

文章编号: 1002-0268 (2004) 05-0012-03

沥青路面车辙预测的粘弹性分析方法

封基良¹, 许爱华², 席晓波³

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2 武汉绕城公路指挥部, 湖北 武汉 430415;

3 武汉市市政工程设计研究院, 湖北 武汉 430015)

摘要: 作为沥青路面的主要损坏形式, 车辙会造成大量的经济损失, 影响到路面行车的安全性、舒适性, 而且还会引起路面其它形式损坏的产生和加剧。本文应用粘弹性理论, 建立沥青混合料有限元模型, 并利用大型商业化有限元软件 ABAQUS 分析路面车辙, 经验证, 此方法是一种合理预测沥青路面车辙的有效方法。

关键词: 粘弹性; 有限元; 车辙

中图分类号: U416 217

文献标识码: A

Visco-elastic Method for Prediction of Asphalt Pavement Rutting

FENG Ji-liang¹, XU Ai-huan², XI Xiao-bo³

(1. School of Transportation, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096 China;

2 Wuhan Bypass Road Construction Command Office, Hubei Wuhan 430415 China;

3 Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute, Hubei Wuhan 430015 China)

Abstract: Rut, a major failure of asphalt pavement, may cost very much to repair with negative impact on safety and comfort. It also induces and accelerates other distress of pavement. Visco-elastic theory has been applied to establish an asphalt mixture finite element model in this article, then ABAQUS, a commercial finite element software, was selected to analyze pavement rut.

Key words: Rut; Visco-elastic; Finite element

车辙是重复行车荷载作用下路面不可恢复应变的累积变形及行车荷载作用下的压密变形。车辙变形随着交通运输的快速发展, 车辆交通的渠化及轴载的增加而增大, 是沥青路面最普遍的一种损坏形式。车辙的形成不仅会导致路面积水, 厚度减薄, 直接影响行车的舒适性和安全性, 还会引起路面其它破坏形式的产生和加剧。是沥青路面设计者、材料工程师、施工承包方及各级公路管理部门关心的主要路面损坏形式。当路表车辙变形量超过 6mm 会产生水飘现象, 严重影响行车安全, 需进行及时修复。据统计, 美国热拌沥青混合料每年花费 150 亿美元, 若每个州路面的寿命能提高 1%, 每年可节省 200 万美元。在我国每年用于沥青路面养护的费用也十分可观, 提高路面的使用寿命也能节省大量的资金。足尺车辙试验是目前评价路面车辙特性的一种有效方法, 但试验费用较

高, 耗时较长, 且不能很好地对路面的车辙进行预测、分析。

沥青混合料作为一种复合材料, 是典型的弹、粘、塑性综合体, 在低温小变形范围内接近线弹性体, 在高温大变形活动范围内表现为粘塑性体, 而在通常温度的过渡范围内则为一般粘弹性体。在行车荷载作用下, 沥青混合料的特性十分复杂, 实际工作范围内主要表现为非弹性体, 变形在卸载后具有不可恢复性。然而可近似地将沥青混合料的力学特性分别进行考虑。赛得斯 (Sides et al)^[1] 建议了一个复杂的、分别评价弹性、塑性、粘、弹性和粘、塑性应变的沥青混合料模型, 这样分类, 对应用有限元法 (FEM) 建立车辙预测模型具有重要的意义。

有许多文献介绍了应用有限法分析结构的非线性、时间依赖性。材料对时间的依赖性可使用荷载步

加以解决, 在很小的时间间隔内, 假定应力恒定, 能够评价和修正小间隔时间末的应变, 通过一步一步的计算, 最终得到整个时间的应变。本文应用波兹纳 (P. Perzyna) 粘弹性流动准则建立了沥青路面车辙分析的三维有限元分析模型, 并分析了路面的车辙。

1 沥青混合料有限元分析模型

许多研究者的研究表明了沥青混合料的非线性特性^[2,3], 在行车荷载作用下具有粘、弹、塑性特征, 一个荷载周期典型的应力、应变时间关系如图 1 所示, 总应变可分解成弹性和粘性、塑性 3 部分, 即

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^v + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为总应变率; $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 为弹性应变率; $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ 为粘性应变率; $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变率。

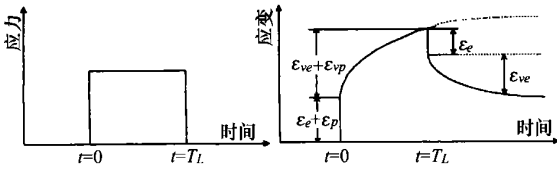


图 1 蠕变恢复试验典型的应力、应变时间关系

由于荷载大小不确定, 难以量化荷载达到设计值阶段的应力应变关系, 通常将粘性应变与塑性应变作为非弹性综合考虑, 即式 (1) 改写成

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (2)$$

式中, $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ 为粘、塑性应变率; 弹性应变率可直接写成

$$\dot{\epsilon}^e = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (3)$$

对于弹粘塑性材料, 按照 Perzyna^[4] 假定, 式 (2) 中的粘塑性应变率与瞬时应变之间有如下关系

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (4)$$

式中, γ 为与荷载作用时间、荷载作用次数有关的材料流变参数, $\langle \Phi(F) \rangle$ 代表当前粘弹性应变率大小的粘性流动函数。

若材料是各向同性的硬化材料, 屈服函数是满足 Mises 屈服条件的势函数, 式 (4) 改为

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (5)$$

式中, $\langle \Phi(F) \rangle = \begin{cases} 0 & F \leq 0 \\ \Phi(F) & F > 0 \end{cases}$

参数 F 代表塑性屈服条件, 可表示成

$$F(\sigma_{ij}, \epsilon_{kl}^p) = \frac{f(\sigma_{ij}, \epsilon_{kl}^p)}{\kappa} - 1 \quad (6)$$

取 F 为

$$F = \frac{\sqrt{J_2}}{\kappa} - 1 \quad (7)$$

$$f(\sigma_{ij}) = \sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (8)$$

式中, J_2 为第二应力偏量不变量, 即

$$J_2 = \frac{1}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (9)$$

经整理得弹、粘塑性本构方程

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{S} + \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}} \quad (10)$$

假定材料服从 Mises 塑性屈服准则, 则 (8) 式为

$$\frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}} = \frac{S_{ij}}{2 \sqrt{J_2}} \quad (11)$$

考虑 (10) 式的非弹性部分, 分别以主应变偏量和主应力偏量分量的形式写出, 则有

$$\dot{\epsilon}_1^{vp} = \frac{\gamma}{2} \langle \Phi(F) \rangle \frac{S_1}{2 \sqrt{J_2}}$$

$$\dot{\epsilon}_2^{vp} = \frac{\gamma}{2} \langle \Phi(F) \rangle \frac{S_2}{2 \sqrt{J_2}}$$

$$\dot{\epsilon}_3^{vp} = \frac{\gamma}{2} \langle \Phi(F) \rangle \frac{S_3}{2 \sqrt{J_2}}$$

将上述各式两边彼此相减平方后再相加, 得

$$(\dot{\epsilon}_1^{vp} - \dot{\epsilon}_2^{vp})^2 + (\dot{\epsilon}_2^{vp} - \dot{\epsilon}_3^{vp})^2 + (\dot{\epsilon}_3^{vp} - \dot{\epsilon}_1^{vp})^2 = \left[\frac{\gamma}{2} \langle \Phi(F) \rangle \right]^2 \left[\frac{(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2}{\sqrt{J_2}} \right]$$

引入粘塑性应变速率张量第二不变量 I_2^{vp} , 且表示为

$$I_2^{vp} = \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (12)$$

经整理, 得总应变率为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{S} + \sqrt{I_2^{vp}} S_{ij} \quad (13)$$

大型商业有限元软件 ABAQUS 将上式简化成^[5]

$$f(\sigma) = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}^p, \bar{\epsilon}^{pl}, \theta, f^\alpha) \quad (14)$$

$$\bar{\sigma} = R \cdot \sigma^0 \quad (15)$$

$$R = 1 + \left(\frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为等效屈服应力; $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变; $\bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变率; θ 为温度; f^α , $\alpha = 1, 2, \dots$ 为预先规定的其他现场变量; σ^0 为静态等效屈服应力; R 为屈强比; D 和 n 为材料参数。

式 (15) 推荐用于高速动态过程, 如移动交通荷载。对低速行车过程, 用 ABAQUS 蠕变模型表征沥青混合料永久变形特性。

$$\dot{\epsilon}^{\sigma} = A \cdot (\bar{\sigma}^{\sigma})^n \cdot t^m \tag{17}$$

式中, $\dot{\epsilon}^{\sigma}$ 为等效蠕变率; $\bar{\sigma}^{\sigma}$ 为等效 Mises 应力; t 为总蠕变时间; A 、 m 和 n 为材料参数。

2 动态交通荷载模型

以行车速度相应的动态移动荷载模型分析路面上成千上万辆车作用下的车辙, 在现有材料模型和计算机技术条件下是不切实际的。近年来, Hua^[9] 对通过车辆数等效时间步来代替的方法作了进一步的发展, 认识到车轮偏移的影响, 采用基于整个偏移范围内统计分布的等效荷载来代替。

如图 2 所示, 车辆偏移的频率类似于正态分布, 基于 Hua 的方法, 单轮通过 A 点的总荷载时间可用下式计算

$$t(x) = \left[F\left(x + \frac{W}{2}\right) - F\left(x - \frac{W}{2}\right) \right] \cdot T$$

式中, x 为距轮载中心偏移的距离; W 为轮胎的宽度; $F(x)$ 正态分布累计平均值; T 为在路面上的整个荷载水平的累计作用时间, 轮载偏移重叠的部分用迭加法处理。

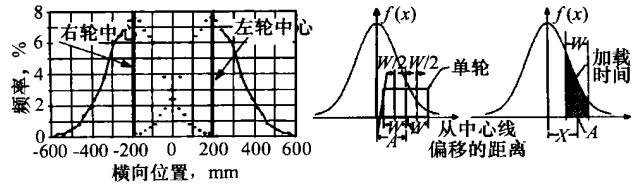


图 2 动态交通荷载模型

3 验证实例及分析

3.1 结构几何尺寸及有限元网格的划分

文献 [7] 以 LOUISIANA 试验路的路面结构为研究对象, 建立如图 3 所示的三维有限元模型。在所建

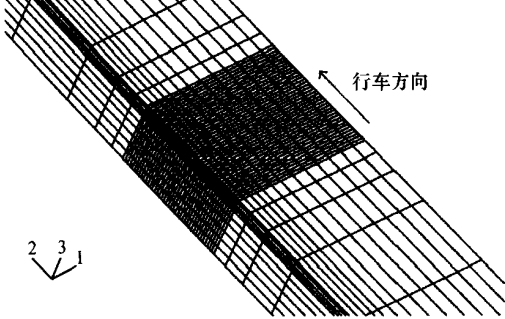


图 3 三维有限元网格示意图

立的模型中, 取长度为 12m, 宽度为 1.2m, 经试算, 有限元网格划分成 6 760 (52×13×10) 个单元。路面结构层从上到下分别为: 89mm 的沥青混凝土上面层、89mm 的废胶粉改性沥青混凝土底面层、216mm 的石灰石碎石基层、254mm 的压实土底基层、路基为盐性粘土层。各层计算参数如表 1 所示, 材料的弹性参数用落锤仪测定, 沥青混凝土的粘、弹、塑性率相关材料参数用不同应变率下的单轴压缩试验测得, 基础的非线性参数用三轴试验测定。

有限元分析材料计算参数					表 1
层位	1	2	3	4	5
材料	沥青混凝土面层	废胶粉改性沥青混凝土	石灰石碎石基层	碾压土底基层	盐性粘土路基
厚度 (mm)	89	89	216	254	
模量 (kPa)	5.4×10 ⁶	5.9×10 ⁶	5.0×10 ⁵	2.5×10 ⁵	1.5×10 ⁵
泊松比	0.35	0.35	0.35	0.3	0.45
蠕变模型	A	1.8×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³		
	m	0.8	0.8		
	n	-0.5	0.8		

3.2 计算结果

采用式 (17) 蠕变模型有限元法计算的车辙结果如图 4 所示。图 5 为车辙计算结果与加速荷载设施 8 个断面测得的在间隔的 2 500 次循环荷载作用下车辙深度的对比, 结果表明, 粘弹性有限元法可得到合理的车辙预测结果。

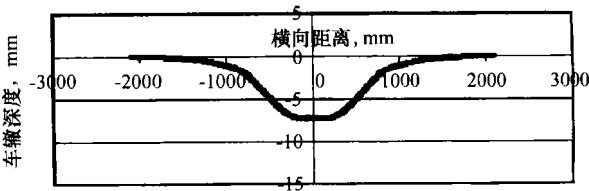


图 4 横向车辙示意图

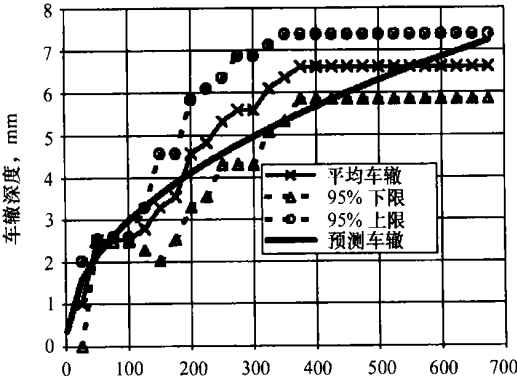


图 5 不同次数循环荷载作用下车辙深度

4 结论

本文应用粘弹性分析方法给出了 (下转第 28 页)

破坏作用。基于这一原理,本文采用冻融循环试验来评价水泥稳定废旧沥青混合料在水和负温共同作用下的耐久性。

4.1 试验方法

试件系与前述试验同批制作,在养生 28d 后开始进行冻融循环试验,采用冻结 12h 和融解 12h 的连续过程,即将达到养生龄期的试件先浸水一天,称重后放入已达 -20℃ 的冷冻箱中冻结 12h,取出后再放入 20℃ 的水浴中溶解 12h,将浸泡过的试件进行称重,再次放入冷冻箱作第二次循环。如此反复共进行 10 次,每次观察试件浸泡融化后的表面破损现象,并记录其质量损失情况,冻融循环全部完成后进行抗压强度试验(25℃)。再生混合料的抗冻能力可以用经过冻融作用后的强度(或质量)下降情况来表征。

4.2 试验结果分析

分析归纳冻融循环抗压强度试验结果(见表 6),可以看出:(1)试件经过冻融反复作用后并没有发生表面崩解现象,其质量损失率均小于 0.2%,甚至可以视为没有损失。(2)试件经过冻融循环后的抗压强度损失率均小于 30%,并且随着水泥剂量的增加,其冻稳性能也逐渐增强。(3)沥青的存在使得再生混合料内部的毛细孔隙减少,甚至有一部分会变成封闭孔隙;经过水泥稳定处治后,随着水化产物的增加,其内部孔隙会进一步减少。以上两个因素就导致此种再生材料具有良好的防水性和抗冻性,适合于作为路面基层材料使用,并且对于寒冷地区的道路建筑而言更具有现实意义。

水泥稳定废旧沥青混合料冻融循环试验结果表 6

水泥剂量 (%)	试件吸水率(%)	质量损失率(%)	冻融后抗压 强度(MPa)	未冻融抗压 强度(MPa)	强度损 失率(%)
4	1.48	0.162	1.08	1.45	25.5
8	0.96	0.067	2.20	2.68	17.9

5 结语

本课题的研究在以下几方面还有待于进一步完善和深入:

- (1)本文仅选择了一种原材料,在后续研究中需要扩大选材范围,全面分析原材料类型对再生混合料路用性能的影响,在此基础上建立原材料评价指标体系。
- (2)本文所总结的再生材料设计参数及其相关规律存在一定的局限性,还需要进行大量试验予以补充。
- (3)关于此种冷再生材料的微观结构和强度形成机理,特别是水泥添加剂与旧沥青结合料之间的作用形式也需要进行研究,提出细致可以接受的理论。

参考文献:

[1] Harold Paul. Evaluation of Recycled Projects for Performance[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1996.

[2] Richard E Y Yeo, Kieran G Sharp. Recycled Crushed Concrete Stabilized with Cementitious Binders[C]. The 3rd International Conference on Road&Airfield Pavement Technology, 1997.

[3] 中华人民共和国交通部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTJ057-94)[S]. 北京:人民交通出版社, 1994.

[4] 李强. 水泥稳定废旧沥青混合料用于路面基层(底基层)的研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2002.

(上接第 14 页)

沥青混凝土的本构分析模型,并介绍了应用大型商业有限元软件 ABAQUS 分析路面结构在行车荷载作用下产生车辙的方法,经与 LOUISIANA 试验路的试验结果比较,证明了此方法能合理地分析和预测路面结构在交通荷载作用下的车辙,是一种预测和评价路面车辙的有效方法;此外,用不同气候条件和轴载条件下的材料参数分别计算对车辙的影响,并采用叠加原理可求得路面结构在预期行车荷载作用下的车辙深度,值得进一步深入研究和推广应用。

参考文献:

[1] Sides A, Uzan J, Perl M. A Comprehensive Viscoelasto-plastic Character-

ization of Sand-asphalt Compressive andTensile Cyclic Loading [J]. Test Evaluat 1985, 13(1): 49— 59.

[2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 人民交通出版社, 2001.

[3] Judycki J. Non-linear Viscoelastic Behavior of Conventional and Modified Asphaltic Concrete Under Creep [J]. Mater and Struct, 1992, 25: 95— 101.

[4] 贾乃文. 粘塑性力学及工程应用[M]. 地震出版社, 2000.

[5] HKS. ABAQUS Theory manual [M]. Hiblit; Karlsson & Sorensen, Inc.

[6] Hua J. Finite Element Modeling and Analysis of Accelerated Pavement Testing Devices and Rutting Phenomenon [D]. Purdue University Ph. - D. Dissertation, 2000.

[7] Huang B, Mohammad L N, Rasoulia M. 3-D Numerical Simulation of Asphalt Pavement at the Louisiana Accelerated Loading Facility (ALF)[J]. Washington; Journal of Transportation Research Record 2001.