typical defect image of Tiebeishan tunnel lining thickness

(a) —衬砌典型缺陷雷达图像; (b) ——衬二衬分界.

3.3 隧道结构病害评价模型中物元模型的确定

隧道结构病害模型经典域与节域的确定:将结构病害等级分为 4 类,即 N_1 为完好状态, N_2 为轻微破损, N_3 为中等破损, N_4 为严重破损,根据上述建立的评价指标 ($c_1 \sim c_5$) 及量化分级标准 ($k_1 \sim k_4$),将隧道衬砌结构各等级对应的经典域物元表示为

$$R_1 = \begin{bmatrix} k_1 c_1(0,1) \\ c_2(0,1) \\ c_3(0,1) \\ c_4(0,1) \\ c_5(0,1) \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} k_2 c_1(1,2) \\ c_2(1,2) \\ c_3(1,2) \\ c_4(1,2) \\ c_5(1,2) \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} k_3 c_1(2,3) \\ c_2(2,3) \\ c_3(2,3) \\ c_4(2,3) \\ c_5(2,3) \end{bmatrix}, R_4 = \begin{bmatrix} k_4 c_1(3,4) \\ c_2(3,4) \\ c_3(3,4) \\ c_4(3,4) \\ c_5(3,4) \end{bmatrix}.$$

确定了隧道病害评价模型中主要物元的经典域之后,便可以确定物元节域,如下所示:

$$R_p = \begin{bmatrix} P c_1(0,4) \\ c_2(0,4) \\ c_3(0,4) \\ c_4(0,4) \\ c_5(0,4) \end{bmatrix}.$$

隧道结构病害模型待评价物元的确定:根据隧道定期检测结果并结合各项评价指标的技术状况描述,对各指标的状况值进行打分.衬砌左右拱腰处共有 5 处滴漏水病害,且已对车辆通行产生一定程度的影响,所以衬砌渗漏水指标评定值取为 2.

全隧道施工缝处均有开裂:隧道衬砌共有 11

条环向裂缝,最大裂缝宽度 0.75 mm,长度范围 1~20 m;共有 30 条纵向裂缝,最大裂缝宽度 2 mm,长度范围 5~15 m;共有 2 处斜向裂缝,最大裂缝宽度 1 mm,长度均为 10 m,所以衬砌开裂指标评定值取为 4. 考虑到隧道出现大范围初衬、二衬结合不密实现象,所以将衬砌有效厚度指标评定值取为 3.

衬砌共有 5 处起层剥落,位置均在侧墙施工缝处,面积为 0.22 m²,所以衬砌起层脱落评定值取为 3. 检测结果显示隧道衬砌混凝土实测强度为 21.1 MPa,而混凝土设计强度为 18 MPa,混凝土强度满足设计要求,所以材料强度劣化评定值定为 1.

综合以上分析,初步得到待评价物元如下:

$$R = \begin{bmatrix} P & c_1 & 4 \\ & c_2 & 2 \\ & c_3 & 1 \\ & c_4 & 3 \\ & c_5 & 3 \end{bmatrix}$$

3.4 评价指标权重的确定及一致性检验

将 5 种评价指标 $c_1 \sim c_5$ 形成判断方阵,见表 8,并将方阵表示为 $R = (a_{ij})$.

表 8 隧道结构病害评价模型判断方阵

Table 8 Judgment matrix of tunnel structure disease evaluation model

R	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
c_1	1	2	3	3	3
c_2	1/2	1	2	3	3
c_3	1/3	1/2	1	2	2
c_4	1/3	1/3	1/2	1	2
c_5	1/3	1/3	1/2	1/2	1

在得到上述判断方阵后,即可采用方根法计算评价指标的权重集以及判断矩阵的最大特征值,首先计算判断方阵中评价指标的权重值:

$$A_i = \sqrt[5]{\prod_{j=1}^5 a_{ij}}, \quad (1)$$

得到 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别为 1.944, 1.442, 0.935, 0.693, 0.550. 对上述结果进行正规化处理,得到

$$A = (0.349, 0.259, 0.168, 0.125, 0.099)^T,$$

即为各评价指标在衬砌结构病害评价模型中所占的比重,随后便可计算判断矩阵的最大特征值 λ , 过程如下:

$$RA = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & 3 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.349 \\ 0.259 \\ 0.168 \\ 0.125 \\ 0.099 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.042 \\ 1.440 \\ 0.861 \\ 0.609 \\ 0.448 \end{bmatrix} = (r_i),$$

得到最大特征值:

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 \frac{r_i}{nA_i} = 5.190. \quad (2)$$

式中 n 为评价指标个数. 进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = 0.048. \quad (3)$$

可以得到一致性指标为

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.043 < 0.1. \quad (4)$$

RI 为随机一致性指标,本文取值为 1.12. 理论上认为 CR 值小于 0.1 即判定物元判断矩阵符合一致性要求,由此证明判断矩阵确定的权重符合要求.

3.5 待评价物元的关联度计算与病害等级的确定

对隧道结构病害评价模型中待评价物元关联度进行计算,具体过程如下:

$$\left. \begin{aligned} k_{11} &= \frac{\rho(\mu_1, \mu_{11})}{\rho(\mu_1, \mu_{p1}) - \rho(\mu_1, \mu_{11})} = -1, \\ k_{21} &= \frac{\rho(\mu_1, \mu_{21})}{\rho(\mu_1, \mu_{p1}) - \rho(\mu_1, \mu_{21})} = -1, \\ k_{12} &= \frac{\rho(\mu_2, \mu_{12})}{\rho(\mu_2, \mu_{p2}) - \rho(\mu_2, \mu_{12})} = -\frac{1}{3}, \\ k_{22} &= -\frac{\rho(\mu_2, \mu_{22})}{|\mu_{22}|} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)为第 1,2 项评价指标与评价等级 1,2 的关联度,其中 k_{ji} 为物元模型评价指标 i 关于评价等级 j 的关联度; μ_{ji} 为经典域物元的取值; μ_{pi} 为节域物元的取值; $\rho(\mu_i, \mu_{ji})$ 为点 μ_i 到区间 $(\mu_{ji, \min}, \mu_{ji, \max})$ 的距离; $\rho(\mu_i, \mu_{pi})$ 为点 μ_i 到区间 $(\mu_{pi, \min}, \mu_{pi, \max})$ 的距离. 关联度矩阵计算结果见表 9.

计算出各评价指标关于 4 个等级的关联度后,可计算出评价模型病害等级的综合关联度,如下所示: $k_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_{ji}$, 其中 α_i 为各评价指标在物元模型中的权重. 计算可得 k_1, k_2, k_3, k_4 分别为 -0.585, -0.461, -0.433, -0.198.

根据前述所规定的的等级评定规则,隧道病

害等级确定如下:

$$k = \max \{k_j | j = 1, 2, \dots, n\} = -0.198 (j = 4) . \quad (6)$$

该隧道结构病害评价等级为 4 级, 即该隧道破损严重.

表 9 评价指标关于评价等级的关联度
Table 9 Correlation degree of evaluation index on evaluation grade

评价指标	k_1 (等级 1)	k_2 (等级 2)	k_3 (等级 3)	k_4 (等级 4)
c_1	-1	-1	-1	0
c_2	-1/3	0	0	-1/3
c_3	0	0	-1/2	-2/3
c_4	-2/3	-1/2	0	0
c_5	-2/3	-1/2	0	0

3.6 评价结果分析

将层次分析法与可拓学理论相结合, 对运营公路隧道中的主要结构病害特征依据其重要程度进行评价权重的确定, 并对结构主要病害进行量化处理, 计算后发现铁背山隧道结构病害评价等级达到了 4 级, 结构破损严重, 现场检测过程中发现隧道衬砌结构开裂严重, 且伴随渗漏水、泛碱病害的发生, 已严重影响了车辆的正常通行, 表明构建的隧道结构病害评价模型符合工程实际情况, 具有一定的工程实用价值.

4 结 论

1) 结合省内典型区间隧道的现场检测数据, 明确了隧道主要结构病害特征; 对运营中隧道结构的病害发生规律进行总结: 隧道衬砌裂缝多发生在衬砌浇筑分隔带处, 表明裂缝以构造性裂缝居多; 衬砌纵向裂缝多发生在隧道拱腰位置, 裂缝宽度要普遍小于环向裂缝宽度; 综合来看隧道二衬厚度达标率在 70% ~ 80%, 个别隧道存在一、二衬接触不密实的情况, 存在结构空洞.

2) 结合隧道衬砌主要结构病害定性描述, 以层次分析法结合可拓学理论为基础, 对隧道结构病害评价指标的类型与取值标准进行规定, 构建了隧道结构病害等级物元评价模型.

3) 将层次可拓模型应用在铁背山隧道结构病害等级评估上, 确定了病害等级评价模型中的主要评价指标, 并给出了各指标的经典域与节域; 对铁背山隧道结构的待评价物元进行了量化, 得到了待评价物元的判断矩阵与病害等级关联度, 由此判断铁背山隧道衬砌结构病害等级为 4 级, 结构破损严重.

参考文献:

- [1] 何川, 余健. 高速公路隧道维修与加固[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
(He Chuan, She Jian. Highway tunnel maintenance and reinforcement [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.)
- [2] Fujii M, Jiang Y J, Tanabashi Y. Database development for road tunnel maintenance and management by using geographical information system [C]// 1st Joint Seminar Between Tongji University and Nagasaki University. Shanghai: Tongji University, 2004: 104 - 108.
- [3] Meguid M A, Dang H K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(3): 278 - 289.
- [4] Seki S, Kaise S, Morisaki Y, et al. Model experiments for examining heaving Phenomenon in tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 128 - 138.
- [5] Lee J S, Choi H Y, Lee H U, et al. Damage identification of a tunnel liner based on deformation data [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(1): 73 - 80.
- [6] 张素磊. 隧道衬砌结构健康诊断及技术状况评定研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
(Zhang Su-lei. Research on health diagnosis and technical status assessment of tunnel lining structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.)
- [7] Harada T, Miyazawa S, Wu Z S. Structural health monitoring in a tunnel management system [C]// Proceedings of the International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Nanjing, 2005: 1411 - 1420.
- [8] 周绍文. 基于可变模糊集理论的公路隧道衬砌结构健康状况评价方法 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
(Zhou Shao-wen. Evaluation method of highway tunnel lining structure health based on variable fuzzy set theory [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [9] Ikuma M. Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(2): 143 - 149.
- [10] Chen J S, Mo H H. Numerical study on crack problems in seepage of shield tunnel using finite element method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(1): 91 - 102.