

文章编号: 0451-0712(2006)07-0018-07

中图分类号: U416.217

文献标识码: B

高等级沥青混凝土路面车辙预估方法研究综述

苏 凯, 孙立军

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海市 200092)

摘 要: 车辙是高等级沥青混凝土路面常见的一种破坏形式, 严重影响到公路的服务质量, 并且容易诱发裂缝等其他破坏。回顾了车辙预估方法发展的历程, 对国内外典型的车辙预估模型进行了评述, 深入分析了每种方法的优缺点, 进而提出了高等级沥青混凝土路面车辙预估方法的发展方向, 为以后沥青混凝土路面的车辙研究及路面设计提供参考, 以提高我国高等级公路的经济效益和社会效益。

关键词: 沥青混凝土路面; 车辙; 预估模型; 评述

沥青混凝土路面以其良好的力学性能、平整耐磨的表面、舒适的行车性能、良好的施工和易性而得到了广泛应用。有资料显示, 美国的沥青混凝土路面占其全部路面的 90%, 日本为 94%。在我国, 自 1988 年上海沪嘉高速公路建成通车实现我国大陆上高速公路零的突破以后, 近几年来高速公路建设事业迅猛发展, 截止 2002 年底全国高速公路已达 25 000 km, 居世界第二位, 且其中 95% 以上为沥青混凝土或者改性沥青混凝土路面^[1]。但是在长期使用过程中, 由于具有显著流变性质的沥青混凝土路面的强度、稳定性和可靠性有别于一般固体, 直接承受行车荷载和各种自然因素的作用, 所暴露出的技术问题也十分严重, 各种损坏应运而生。其中, 车辙是渠化交通的高等级公路沥青混凝土路面的主要损坏类型之一。

车辙是指在行车荷载的反复作用下, 路面发生

的不可恢复的永久变形; 通常轮迹带的沥青混凝土面层在下凹的同时, 两侧伴随着隆起, 二者组合起来构成车辙。由于沥青混凝土路面的车辙主要发生在高温季节, 所以在沥青混凝土路面材料和结构稳定性研究中, 车辙问题被认为是“高温稳定性”问题。

车辙的存在严重缩短了路面的使用寿命, 降低了道路的服务质量, 构成了道路运输的安全隐患, 表现为:

- (1) 影响了路面的平整度, 导致行车舒适性降低;
- (2) 使轮迹带沥青混凝土层厚度减薄, 降低了面层以及路面结构的整体强度, 也由此进一步引起裂缝、坑槽等其他路面破坏;
- (3) 存在较大辙槽的路段, 车辆变向难以控制, 且雨天时路表排水不畅, 车辆易于发生漂滑而影响高速行驶的安全;

收稿日期: 2005-12-01

参考国外成熟规范以及国内研究成果和相近材料规范, 确定了橡胶沥青材料设计技术要求。

(3) 施工工艺涉及小范围、低强度的工艺调整。施工过程表明, 材料设计技术要求合理, 橡胶沥青的施工工作性较好。

(4) 完工后的检测表明, 橡胶沥青混凝土罩面在密水和表面构造上达成理想的平衡, 抗滑能力较高, 全钢轮组合碾压达到了理想的压实效果。

参考文献:

[1] ASTM D6114-97, Standard Specification for

Asphalt-Rubber Binder[S].

- [2] 黄文元, 等. 公路货运超载运输现状及对策的建议[J]. 公路交通科技, 2003, (4).
- [3] C J Potgieter, J S Coetsee. Bitumen rubber asphalt: Year 2002 design and construction procedures in South Africa[Z]. Asphalt Rubber 2003, 2003.
- [4] Standard Specifications for Road and Bridge Construction[S].
- [5] 黄文元. 轮胎橡胶粉改性沥青路用性能及应用研究[D]. 同济大学, 2004.
- [6] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].

(4)在寒冷地区辙槽会被冰雪所覆盖,致使路面抗滑能力下降。

因此,建立科学、合理的车辙预估模型,提出控制车辙的沥青混凝土路面设计方法,对防止和减少车辙的危害,提高路面的使用寿命,选择合适的维修养护时机,提高路面的管理水平,都具有重要意义。因此而使路面的寿命得以提高或车辙损坏得以延缓时,其所产生的实用价值将是巨大的。对车辙的发展进行预估,已经成为当前道路研究者必须面对的一项核心问题。本文回顾了车辙预估方法的发展历程,系统地总结了国内外典型的车辙预估方法并对其进行评述,以便为国内的车辙预估研究提供借鉴。

1 车辙预估方法的发展^[2]

20世纪60年代以前,用于设计沥青混凝土路面结构和判断路面使用性能的主要指标为加州承载比(California Bearing Ratio,简称为CBR)和其他反映路面材料抗荷能力的经验性指标,通过控制CBR值来确保土基不会发生整体性剪切破坏(变形)。并且由于当时的交通量较小、重载车辆少,沥青混凝土面层厚度薄,疲劳裂缝是当时的主要病害,车辙问题并未引起足够的重视,沥青混凝土路面研究中很少涉及到永久变形及其预估方法的研究。

随着沥青混凝土路面结构的变化,较厚沥青混凝土面层(25~30 cm)的采用,疲劳裂缝逐渐减少,交通量的增加、大量重载车辆的出现,使车辙问题变得日益突出。1962年第一届国际沥青混凝土路面结构设计会议上,壳牌石油公司提出了世界上第一个兼顾疲劳和车辙病害机理的沥青混凝土路面结构设计方法,车辙问题逐渐受到重视,成为道路工作者新的研究热点。Shell设计方法中以路基顶面的竖向永久变形作为主要的研究内容,以路基顶面的压应变为控制指标。在多年研究中,这种“控制路基顶面永久变形”的预估方法一直是建立车辙预估模型的主流方法。

在第三届国际沥青混凝土路面设计会议(1972年)上,Barksdale和Romain提出了新的车辙预估方法——层应变法。该方法考虑了沥青材料的粘弹特性,以及轴载、温度、湿度等环境条件,并在实际路面上进行了验证。1976年的TRB年会上有几篇文章针对该方法的适用性进行了探讨。

在第四届国际沥青混凝土路面设计会议(1977年)上,一些新的车辙预估方法相继提出,出现了车

辙预估方法研究的一个高潮,比较有代表性的有:(1)Finn基于应力、弯沉、荷载作用次数等现场数据,统计得出了车辙预估模型;(2)Classen修正了Shell的预估方法,并采用蠕变试验对沥青混凝土层变形进行了校正;(3)Knis考虑了温度、湿度、时间、荷载等因素,提出了粘弹性的车辙预估方法。

在第五届国际沥青混凝土路面设计会议(1982年)上,关于车辙预估方法的论述很少,已有的几篇文献均是对限制路基顶面压应变的方法进行修正,可以说这时候车辙预估方法的研究陷入了低潮。

在第六届国际沥青混凝土路面设计会议(1987年)上,车辙问题又重新回到人们的视野。Eckmann采用动态蠕变试验和层应变法得出了新的预估模型,且预估值与现场实测结果基本一致。Eisenmann和Hilmer采用足尺试验,研究了荷载和胎压对车辙的影响,得出了统计回归模型。

第八届国际沥青混凝土路面设计会议(1997年)车辙问题受到了越来越多的关注,永久变形第一次被单独辟出一个专栏进行讨论,其中Bryan提出了新的土基压应变的控制标准,Thom提出了适用于软土地基的车辙预估方法,但是并未有新的车辙预估方法提出。

第九届国际沥青混凝土路面设计会议(2002年)又迎来了车辙研究的一个新高潮,车辙问题成为本次会议主题之一。这一时期随着计算机技术的发展,有限元方法在车辙预估中得到了广泛应用。Blab利用有限元方法,采用Maxwell模型,在实测轮胎接地压力和温度分布的基础上对车辙深度进行预估,其结果与HVS的试验结果基本吻合。Hossain采用时间硬化蠕变模型,利用有限元方法也对车辙深度进行了预估。

2 国外的车辙预估方法

2.1 早期的车辙控制方法

早期的SHELL石油公司和美国地沥青协会AI的车辙控制方法均采用路基顶面的竖向永久变形和达到永久变形失效时的荷载作用次数描述,并将永久变形失效定义为路面产生一定车辙深度时对应的路面状态。二者均以土基顶面的压应变作为车辙的控制指标,其依据是路面材料的永久应变同弹性应变成正比,如果将一定交通荷载作用下的路基顶面的弹性应变控制在一定范围内,则路基以上各层的弹性应变都将得到控制,从而在一定程度上控制车

辙。AI法认为按照式(1)进行设计,在沥青混合料压实得当的情况下,设计使用期内车辙深度不会超过 $1.25\text{ cm}^{[3]}$ 。

$$\epsilon_z = AN^B \quad (1)$$

式中: ϵ_z 为土基顶面压应变; N 为荷载作用次数; A 、 B 为系数。

然而,该模型存在明显的不足。首先,弹性应变同永久应变的相关关系尚未有定论。其次,车辙深度与路基顶面的压应变仅存在定性的关系,没有定量的关系,用它来控制车辙缺乏精确性和严密性。第三,该模型缺乏弹性或者粘弹性的理论和试验分析,把路面结构过于简化,只把路基路面看作一个整体,没有区分各结构层的变形特性,且较多地考虑基层和路基材料的变形,对面层的考虑不够。实际上,在多层路面结构中,不同结构的路面即使传递到土基顶面的压应变相同,在加荷次数相同的情况下,却可能出现不同的车辙效应,所以最终的观测结果与模型的计算结果有很大的出入,特别是当一些因素显著地影响沥青混合料的永久变形时,更有可能使预测模型的结果产生较大的离散性。第四,这一指标不能预估路面在不同使用时期的车辙深度,难以指导路面的养护与管理工作。

由于对车辙机理的认识存在很大的局限性,忽略了沥青混凝土层等结构层的永久变形,因此采用路基顶面压应变假设建立的车辙预估模型,不能很好地描述路面的实际工作状态,其预估结果与实际路面存在较大的离散性。

在第六届国际沥青混凝土路面设计会议上,Eisenmann^[4]等将沥青混凝土路面的永久变形机理明确为沥青混合料的剪切流动变形机理,并将动态力学试验和层应变分析结合起来预测足尺试验路的车辙,取得了显著成效后,沥青混凝土层永久变形预估模型优越性引起了研究者的兴趣。此后,以失稳型车辙作为主要研究对象,以沥青混凝土层的永久变形为基本内容来建立沥青混凝土路面车辙预估模型成为主流的研究方向。

多年研究成果的累积,使得以沥青混凝土层永久变形为基础建立的车辙预估模型具有丰富多样的形式。根据建立模型时所依据的方法,本文将其分为理论法、经验法、力学—经验法。

2.2 理论法

理论法通过试验测得沥青材料的性质参数,利用弹性或者粘弹性层状体系理论计算路面内部的应

力、应变,然后根据路面材料的永久变形同应力之间的关系,建立沥青混凝土层的永久变形预估模型。

2.2.1 弹性层状体系法

弹性层状体系法又称层应变法,一般把路面分为若干个亚层,最后统计出各层的累积变形,最早由Barksdale和Romain^[5]于1972年提出。其原理是把路面的每层划分成更小的亚层,计算各亚层是以弹性层状体系理论为基础的,然后通过室内试验相联系,估计由于路面各层的永久变形所造成的车辙。其计算公式如下:

$$\Delta_p = \sum_{i=1}^n (\epsilon_i^p \Delta z_i) \quad (2)$$

式中: Δ_p 为每一层的永久变形; ϵ_i^p 为每一亚层的塑性应变; Δz_i 为每一亚层的厚度。

这种方法的优点是:理论简化,基本能满足工程精度的要求。它的缺点是:(1)只考虑了轮胎中心下区域的应力应变,没考虑轮迹边缘的剪切变形;(2)永久变形仅依赖于路面的弹性应力;(3)使用线性或非线性的弹性理论和引起车辙的一些实际行为不符合(例如轮迹边缘的剪切流动)。

利用弹性层状体系理论计算沥青混凝土面层的车辙,在国际上最有影响也是应用最广的当推壳牌(Shell)法^[7]。壳牌车辙预估方法是在大量蠕变试验、轮迹试验和一系列假设的基础上建立起来的。该方法做了如下假定:沥青混合料的变形是由于相邻矿料间的滑移所形成的,并且从蠕变试验中得到的沥青混合料劲度与沥青劲度的关系,相当于反映沥青混合料永久变形的粘滞劲度与反映沥青永久变形的沥青粘滞劲度的关系。考虑到动态与静态之间的差异,提出了车辙计算的动态修正系数公式如下:

$$\Delta h = C_m \cdot Z_0 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{av}}{S_{mix,\eta}} \cdot h_i \right) \quad (3)$$

式中: Δh 为车辙深度; C_m 为动态修正系数; Z_0 为构造因子,用以调整试验室的单轴静态蠕变试验与实际路面侧向为受约束状态下不一致而造成的结果误差; σ_{av} 为第 i 分层内的平均压应力; $S_{mix,\eta}$ 为第 i 分层沥青混合料的粘滞劲度; h_i 为第 i 分层厚度。

该模型存在如下缺陷:(1)该模型无法说明使用改性沥青对减少新建路面车辙的效果;(2)无法解释轴载不同、构型不同而接触压力相同情况下,路面产生的车辙不同的现象;(3)此式仅对弹性响应精确,将劲度参数作为弹性参数,未考虑混合料的粘性和塑性响应;(4)动态影响修正因子的引入使预测永久

变形增大30%~100%。

2.2.2 粘弹性方法

美国联邦公路局和麻省理工学院提出的路面结构设计粘弹性系统VESYS^[7]中,建立了以粘弹性理论为基础的车辙预估模型。在该模型中认为路面材料的永久变形是应力、加载时间、温度、含水量的函数。假定:(1)在荷载反复作用次数 m 与 $m+1$ 之间,路面材料的粘弹性变形有足够的恢复时间;(2)每次荷载作用下各层的弯沉不变。在此基础上通过试验确定如下关系:

$$\begin{cases} R(N) = W \cdot f(N) \\ R = \sum_{i=1}^n R(N) \\ f(N) = u \cdot (N)^{-a} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R(N)$ 为第 N 次荷载作用下的永久变形; W 为一次荷载作用下路面的弯沉; u 、 a 为面层材料的车辙特征系数,通过重复荷载试验测得; R 为车辙总量。

该方法的优点是考虑了行车荷载作用下沥青混凝土路面的时间硬化现象,可以反映沥青混凝土的侧向流动变形。但是非线性的粘弹性模型比较复杂,限制了其应用,在以后的研究中研究人员对此车辙预估方法进行了大量的对比试验,结果证明其预测值偏小,因为该模型中没有沥青混合料的压密变形。

2.2.3 粘弹塑性方法

1994年Sousa^[8]等人建立了一个非线性的粘弹塑性模型。该模型的粘弹性元件由8个Maxwell并联而成,模型的粘弹性元件代表了荷载速率和温度依赖的粘结料;模型的弹塑性元件代表沥青混合料中的骨料。采用了Von Mises塑性力学模型及其相关的流动规则,以及线性的各向同性和运动硬化定律,通过一系列的实验,最后得到车辙深度和最大永久剪应变之间的关系为:

$$D_R = k \gamma_{\max} \quad (5)$$

式中: D_R 为车辙深度; γ_{\max} 为最大永久剪应变; k 为系数。

这个模型的优点是:(1)可以预估剪应力;(2)预估的残余变形是合理的;(3)考虑了材料的非线性,提高了预测的能力。它的缺点是:(1)广义的Maxwell粘弹性模型不能很好地描述沥青混凝土材料,因为在周期荷载的作用下,卸载后大多数应变回复,因此其预估结果与现场或者实验数据不相符合;(2)塑性元件需要改进。

2.3 经验法

经验法是从试验路或者室内试验测定数据,采用统计方法建立沥青混凝土层永久变形与沥青材料参数、荷载作用次数的经验关系。

2002年,Archilla基于美国各州公路工作者协会(AASHTO)路面实验数据,提出了下面的统计车辙预估模型^[9]:

$$DR_{it} = \delta_i + a_i (1 - e^{-b_i N_{it}}) \quad (6)$$

式中: DR_{it} 为在时间 t 时,断面 i 的车辙深度; δ_i 为路面断面 i 竣工时源于下卧层的车辙深度,为一与全部初始车辙深度相关的非观察值; a_i 、 b_i 为路面特性函数; N_{it} 为在时间 t 时,路面断面 i 累积荷载重复作用次数。

由于经验法建立的经验模型没有考虑路面结构的整体效应,模型中结构很少,甚至没有考虑到沥青材料的力学参数,不能对混合料的力学性能有较深入地概括,且预估车辙的公式外延性差,适用面窄,所以经验法只能用于非常具体的环境,应用局限性较大,难以推广,用于评价沥青混凝土路面的永久变形受到了一定的限制。

2.4 力学—经验法

力学—经验法采用弹性层状体系理论或粘弹性层状体系理论计算路面的应力、应变,并结合室内外实验,统计得出沥青混凝土路面的车辙同材料特性、路面结构及荷载作用次数之间的经验关系式。

2000年Monismith^[10]提出了一种层应变的替换方法用来描述沥青混凝土路面的车辙行为,在这种方法中把路面模拟成多层弹性体系,沥青混凝土模量由恒定的重复荷载简单剪切实验得到。假设车辙由剪应变控制,并假设在轮迹边缘下50 mm深度处的永久(非弹性)剪应变的累积计算公式为:

$$\lambda^i = a \exp(b\tau) \gamma N^c \quad (7)$$

式中: λ^i 为在50 mm深度处的永久(非弹性)剪应变; τ 为在同样深度处剪应力; γ 为弹性剪应变; N 为荷载重复次数; a 、 b 、 c 为回归常数。

非弹性剪切变形的累积以1 h作为基础计算,对非弹性的剪切变形相应车辙深度的计算公式为:

$$D_R = K \gamma_j^i \quad (8)$$

式中: γ_j^i 为在第 j 小时的非弹性剪切应变; K 为常数。

这种方法的优点是考虑了轮胎边缘下的剪切变形;缺点是其为基于非线性的弹性理论,且无标准。

2004年美国各州公路工作者协会(AASHTO)

提出了如下的车辙预估模型^[11]:

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.15552} k \beta_{r1} N^{0.39937} \beta_{r2} T^{1.734} \beta_{r3} \quad (9)$$

式中: $\beta_{r1}, \beta_{r2}, \beta_{r3}$ 为车辙预估模型的修正系数; k 为沥青混凝土层厚度和计算点深度的函数, $k = (C_1 + C_2 \times \text{depth}) \times 0.328196^{\text{depth}}$, C_1, C_2 为系数, depth 为计算层的深度。

计算车辙时首先计算出对应层位的塑性变形:

$$\Delta R_{di} = \epsilon_{pi} \cdot \Delta h_i$$

进而统计出车辙深度为:

$$R_d = \sum_{i=1}^n \Delta R_{di} \quad (10)$$

该模型也存在一些缺陷:(1)该模型在计算回弹变形时只考虑了各结构层在轮载作用下处于弹性状态的应力,实际上各结构层的应力状态对塑性变形的影响很大;(2)只考虑轮载的影响而没有考虑间歇时间和行车速度(作用时间)的影响;(3)修正因子 k 考虑了围压和深度的影响,但为纯粹的经验关系式,并没有充分理论基础;(4)样本数量少,精确性有待进一步提高。

2004 年 Fwa^[12] 等人基于沥青混凝土的剪切流动变形原理,采用 $C-\phi$ 模型进行沥青混凝土路面的车辙预估,模型如下:

$$R = C \sum_{i=1}^n [(N_i)^a \cdot (L_i)^b \cdot (T_i)^c \cdot (t_i)^d] \quad (11)$$

式中: R 为车辙深度; C 为轮迹分布影响系数; L_i 为实际受力与路面能承受的最大抗力的比值; T_i 为路面温度; t_i 为轮载作用时间; N_i 为轮载作用次数。

该模型基于沥青混凝土路面车辙的发生机理,综合考虑了影响车辙的各种因素,是力学—经验法的典型代表。但是该预估中 L_i 的意义并不明确(剪应力或拉应力),且模型的建立仅限于室内试验,还需要现场数据的进一步修正。

2.5 有限元法

车辙是由于铺筑材料的非线性特性而发生,例如沥青混合料的粘弹性和粘塑性、骨料和土的塑性,所以,车辙是路面结构塑性应变的结果。有限元法能很好地模拟具有非线性特性的路面车辙。目前,很多研究者采用了商用的有限元程序包来建立车辙的预估模型,例如美国普渡大学的 Huang, H. M 等人采用蠕变模型进行车辙的有限元分析。有限元程序包包括 ABAQUS 和 ANSYS 等。因计算机计算容量和

计算时间都在大大提高,使用这种方法比较经济,且使用有限元法可模拟整个车辙区域,是一种较为合理的预估方法;但是计算参数的确定是限制该方法的一个瓶颈。

3 国内车辙预估方法

我国对车辙预估模型的研究开展得相对较晚,自 20 世纪 80 年代中期开始,同济大学、东南大学、长安大学陆续开始了研究,目前也取得了一些成果。代表性的预估方法有同济大学徐世法^[13]采用线粘弹性层状体系理论结合沥青混合料粘弹特性建立的预估模型,属理论法。同济大学许志鸿、林绣贤^[14]结合“七五”国家重点攻关项目“半刚性基层沥青混凝土路面研究”,采用基本符合高温时沥青混合料特性的粘弹性体系理论,描述材料变形随温度、加载时间而变化的特性,建立了力学计算的车辙预估模型。东南大学李一鸣^[15]结合“七五”国家重点攻关项目“单家寺稠油沥青混合料抗车辙能力及变形规律”,根据理论分析和室内轮辙试验建立的指数型车辙预估模型,属力学—经验法。长安大学张登良^[16]采用弹性层状体系理论结合沥青材料的流变模型建立的预估模型,属理论法。

3.1 “四单元五参数”模型

1988 年徐世法等人在分析沥青混凝土路面永久变形时,根据粘弹性层状体系理论计算路面内的应力、应变,沥青混凝土参数采用“四单元五参数”模型进行确定,最后提出如下的车辙预估方法:

$$RD = \sum_{i=1}^n (W_{t1,i} - W_{t2,i}) \quad (12)$$

式中: RD 为车辙深度; $W_{t1,i}$ 为第 i 级荷载加载时的总变形; $W_{t2,i}$ 为第 i 级荷载卸载后的回弹变形。

但是,“四单元五参数”模型虽然能近似地表示沥青混合料的粘弹特性,但是元件越多,设计时所需要的参数就越多,而材料参数的确定却是一件相当复杂的工作,就工程应用而言,得到准确的参数实现起来比较困难,并且室内试验得到的参数与道路结构中的受力状态还有很大不同。

3.2 解析法模型

1990 年许志鸿等人提出了一种基于粘弹性层状体系理论的车辙理论计算方法。该方法把路基路面看成粘弹性层状体系时,通过 Laplace 变换,将变换式中的弹性常数代之以粘弹性算子,荷载也用相应的 Laplace 变换式代替,之后再进行 Laplace 反演

求得其位移和应力的解。具体如下:沥青混凝土路面的车辙实质上是汽车荷载在路面上反复加载、卸载所造成的塑性变形累积的结果,即加载时的总变形减去卸载时的回弹变形反复累积的产物;对于卸载时的变形可用Laplace变换的初值定理来解决,而长期荷载下的变形,可根据Laplace变换的终值定理来确定。

最终车辙为:

$$R_L = W(\infty) - W(0) \quad (13)$$

式中: $W(0)$ 为卸载时的回弹变形; $W(\infty)$ 为加载时的总变形; R_L 为车辙。

该方法采用弹性层状体系的基本理论,通过代入粘弹性算子,求得路面在加载和卸载状态的位移差,即为车辙。该方法存在以下缺陷:(1)与实际道路的受力模式相距甚远;(2)车辙主要来自于侧向流动变形,而不是垂直变形;(3)未能反映两侧的隆起;(4)动态修正因子和劲度模量的确定带有很大的经验性。

3.3 东南模型

李一鸣(1992年)认为沥青混合料在高温下由于车轮反复碾压,沥青混凝土层将产生横向剪切流动,这种流动已不再是经典粘弹性理论中的微观层次上的流动,而是混合料结构不断调整在细观层次上的流动。材料本身的应力变形力学特性是产生这种细观流动的内在因素,具有一定横向分布的车轮反复碾压则是产生细观流动的外界条件。基于此建立了如下的预估公式:

$$\Delta H = \frac{5.924 N^{0.222} K^{0.592} \sigma^{(0.0282-1.520N^{-1})}}{DS^{0.464}} \quad (14)$$

式中: K 为流动动力参数, $K = (1/(2\pi R)) \times \int (\tau_i/\sigma_m) ds = \int_0^H (\tau_i/\sigma_m) dz$, τ_i 为沥青混合料剪应力强度, σ_m 为沥青混合料平均法向应力; N 为轴载作用次数; DS 为沥青混合料车辙试验动稳定度; σ 为行车横向分布标准差。

该模型的优点是考虑了车辙的横向流动变形,更接近实际。但是忽略了对车辙产生重要影响的温度,而且动稳定度与车辙并无必然关系,动稳定度相同,抗车辙能力却可能相差很大;且 K 积分的确定比较困难。

3.4 西公模型

1995年张登良等人采用弹性层状体系理论和流变学模型,考虑路面结构为多层轮载动态效应和

侧向隆起,得到如下高等级沥青混凝土路面车辙预估模型:

$$RD = \left[\sum_{i=1}^n C_{di} \left(\frac{E_i}{S_{mix,p}} \times \delta_i \right) \right] (1 + K_L) \quad (15)$$

式中: RD 为车辙深度; E_i 为第 i 亚层沥青混合料的弹性模量; $S_{mix,p}$ 为第 i 亚层沥青混合料的粘性劲度模量; K_L 为侧向隆起系数, $K_L = 0.5$; C_{di} 为第 i 层沥青混合料的动态修正系数; n 为沥青混凝土层的亚层总数; δ_i 为第 i 层沥青混合料上层面与下层面的垂直变形之差。

该模型与Shell的模型类似,也采用弹性层状体系理论进行路面内的应力计算,采用蠕变试验确定沥青材料的劲度模量;虽然考虑了动载和材料的侧向隆起流动,但是均具有很大的经验性,因此其可靠性并不高;并且在实践中确定材料的参数也比较困难。

4 小结

(1)从以上各种方法来看,理论分析法相对较为完善,借助有限元工具,精度相对提高,是目前常用的车辙预估方法。任何一种由理论法得到的车辙预估模型,都是建立在一定假设基础上的,在这些模型中与材料相关的物理参数还必须由某些特定的试验来确定,因此,这些模型仍然可以认为是建立在某种特定的试验基础上,而这些模型的可靠性则完全取决于所做的假设以及试验模型与实际路面结构工作状态的接近程度。

使用线性或者非线性的弹性理论建立模型比较简易,但由于弹性理论不能很好地反映较高温度下沥青材料的实际粘弹特性而使得模型具有很大的局限性;粘弹性方法在理论上更接近沥青材料的实际粘弹特性,然而由于材料的粘弹行为无论在数学上还是在当前常用的材料测试方法上均难以准确把握,所以目前粘弹性的预估方法精度还有待于进一步提高。

(2)经验法所得公式针对性比较强,可靠度比较高。但该法有很大的局限性,只适用于对与所研究道路(或试验条件)一致的环境条件进行车辙预估,一旦路面环境发生改变,结果的可靠性则比较差,难以推广。

(3)力学—经验法采用弹性或者粘弹性层状体系理论求解路面的应力、应变,再结合沥青材料试验,统计得出沥青混凝土层的永久变形同路表形变、材料性质参数和荷载作用次数之间的经验关系,综

合了理论法和经验法的优点,在考虑因素全面的前提下可以得出合适的车辙预估模型,是车辙预估研究的发展方向。

参考文献:

- [1] 中国公路学会调研组. 高速公路沥青路面早期破坏的现状 & 对策[J]. 中国公路, 2003, (专刊).
- [2] <http://www.asphalt.org/GRAPHICS/ISAPreporter26.pdf> [EB/OL].
- [3] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- [4] Eisenmann. Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavement — experiments and theoretical investigations [A]. Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements [C]. Michigan Ann Arbor, 1987.
- [5] 彭妙娟, 许志鸿. 沥青路面车辙预估方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(11).
- [6] Valkering C P, Stapel F D R, Lijzenga J. The SHELL Pavement Design Method on a Personal Computer [C]. Proceedings of 7th International Conference on Asphalt Pavement, Nottingham: ISAP, 1992.
- [7] Kenis W J. Predictive design procedures, VESYS users manual[R]. 1977.
- [8] Sousa J B, et al. Permanent pavement deformation response of asphalt aggregate mixes[R]. Washington D C: SHRP, National Research Council, 1994.
- [9] Archilla A R, Medanat S. Development of asphalt pavement rutting mold from experimental data[A]. 79th Annual TBR Meeting [C]. Washington D C: National Research Council, 2000.
- [10] Monismith C L, Deacon J A, Harvey J T. Westrack: Performance models for permanent deformation and fatigue[R]. Berkeley: Pavement Research Center, University of California, 2000.
- [11] AASHTO. AASHTO 2002 Guide for Design of Pavement Structures[S].
- [12] T F Fwa, S A Tan, L Y Zhu. Rutting Prediction of Asphalt Pavement Layer Using C — ϕ Model[J]. Journal of Transportation Engineering[©]ASCE, 2004, 130(5).
- [13] 徐世法, 朱照宏. 按粘弹性理论预估沥青路面车辙[J]. 同济大学学报, 1990, 18(3).
- [14] 许志鸿, 等. 沥青路面车辙的理论计算[J]. 中国公路学报, 1992, 3(3).
- [15] 俞建荣, 李一鸣. 轮辙试验的车辙预估模型探讨[J]. 中国公路学报, 1992, 5(3).
- [16] 张登良, 李俊. 高等级沥青路面车辙研究[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1).

A Summary of Rutting Prediction Method on High Grade Asphalt Concrete Pavements

SU Kai, SUN Li-jun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Rutting is a common damage in asphalt concrete pavement, which may severely depress the pavement performance and induce other damages, such as crack. The history of rutting prediction is reviewed. Furthermore, some representative rutting prediction models are studied and its merits and demerits analyzed. Then the development of models is also pointed out. The aim is to provide some reference to the future rutting research and highway design, which could enhance the economic benefit and the social benefit of high grade highway in China.

Key words: asphalt concrete pavement; rutting; prediction model; summary