

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.08.019

基于模糊理论的隧道服役性能评价方法研究

刘超¹, 刘刚², 许崇帮², 周幸宇², 张科超³

(1. 中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400037; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 中路高科交通科技集团有限公司, 北京 100088)

摘要:为了解决国内运营隧道遇到土建结构方面的病害问题,从公路隧道勘察、设计、施工3个方面对隧道土建结构病害致病因素进行了分析,以此为基础建立了一套完备的公路隧道服役性能评价指标体系,保证了评估要素的全面性。采用改进的层次分析法(乘积标度法),结合隧道建设周期内各项影响服役性能的因素的特点,提出了一种逻辑清晰、适用于分析公路隧道服役性能评价的指标权重确定法则。在此基础上,采用底层指标集与类型指标集的2级模糊综合评价模型,以当前养护规范标准为指标等级分级标准,计算了各评价指标的模糊综合评价价值,组成该类型指标项目下各评价指标的单因素模糊综合评价值的矩阵,耦合各矩阵完成了对隧道设施服役性能的模糊综合评价。将某隧道建设情况作为工程实例进行了评价体系验证,证明了提出的服役性能模糊综合评价体系的工程应用有效性。该模糊评价研究不仅建立了完备的公路隧道服役性能评价方法,而且实现了对公路隧道服役性能的定量分析,为工程上评价隧道服役性能提出了一种新方法,同时提出了隧道基础设施长期服役性能时变规律的评价方法。

关键词:隧道工程;服役性能;模糊综合评价模型;层次分析法;定性分析

中图分类号:U456

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2022)08-0142-10

Study on Service Performance Evaluation Method for Tunnel Based on Fuzzy Theory

LIU Chao¹, LIU Gang², XU Chong-bang², ZHOU Xing-yu², ZHANG Ke-chao³

(1. The 5th Engineering Co., Ltd. of China Railway 11th Bureau Group, Chongqing 400037, China;
2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
3. China-Road Transportation Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to solve the problem of civil structure diseases encountered in domestic operating tunnels, the disease causing factors of the civil structure of tunnel are analyzed from the aspects of highway tunnel investigation, design and construction. Based on this, a complete evaluation indicator system for highway tunnel service performance is established to ensure the comprehensiveness of the evaluation elements. By adopting the improved AHS (product scaling method), according to the characteristics of various factors affecting the service performance during the tunnel construction period, an indicator weight determination rule with clear logic and suitable for analyzing the service performance evaluation of highway tunnels is proposed. On this basis, adopting a 2-level fuzzy comprehensive evaluation model composed of the underlying indicator set and the type indicator set, taking the current maintenance standard as the indicator level classification criterion, the fuzzy comprehensive evaluation value of each evaluation indicator is calculated, the matrix of single-factor fuzzy comprehensive evaluation values of each evaluation indicator under the project of this indicator type is composed. By coupling the matrix, the fuzzy comprehensive

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1600305)

作者简介: 刘超(1984-),男,四川重庆人,高级工程师。(594521890@qq.com)

evaluation of the service performance of tunnel facilities is completed. Taking the construction of a tunnel for engineering example, the evaluation system is verified, which proved the effectiveness of the proposed fuzzy comprehensive evaluation system for service performance in engineering application. This fuzzy evaluation research not only established a complete method for evaluating the service performance of highway tunnels, but also realized the quantitative analysis of the service performance of highway tunnels, it proposed a new method for evaluating the service performance of tunnels in engineering, and a method for evaluating the time-varying rule of long-term service performance of tunnel infrastructure.

Key words: tunnel engineering; service performance; fuzzy comprehensive assessment model; analytic hierarchy process (AHS); qualitative analysis

0 引言

我国隧道工程建设近些年经历了突飞猛进的发展,中国已经成为拥有隧道数量最多、规模最大的国家^[1]。而我国有近1/3的隧道都会出现隧道病害^[2],如隧道渗漏水^[3]、隧道冻害^[4]、衬砌开裂^[5]、衬砌侵蚀^[6],并且甚至会引发重大安全事故^[7]。所以对当前在役隧道的开展其服役性能评估是十分必要的。

不少学者对隧道服役性能评价理论与方法进行了研究,有学者从数值模拟的角度出发去评估隧道状态,如周彪^[7]基于盾构隧道的特点,构建了环境、材料、构件及结构的多层次评价指标体系,采用随机格构理论,基于Diana分析软件确定收敛评价指标,建立了盾构隧道大修结构区段整体性能评估方法。杨瑞鹏^[8]研究了运营隧道二次衬砌状态的评价体系,但仅用了衬砌厚度一项指标做有限元分析模拟,未能全面反映衬砌的状态。以上二位学者基于单一结构构件的评估方法往往只能对隧道结构性能进行评估,并不能代表整体隧道的服役性能,故更多学者从影响隧道整体性能的因素入手提出隧道服役性能评价方法。胡群芳^[9]从结构设计、结构现状及病害、养护维修等方面进行了综合考虑,提出了分类指标与分级标准,以层次分析法^[10]为基础,结合模糊原理^[11]研究了公路隧道结构安全评估。

冯乾宽^[12]将中国的桥隧的检测规章的不足,构建了相对应的检监测制度体系框架,提出了基于建筑物全寿命周期的桥隧监测制度,但该制度忽略了其各个判定因素的重要性比较,合理性上有一些欠缺,但也为性能评价提供了一种新指导。郭剑勇^[13]分析了当前一些隧道检查规范中的合理性因素与不足之处,根据区段评价等级提出了一个简单判别隧道运营等级的方法。傅鹤林^[14]结合了隧道判断的随机性与模糊性,依据逆向云发生器原理,获得各项评价权值,对公路隧道健康状态进行了评价。翟利

华^[15]收集多个地铁盾构隧道的相对沉降、差异沉降、收敛变形、渗漏水、裂缝和剥落6个指标数据,在专家评估与偏最小二乘法回归法的基础上提出了隧道服役性能指标的定量计算方法。邹文浩^[16]选取了5个因素11个指标,利用模糊向量单值化法评价重载铁路隧道基底结构服役状态。王华牢^[17]基于3种隧道病害指标集构建了一个包含15个检测指标的3层评价体系,采用了层次分析法与乘积标度法^[18]确定权重,并提出一种模糊算子对隧道结构健康状况做出了比较准确的评价。

公路隧道设施服役性能影响因素众多,其服役状态劣化是多种因素共同作用的结果^[19],且各种因素对隧道设施服役性能的影响规律具有一定的不确定性、模糊性,所以隧道设施服役性能评价中很难用显式的逻辑关系进行评价。因此,本研究根据评价指标与服役状态的特殊的逻辑关系,利用模糊评价方法对多因素评价指标进行综合性的评价,建立公路隧道普适性指标,为隧道后期养护工作提供指标参考。

1 隧道服役性能综合评价指标体系

1.1 公路隧道服役性能综合诊断指标

隧道土建结构设施的功能从其根本而言就是保证交通出行的路径安全,即在隧道通行期间隧道衬砌支护结构安全、可靠,不存在不可接受的风险。隧道土建结构设施的这种功能属性是在时间上是一种经历了勘察、设计、施工和运营维护的结果,在系统组成上是支护结构、路面结构及防排水系统等多个系统组成共同效用的结果。

根据工程实践和隧道耐久性的理论研究成果,隧道服役性能评判体系细分为一个类型指标集与底层指标集共同组成的2级评价体系如图1所示。其中,类型指标集为工程建设流程,共3类;底层评价指标集为影响公路隧道服役性能的因素,共13种。

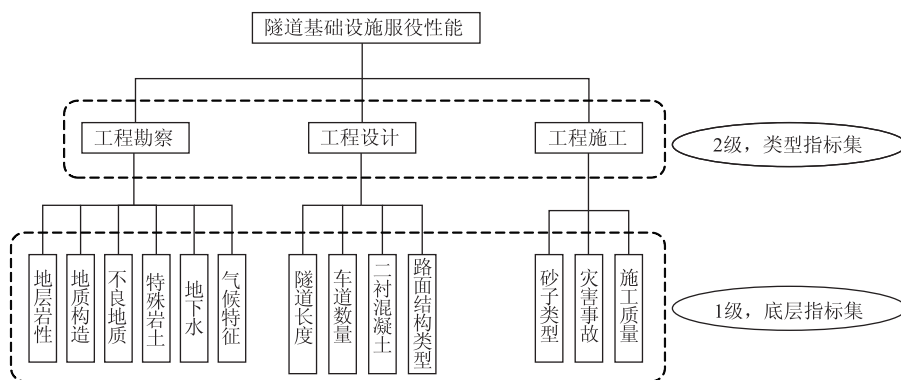


图1 公路隧道基础设施服役性能评价体系

Fig. 1 Service performance evaluation system for highway tunnel infrastructure

1.2 诊断指标权重

隧道服役性能指标中权重反映了在各个评判因素之间的相对重要程度，隧道建设的客观条件对隧道的服役性能有着不同程度的影响，为反映两项因素之间的重要性差异，权重设置“相同”、“稍微大”、“略大”3个等级，并以层次分析法为基础的乘积标度法确定。

在9/9~9/1标度法、10/10~18/2标度法、指数标度法3种标度法^[20]中取“稍微大”的标度值的平均值作为新的标度值，即

$$\omega_A : \omega_B = \frac{1.286 + 1.500 + 1.277}{3} : 1 = 1.354 : 1. \quad (1)$$

因此，在乘积标度法中3个等级的权重如下：

当评判因素A与评判因素B之间的重要性“相同”时，权重为

$$(\omega_A, \omega_B) = (0.5, 0.5). \quad (2)$$

当评判因素A的重要性比评判因素B的重要性“稍微大”时，权重为

$$(\omega_A, \omega_B) = \left(\frac{1.354}{1 + 1.354}, \frac{1}{1 + 1.354} \right) = (0.575, 0.425). \quad (3)$$

当评判因素A的重要性比评判因素B的重要性“略大”时，权重为

$$(\omega_A, \omega_B) = \left(\frac{1.354 \times 1.354}{1 + 1.354 \times 1.354}, \frac{1}{1 + 1.354} \right) = (0.647, 0.353). \quad (4)$$

(1) 工程勘察指标权重

工程勘察共计6个指标，分别是地层岩性(K_1)、地质构造(K_2)、不良地质(K_3)、特殊岩(K_4)、地下水(K_5)和气候特征(K_6)，6个指标的两两比选情况如表1所示。

表1 工程勘察指标影响因素比较

Tab. 1 Comparison of influencing factors of engineering investigation indicators

比较指标	比较值
$K_1 : K_2$	1.354 : 1
$K_1 : K_3$	1 : 1
$K_1 : K_4$	1 : 1
$K_1 : K_5$	1 : 1.354
$K_1 : K_6$	1.354 : 1

两两比较结果为：

$$\omega_{K_1} : \omega_{K_2} : \omega_{K_3} : \omega_{K_4} : \omega_{K_5} : \omega_{K_6} = 1.354 : 1 : 1.354 : 1.354 : 1 : 1.833 : 1. \quad (5)$$

则6个项目的标度权重为：

$$(\omega_{K_1} \quad \omega_{K_2} \quad \omega_{K_3} \quad \omega_{K_4} \quad \omega_{K_5} \quad \omega_{K_6}) = (0.17 \quad 0.13 \quad 0.17 \quad 0.17 \quad 0.23 \quad 0.13). \quad (6)$$

(2) 工程设计指标权重

工程设计的4个评价指标分别为：隧道长度(J_1)、车道数量(J_2)、二衬混凝土(J_3)和路面结构类型(J_4)。从各指标对于隧道设施服役性能的影响性角度考虑，认为车道数量和路面结构类型的重要性“相同”，隧道长度和二衬混凝土的重要性“相同”，并且隧道长度和二衬混凝土的重要性比车道数量和路面结构类型的重要性“稍大”，因此有

$$\omega_{J_1} : \omega_{J_2} : \omega_{J_3} : \omega_{J_4} = 1.354 : 1 : 1.354 : 1. \quad (7)$$

则4个项目的标度权重为：

$$(\omega_{J_1} \quad \omega_{J_2} \quad \omega_{J_3} \quad \omega_{J_4}) = (0.3 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.2). \quad (8)$$

(3) 工程施工指标权重

工程施工类评价指标包括施工质量(S_1)、灾害事故(S_2)、砂子类型(S_3)3个指标。其中，“施

工质量”与“灾害事故”的重要性相同,并比“砂子类型”的重要性“稍微大”,即

$$\omega_{S_1} : \omega_{S_2} : \omega_{S_3} = 1.354 : 1.354 : 1. \quad (9)$$

则3个病害情况的标度权重为

$$(\omega_{S_1} \quad \omega_{S_2} \quad \omega_{S_3}) = (0.365 \quad 0.365 \quad 0.27)。 \quad (10)$$

(4) 类型指标集各指标权重的确定

公路隧道设施服役性能评价包括3个类型指标,分别为工程勘察(K)、工程设计(J)和工程施工(S)。

从各类评价指标情况对于隧道设施服役性能的影响性的角度考虑,认为工程勘察的重要性比工程施工的重要性稍微大,而工程施工的重要性比工程设计的重要性“稍微大”,因此有

$$\omega_K : \omega_J : \omega_S = 1.833 : 1 : 1.354, \quad (11)$$

$$(\omega_K \quad \omega_J \quad \omega_S) = (0.438 \quad 0.239 \quad 0.323)。 \quad (12)$$

2 公路隧道设施服役性能的模糊综合评价模型

2.1 模糊综合评价模型

隧道病害检测评价采用2级模糊综合评价模型:

(1) 对底层指标层项目层各因素进行1级模糊综合评价;(2) 对类型指标层进行2级模糊综合评价,最后完成对隧道整体的服役状态的评价。

(1) 建立评价等级集合

类型指标与底层指标两个层次均按照JTG H12—2015《公路隧道养护技术规范》^[21]的标准取5个等级:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \quad (13)$$

式中, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 分为病害等级1类、2类、3类、4类、5类,并分别赋值1, 2, 3, 4, 5。

(2) 建立隶属函数

根据大数据统计分析方法,隧道服役性能评价中底层指标集中各评价指标相对于各类工程技术状况的隶属函数取自获取的样本数据,各类的隶属数形式如下:

$$\gamma_n(C_{ij}) = \frac{M_n}{N}, \quad (14)$$

式中, $n=1$ 类、2类、3类、4类、5类为5个工程技术状况等级; C_{ij} 为底层指标集各评价指标; N 为符合评价指标值的样本数量; M_n 为隧道工程技术状况等级为 n 的样本数量。

(3) 底层指标集各指标的模糊综合评价

① 根据样本数据库对评价指标的统计分析,得到

底层评价指标其对于各工程技术状况等级的隶属向量:

$$\gamma_{C_{ij}} = (r_{1C_{ij}} \quad r_{2C_{ij}} \quad r_{3C_{ij}} \quad r_{4C_{ij}} \quad r_{5C_{ij}}), \quad (15)$$

式中, i 为 K, J, S , j 为 1, 2, 3, 4, 5, 6。

② 隶属向量单值化。根据各工程技术状况等级的赋值情况,则各评价指标的模糊综合评价值按下式计算:

$$P_{C_{ij}} = 1 \times \gamma_{1C_{ij}} + 2 \times \gamma_{2C_{ij}} + 3 \times \gamma_{3C_{ij}} + 4 \times \gamma_{4C_{ij}} + 5 \times \gamma_{5C_{ij}}。 \quad (16)$$

③ 以每个底层评价指标的模糊综合评价值为行,即可组成该类型指标项目下各评价指标的单因素模糊综合评价值的矩阵:

$$P_{C_i} = (P_{C_{i1}} \quad P_{C_{i2}} \quad \cdots \quad P_{C_{ij}})^T。 \quad (17)$$

④ 确定每个类型指标集下各底层指标的权重,得权重向量:

$$\omega_{C_i} = (\omega_{C_{i1}} \quad \omega_{C_{i2}} \quad \cdots \quad \omega_{C_{ij}})。 \quad (18)$$

⑤ 由每个类型指标中各底层评价指标的单因素模糊综合评价值的矩阵和各指标间的权重向量,可用如下模糊综合评价模型得到每个类型评价指标的模糊综合评价值:

$$Q_i = \omega_{C_i} P_{C_i}。 \quad (19)$$

(4) 隧道设施服役性能的模糊综合评价

① 以类型指标集中各评价指标的模糊综合评价值为行,组成该类型指标集的单因素模糊综合评价值的矩阵:

$$P_G = (Q_K \quad Q_J \quad Q_S)^T。 \quad (20)$$

② 确定结构中指标集中各评价指标的权重,得权重向量:

$$\omega_G = (\omega_K \quad \omega_J \quad \omega_S)。 \quad (21)$$

③ 确定结构中指标集中各评价指标的权重,得权重向量根据类型指标集的单因素评价矩阵和权重向量,可用如下模糊综合评价模型得到待评价隧道设施服役性能的模糊综合评价值:

$$Q = \omega_G \cdot P_G, \quad (22)$$

式中, ω_G 为类型指标的权重向量; P_G 为类型指标集单因素模糊综合评价值的矩阵; Q 为隧道基础设施服役性能的模糊综合评价值。

基于大数据技术的公路隧道设施服役性能评价方法中应考虑了所有参与评判的因素的影响,宜按权重大小均衡兼顾,以体现指标数据整体的特性,故模糊计算的算子采用加权平均型算子,即实数乘积计算。

(5) 公路隧道检测评价等级的判定

公路隧道设施服役性能综合评价,其基础数据值的等级划分是按照公路隧道养护技术规范中对隧道工程技术状况评定分级演化而来,因此,得到的公路隧道基础设施服役性能的评价以按照其规定进行划分,检测评价等级评价可以如表2定量化,根据上面模糊综合评价值的计算结果,可由表2查得隧道基础设施服役性能等级。

表2 隧道服役性能等级划分

Tab.2 Classification of tunnel service performance

服役性能等级	服役性能状况	模糊综合评价值 Q
1类	完好	$1.5 \geq Q > 1.0$
2类	良好	$2.5 \geq Q > 1.5$
3类	合格	$3.5 \geq Q > 2.5$
4类	差	$4.5 \geq Q > 3.5$
5类	极差	$Q > 4.5$

2.2 地表水补给关系测试

根据待评价对象确定底层指标的评价值,在样本数据库中抽取符合指标值条件的有效样本组成综合评价样本数据库,统计分析得出隧道各工程技术状况登记下的隶属向量,并根据对各级工程技术状况的赋值规定,可得出待评对象地层岩性评价指标的模糊综合评价值。

(1) 工程勘察评价指标模糊综合评价值

工程勘察中共有6个底层指标:地层岩性、地质构造、不良地质、特殊岩土、地下水、气候特征,根据2.1节中的计算方式,可以得到工程勘察类下各评价指标的单因素模糊综合评价值的矩阵:

$$P_K = (P_{K_1} \quad P_{K_2} \quad P_{K_3} \quad P_{K_4} \quad P_{K_5} \quad P_{K_6})^T, \quad (23)$$

$$\omega_K = (0.17 \quad 0.13 \quad 0.17 \quad 0.17 \quad 0.23 \quad 0.13), \quad (24)$$

$$Q_K = \omega_K \cdot P_K. \quad (25)$$

(2) 工程设计评价指标模糊综合评价值

工程勘察中共有4个底层指标:隧道长度、车道数量、二衬混凝土、路面结构类型,根据2.1节中的计算方式,可以得到工程设计类下各评价指标的单因素模糊综合评价值的矩阵:

$$P_J = (P_{J_1} \quad P_{J_2} \quad P_{J_3} \quad P_{J_4})^T, \quad (26)$$

$$\omega_J = (0.3 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.2), \quad (27)$$

$$Q_J = \omega_J \cdot P_J. \quad (28)$$

(3) 工程施工评价指标模糊综合评价值

工程勘察中共有3个底层指标:施工质量、灾

害事故、砂子类型,根据2.1节中的计算方式,可以得到工程施工类下各评价指标的单因素模糊综合评价值的矩阵:

$$P_S = (P_{S_1} \quad P_{S_2} \quad P_{S_3})^T, \quad (29)$$

$$\omega_S = (0.365 \quad 0.365 \quad 0.27), \quad (30)$$

$$Q_S = \omega_S \cdot P_S \quad (31)$$

(4) 公路隧道设施服役性能综合评价

由前述工程勘察、工程设计、工程施工的模糊综合评价的结果组成3个评价指标对公路隧道设施服役性能模糊综合评价值的向量:

$$P_G = (Q_K \quad Q_J \quad Q_S)^T, \quad (32)$$

$$\omega_G = (\omega_K \quad \omega_J \quad \omega_S) = (0.438 \quad 0.239 \quad 0.323), \quad (33)$$

$$Q = \omega_G \cdot P_G. \quad (34)$$

3 基于大数据的隧道基础设施长期性能时变规律评价方法

上一节重点研究了公路隧道设施服役状态的评价方法,评价目的是为了获取待评价对象当前状态下的服役性能等级,了解与掌握隧道工程的当前服役状态。在隧道设施养护管理中,人们有时不但需要了解与掌握隧道当前的服役状况,更需要预测隧道工程服役性能将来的变化趋势,即研究隧道基础设施长期性能时变规律,以便合理地制订更为经济、合理的运营养护措施。

隧道设施服役状态与其长期性能时变规律的关系,可以理解为长期性能的是由无数个隧道设施服役状态组成,隧道设施的服役状态是其长期性能时变规律曲线上的一个点。因此,隧道基础设施长期性能时变规律研究可以通过研究不同时间下隧道设施服役状态来实现。

由此,隧道基础设施长期性能时变规律评价过程如下:

(1) 确定待评对象评价指标值,与待预测服役时长 t_i 。

(2) 按照待评对象评价指标值,选取符合指标值的样本数据,建立初级样本数据库 B_f 。

(3) 再根据待预测服役时长 t_i ,在初级样本数据库中选取满足服役时长 t_i 的样本,作为评价样本数据库 B_p 。

(4) 按照 2.2 节公路隧道设施服役性能的模糊综合评价方法进行评价, 得出公路隧道设施服役性能综合评价值 Q_{si} 。

(5) 由不同的 Q_{si} 与 t_i 绘制不同服役时间下的公路隧道设施服役性能综合评价值曲线, 即为待评对象的隧道基础设施长期性能时变规律。

由于这种方法主要通过构建不同时间下的评价指标样本数据库, 获得不同时间下的隧道设施服役状态, 从而获得隧道基础设施长期性能时变规律, 因此, 该方法也称为“样本时效法”。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

雾松岭隧道地处黑龙江省东南部张广才岭腹地, 海林市横道河子镇西 11 km 的雾松岭, 于 2006 年建成通车。海拔高度为 610~720 m, 相对高度差 80~110 m, 地形坡度为 10°~30°。隧道为分离式隧道, 左线长 590 m, 里程桩号为 ZK225+821~ZK226+411; 右线长 501 m, 里程桩号为 YK225+900~YK226+401。隧道设计时速: 80 km/h, 净高: 5.0 m, 建筑限界: 0.75+0.50+2×3.75+0.75+0.75=10.25 m。

隧址区内出露地层主要为印支期二长花岗岩及少部分第四系全新统松散堆积层。基岩为印支期二长花岗岩侵入岩, 主要由长石、石英及部分黑云母组成, 中-粗粒结构, 块状构造, 岩质十分坚硬; 第四系全新统松散堆积层为坡积亚黏土夹石块, 石块灰黑色, 为中基性火山岩, 坚硬, 块径 10~100 cm, 含量 30%左右, 分布不均。隧道围岩为Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级, 未见不良地质情况与特殊性岩土。本区地下水类型为基岩裂隙水, 受大气降雨补给, 向沟谷河流排泄, 地下水不发育, 对隧道混凝土无腐蚀性。

雾松岭隧道所在地区属于温带季风气候, 年平均气温 2.8℃, 最高气温 34.8℃、最低气温-41℃, 年平均降雨量 691 mm, 降雨多集中在 6—8 月份, 冬季最大积雪厚度为 0.4 m, 地面稳定冻结期在 11 月中旬, 最大冻土深 2.02 m。

隧道衬砌结构按新奥法原理设计, 采用复合式支护结构形式, 初期支护以锚杆、钢架、钢筋网及喷射混凝土组成联合支护体系, 二次衬砌采用 C25 模注混凝土结构, 初期支护与二次衬砌结构之间设防排水保温层。隧道净空断面为三心圆曲墙断面。

表 3 雾松岭隧道基本情况
Tab. 3 Basic situation of Wusongling Tunnel

1	隧道名称	雾松岭隧道
2	路线名称	黑龙江省绥满高速公路
3	入口桩号	左: ZK225+821 右: YK225+900
4	隧道全长/m	左线: 590 右线: 501
5	衬砌类型	复合衬砌
6	洞门类型	削竹式
7	路面类型	混凝土
8	排水方式	衬砌背面、路基、路缘排水
9	最大净宽/m	10.25
10	行车道宽/m	3.75
11	检修道宽/m	1.00
12	通风方式	自然通风
13	照明设施	有
14	消防设施	有
15	横洞/个	1
16	竖井	有
17	通车时间	2007 年
18	设计车速/(km·h ⁻¹)	80
19	建筑限界/m	5.0
补充说明		单向行车双车道

4.2 公路隧道服役性能指标

(1) 评价指标提取

表 4 工程勘察类评价指标
Tab. 4 Evaluation indicators of engineering survey

序号	项目	指标值
1	地层岩性	花岗岩
2	地质构造	断层/破碎带
3	不良地质	无
4	特殊岩土	无
5	地下水	不发育
6	气候特征	温带季风气候

表 5 工程设计类评价指标
Tab. 5 Evaluation indicators of engineering design

序号	项目	指标值
1	隧道长度	中隧道
2	车道数量	2 车道
3	二衬混凝土	C25
4	路面结构类型	混凝土路面

表 6 工程施工类评价指标

Tab. 6 Evaluation indicators of engineering construction

序号	项目	指标值
1	施工质量	良好
2	灾害事故	无
3	砂子类型	河砂

评价指标样本的母体来源于河北省公路隧道数据，首先根据待评价对象的指标值从样本母体数据库抽取满足条件的样本建立指标样本数据库；根据指标样本数据库对各指标影响进行分析评价；获取评价指标评价值；最后按照各指标的权重进行逐级评价。

河北省公路隧道工程共收录了 316 组数据，其中信息数据较全、满足数据共计 114 组数据。按照工程勘察、工程设计和工程施工的评价指标值对评价指标数据库进行了筛选，筛选结果如表 7~9 所示。

表 7 工程勘察类指标样本统计信息

Tab. 7 Statistical information of engineering survey indicator samples

序号	项目	指标值	样本数量	各工程技术状况评定等级样本量				
				1	2	3	4	5
1	地层岩性	花岗岩	35	35	0	0	0	0
2	地质构造	断层/破碎带	78	75	3	0	0	0
3	不良地质	无	110	107	3	0	0	0
4	特殊岩土	无	106	104	2	0	0	0
5	地下水	不发育	108	105	3	0	0	0
6	气候特征	温带季风气候	76	76	0	0	0	0

表 8 工程设计类指标样本统计信息

Tab. 8 Statistical information of engineering design indicator samples

序号	项目	指标值	样本数量	各工程技术状况评定等级样本量				
				1	2	3	4	5
1	隧道长度	中隧道	29	29	0	0	0	0
2	车道数量	2 车道	114	111	3	0	0	0
3	二衬混凝土	C25 混凝土	54	54	0	0	0	0
4	路面结构类型	混凝土路面	35	33	2	0	0	0

表 9 工程施工类指标样本统计信息

Tab. 9 Statistical information of engineering construction indicator samples

序号	项目	指标值	样本数量	各工程技术状况评定等级样本量				
				1	2	3	4	5
1	施工质量	良好	114	111	3	0	0	0
2	灾害事故	无	111	108	3	0	0	0
3	砂子类型	河砂	114	111	3	0	0	0

4.3 隧道服役性能评价

4.3.1 评价指标值计算

根据式 (10)，(12) 可以得出隶属度及计算值。

表 10 工程勘察类指标模糊综合评价值

Tab. 10 Fuzzy comprehensive evaluation values of engineering survey indicators

序号	项目	模糊综合评价值	各工程技术状况评定等级隶属度				
			1	2	3	4	5
1	地层岩性	1.0	1	0	0	0	0
2	地质构造	1.04	0.96	0.04	0	0	0
3	不良地质	1.03	0.97	0.03	0	0	0
4	特殊岩土	1.02	0.98	0.02	0	0	0
5	地下水	1.03	0.97	0.03	0	0	0
6	气候特征	1.0	1	0	0	0	0

表 11 工程设计类指标模糊综合评价值

Tab. 11 Fuzzy comprehensive evaluation values of engineering design indicators

序号	项目	模糊综合评价值	各工程技术状况评定等级隶属度				
			1	2	3	4	5
1	隧道长度	1.0	1	0	0	0	0
2	车道数量	1.03	0.97	0.03	0	0	0
3	二衬混凝土	1.0	1	0	0	0	0
4	路面结构特征	1.06	0.94	0.06	0	0	0

表 12 工程施工类指标模糊综合评价值

Tab. 12 Fuzzy comprehensive evaluation values of engineering construction indicators

序号	项目	模糊综合评价值	各工程技术状况评定等级隶属度				
			1	2	3	4	5
1	施工质量	1.03	0.97	0.03	0	0	0
2	灾害事故	1.03	0.97	0.03	0	0	0
3	砂子类型	1.03	0.97	0.03	0	0	0

4.3.2 底层评价指标的单因素模糊综合评价值计算

由式 (13)，(15) 计算模糊综合评价值

表 13 工程勘察指标模糊综合评价值

Tab. 13 Fuzzy comprehensive evaluation values of engineering survey indicators

序号	项目	各评价指标					
		地层岩性	地质构造	不良地质	特殊岩土	地下水	气候特征
1	指标模糊综合评价值	1	1.04	1.03	1.02	1.03	1
2	指标权重	0.17	0.13	0.17	0.17	0.23	0.13
3	工程勘察指标模糊综合评价值	1.02					

表 14 工程设计指标模糊综合评价

Tab. 14 Fuzzy comprehensive evaluation values of engineering design indicators

序号	项目	各评价指标			
		隧道长度	车道数量	二衬混凝土	路面结构类型
1	指标模糊综合评价	1	1.03	1	1.06
2	指标权重	0.3	0.2	0.3	0.2
3	工程设计指标模糊综合评价	1.02			

表 15 工程施工指标模糊综合评价

Tab. 15 Fuzzy comprehensive evaluation values of engineering construction indicators

序号	项目	各评价指标		
		施工质量	灾害类型	砂子类型
1	指标模糊综合评价	1.03	1.03	1.03
2	指标权重	0.365	0.365	0.27
3	工程施工指标模糊综合评价	1.03		

4.3.3 公路隧道设施服役性能等级确定

由式 (16)~(18) 可计算出由工程勘察、工程设计和工程施工为主控因素的隧道服役性能模糊综

表 17 隧道洞身分项技术状况评定表

Tab. 17 Technical condition evaluation table of tunnel hole items

	状况值							
	衬砌破损	渗漏水	路面	检修道	排水设施	吊顶及预埋件	内装饰	标志标线
YK225+900~YK226+401	1	0	1	1	0	0	0	1
$\max(JGCI_{ij})$	1	0	1	1	0	0	0	1
权重	25	15	15	2	6	10	2	5
$JGCI = 100 \times \left[1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(JGCI_i \times \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right) \right]$		87	土建结构评定等级				1 级	

5 结论

本研究通过对公路隧道服役性能、指标及模糊评价方法的研究分析,主要得出了以下几点结论:

(1) 建立了底层指标和类型指标共同组成的 2 级公路隧道服役性能评价体系,并根据影响公路隧道服役性能的因素特点对各级评价指标按照“相同”、“稍微大”、“略大”3 种等级进行权重确定。

(2) 建立了公路隧道服役性能模糊综合评价模型,并结合影响隧道服役性能的因素特征,提出了针对于服役性能综合评价的评价方法。

(3) 提出利用大数据统计方法,构建不同时间

合评价,计算结果如表 16 所示。

表 16 公路隧道设施服役性能模糊综合评价

Tab. 16 Fuzzy comprehensive evaluation values of service performance of highway tunnel facilities

序号	项目	各评价指标		
		施工质量	灾害类型	砂子类型
1	指标模糊综合评价	1.02	1.02	1.03
2	指标权重	0.438	0.239	0.323
3	公路隧道设施服役性能模糊综合评价	1.02		

根据表 16 可知,待评价对象雾松岭隧道公路隧道设施服役性能模糊综合评价值为 1.02,依据表 2 隧道设施服役性能评价等级定量划分标准,雾松岭隧道服役性能等级属于 1 类,性能完好。

4.4 隧道技术状况评定

雾松岭隧道现场土建结构专项检测分项技术状况与评定如表 17 所列,隧道技术状况评定为 1 类,与 4.3 节隧道服役性能评价结果基本一致。可见,本章所建立的隧道设施服役性能评价方法和相关指标能够较好地预测、评判公路隧道的服役性能状况。

表 17 隧道洞身分项技术状况评定表

Tab. 17 Technical condition evaluation table of tunnel hole items

	状况值							
	衬砌破损	渗漏水	路面	检修道	排水设施	吊顶及预埋件	内装饰	标志标线
YK225+900~YK226+401	1	0	1	1	0	0	0	1
$\max(JGCI_{ij})$	1	0	1	1	0	0	0	1
权重	25	15	15	2	6	10	2	5
$JGCI = 100 \times \left[1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left(JGCI_i \times \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right) \right]$		87	土建结构评定等级				1 级	

下的评价指标样本数据库,评价不同时刻下的隧道设施服役状态,基于样本时效法提出隧道基础设施长期性能时变规律评价方法。

(4) 结合绥满公路中雾松岭隧道病害调查,利用公路隧道服役性能模糊综合评价方法进行了实例分析,与现行规范的相比证明该方法评价的有效性,该方法为隧道服役性能评价提供了新的理论方法。

参考文献:

References:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综

- 述 · 2015 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (5): 1-65.
- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Tunnel Engineering Research: 2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (5): 1-65.
- [2] 王华牢, 李宁, 褚方平. 公路隧道衬砌厚度不足对衬砌安全性影响 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9 (2): 32-38.
- WANG Hua-lao, LI Ning, CHU Fang-ping. Effect of Lining Thickness Lack on Lining Safety for Highway Tunnel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9 (2): 32-38.
- [3] 郑艾辰, 何兆益, 李家琪, 等. 隧道裂损衬砌渗漏水红外特征识别试验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2022, 52 (1): 109-116.
- ZHENG Ai-chen, HE Zhao-yi, LI Jia-qi, et al. Experimental Study on Infrared Characteristic Recognition for Water Leakage of Tunnel Cracked Lining [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52 (1): 109-116.
- [4] 张炳涛, 崔国军, 叶飞, 等. 季冻区运营公路隧道冻害监测预警技术研究 [J]. 公路, 2021, 66 (3): 376-382.
- ZHANG Bing-tao, CUI Guo-jun, YE Fei, et al. Research on Freezing Damage Monitoring and Early Warning Technology of Operating Highway Tunnels in Seasonally Frozen Areas [J]. Highway, 2021, 66 (3): 376-382.
- [5] 杨春平, 胡强. 高速公路隧道病害检测与处治技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (4): 237-245.
- YANG Chun-ping, HU Qiang. Research on the Detection and Treatment Technology for Highway Tunnel Defects [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58 (4): 237-245.
- [6] 韩兴博, 叶飞, 夏天晗, 等. 在役隧道环境侵蚀下管片承载能力概率劣化模型 [J]. 中国公路学报, 2022, 35 (1): 49-58.
- HAN Xing-bo, YE Fei, XIA Tian-han, et al. Probability Degradation Models of Bearing Capacity of Operating Tunnel Segments under Environmental Erosions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35 (1): 49-58.
- [7] 周彪, 谢雄耀, 杨雨冰, 等. 盾构隧道大修结构服役性能评价及跨尺度模拟 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (10): 1390-1397.
- ZHOU Biao, XIE Xiong-yao, YANG Yu-bing, et al. Service Performance Evaluation and Cross Scale Simulation of Shield Tunnel During Overhaul [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2019, 47 (10): 1390-1397.
- [8] 杨瑞鹏, 王亚琼, 高启栋, 等. 基于厚度检测的运营隧道二次衬砌安全评价研究 [J]. 公路, 2021, 66 (6): 378-385.
- YANG Rui-peng, WANG Ya-qiong, GAO Qi-dong, et al. Research on Safety Evaluation of Secondary Lining of Operating Tunnel Based on Thickness Detection [J]. Highway, 2021, 66 (6): 378-385.
- [9] 胡群芳, 周博文, 王飞, 等. 基于模糊层次分析的公路隧道结构安全评估技术 [J]. 自然灾害学报, 2018, 27 (4): 41-49.
- HU QUN-fang, ZHOU Bo-wen, WANG Fei, et al. Structural Safety Assessment Technology of Long Highway Tunnel Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27 (4): 41-49.
- [10] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [11] 黎梨苗, 陈志刚. 基于模糊与相似两原理的节点信任评价模型 [J]. 计算机应用与软件, 2016, 33 (12): 305-308, 328.
- LI Li-miao, CHEN Zhi-gang. Trust Evaluation Model Based on Fuzzy and Similarity Theory [J]. Computer Applications and Software, 2016, 33 (12): 305 - 308, 328.
- [12] 冯乾宽, 王石磊, 高岩, 等. 高速铁路桥隧检测监测制度及状态评定对比研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (1): 140-146.
- FENG Qian-kuan, WANG Shi-lei, GAO Yan, et al. Comparative Study on Bridge and Tunnel Inspection Monitoring System and Condition Evaluation of High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2021, 61 (1): 140-146.
- [13] 郭剑勇, 张继清, 王秀妍, 等. 天津地铁隧道运营状态评价方法研究 [J]. 铁道建筑技术, 2019 (4): 38-41.
- GUO Jian-yong, ZHANG Ji-qing, WANG Xiu-yan, et al. Study on Operation Status Evaluation Method for Tianjin Subway Tunnels [J]. Railway Construction Technology, 2019 (4): 38-41.
- [14] 傅鹤林, 黄震, 黄宏伟, 等. 基于云理论的隧道结构健康诊断方法 [J]. 工程科学学报, 2017, 39 (5): 794-801.
- FU He-lin, HUANG Zhen, HUANG Hong-wei, et al. Health Diagnosis Method of Shield Tunnel Structure Based on Cloud Theory [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39 (5): 794-801.

(下转第 165 页)