

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.04.001

# 高速公路沥青路面半刚性基层结构 剩余寿命评价方法研究

林翔, 李强

(公路养护技术国家工程研究中心, 北京 100095)

**摘要:** 针对高速公路沥青路面半刚性基层结构剩余寿命一直缺少定量化评价方法的问题, 结合大量高速公路养护设计项目经验及数据积累, 提出从结构完整性及结构强度衰减度两方面综合评价半刚性基层结构剩余寿命的方法。结构完整性给出了3种计算方法, 包括利用探地雷达无损检测数据直接计算、路面病害与取芯数据结合判断及通过路面病害特征推算; 结构强度衰减度给出了4种计算方法, 包括现场实测模量直接计算、弯沉盆特征参数分析、材料参数对比及结构强度指数评价。由于以上各种方法技术适用性不同, 提出采用定量评价及定性分析相结合的方式, 计算半刚性基层剩余寿命指数。利用对全国代表性省份高速公路大中修周期的调研结果, 将高速公路大中修周期分布规律转化为路面结构寿命衰变规律, 并与结构完整性及结构模量衰减度两项评价指标建立匹配关系, 从而实现了对现有路面结构剩余寿命的定量化计算。将以上成果进行总结提炼, 建立了一套完整的理论分析模型及分析流程, 并在实际工程中进行了验证, 发现评价结果与路面结构实际破坏特点较为匹配, 可用于指导半刚性基层沥青路面养护设计实践。

**关键词:** 道路工程; 剩余寿命评价方法; 养护周期; 半刚性基层结构; 结构完整性; 强度强度衰减度

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2021) 04-0001-08

## Study on Residual Life Evaluation Method of Semi-rigid Base Structure of Expressway Asphalt Pavement

LIN Xiang, LI Qiang

(National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Beijing 100095, China)

**Abstract:** In view of the problem of lack of quantitative evaluation methods for the remaining life of semi-rigid base structure of expressway asphalt pavement, combining with the experiences and data accumulations of a large number of expressway maintenance design projects, a method for comprehensively evaluating the remaining life of semi-rigid base structure is proposed from the aspects of structural integrity and structural strength attenuation. Three calculation methods for structural integrity are presented, including direct calculation using GPR non-destructive testing data, combining judgment of pavement disease with coring data, and estimation by road surface disease characteristics. Four calculation methods for structural strength attenuation are given, including direct calculation using on-site measured modulus, analysis of characteristic parameters of deflection basin, comparison of material parameters, and evaluation of structural strength index. Due to the different applicability of the above methods and techniques, a method of combining quantitative evaluation and qualitative analysis is proposed to calculate the remaining life index of semi-rigid base. Using the survey results of major and medium repair cycles of expressways in representative provinces

收稿日期: 2019-11-22

基金项目: 交通运输部建设科技项目 (LAPP)

作者简介: 林翔 (1985-), 男, 广西百色人, 硕士, 副研究员. (489584225@qq.com)

in China, the distribution rule of major and medium repair cycles of expressways is transformed into the rule of pavement structure life decay, which is matched with the evaluation indicators of structural integrity and structural modulus attenuation, so the quantitative calculation of the remaining life of current pavement structure is realized. After summarizing the above results, a complete set of theoretical analysis models and analysis procedures are established and verified in actual projects. It is found that the evaluation results match the actual damage characteristics of pavement structure, it can be used to guide the practice of maintenance design of semi-rigid base asphalt pavement.

**Key words:** road engineering; residual life evaluation method; major and medium repair cycles; semi-rigid base structure; structural integrity; structural strength attenuation

## 0 引言

半刚性基层结构是我国高等级公路沥青路面主要结构形式。目前,公路路面技术状况评价指标主要以路面功能性能评价为主,而对于半刚性基层结构实际破坏状况及残余强度等方面均无法准确表征<sup>[1-2]</sup>。故在实际养护设计工程中,设计人员只能通过经验判断或进行小范围的开挖验证等途径对半刚性基层使用状况进行定性评价分析<sup>[3]</sup>,容易造成养护设计针对性不强、病害处治不彻底或过度处治等问题。本研究主要从半刚性基层结构完整性及强度衰减等两方面,采用定量评价与定性分析相结合的方式,分析其使用性能衰减规律与公路养护周期的相关关系,从而提出一套针对半刚性基层剩余使用寿命的评价方法,用于指导半刚性基层沥青路面养护设计实践。

## 1 评价指标及评价方法

沥青路面半刚性基层是指用水泥、石灰、粉煤灰等无机结合料稳定类材料作为路面基层的结构形式,其主要承担了提供路面结构承载能力的作用。路面结构寿命的终结一般都以基层结构完全破坏,丧失承载能力作为标志<sup>[4]</sup>。故本研究主要通过结构完整性及结构强度衰减程度两个方面对沥青路面半刚性基层结构整体使用性能进行综合评价<sup>[5-6]</sup>,并预测结构剩余使用寿命。

### 1.1 半刚性基层结构完整性

借鉴路面结构破损状况指数 ( $PCI$ )<sup>[7]</sup>的定义,本研究采用基层结构破损状况指数来评价半刚性基层结构的完整性。由于基层结构破坏属于路面结构隐性病害,目前还没有对其进行直接检测的方法。本研究主要通过间接检测与经验判断相结合的方式进行分析评价。

(1) 探地雷达数据计算法:利用探地雷达对路

面结构内部缺陷的检测技术应用越来越广泛。依靠高精度检测天线,可以对路面基层结构裂缝、松散、脱空、含水量高、局部沉陷等病害进行识别<sup>[8-9]</sup>。故该方法推荐直接利用探地雷达检测数据识别出路路面基层结构破坏位置及影响面积,计算基层结构破损状况指数  $BCI$ 。该指标为实际检测得到,可作为定量评价指标。

$$BCI = 1 - 100\% \times (\text{基层结构破损面积} / \text{路面面积}), \quad (1)$$

式中,基层结构破损面积为单位长度车道内,通过探地雷达检测识别出基层结构破损病害面积之和;检测路面面积为单位长度车道路面面积。

说明:该方法利用检测数据直接计算得到,属于最为精确的计算方法,在具备检测设备条件下,应优先采用该方式计算基层结构破损率。

(2) 路面病害结合钻芯取样验证计算法:沥青路面病害产生及发展,主要包括两个方面:病害从上至下发展,主要包括温缩裂缝、疲劳裂缝等;病害从下向上发展,主要包括基层反射裂缝、结构性裂缝等。养护设计项目中,经常需要对病害位置进行取芯,分析病害产生原因及结构破坏层位。该方法将结合钻芯取样数据,间接评价基层结构完整性。根据现有路面病害分布特点,挑选典型病害及代表性位置,进行钻芯取样,检测各种典型病害位置下部半刚性基层结构破坏发展层位及影响面积。通过统计分析得出各类典型病害位置下部半刚性基层发生破坏的概率,进而通过路面病害情况,计算基层结构破损状况指数  $BCI$ 。该指标为实际检测得到,可作为定量评价指标。

$$BCI = 15 \times (DR \sum_{i=1}^n j_i k_i)^{0.412}, \quad (2)$$

式中, $DR$ 为路面表层破损率; $i$ 为典型病害类型; $n$ 为典型病害数量; $j_i$ 为第*i*类典型病害折合破损面积占总病害折合破损面积的比例; $k_i$ 为第*i*类典型病害

基层破坏的芯样个数所占该类病害芯样总数的比例。

说明:该方法利用路表面病害分布情况,找出典型病害并进行取芯验证,间接判断下部半刚性基层破损状况。由于严重病害的发生经常是基层破坏反射至面层所致,该方法通过实地取芯验证,也具有一定的准确性,但其计算精度要低于探地雷达直接检测法,在缺少探地雷达设备的情况下,应优先选用该方法计算基层结构破损状况指数。

(3)路面病害特征推算法:由于半刚性基层结构破坏反射至沥青路面的病害形式,主要包括贯穿全幅路面的横向裂缝、轮迹带位置长度较大的纵向裂缝、唧浆、严重龟网裂等。故该方法聚焦于以上几种路面病害,通过大数据统计分析其病害分布特征与结构结构破坏程度的相关关系,见图1。发现交通轴载作用次数的不断增加,贯穿全幅路面的横向裂缝间距逐渐变小,由建成通车时间距大于500m,逐渐发展至结构寿命末期的20m,且该指标呈现出前期衰变较快,后期逐渐稳定的变化规律。严重的纵向裂缝一般都属于结构性裂缝,主要是由于半刚性基层破坏逐渐反射至面层产生的。根据统计数据发现,随着交通轴载作用次数的不断增加,纵向裂缝长度逐渐增大,由刚开始出现时长度20m,发展至结构寿命末期长度大于150m,且呈现出前期较为稳定、后期加速发展的趋势。该方法根据以上规律,将病害发展阶段与路面结构寿命相结合,提取由于半刚性基层破坏而反射至面层的各类常见病害,构建了一套半刚性基层结构完整性专项评价指标体系,通过该指标体系推算半刚性基层结构破损程度,见表1。

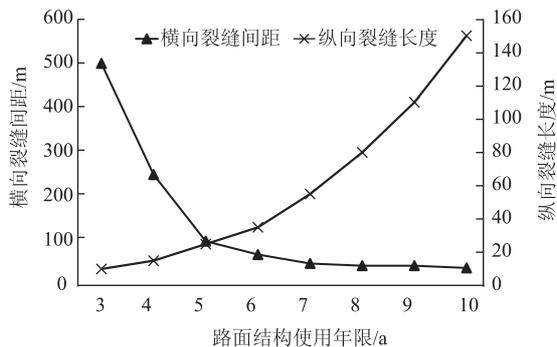


图1 路面病害特征与结构使用年限关系

Fig. 1 Relationships between pavement disease characteristics and structural service life

说明:该方法属于经验推算法,是通过大量工程经验及数据统计总结得出的,针对具体项目路段及病害并没有进行实际检测或抽样验证,故无法定

表1 路面病害特征推算法评价半刚性基层结构完整性

Tab. 1 Evaluation of structural integrity of semi-rigid base by pavement disease feature calculation method

评价指标	评价单元	优等	中等	差等
横向裂缝间距/m	检测范围内	>100	100~50	<50
横向裂缝贯穿度/%	检测范围内	<30	30~60	60~100
平均纵向裂缝长度/m	1车道公里内	0~100	100~200	>200
坑槽及唧浆率/%	检测范围内	<1	1~5	>5
龟网裂率/%	检测范围内	<1	1~5	>5

量化计算基层破损率。利用该指标体系,可对基层破坏程度进行定性的分级。在缺乏专项检测条件的情况下,可仅利用路表面病害数据定性分析基层破坏程度。在进行网级路况评价分析中,可也利用该方法对路网中各路线基层结构状况进行定性评价。

1.2 半刚性基层结构强度衰减程度

由于路面基层结构属于路面结构的主要承重层,对其使用性能的评价还需对其结构承载能力进行分析<sup>[10]</sup>。本研究采用基层模量衰减度指标来评价半刚性基层结构强度衰减情况。结合目前常用的结构层模量专项检测方法,提供了5种半刚性基层模量衰减度的计算方法,分别对应着不同的数据需求及计算精度。路面各结构层模量的测试方法应符合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)及《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2019)的要求。

(1)现场实测模量法:该方法通过承载板法对既有路面逐层开挖并实测各结构层模量,将其与原始设计模量或新建基层结构模量进行比较,得到基层模量衰减度<sup>[11-13]</sup>。该指标为实际检测得到,可作为定量评价指标。

$$\text{基层模量衰减度} = \frac{\text{基层初始模量} - \text{基层当量模量}}{\text{基层初始模量}} \times 100\%$$

式中,基层初始模量为以相同地区相同结构的新建路面半刚性基层模量为基层初始模量;当无新建结构基层初始模量数据时,以完好路段路肩处基层反算模量作为基层初始模量;基层当量模量为既有路面结构弯沉盆数据反算基层结构模量作为当量模量<sup>[14]</sup>。

说明:目前检测路面基层模量最准确的方式就是直接开挖路面面层,利用承载板在基层顶面实测回弹模量。但该方法对原有路面的破坏、施工作业难度及对现有交通的干扰等方面均较大,一般不会大范围采用。在重点工程或高速公路大修工程等项

目中,可采用该方法测量基层模量。

(2) 弯沉盆特征参数分析法:该方法利用落锤式弯沉仪(FWD)检测路面弯沉盆数据,并通过模量反算的方法计算既有路面半刚性基层模量,作为基层当量模量,将其与基层初始模量相比较,计算模量衰减度。计算公式与现场实测法相同。该指标为实际检测得到,可作为定量评价指标。

说明:该方法主要计算基层模量衰减情况。通过无损手段检测基层结构模量的方式主要是落锤式弯沉仪(FWD)检测弯沉盆数据,再利用弯沉盆反算模量。由于本研究利用的指标是模量衰减度(即模量比值),故不同反算方法得到两种状态下模量的比值应该具有相对的稳定性及可信度,可用于后期评价分析。

(3) 材料试验数据计算法:通过对钻芯取样收集得到的路面基层结构芯样进行无侧限抗压强度试验,实测基层结构材料的强度指标,并与新建路面结构层强度进行比较,计算模量衰减度<sup>[15-16]</sup>,见表2。计算公式与现场实测法相同。

表2 材料试验数据计算法评价半刚性基层强度衰减程度  
Tab.2 Evaluation of strength attenuation of semi-rigid base by material test data calculation method

评价指标	优等	中等	差等
基层模量衰减度/%	0~20	20~30	<30

说明:该方法针对现场取样进行实验室检测,分析强度衰减情况。但由于室内试验毕竟无法完全还原路面结构原始的受力状况,而对于已发生破损的材料无法进行室内加载试验,故该检测数据的代表性及准确性要低于以上两种方法,可用于定性评价基层结构强度衰减情况。

(4) 路面结构强度指数评价法:通过自动弯沉仪或贝克曼梁弯沉仪检测得到的路表回弹弯沉值,计算出路面结构强度指数(PSSI),通过PSSI间接判断基层模量衰减程度<sup>[17]</sup>,见表3。

表3 路面结构强度指数评价法评价半刚性基层强度衰减程度  
Tab.3 Evaluation of strength attenuation of semi-rigid base by pavement structure strength index evaluation method

评价指标	优等	中等	差等
PSSI值/%	100~80	80~60	<60

说明:通过PSSI判断路面整体结构强度是当前公路养护设计路况评价的常规做法,但PSSI指标表征的是路面整体结构强度与原始设计结构强度的衰减情况,不能直接反映基层结构的强度衰减。一般认为半刚性基层结构是路面结构承载能力的主

要提供层位,故该方法将表征整体结构强度的指标用于间接反映半刚性基层结构的强度状况,具有一定的代表性,但该评价方法只能作为定性分级的标准。

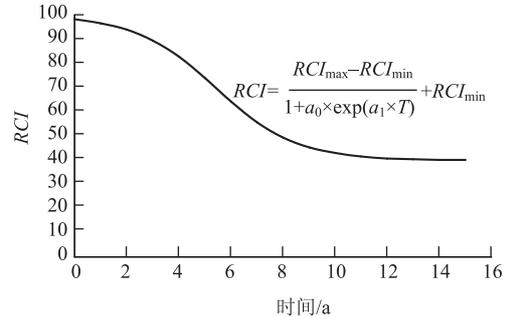


图2 修正S型路面使用性能衰变模型

Fig.2 Modified S-type pavement serviceability decay model

## 2 衰变规律分析

### 2.1 模型形式

鉴于现有的研究基础和所掌握的数据资源情况,参考《沥青路面长期性能研究(LAPP)》项目研究成果,本研究采用修正S型模型对路面结构剩余寿命变化规律进行拟合分析。模型形式如下:

$$RCI = (RCI_{max} - RCI_{min}) / (1 + a_0 \exp(a_1 A)) + RCI_{min}, \quad (3)$$

式中, $RCI$ 为半刚性基层剩余寿命指数; $RCI_{max}$ 为半刚性基层寿命上限; $RCI_{min}$ 为半刚性基层寿命下限; $A$ 为半刚性基层破损状况指数或半刚性基层模量衰减度; $a_0$ 为模型参数; $a_1$ 为模型参数。

### 2.2 确定关键控制点

(1) 由于该方法计算的指标为结构剩余寿命指数,新建路面结构寿命 $RCI_{max}$ 可取100,结构寿命终结时 $RCI_{min}$ 取0。

(2) 模型参数 $a_1$ 表征的是结构剩余寿命的衰变速度,通过将实际路面结构使用寿命变化情况与不同参数取值结果进行比较分析,该方法选取其中吻合度最高的 $a_1$ 值0.06。

(3) 通过对全国高速公路大中修周期的调研及统计分析,统计出不同交通状况下半刚性基层路面结构大修周期,如表4所示;将各种使用条件下,功能性大修周期及中修周期分别与结构使用寿命相比较,可计算各养护阶段结构剩余寿命指数,如表5所示。

表4 不同交通等级高速公路结构使用寿命

Tab. 4 Service life of expressway structures with different traffic grades

交通量	结构使用寿命/a		
	高速(结构性)	一级	二级
轻	19.6	13.2	11
中	17.4	11.6	10.4
重	15.4	10.6	9.5
特重	14.5	8.9	7

表5 不同交通等级高速公路剩余寿命指数

Tab. 5 Remaining life indexes of expressways with different traffic grades

评价指标	性能分级					
	优等		中等		差等	
	功能性大修	中修	功能性大修	中修	功能性大修	中修
轻交通	15	8	13	6	11	4
养护中交通	12	7.7	10	5.7	8	3.7
周期/a重交通	11.5	5.3	9.5	3.3	7.5	1.3
特重交通	10.2	5	8.2	3	6.2	1
轻交通	23.50	59.20	33.70	69.40	43.90	79.60
剩余寿命中交通	31.00	55.70	42.50	67.20	54.00	78.70
指数/%重交通	25.30	65.60	38.30	78.60	51.30	91.60
特重交通	29.70	65.50	43.40	79.30	57.20	93.10

### 3 建立新指标体系与养护类型关系

根据养护设计工程实践,并结合我国公路沥青路面养护设计相关标准规范的规定,提出半刚性基层沥青路面大修及中修的路况边界条件,与半刚性基层结构破损状况指数、半刚性基层结构模量衰减度两项指标建立相关关系<sup>[18]</sup>,如表6所示。

表6 半刚性基层结构评价指标与养护类型关系

Tab. 6 Relationship between evaluation indicator and maintenance type of semi-rigid base structure

养护性质	中修	功能性大修	结构性大修
半刚性基层结构破损状况指数	15	20	25
半刚性基层结构模量衰减度	10	20	30

### 4 确定分析模型

根据已知的剩余寿命指数  $RCI$  值及半刚性基层结构破损状况指数衰减度或半刚性基层结构模量衰减度  $A$  值,可计算出模型参数  $a_0$ ,见下式:

$$a_0 = ((RCI_{max} - RCI_{min}) / (RCI - RCI_{min}) - 1) / \exp(a_1 A)$$

计算出不同使用条件下模型参数  $a_0$  值,如表7所示,并绘制半刚性基层结构剩余寿命对应关系图,如图3、图4所示。

表7 确定模型参数  $a_0$

Tab. 7 Determination of model parameter  $a_0$

等级评定	交通量等级	模型参数 $a_0$	等级评定	交通量等级	模型参数 $a_0$
基层结构完整性优等	轻	0.010 0	基层模量衰减度优等	轻	0.010 0
	中	0.015 0		中	0.015 0
	重	0.026 1		重	0.017 4
	特重	0.035 0		特重	0.022 2
基层结构完整性中等	轻	0.046 8	基层模量衰减度中等	轻	0.043 6
	中	0.055 4		中	0.040 2
	重	0.088 3		重	0.056 1
	特重	0.091 3		特重	0.057 0
基层结构完整性差等	轻	0.092 4	基层模量衰减度差等	轻	0.087 3
	中	0.099 0		中	0.086 3
	重	0.132 9		重	0.099 5
	特重	0.177 4		特重	0.100 9

### 5 分析流程及方法

利用以上建立起来的模型,可以开展沥青路面半刚性基层结构剩余使用价值的评价分析。在分析前,需通过现有专项检测手段或已有检测数据,分别确定基层结构完整性及基层结构模量衰减度两项指标。确定方法如下:

(1) 当半刚性基层结构完整性评价仅能获得定性评价结果,而半刚性基层强度衰减性评价可以获得本研究定量评价数据时,可采用图3的方法计算结构剩余寿命指数。

(2) 当半刚性基层结构完整性评价可获得定量评价数据,而半刚性基层强度衰减性评价只能获得定性评价结果时,可采用图4的方法计算结构剩余寿命指数。

(3) 当两方面评价指标均能获得定量评价数据时,可两种方法同时使用,并进行综合比选。

(4) 当两方面评价指标均无法获得量化的计算结果时,将不适用于本研究中半刚性基层剩余寿命评价方法。

### 6 方法应用及验证

#### 6.1 案例1:重等交通等级

河北省某条高速公路,重等交通等级,沥青混

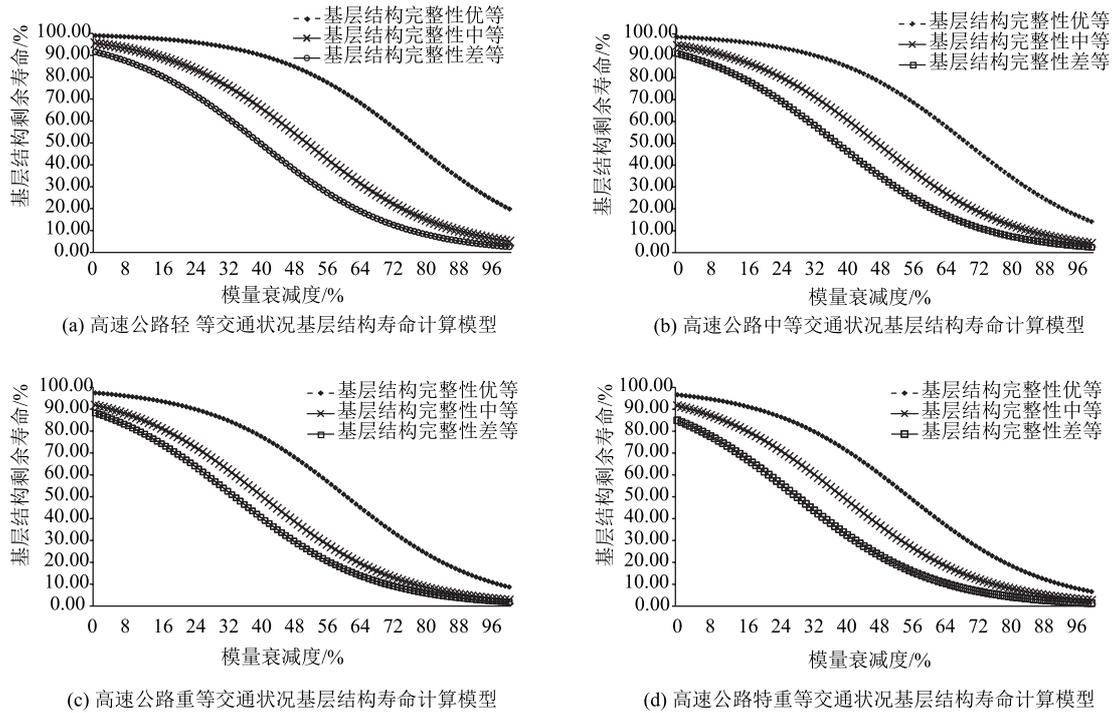


图3 高速公路基层结构寿命与基层模量衰减度关系模型

Fig. 3 Model of relationship between structural life and base modulus attenuation of expressway base

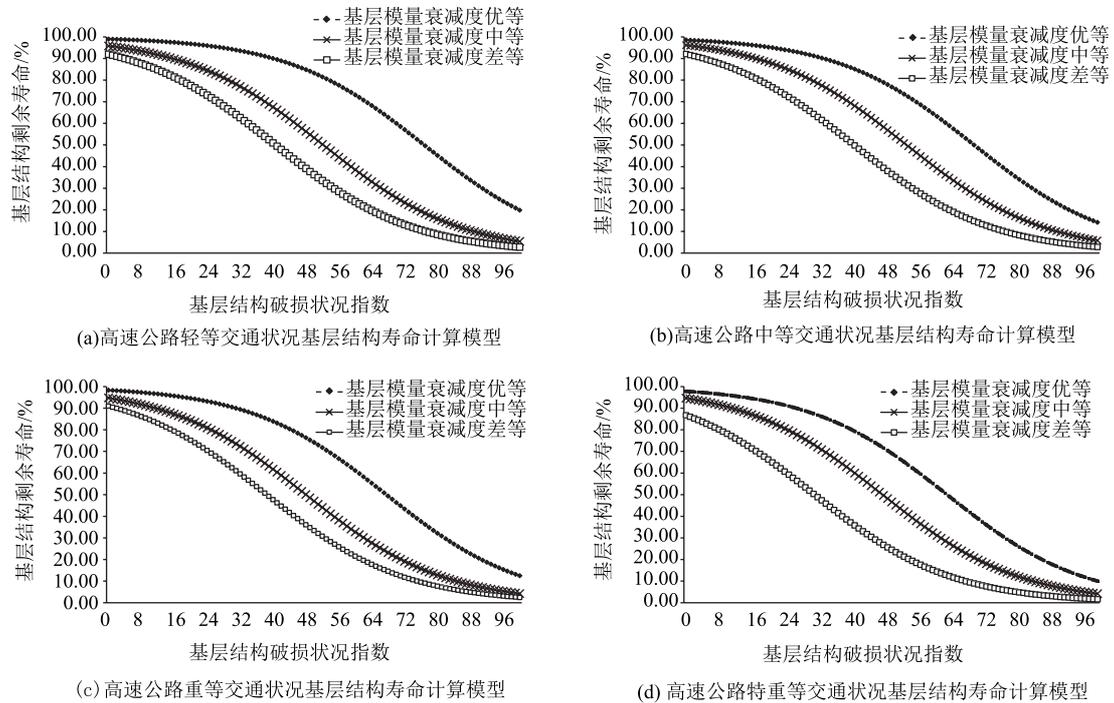


图4 高速公路基层结构寿命与基层破损率关系模型

Fig. 4 Model of relationship between structural life and base damage rate of expressway base

混凝土路面，2005 年建成通车，2014 年对路况进行详细检测，路面 *PCI* 指标均值为 86，*PSSI* 指标均值为 85；该路段典型病害类型为横向裂缝、纵向裂缝及坑槽，经过典型病害位置钻芯取样，发现 70% 的横

向裂缝位置基层发生破坏，80% 的纵向裂缝位置基层发生开裂，100% 的坑槽位置基层结构破坏。该路段在 2015 年开展了中修养护工程。

方法验证：利用以上检测数据，可计算出该路

段半刚性基层结构破损状况指数为 88, 衰减值为 12; 基层结构模量衰减度定性评价为中等; 利用下图计算出该路段半刚性基层剩余寿命为 90%。故对于该路段, 可认为基层结构基本保持良好, 没有发生大范围的损坏, 可以继续保持原有的状态。该结论与 2015 年采用中修工程, 重点处治沥青面层病害的养护方案是相匹配的。

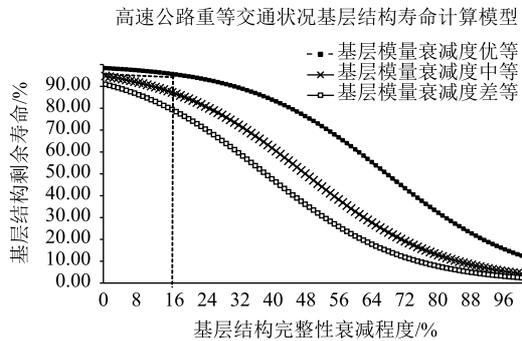


图5 应用实例 1

Fig. 5 Application example 1

## 6.2 案例 2: 特重等交通等级

广东省某条高速公路, 特重等交通等级, 沥青混凝土路面, 2001 年建成通车, 2015 年对路况进行详细检测, 现场代表性位置通过承载板实测基层顶面当量回弹模量为 242 MPa, 原设计基层顶面当量回弹模量为 300 MPa; 另外, 针对该路段代表性病害分布特征进行调查, 发现横向裂缝平均间距为 20 m, 纵向裂缝平均长度为 350 m/km。该路段在 2016 年开展了大修养护工程。

方法验证: 利用以上检测数据, 可计算出该路段半刚性基层结构模量衰减度指数为 81, 衰减值为 19; 基层结构完整性定性评价为差等; 利用图 6 计算出该路段半刚性基层剩余寿命为 60%。故对于该路段, 可认为基层结构整体仍具有一定强度, 但局部路段基层结构发生较严重破坏, 应进行彻底的处治并开展补强处理。该结论与 2016 年采用大修工程, 重点处治整体结构层病害, 并加铺沥青混凝土补强层的养护方案是相匹配的。

## 7 结论

本研究通过大量调研及数据统计分析, 系统的提出了一套高等级公路沥青路面半刚性基层结构剩余寿命评价方法, 主要研究结论包括以下几方面:

(1) 采用结构完整性及结构模量衰减度两项指标评价半刚性基层结构使用状况, 同时结合现有路况专项调查手段, 提出定量计算结合定性评价的方

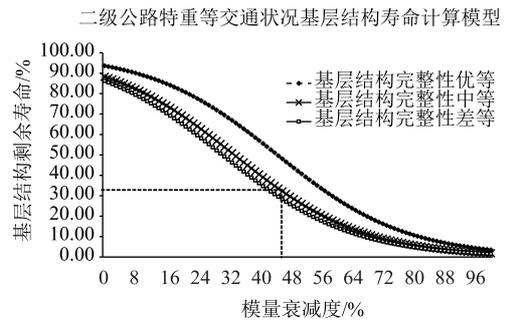


图6 应用实例 2

Fig. 6 Application example 2

式对这两项指标进行分析的方法。

(2) 将全国大中修周期分布规律的统计分析结果转化为路面结构寿命衰变规律, 并与结构完整性及结构模量衰减度两项评价指标建立匹配关系, 从而实现了现有路面结构剩余寿命的定量化计算。

(3) 经过实际养护设计工程验证, 该方法评价结果与路面结构实际破坏特点较为匹配, 可用于指导半刚性基层沥青路面养护设计实践。

## 参考文献:

### References:

- [1] 姚祖康. 对我国沥青路面现行设计指标的评述 [J]. 公路, 2003 (2): 43-49.  
YAO Zu-kang, A Review on Design Criteria of Asphalt Pavements [J]. Highway, 2003 (2): 43-49.
- [2] 姚祖康, 对国外沥青路面设计指标的评述 [J]. 公路, 2003 (3): 18-24.  
YAO Zu-kang. A Review on Foreign Asphalt Pavement Design Indicator [J]. Highway, 2003 (3): 18-24.
- [3] JTG 5421—2018, 公路沥青路面养护设计规范 [S].  
JTG 5421—2018, Specifications for Maintenance Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [4] 陈飞, 马融. 基于两阶段水泥稳定碎石基层寿命预估研究 [J]. 公路, 2016 (5): 174-177.  
CHEN Fei, MA Rong. Study on Life Prediction of Cement Stabilized Macadam Base Based on Two-stage [J]. Highway, 2016 (5): 174-177.
- [5] 陈泽生. 旧路半刚性基层性能评价 [D]. 南京: 东南大学, 2015.  
CHEN Ze-sheng. Performance Evaluation of Old Road Semi-rigid Base [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [6] 贾彦顺. 基于模量退化的沥青路面可靠性评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.  
JIA Yan-shun. Study on Reliability Evaluation of Asphalt

- Pavement Based on Modulus Degradation [D], Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [7] JTG 5210—2018, 公路技术状况评定标准 [S].  
JTG 5210—2018, Highway Performance Assessment Standards [S].
- [8] 金光来, 臧国帅, 蔡文龙, 等. 基于探地雷达的路面结构完整性量化评价方法 [J]. 公路, 2020 (5): 16—20.  
JIN Guang-lai, ZANG Guo-shuai, CAI Wen-long, et al. Evaluation Method of Pavement Structural Integrity Based on Ground Penetrating Radar [J]. Highway, 2020 (5): 16—20.
- [9] 熊春龙. 基于无损检测技术的沥青路面结构性健康状况评估方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
XIONG Chun-long. Research on Asphalt Pavement Structural Health Evaluation Method Based on Non-destructive Testing Technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [10] 盛燕萍, 李海滨, 赵海生, 等. 半刚性基层模量衰减对沥青路面结构力学行为的影响 [J]. 河北工业大学学报, 2016, 45 (1): 101—107.  
SHENG Yan-ping, LI Hai-bin, ZHAO Hai-sheng, et al. Effect on Mechanical Behavior of Asphalt Pavement Structure Based on Semi-rigid Base Modulus Attenuation [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2016, 45 (1): 101—107.
- [11] 徐建平, 赵毅, 梁乃兴, 等. 基于疲劳累积损伤的高模量沥青路面使用寿命预估 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2018, 38 (2): 26—33.  
XU Jian-ping, ZHAO Yi, LIANG Nai-xing, et al. Life Prediction of High Modulus Asphalt Pavement Based on Fatigue Cumulative Damage [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38 (2): 26—33.
- [12] 单丽岩, 谭忆秋, 许亚男, 等. 应力、应变控制模式下沥青疲劳损伤演化规律 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (1): 16—21.  
SHAN Li-yan, TAN Yi-qiu, XU Ya-nan, et al. Fatigue Damage Evolution Rules of Asphalt under Controlled-stress and Controlled-strain Modes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (1): 16—21.
- [13] 汪福松, 肖月, 仪明伟, 等. 长期服役后沥青路面面层材料回弹模量性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37 (3): 39—44.  
WANG Fu-song, XIAO Yue, YI Ming-wei, et al. Research on Resilience Modulus of Surface Mixture on Asphalt Pavement After Long-term Service [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37 (3): 39—44.
- [14] 王建章, 李红. 沥青路面半刚性基层结构承载能力评价方法研究 [J]. 公路工程, 2018 (10): 209—212.  
WANG Jian-zhang, LI Hong. The Method to Evaluate Structure-load-carrying Capacity of Semi-rigid Base [J]. Highway Engineering, 2018 (10): 209—212.
- [15] KOUCHAKI S, ROSHANI H, PROZZI J A, et al. Evaluation of Aggregates Surface Micro-texture Using Spectral Analysis [J]. Construction & Building Materials, 2017, 156: 944—955.
- [16] NEJAD F M, KARIMI N, ZAKERI H. Automatic Image Acquisition with Knowledge-based Approach for Multi-directional Determination of Skid Resistance of Pavements [J]. Automation in Construction, 2016, 71: 414—429.
- [17] 巩建, 常成利, 程珊珊, 等. 基于弯沉的沥青路面使用性能评价模型 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (7): 40—46.  
GONG Jian, CHANG Cheng-li, CHENG Shan-shan, et al. An Asphalt Pavement Performance Evaluation Model Based on Deflection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016 (7): 40—46.
- [18] HALL K T, CORREA C E, CARPENTER S H, et al. Rehabilitation Strategies for Highway Pavements, NCHRP C1-38A [R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2001.