

文章编号:1005-0523(2013)05-0047-05

# 水-荷载耦合作用下的沥青路面车辙变形分析

祁文洋<sup>1</sup>, 李 喆<sup>2</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 山东高速路桥养护有限公司, 山东 济南 250000)

**摘要:**为探究水-荷载耦合作用下的沥青路面车辙变形特点。基于Biot理论,运用有限元数值模拟方法,对比分析水-荷载耦合作用与单独荷载作用下的沥青路面车辙变形规律。分析结果表明:水-荷载耦合作用下的沥青路面车辙变形量及变形速率低于单独荷载作用,密闭于沥青路面联通空隙内部的水一定程度上有助于沥青路面的抗变形能力;水-荷载耦合作用与单独荷载作用下沥青路面的车辙变形比与荷载循环作用次数呈对数函数,且随着荷载循环作用次数的增加而降低。

**关键词:**道路工程;沥青路面;水-荷载耦合;有限元;车辙变形

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

车辙变形是高等级沥青路面主要损坏模式之一<sup>[1]</sup>。沥青路面车辙变形的产生不仅影响了行车舒适性,而且在雨天容易导致漂滑,显著降低了行车的安全性<sup>[2]</sup>。研究表明,水存在的情况下,沥青路面会产生泛油、剥落、松散及车辙等早期损坏<sup>[3-4]</sup>。当前对于沥青路面水损坏机理的理论研究主要集中于水-荷载耦合作用下沥青路面内部孔隙水压力计算及孔隙水对沥青路面力学行为影响的分析,并提出孔隙水压力诱发了沥青路面早期功能性损坏并使得沥青路面过早产生结构性损坏<sup>[5-9]</sup>。然而,目前的理论研究主要是基于弹性理论,无法分析沥青路面在高温条件下的非线性变形行为。

本文基于Biot理论,运用有限元数值模拟方法,考虑沥青混合料的粘弹性,对水-荷载耦合作用下的沥青路面车辙变形规律进行分析,以探究水对于沥青路面车辙变形的影响。

## 1 基本理论与方程

将沥青混合料视为理想饱和流固两相多孔介质,并将荷载作用下沥青路面结构视为垂直均布荷载作用下各向同性的层间完全连续接触的层状轴对称体系。以Biot理论来描述水-荷载耦合作用下的沥青路面结构,则轴对称条件下的孔隙流体方程:

$$-\frac{\partial p(r,z,t)}{\partial r} = \frac{\rho_f g}{k} \frac{\partial u_f(r,z,t)}{\partial t} + \rho_f \frac{\partial^2 u(r,z,t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p(r,z,t)}{\partial z} = \frac{\rho_f g}{k} \frac{\partial w_f(r,z,t)}{\partial t} + \rho_f \frac{\partial^2 w(r,z,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中: $p(r,z,t)$ 为孔隙水压力; $u(r,z,t)$ 为固体的径向位移; $u_f(r,z,t)$ 为液体相对于固体的径向位移; $w(r,z,t)$ 为固体的轴向位移; $w_f(r,z,t)$ 为液体相对于固体的轴向位移; $r$ 为孔隙轴向位置; $z$ 为孔隙径向位置; $t$ 为孔隙水压力作用时间; $\rho_f$ 为液体密度; $g$ 为重力加速度; $k$ 为渗透系数。

根据弹性动力学理论,采用有限元法分析路面结构动力响应的控制方程:

收稿日期:2013-07-25

作者简介:祁文洋(1985—),男,博士研究生,研究方向为路面结构设计与道路建筑材料。

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{u}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{u}\} = \mathbf{P}(t) \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{u}$ ,  $\dot{\mathbf{u}}$ ,  $\ddot{\mathbf{u}}$  分别为节点位移、速度、加速度矢量;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\mathbf{P}(t)$  为路面结构动力系统中的车辆荷载矩阵。

沥青路面结构体系为小阻尼结构,通常采用瑞利阻尼假设,把阻尼矩阵表示为质量矩阵和刚度矩阵的线性组合,即

$$\{\mathbf{C}\} = \alpha\{\mathbf{M}\} + \beta\{\mathbf{K}\} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ ,  $\beta$  为与结构固有频率和阻尼比有关的阻尼系数,  $\alpha$ ,  $\beta$  可以由任意 2 个振型的固有频率和相应的阻尼比来确定,即

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\omega_2\xi_1 - \omega_1\xi_2)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2(\omega_2\xi_2 - \omega_1\xi_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (6)$$

式中:  $\omega$ ,  $\xi$  分别为结构自震频率和相应的阻尼比。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 荷载模型与边界条件

车辆荷载采用标准轴载 100 kN, 等效的单圆荷载接地半径  $r$  为 0.150 6 m。通过定义时间函数和时间步实现循环半正弦瞬态加载模式,以模拟实际路面承受车轮动态荷载的作用,半正弦均布荷载的峰值定义为  $p_{\max}$ , 每个循环中的荷载作用时间为  $T$ 、任意时刻的均布应力为  $p = p_{\max} \sin(\pi t/T)$ 。本文选取时间步长为 0.001 s, 荷载作用时间  $T$  取 0.018 s, 相当于 60 km·h<sup>-1</sup> 的行车速度, 每个循环的计算时间为 0.36 s, 荷载作用循环次数为 10。

路面结构尺寸为径向方向 ( $y$  方向) 3.0 m, 深度方向 ( $z$  方向) 3.08 m。路面结构的分析模型见图 1。

沥青路面结构各层间的接触为完全连续, 其中沥青面层中的固相为混合料固体颗粒组成的骨架, 液相为充满于骨架孔隙中的水, 其为不可压缩流体。采用 2-D Solid9 节点 4 边形单元进行网格划分。计算分析中, 假设路面结构内初始状态为 0, 即仅分析附加荷载作用产生的孔隙水压力。

模型的边界条件为: 固态相的右边界为竖向自由移动、横向固定, 下边界为固定约束, 上边界的水平和竖向都是自由的。液态相的荷载位置和下边界为不排水条件, 右边界和上边界除荷载位置以外的为排水条件。

### 2.2 路面结构材料参数

沥青混合料的路用性能十分复杂, 高温条件下, 其材料性质主要表现为粘弹性。沥青面层的粘弹性材料参数可由恒定加载应力的单轴压缩蠕变试验确定。通过对蠕变试验数据进行模型参数拟合, 将所得参数输入有限元的蠕变材料模块, 可以实现水-荷载耦合作用下沥青路面的粘弹性分析, 本文所用粘弹性材料参数根据文献[10]确定。

有限元分析模型中以渗透系数来描述沥青面层中孔隙水的渗透性。已有研究表明, 对于沥青面层, 8% 的空隙率为其水损坏发生的拐点。本文选取沥青面层的空隙率为 8%, 根据 L.Allen Cooley<sup>[1]</sup> 的研究成果,

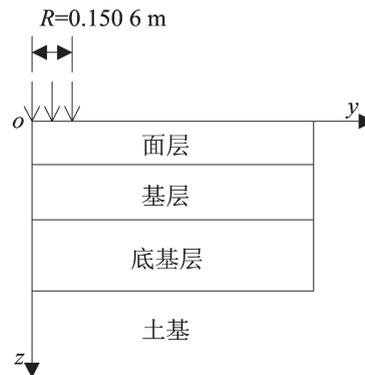


图 1 路面结构分析模型  
Fig.1 Analysis model of pavement structure

8%的空隙率所对应的渗透系数为  $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。分析模型所选用的路面结构材料参数如表1所示。

表1 路面结构材料参数  
Tab.1 Parameters of pavement structure

层位	厚度/cm	模量/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	阻尼系数 $\beta$
面层	18	1 400	0.35	2 400	0.05
基层	20	1 600	0.25	2 100	0.05
底基层	20	600	0.30	1 800	0.05
土基	250	50	0.40	1 800	0.05

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 变形量

水-荷载耦合作用下及单独荷载作用下路表轮心处  $o$  点的竖向位移时程曲线如图2所示。可以看出,加载时沥青路面的路表竖向位移逐渐增大,而卸载后的竖向位移开始减小但却无法恢复到0,残留的竖向位移即为沥青路面的车辙变形;在整个循环荷载作用过程中,水-荷载耦合作用下的沥青路面竖向位移小于单独荷载作用。这表明,沥青混合料骨架孔隙中的水可提供一定的抗变形能力。

不同荷载循环作用次数时,水-荷载耦合作用与单独荷载作用下沥青路面车辙变形差值由图3所示。由图3可以得到:荷载循环次数为1~5次范围内,两种环境状态下沥青路面的车辙变形差呈增加趋势;荷载循环次数为5~10次时,车辙变形差值变化不大。这是由于水-荷载耦合作用初始阶段,混合料空隙较大,其内部空隙水可自由流动,随着空隙率的减小,孔隙水压力迅速增大,即对沥青路面抗变形能力的贡献逐渐增加。当荷载循环至一定次数时,混合料空隙率较小,封闭于其内部的水无法自由流动,孔隙水压力值较大且维持在稳定状态,从而对沥青路面抗变形能力的贡献较为稳定。

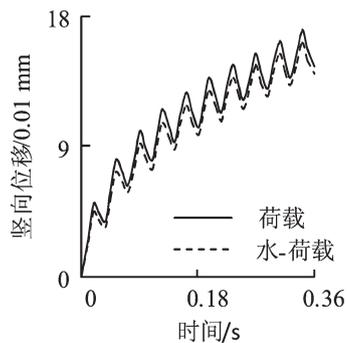


图2 竖向位移时程曲线  
Fig.2 Time history of vertical displacement

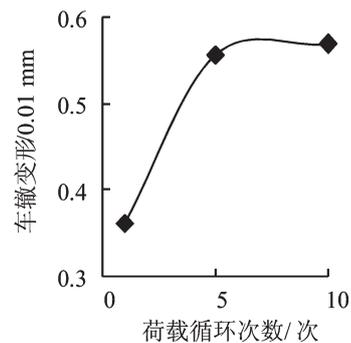


图3 车辙变形差与荷载循环次数关系  
Fig.3 Relationship between rutting deformation difference and loading number

以上分析表明,水-荷载耦合作用下的沥青路面的车辙变形量低于单独荷载作用,密闭于沥青路面联通孔隙内部的水一定程度上有助于沥青路面的抗变形能力。随着荷载作用次数的增加,水对于沥青路面抗变形能力的贡献先逐渐增大后处于稳定状态。

#### 3.2 变形速率

变形速率是指单位变形所历经的荷载运行次数。分别对水-荷载耦合作用及单独荷载作用下沥青路面车辙变形与荷载循环次数之间的关系进行线性拟合,获得拟合直线斜率,即为对应的变形速率,两者的拟合直线及变形速率见表2。

由表2可以看出,水-荷载耦合作用下沥青路面车辙变形速率小于单独荷载作用时。沥青路面内部联通孔隙中的水在一定程度上消散了部分的荷载作用,使得沥青路面的变形速率减缓。这同样表明了水的

存在一定程度上提高了沥青路面的抗变形能力。但孔隙水的长期存在,会使得集料表面的沥青发生自发的乳化作用而剥离,引发沥青路面的松散、沉陷等损坏。从而密封于沥青路面内部的孔隙水,在路面使用初期有助于提高沥青路面的抗变形能力,而在使用中期将造成沥青路面较为严重的功能性损坏。

表2 拟合直线与变形速率

Fig.2 Fitting straight-line and creep slope

工况	拟合直线	相关系数 $R^2$	变形速率/(0.01 mm·次 <sup>-1</sup> )
水-荷载耦合作用	$y = 1.1506x + 2.9926$	0.97	1.1506
荷载作用	$y = 1.1728x + 3.3697$	0.96	1.1728

### 3.3 水影响因子

沥青路面在水-荷载耦合作用下发生的车辙变形为  $RD_w$ , 在单独荷载作用下为  $RD_d$ , 定义  $RD_w/RD_d$  为水影响因子, 以表征水对沥青路面车辙变形的影响。水影响因子与荷载循环次数的关系见图4。

由图4可知, 水影响因子随着荷载循环次数的增加是逐渐减小的, 且两者之间的相关关系可用对数函数  $y = -0.02 \ln(x) + 1.099$  进行拟合, 相关系数为 0.99。这表明, 水对沥青路面车辙变形的影响程度随着荷载循环次数的增加呈对数函数减小。随着车辆荷载的重复作用, 沥青混合料的空隙逐渐减小, 即混合料颗粒组合更为紧密, 材料骨架的抗力增大, 虽然孔隙水压力亦有所增大, 但相比于材料骨架抗力的增大幅度要小, 从而水影响因子逐渐减小。

以上分析表明, 在水未能使集料表面沥青剥离、沥青混合料路用性能下降之前, 水-荷载耦合作用与单独荷载作用下的沥青路面车辙变形比与荷载循环作用次数呈对数函数, 且随着荷载循环作用次数的增加而降低。

## 4 结论

1) 水-荷载耦合作用下的沥青路面的车辙变形量低于单独荷载作用, 密闭于沥青路面联通孔隙内部的水一定程度上有助于沥青路面的抗变形能力。随着荷载作用次数的增加, 水对于沥青路面抗变形能力的贡献先逐渐增大后处于稳定状态。

2) 在水未能使集料表面沥青剥离、沥青混合料路用性能下降之前, 水-荷载耦合作用与单独荷载作用下的沥青路面车辙变形比与荷载循环作用次数呈对数函数, 且随着荷载循环作用次数的增加而降低。

3) 本文基于 Biot 理论建立了路面结构分析模型, 适用于分析沥青路面使用初期孔隙水对车辙变形的影响。需进一步解决的问题: 考虑水对集料-沥青界面的不利影响, 对分析模型计算方法进行改进, 以提升分析模型的工程有效适用性。

### 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: 219-250.
- [2] 徐世法. 沥青路面车辙深度与行车安全[J]. 北京建筑工程学院学报, 1994, 10(1): 47-51.
- [3] COPELAND A R. Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems[D]. Vanderbilt University, Civil Engineering, 2007.

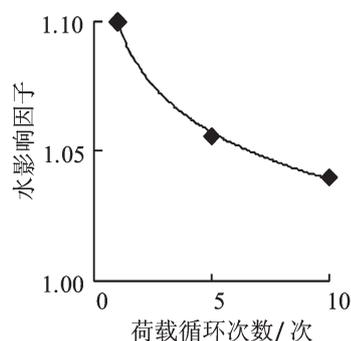


图4 水影响因子与荷载循环次数关系  
Fig.4 Relationship between rutting deformation ratio and loading number

- [4] 王坤,陈景雅. Sasobit应用于温拌排水沥青混合料的研究[J]. 华东交通大学学报,2012,29(6):11-15.
- [5] 董泽蛟. 多孔介质理论下饱和沥青路面动力响应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [6] 钟阳,耿立涛,周福霖,等. 沥青路面超孔隙水压力计算的刚度矩阵法[J]. 沈阳建筑大学学报,2006,22(1):21-29.
- [7] 刘朴,凌宏伟,韩骥,等. 沥青路面超孔隙水压力的测试[J]. 上海公路,2002(4):20-22.
- [8] 罗志刚,周志刚,郑健龙,等. 沥青路面水损害分析[J]. 长沙交通学院学报,2005,21(3):32-36.
- [9] 周长红,陈静云,王哲人,等. 沥青路面动水压力计算及其影响因素分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2008,39(5):1100-1104.
- [10] 郭乃胜,赵颖华,侯金成,等. 纤维沥青混凝土的松弛性能研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(1):28-32.
- [11] ALLEN COOLEY JR L, RAY BROWN E, MAGHSOODLOO S. Development of critical field permeability and pavement density values for coarse graded superpave pavements, NCAT Report 01-03[R]. Alabama: Auburn University, 2001: 1-14.

## Rutting Deformation of Asphalt Pavement under Moisture-load Coupling Action

Qi Wenyang<sup>1</sup>, Li Zhe<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shandong Highway and Bridge Maintenance Co., LTD., Jinan 250000, China)

**Abstract:** In order to analyze the characteristic of rutting deformation of asphalt pavement under moisture-load coupling action, this paper compares and analyzes the rutting behaviors of saturated asphalt layer and dry surface layer by using FEM. The result indicates that the rutting depth is lower under saturated condition than dry condition, and the creep slope of asphalt layer under saturated condition decreases, compared to the asphalt layer under dry condition. The rutting deformation ratio between moisture and dry condition follows the log function relationship with the loading number, and decreases with the increase of loading number.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; moisture-load coupling action; finite element; rutting deformation