

The Research to Mechanical Model of Rutting Deformation

Yinghui LIANG

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400000, China

Abstract: In high grade pavement structure, Permanent deformation of rutting is one of the main destruction. In this paper, the mechanical analysis of high grade road surface is carried out by means of the viscoelastic model. The conclusion is drawn by the comparison of the Maxwell、Kelvin、Van Der Poo and Burgers viscoelastic mechanics model. It is necessary to considering material nonlinear elastic, viscoelastic and plastic and other basic characteristics, the eventual establishment of reasonable permanent deformation tests of mechanical model and permanent deformation analysis method in the analysis of permanent deformation of asphalt pavement.

Keywords: Rut; Permanent deformation; Viscoelasticity; Mechanical model

沥青路面车辙变形力学模型研究

梁迎辉

重庆交通大学 土木工程学院, 重庆, 中国, 400000

摘要: 在高等级路面结构破坏中, 车辙的永久变形是主要的破坏之一。本文借助粘弹性模型对高等级路面进行力学分析。通过比较 Maxwell、Kelvin、Van Der Pool 和 Burgers 粘弹性力学模型, 得出结论: 在分析沥青路面的永久变形时, 需要充分考虑材料非线性弹性、粘弹性、塑性等基本特性, 最终建立合理的永久变形试验的力学模型和永久变形分析方法。

关键词: 车辙; 永久变形; 粘弹性; 力学模型

1 引言

高等级公路中, 沥青路面作为一种无缝隙的连续式路面, 具有路面平整度较高、耐磨性较好、抗滑性能好、行车噪音低、行车无扬尘、后期养护方便以及易于回收利用等优点^[1], 因此沥青路面在世界各国公路建设中得到了广泛的应用。

在我国, 很多高等级公路都是采用的半刚性基层, 而通过大量实例, 车辙主要是由于永久性的变形形成的。鉴于沥青混合料的高温稳定性及其固有的粘弹塑性, 其力学分析可以借助粘弹性理论以及粘弹性模型。

2 关于车辙变形的研究

2.1 关于车辙变形的研究及发展

1962 年, 路面车辙问题开始引起科研机构得广泛关注, 这种关注出现在美国 AASHTO 试验路研究期间。1972 年 Hofstra 通过相关研究得出剪切应力是

产生路面车辙的主要原因, 所以, 为了有效减少车辙的出现可以使用较高强度的路面材料^[2], 从此之后沥青路面的永久变形方向研究成为研究者的关注焦点。

据美国、日本等发达国家的调查数据显示, 路面损坏所造成的车辙比例正在增加。美国曾在 20 世纪 70 年代发起覆盖美国全境的路面破损调查, 结果表明, 车辙造成的路面损坏占有很大比例^[3]。90 年代, 对日本公司沥青路面的运营及维护进行了系统的调查和研究, 表面车辙是日本公路沥青路面破坏的主要形式。

2.2 关于车辙永久变形的力学机理分析

沥青面层的永久变形是研究的重点。沥青混合料是一种由沥青水泥和骨料本身的松散矿物颗粒组成的混合材料体系。当外部荷载作用时, 微结构应力克服了沥青膜粘性力之间的部分弱粘结, 并使之相互作用。由于荷载不断重复作用, 迫使这种相互错动在更深更宽范围内不断重复产生, 并逐步累积形成宏观永久变形^[4]。这种多方向运动的颗粒, 导致沥青面层

的混合物向轮胎的两侧流动,从而产生推移,拥包以及永久变形。

研究表明,当建立永久变形的预估模型时,应同时考虑两个因素:混合料的压密以及塑性流动。压密就是使材料颗粒间的排列更紧密;塑性流动的产生是由于材料的迁移。如果荷载超过材料的抗剪强度或足够的蠕变,永久变形将发生。AASHO 试验路的开挖和壳牌公司环道试验表明:沥青路面初期永久变形的主要原因是行车碾压,路面层体积的减小,几乎等于相邻区域的体积增大,此时,路面的压实已完成。永久变形进一步加深,它主要产生于沥青层的流动变形。

纵观沥青混合料永久变形的形成过程,大致可分为以下三个阶段^[5]:

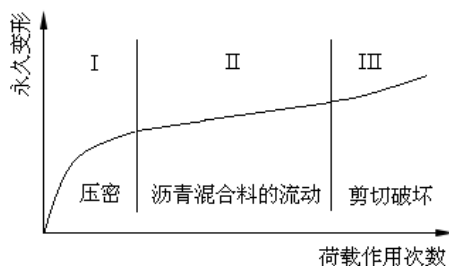


图 1. 沥青混合料永久变形的发展过程

(1) 开始阶段的压密过程,由于沥青混合料存在空隙,特别是在施工不足的情况下,车轮荷载再次碾压沥青路面,沥青面层的厚度减小,在车轮荷载集中的地方形成永久变形。这样的道路,沥青层是只有在车辆的重复滚动,孔隙率减小,最终残余孔隙率的沥青层趋于稳定。在公路施工过程中,通过严格压实规范,来控制压实过程中产生的永久变形。

(2) 沥青混合料的流动,沥青混合料发生剪切变形主要是由于在高温状态下其为半固体,具有流动性,

因此在车辆荷载的作用下,会发生剪切变形,当车辆荷载的剪应力达到沥青混合料所承受的阈值时,就会发生永久变形。

(3) 矿质骨料的重排和矿质骨架的破坏,在高温下是半固态的沥青混合料,在荷载作用下最先流动。此时,荷载主承体为混合料中粗集料和细集料两者组成的骨架。

可以看出,永久变形的初始原因是压密和高温下的流动,从而导致了骨架的不稳定性。高温,重载,慢速以及运输等因素,以及混合料级配的变异性、孔

隙率高、部分路段的油量控制不好等内因,这些都会引起车辙和路面永久变形。

3 国内外车辙变形力学模型的研究与发展

路面永久变形计算和预测取决于准确的模型参数,为了得到准确反映沥青混合料的永久变形模型的特征参数,符合实际应力状态和道路试验的环境是必须的。

目前,沥青混合料永久变形试验的评价方法可以分为三类^[6]:经验性的试验方法、性能相关的试验方法以及基于力学原理的试验方法。而基于力学原理的试验方法主要有单轴蠕变试验、弯曲蠕变试验和三轴蠕变试验等。在这类试验中,试件的应力和应变是均匀的或是线性分布的,因此可以通过测量变形的力学参数,得到路面的车辙预测和建立永久变形模型^[7]。

3.1 国外车辙变形力学模型的研究及发展

在 1962 年壳牌石油公司第一次提出考虑永久变形的路面设计方法^[8]。1972 年, Barksdale 和 Romain 提出层应变法 (Layer strain methodology)^[9]。第五届国际沥青混凝土路面设计会议之后,对面层沥青混合料的研究成了沥青路面永久变形的主要问题。美国建立了粘弹塑性模型计算沥青混凝土永久变形。本对澳大利亚几百公里的公路进行了测量,并对道路形状数据进行了统计分析。魏斯曼号采用小变形模型来预测道路表面的行为,该模型包括温度和负载率。能够成功预测大多数路面的永久变形行为,但并不精确。陈将 SHRP 用于评估抗永久变形的标准与实际路面作比较,得到的与实际情况有差距,认为损失能可作为沥青路面的抗永久变形评价。

3.2 国内车辙变形力学模型的研究及发展

在我国,对沥青路面永久变形的研究起步较晚,研究的目标主要集中于永久变形的预测模型方面。自 20 世纪 80 年代中期,东南大学、长安大学、同济大学等,已经进行了研究,并取得了不少成果。具有代表性的预测方法是徐世法,赵朱虹基于沥青混合料“四单元、五参数”流变模型,该模型以粘弹性多层弹性层状体系建立沥青路面力学分析及车辙预估模型开发的蠕变试验,提出了控制沥青路面永久变形的有效途径和控制指标。李一鸣,俞建荣基于七五国家重点项目“单家寺稠油和沥青混合料车辙变形规律”,根据理论分析和室内车辙试验建立了指数型车辙预估

模型。王后裕等通过分析固结效应和荷载永久变形的流变特性，提出了流变模型。周晓青从能量角度出发，分析了沥青混合料的永久变形机理，建立了沥青路面在重载作用下的车辙预估模型。张丽娟，张晓宁将一维沥青混合料的 Burgers 模型推广到三维模型，简化计算了沥青路面隆起与下凹的永久变形。

4 荷载作用下的沥青混合料力学模型的分析

沥青混合料属于粘弹性材料，主要有四种变形：粘性变形、弹性变形、粘弹性变形及粘塑性变形，其之间的关系式为：

$$e = e_e + e_v + e_{ve} + e_{vp}$$

式中， e —沥青混合料的总应变；

e_e —瞬时弹性应变；

e_v —粘性应变；

e_{ve} —粘弹性应变；

e_{vp} —粘塑性应变。

其中 e_e 在卸载后会立即恢复， e_{ve} 随着时间逐渐的恢复，而 e_v 及 e_{vp} 则不能恢复。可知沥青混合料在荷载作用下的永久变形是由粘性、残余粘弹性及粘塑性变形决定的^[10,11]。

在根据流变学的相关理论，则沥青混合料可采用力学的模型（即本构关系）来表述。其中力学的模型主要是通过元件不同的串联、并联的方式组合而成的，元件包括：弹性元件及粘性元件。为了建立沥青混合材料的流变模型，需要遵循以下两个要求^[12]：

(1) 模型能够反映出材料的力学特性；(2) 该模型要尽可能简单直观，有利于工程的应用。现工程实际应用的模型有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、Burgers 模型等，其性能分析如下图所示^[13,14]。

模型的建立要确保能够较好的反映出材料的瞬时弹性、粘弹性及粘性流动变形的行为，故通常采用 Burgers 模型来描述，其本构方程式：

$$e(t) = \frac{s_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{h_1}}\right) + \frac{s_0}{h} t + \frac{s_0}{E}$$

式中， s_0 —施加荷载；

t —加载时间；

E_1 、 E —弹性模量；

h 、 h_1 —粘性系数。

4.1 Maxwell 粘弹性模型及其性能分析



图 2. Maxwell 粘弹性模型

(1) 蠕变方程

$$\text{施加恒载 } s_0: e(t) = \frac{s_0}{h_3} t + \frac{s_0}{E}$$

$$\text{在 } t = t_0 \text{ 时刻卸载: } e(t) = \frac{s_0}{h_3} t_0$$

(2) 变形曲线

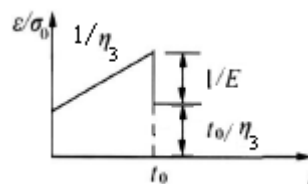


图 3. Maxwell 粘弹性模型变形曲线

(3) 变形性能分析

仅能反映弹性变形及粘性流动，无法反映粘弹性变形。

4.2 Kelvin 粘弹性模型及其性能分析

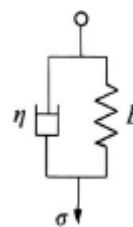


图 4. Kelvin 粘弹性模型

(1) 蠕变方程

$$\text{施加恒载 } s_0: e(t) = \frac{s_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{h_1}}\right) + \frac{s_0}{E}$$

$$\text{在 } t = t_0 \text{ 时刻卸载: } e(t) = \frac{s_0}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t_0}{h_1}}\right) e^{-\frac{E_1 (t-t_0)}{h_1}}$$

(2) 变形曲线

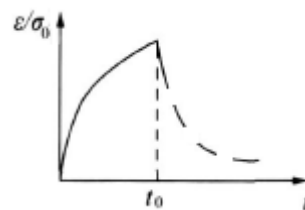


图 5. Kelvin 粘弹性模型变形曲线

(3) 变形性能分析

不能反映出瞬时弹性及永久变形。

4.3 Van Der Pool 粘弹性模型及其性能分析

(1) 蠕变方程:

$$\text{施加恒载 } S_0: e(t) = \frac{S_0}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{h}}) + \frac{S_0}{E}$$

$$\text{在 } t = t_0 \text{ 时刻卸载: } e(t) = \frac{S_0}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t_0}{h}}) e^{-\frac{E_1 (t-t_0)}{h}}$$

(2) 变形曲线

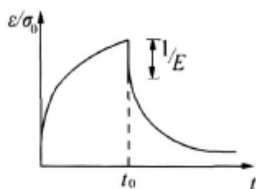


图 6. Van Der Pool 粘弹性模型变形曲线

(3) 变形性能分析

反映出材料的瞬时弹性、粘弹性变形，却反映不出永久变形。

4.4 Burgers 粘弹性模型及其性能分析

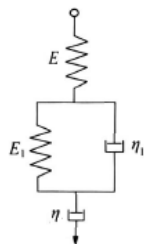


图 7. Burgers 粘弹性模型

(1) 蠕变方程

$$\text{施加恒载 } S_0: e(t) = \frac{S_0}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{h}}) + \frac{S_0}{h} t + \frac{S_0}{E}$$

在 $t = t_0$ 时刻卸载:

$$e(t) = \frac{S_0}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t_0}{h}}) e^{-\frac{E_1 (t-t_0)}{h}} + \frac{S_0}{h} t_0$$

(2) 变形曲线

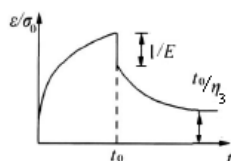


图 8. Burgers 粘弹性模型变形曲线

(3) 变形性能分析

反映出材料的瞬时弹性、粘性流动和粘弹性，但其中粘性流动变形为无穷大，不合理。

5 结束语

查阅相关文献可知剪切变形是导致沥青混合料永久变形的的主要因素，因此，对于试验方法方面，该方法能直接测量沥青混合料的永久变形是最重要的。圆柱形试样的三轴重复加载试验，在加载方式上是压缩的，实际上它的破坏方式是剪切的，所以它通常被称为三轴剪切试验^[15]。三轴重复加载试验可以模拟沥青路面的三维应力状态。试验结果表明，三轴试验更符合沥青混合料的实际应力状态，但同时，试验设备比较复杂，试验设备有较高的要求，且造价比较大。

由于沥青和沥青混合料具有粘度和塑性等特性，以及对应力、温度和时间依赖性。因此其材料本构关系是非线性的、复杂的。重复荷载作用下，沥青混合料的永久变形是由残余粘弹性变形、塑性变形等组成。对于沥青路面永久变形的分析，应充分考虑材料非线性弹性、粘弹性、塑性等基本特性，建立合理的永久变形试验的力学模型和永久变形分析方法。

References (参考文献)

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 133-135.
- [2] 黄菲. 沥青路面永久变形数值模拟及车辙预估[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [3] 苏凯, 孙立军. 高等级公路沥青路面车辙预估方法研究综述[J]. 公路: 2006, 07: 18-24.
- [4] 杨捷. 沥青车辙与拥包形成机理的粘弹性分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [5] 黄晓明, 吴少鹏, 赵永利. 沥青与沥青混合料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
- [6] 闫其来. 沥青混合料抗车辙性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2005: 113-114.
- [7] 黄晓明, 张裕卿. 沥青混合料高温性能试验方法[J]. 公路交通科技: 2008, 05: 1-7.
- [8] 徐建红, 蒋龙德, 邵德良. 高速公路沥青路面车辙现象初探[J]. 浙江交通科技, 2006, 03: 37-41.
- [9] 沈金安. 沥青与沥青混合料的路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 88-91.
- [10] 黄卫东, 吕伟民. 沥青及沥青混合料流变性质与动稳定度的关系[J]. 同济大学学报, 2000, 28(4): 501-504.
- [11] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 43-47.
- [12] 杨捷. 沥青车辙与拥包形成机理的粘弹性分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [13] 彭妙娟, 许志鸿. 沥青路面永久变形的形成及其控制[J]. 华东公路: 2004, 05: 03-05.
- [14] 崔云财. 改善沥青混合料高温稳定性的措施[J]. 黑龙江交通科技, 2009, 04: 76-76.