

基于层次分析法的就地热再生沥青路面 路用性能后评估

于 玲¹,张筱薇¹,包龙生¹,汤 浩²

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁新发展交通集团,辽宁 沈阳 110000)

摘 要 目的 分析就地热再生沥青路面性能后评估指标,建立相对独立的就地热再生路面路用性能后评估体系. 方法 基于辽宁省黑大线维修改造工程沈棋路至棋盘山风景区路段,以《公路技术状况评定标准》(JTGH20—2015)为依据,结合就地热再生的特点,利用层次分析法计算就地热再生沥青路面路用性能的各项指标的权重值,将其作为指标权重值的修正值,进而计算就地热再生项目的路面质量指数(PQI),对就地热再生路面的路用性能进行更加客观、准确的评估. 结果 得出路面破损状况指数(PCI)、路面行驶质量指数(RQI)、车辙深度指数(RDI)和路面抗滑性能指数(SRI)的权重分别为0.478 7、0.243 2、0.204 5和0.073 5,路面质量指数(PQI)为90.623 1,评价等级为优. 结论 利用修正后的指标权重计算得出的结果更加精确、可靠,更适用于辽宁省公路的具体情况. 对路用性能后评估的进一步发展打下良好基础.

关键词 就地热再生;路面性能;后评估;层次分析法

中图分类号 TU375.4

文献标志码 A

The Asphalt Post Evaluation of Pavement Performance Index of Hot In-place Recycling Technology Based on the Analytic Hierarchy Process

YU Ling¹, ZHANG Xiaowei¹, BAO Longsheng¹, TANG Hao²

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning New Development Traffic Group, Shenyang, China, 110000)

Abstract: In this paper the post evaluation index of asphalt pavement performance by hot in-place recycling technology are analyzed and relatively independent post-evaluation system of recycling pavement performance is established. Based on the evaluation standard of highway technical condition (JTGH20—2015) and the characteristics of geothermal regeneration, the weight value of each performance index of the reclaimed pavement is calculated by the analytic hierarchy process. The

收稿日期:2016-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51078242);辽宁省自然科学基金项目(2014020074)

作者简介:于玲(1970—),女,副教授,主要从事道路、桥梁领域的研究.

weight value of the former index is corrected to calculate the pavement quality index(*PQI*) of the thermal regeneration project, which can make a more objective and accurate evaluation for the performance of the reclaimed pavement. The calculated pavement condition index(*PCI*), riding quality index(*RQI*), rutting depth index(*RDI*) and pavement skid resistance index(*SRI*) weight values were 0.478 7, 0.243 2, 0.204 5 and 0.073 5, pavement quality index(*PQI*) was 90.623 1, the evaluation grade is excellent. The results obtained from the revised index weights are more accurate and reliable, and can also be applied to the specific situation of Liaoning province. The post evaluation of pavement performance of asphalt pavement can lay a good foundation for the further development.

Key words: hot in-place recyding; pavement performance; post evaluation; analytic hierarchy process

就地热再生项目的后评估^[1-6]是指对已经完工并产生一定影响的就地热再生项目的路面使用性能指标、环境效益、经济效益、社会影响等方面进行后评价。而沥青路面使用性能的后评估是其中相对重要的组成部分。笔者通过对辽宁省黑大线实验路段的现场检测,进行客观、系统的路用性能后评估,并且为促进就地热再生技术的进一步发展和将来形成较为系统的后评估指南打下良好基础。

1 就地热再生技术路面性能后评估指标确定

就地热再生技术具有施工速度快、工艺简便、应用广泛等优点,此外,它对旧料利用率高,对交通的干扰也较小。其施工现场及再生设备如图1所示。



图1 就地热再生技术的施工现场及设备

Fig.1 Construction site and equipment of HIR

就地热再生技术后评估的最主要的部分

就是路面性能指标的后评估。而路面性能指标主要包括路面损坏状况、路面行驶质量、路面车辙深度、路面抗滑性能和路面的结构强度5个指标。在做道路养护前,首先要对路面的性能进行调查和分析,判别其需要采取哪种养护措施和养护对策^[7]。目前世界部分国家采用的路面评价指标^[8]如表1所示。

表1 世界部分国家采用的路面评价指标

Table 1 Pavement evaluation index at home and abroad

国家	路面性能评价指标
中国	路面质量指数(<i>PQI</i>)
美国	现时服务性能指数(<i>PSI</i>)
日本	养护管理指数(<i>MCI</i>)
英国	道路状况指数(<i>RCI</i>)
加拿大	路面质量指数(<i>PQI</i>)

我国采用路面质量指数(*PQI*)作为路面使用性能的评价指标,主要是通过路面破损状况指数(*PCI*)、路面行驶质量指数(*RQI*)、车辙深度指数(*RDI*)和路面抗滑性能指数(*SRI*)4项指标进行确定,*PQI*的计算式为

$$PQI = w_1 PCI + w_2 RQI + w_3 RDI + w_4 SRI. \quad (1)$$

式中: w_1 为*PCI*的权重值; w_2 为*RQI*的权重值; w_3 为*RDI*的权重值; w_4 为*SRI*的权重值。

2 就地热再生技术路面性能后评估指标分析

笔者基于辽宁省黑大线维修改造工程进

行就地热再生技术路面性能后评估指标分析. 将该项目的中间四车道中 K20 + 100 ~ K20 + 200、K24 + 350 ~ K24 + 650、K29 + 490 ~ K29 + 640三个路段作为检测路段.

2.1 路面破损状况指数后评估

沥青路面的病害会通过裂缝、坑槽、翻浆等反映出来,一般存在于上面层,且肉眼可见^[9]. 这些病害会影响路面的完整程度,也会影响驾驶员在行车时对道路的服务水平的评价,依照《公路技术状况评定标准》(JT-GH20—2015), PCI 的计算式为

$$PCI = 100 - 15DR^{0.412}.$$
 (2)

$$DR = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A}.$$
 (3)

式中: DR 为路面总破损率; A_i 为第 i 类破损形式的面积之和; A 为被统计路面的总面积.

表 2 为经就地热再生技术处理后,沥青路面破损面积情况. 根据式 (2) 和式 (3),经计算得出三个路段 PCI 的平均值为 86.08.

表 2 路面病害情况
Table 2 Pavement condition

检测路段	A_i/m^2	A/m^2	$DR/\%$	PCI
K20 + 100 ~ K20 + 200	14.08	1 600	0.88	85.72
K24 + 350 ~ K24 + 650	39.36	4 800	0.82	86.37
K29 + 490 ~ K29 + 640	19.20	2 400	0.80	86.15
平均值	24.21	2 933	0.83	86.08

2.2 路面行驶质量指数后评估

路面平整度能够直接反映车辆行驶的舒适程度,目前通常利用路面行驶质量指数来进行评价, RQI 的计算式为

$$RQI = 11.5 - 0.75IRI,$$
 (4)

$$IRI = 0.3803BI - 0.4537.$$
 (5)

式中: IRI 为国际平整度指数; BI 为利用平整度设备采集的检测结果.

笔者将该试验路段的抽测结果整理和统计,并按式 (4) 计算路面行驶质量情况指数(见表 3). 根据式 (4) 和式 (5),经计算得出

三个路段 RQI 的平均值为 100.

表 3 路面行驶质量情况
Table 3 Riding quality

检测路段	3 m 直尺平整度/mm	$IRI/(\text{m} \cdot \text{km}^{-1})$	RQI
K20 + 100 ~ K20 + 200	3.48	0.87	100
K24 + 350 ~ K24 + 650	3.29	0.8	100
K29 + 490 ~ K29 + 640	3.55	0.9	100
平均值	3.44	0.86	100

2.3 路面车辙深度指数后评估

根据《公路技术状况评定标准》(JTG H20—2015),笔者针对不同深度的车辙,运用不同的函数对其进行计算,并且还限制了车辙深度的最大值. 具体的评价模型:

$$RDI = \begin{cases} 100 - 2RD, & RD \leq 20; \\ 60 - 4(RD - 20), & 20 < RD \leq 35; \\ 0, & RD > 35. \end{cases}$$
 (6)

式中: RD 为车辙深度,mm.

通过对车辙深度进行测定,表 4 为就地热再生后车辙深度情况. 根据式 (6),经计算得出三个路段 RDI 的平均值为 86.4.

表 4 车辙深度情况
Table 4 Rutting depth

检测路段	RD/mm	RDI
K20 + 100 ~ K20 + 200	6.8	86.4
K24 + 350 ~ K24 + 650	7.2	85.6
K29 + 490 ~ K29 + 640	6.5	87
平均值	6.8	86.4

2.4 路面抗滑性能指数后评估

在对路面抗滑性能进行评价时,我国通常通过计算路面的横向力系数(SFC)作为评价指标,它的模型公式为

$$SRI = \frac{65}{1 + 28.6e^{-0.105SFC}} + 35.$$
 (7)

式中: SFC 为横向力系数,横向力系数通常以 20 m 为单位长期保存.

试验路段对 SFC 进行了测定,该试验路段经就地热再生后,其路面抗滑性能指标结

果如表5所示.根据式(7),经计算得出三个路段SRI的平均值为100.

表5 路面抗滑能力情况

Table 5 Skidding resistance

检测路段	SFC	SRI
K20 + 100 ~ K20 + 200	124.12	100
K24 + 350 ~ K24 + 650	126.18	100
K29 + 490 ~ K29 + 640	127.61	100
平均值	125.97	100

3 利用层次分析法确定路面性能指标权重

在利用层次分析法^[10-15]对目标进行分析时,要先根据分析目标的目的和性质把总目标层按主次关系划分成逐阶的层次结构,然后把每个层次结构上的因素两两进行比较,构建判断矩阵,从而得到各个结构层上每个因素的权重数值.最后得出最底层中的各个因素相对于最高层的权重值.

根据笔者对就地热再生项目路面性能后评估的需要,将其划分为两个层次,第一层作为评价的目标层,记为A;第二层包括四个子指标:破损状况指数B1、路面行驶质量指数B2、车辙深度指数B3和路面抗滑性能指数B4.再根据指标体系构建判断矩阵,并通过相对判断矩阵的计算来确定路面性能的各项指标所占的权重.

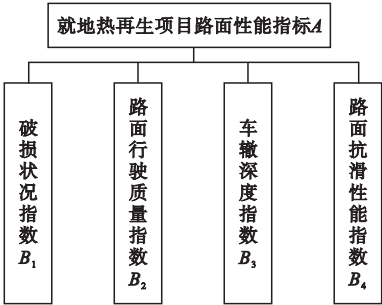


图2 就地热再生项目沥青路面使用性能指标层次构造图

Fig. 2 The hierarchical structure diagram of pavement performance after HIR

3.1 构建指标判断矩阵

在对各层因素两两比较时,首先将咨询30位辽宁省高速公路方面的专家,根据专家意见,建议路面车辙深度指数所占权重值应适当提高,路面行驶质量指数应适当降低.然后对各位专家的意见进行汇总和统计,从而确定两影响因素的相对重要性.再根据统计结果构造出判断矩阵,最后按照此分析方法的步骤确定各个元素对目标层的权重.层次分析法通常采用1-9的比例标度来判断两项指标的重要性^[16],其比例标度及赋值含义如表6所示.

表6 比例标度赋值含义

Table 6 The proportional scale value meaning

标度 a_{ij}	含义
1	两元素相比,具有同等重要性
3	两元素相比,前者比后者稍重要
5	两元素相比,前者比后者重要
7	两元素相比,前者比后者明显重要
9	两元素相比,前者比后者绝对重要
2,4,6,8	两元素相比,介于上述判断的中间值

在构建层次分析法判断矩阵时,第*i*行、第*j*列的赋值表示第*i*行因素相对于对第*j*列因素的重要性,若第*i*行因素较第*j*列因素的相对权重为*n*,那么第*j*行因素相对于第*i*列因素的相对权重就为1/*n*;而任何元素与本身同等重要,因此对角线上的数值为“1”.根据专家意见构建出的判断矩阵A为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 2 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 4 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 1 \end{pmatrix}$$

3.2 计算各项指标权重

(1)计算判断矩阵A中各行元素的乘积*P_i*,计算结果如表7所示.

表7 P_i 值
Table 7 The value of P_i

B_1	B_2	B_3	B_4	P_i
1	3	2	5	30
1/3	1	2	3	2
1/2	1/2	1	4	1
1/5	1/3	1/4	1	0.016 7

(2) 计算 P_i 的 n 次方根 $\overline{P_i}$:

$$\overline{P_i} = \sqrt[n]{P_i}. \tag{9}$$

式中: $i=1,2,3,4;n=4$.

按式(9) 计算得出的 $\overline{P_i}$ 分别为:
 $\overline{P_1}=2.340\ 3, \overline{P_2}=1.189\ 2, \overline{P_3}=1, \overline{P_4}=0.359\ 5$.

(3) 对向量 $\overline{P}=(\overline{P_1},\overline{P_2},\cdots,\overline{P_n})^T$ 进行归一化处理:

$$p_i = \frac{\overline{P_i}}{\sum_{i=1}^n \overline{P_i}}. \tag{10}$$

按式(10) 计算得 p_i 值分别为: $p_1=0.478\ 7, p_2=0.243\ 2, p_3=0.204\ 5, p_4=0.073\ 5$, 则 $\overline{P}=(p_1,p_2,\cdots,p_n)^T$ 为所求判断矩阵的特征向量,即 B 层各项指标所占的权重值.

(4) 一致性验算^[17-20]

① 计算判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AP)_i}{nP_i}. \tag{11}$$

式中: $n=4$.

根据式(11) 计算得出判断矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max}=4.173\ 6$.

② 计算不一致程度指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{12}$$

式中: $n=4$.

根据式(12) 计算得出判断矩阵 A 的不一致程度指标 $CI=0.057\ 9$.

平均随机一致性指标的 RI 值见表 8,从表中可以查出四阶矩阵的一致性标准 $RI=0.89$.

表8 平均随机一致性指标的 RI 表
Table 8 Mean random consistency index RI

矩阵阶数	RI	矩阵阶数	RI
1	0	9	1.47
2	0	10	1.48
3	0.51	11	1.51
4	0.89	12	1.55
5	1.12	13	1.57
6	1.24	14	1.58
7	1.36	15	1.59
8	1.41		

③ 计算一致性比率指标 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI}. \tag{13}$$

根据式(13) 计算得出判断矩阵 A 的一致性比率指标 $CR=0.065\ 1$.

当 $CR<0.1$ 时,则判断矩阵的不一致程度处于可容许范围内,具有满意的一致性,可以通过一致性检验.这样,其归一化特征向量则为权向量,否则需对 a 加以调整,重新构造判断矩阵 A .

文中判断矩阵 A 的一致性比率指标 $CR=0.065\ 1<0.1$,通过一致性检验.

因此 $\overline{P}=(0.478\ 7, 0.243\ 2, 0.204\ 5, 0.073\ 5)^T$ 即为辽宁省路面 PQI 中各项指标的权重值: PCI 的权重值为 $w_1=0.478\ 7, RQI$ 的权重值为 $w_2=0.243\ 2, RDI$ 的权重值为 $w_3=0.204\ 5, SRI$ 的权重值为 $w_4=0.073\ 5$.

4 路用性能后评估

4.1 指标权重对比分析

《公路技术状况评定标准》(JTG—H20—2015)中各项指标的权重值与本文计算出的修正权重值对比结果如表 9 所示.

以往对沥青路面路用性能的评价通常按照《公路技术状况评定标准》(JTG—H20—2015)来进行,虽然该标准的适用范围很广,但针对性较弱.笔者利用层次分析法对 PQI 中各项指标的权重值进行计算,其结果更加

精确、可靠,也更能适用于辽宁省公路的基本情况。

表9 沥青路面 PQI 分项指标权重
Table 9 Sub index weights of PQI

评估指标	权重	国家标准权重值	修正后权重值	涨幅/%
PCI	w_1	0.35	0.478 7	36.8
RQI	w_2	0.40	0.243 2	-39.2
RDI	w_3	0.15	0.204 5	36.3
SRI	w_4	0.10	0.073 5	-26.5

《公路技术状况评定标准》(JTG—H20—2015)中 PQI 分项指标权重值比较看中路面破损状况和路面行驶质量。从近年来辽宁省公路养护的决策上来看,路面破损和车辙现象比较常见,大多数决策都是针对路面破损状况和路面行驶质量展开的。

4.2 路面质量后评估

根据《公路技术状况评定标准》(JTG—H20—2015),目前我国正在使用的路用性能评价指标与研究标准如表 10 所示。

表 10 路面使用性能评价指标与研究标准

Table 10 Evaluation index and standard of pavement performance	
PQI	评价等级
≥ 90	优
$80 \leq PQI < 90$	良
$70 \leq PQI < 80$	中
$60 \leq PQI < 70$	次
< 60	差

利用修正后的权重值计算辽宁省黑大线维修改造工程沈棋路至棋盘山风景区路段就地热再生后的指数 PQI 为

$$PQI = 0.478\ 7 \times 86.08 + 0.243\ 2 \times 100 + 0.204\ 5 \times 86.4 + 0.073\ 5 \times 100 = 90.623\ 1.$$

该试验路段经就地热再生后 PQI 大于 90。由表 10 可知,该路段的路面使用性能为优。

5 结 论

(1) 基于层次分析法对 PQI 中的各项指

标权重进行了修正计算,利用修正后的指标权重计算得出的结果更加精确、可靠,也能适用于辽宁省公路的具体情况。

(2) 计算得出辽宁省黑大线维修改造工程沈棋路至棋盘山风景区路段 PCI、RQI、RDI 和 SRI 的权重分别为 0.478 7、0.243 2、0.204 5 和 0.073 5,计算得出路面性能指数 PQI 为 90.623 1,评价等级为优。

(3) 沥青路面的使用性能后评估是就地热再生项目后评估中最重要的组成部分,对其进行客观、系统的后评估可以为促进就地热再生技术的进一步发展和将来形成较为系统的后评估指南打下良好基础。

参考文献

[1] 莫丽威. 就地热再生技术在高速公路沥青路面预养护中的适应性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
(MO Liwei. The applicability disquisition of hot in-place recycling technology in asphalt pavement's premaintenance of expressway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.)

[2] 莫丽威,何禾,孙建国,等. 基于加权 TOPSIS 法的 HIR 技术应用综合效用评价[J]. 养护机械 & 施工机械,2013(1):65-69.
(MO Liwei, HE He, SUN Jianguo, et al. Evaluation of comprehensive utility of HIR technology based on weighted TOPSIS method [J]. Maintenance machinery & construction technology, 2013(1):65-69.)

[3] 武文静. 就地热再生技术后评估研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2014.
(WU Wenjing. Study on post evaluation of HIR technology [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)

[4] 张振明. 项目后评估在电网企业建设项目中的应用[D]. 天津,天津大学,2010.
(ZHANG Zhenming. Application of post-project evaluation on electrical power grid enterprises new project [D]. Tianjin: Tianjing University, 2010.)

[5] 张松见. 沥青路面就地热再生(HIR)施工技术应用[J]. 青海交通科技,2010(1):85-88.
(ZHANG Songjian. Application of asphalt pavement on the construction technology of geothermal regeneration(HIR) [J]. Qinghai traf-

- fic science and technology, 2010 (1): 85 - 88.)
- [6] 韩青春. 沥青路面现场热再生技术的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
(HAN Qingchun. Study on the application of hot In-place recycling of the asphalt pavement [D]. Chang chun: Jilin University, 2007.)
- [7] 苑剑光. 沥青路面就地热再生技术在吉林省高速公路上的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
(YUAN Jianguang. Asphalt pavement thermal renewable technology in the Jilin province study on the application of the highway [D]. Chang chun: Jilin University, 2009.)
- [8] 王鹏, 彭兀伟. 基于层次分析法的和谐校园评价指标权重确定[J]. 中国科技信息, 2010 (14): 244 - 247.
(WANG Peng, PENG Yuanwei. Determining the evaluation criterion weight of harmonious campus based on AHP [J]. China science and technology information, 2010 (14): 244 - 247.)
- [9] SARIY T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [10] BIN A, LATIF A. Latif. Relationship between international roughness index (IRI) and present serviceability index (PSI) [J]. Faculty of civil engineering university Teknologi Malaysia, 2013, 150(6): 197 - 205.
- [11] MOUSSEAU V, FIGUERA J, NAUX J. Using assign examples to infer weights for ELECTER TRI methods; some experimental results [J]. European journal of operational research, 2011, 130(2): 263 - 275.
- [12] MACHARIS C, SPRINGARL J, BRUCKER K. et al. PROMETHEE and AHP The design of operational Synergies in multi-criteria analysis: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP [J]. European journal of operational research, 2014, 153(2): 307 - 317.
- [13] 于艳春. 农村公路建设项目后评价研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
(YU Yanchun. The study of rural road construction post-evaluation [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.)
- [14] CHATTI K, LEE D. Development of preventive maintenance strategy for minimizing roughness related pavement damage [R]. Los Angeles: University of California Los Angeles, 2011.
- [15] ELDUKAIR Z A, AYYUB B M. attribute fuzzy decisions in construction strategies [J]. Fuzzy sets and systems, 2012, 10(2): 225 - 227.
- [16] CHABOCHE J L. Continuum damage mechanics tool to describe phenomena before crack initiation [J]. Nuclear engng and design, 2011 (64): 233 - 247.
- [17] MONISMITH C L, EPPS J A, AND FINN F N. Improved asphalt mix design. Proc. of asphalt paving technologists [D]. San Antonio: Case Western Reserve University, 2015.
- [18] MONSUUR H. An intrinsic consistency threshold for reciprocal matrices [J]. European journal of operational research, 2014, 96 (2): 387 - 391.
- [19] 张敏江, 张文博, 于保阳. 基于层次分析法的沥青路面冷再生技术后评价指标权重分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(4): 634 - 639.
(ZHANG Minjiang, ZHANG Wenbo, YU Baoyang. Analysis of weighing values of post-assessment indexes for cold recycling technology of asphalt pavement based on analytic hierarchy procedure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28 (4): 634 - 639.)
- [20] 李海华, 赵红泽, 李海强. 基于模糊层次分析法的煤矿工程评标指标权重确定 [J]. 煤炭技术, 2013(2): 54 - 56.
(LI Haihua, ZHAO Hongze, LI Haiqiang. Based on fuzzy analytic hierarchy process in coal mine engineering bid evaluation index weight determination [J]. Coal technology, 2013(2): 54 - 56.)