

文章编号: 1002-0268 (2009) 09-0046-07

刹车荷载反复作用下沥青路面 剪切动响应三维有限元分析

彭卫兵, 刘萌成, 刘书镐

(浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了揭示刹车反复作用下沥青路面剪切动响应力学行为特征, 应用 ABAQUS 建立了典型半刚性基层沥青路面三维计算模型, 针对沥青路面剪切动响应控制性外部影响因素, 以及单次及反复刹车作用下沥青路面剪应力与水平位移变化规律进行了数值模拟分析。计算结果表明: 加速度和阻尼比对路面结构残余水平位移存在较大影响; 刹车作用效应随着深度的增加而迅速衰减, 路表呈现为波浪形的剪切推移变形特征; 反复刹车导致沥青路表残余变形缓慢累积, 作用次数达到 106 次后可形成波浪形车辙病害。

关键词: 道路工程; 剪切动响应; 有限元分析; 沥青路面; 反复刹车荷载

中图分类号: U416.01

文献标识码: A

Analysis of Shear Dynamic Response of Asphalt Pavement under Repeated Brake Loads by 3D Finite Element Method

PENG Weibing, LIU Mengcheng, LIU Shuhao

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310014, China)

Abstract: In order to investigate the shear dynamic response of asphalt pavement under repeated brake load, a three-dimensional numerical model for the semi-rigid base asphalt pavement was presented by using ABAQUS. Some numerical simulations were conducted for the dominant external influence factors on the shear dynamic response, shear stress and horizontal displacement variations of asphalt pavement under one-cycle and repeated brake loads. The calculation result shows that (1) the influences of the acceleration and damping ratio on the residual horizontal displacement (U_x)_{res} of pavement are remarkable; (2) the influence of brake on the dynamic response of the pavement decays with the increase of the depth, deformation of the pavement surface appears to be lumpy as result of (U_x)_{res} at the pavement surface; (3) (U_x)_{res} at the pavement surface develops little by little with the increase of the load frequency under the repeated brake loads, and the lumpy rutting comes into being as the load number is more than one million.

Key words: road engineering; shear dynamic response; finite element analysis; asphalt pavement; repeated brake loads

0 引言

车辆正常行驶状态下车与路之间的摩擦作用较小, 水平荷载对路面的作用效应可忽略不计^[1], 然

而, 在车辆频繁制(启)动的道路交叉口、停车场(场)和收费站等地段, 沥青路面受到较大的水平荷载作用, 容易产生波浪型车辙(即拥包)和疲劳损害等早期损坏形式^[2-3]。近年来众多学者针对轮载的水

收稿日期: 2008-11-14

基金项目: 浙江省教育厅科研项目 (Y200702509)

作者简介: 彭卫兵 (1978-), 男, 江西樟树人, 博士, 研究方向为道路和桥梁工程结构设计理论. (cmeon110@126.com)

平与垂直压力分布形式及两者综合作用下的沥青路面结构力学行为开展了广泛的研究工作^[4-7]。然而, 已有相关研究大都将问题简化成为轮载作用下的静力计算问题, 这不符合车辆频繁制(启)动力循环作用的实际情况。

有鉴于此, 本文采用 ABAQUS 大型有限元软件, 就刹车状态下水平荷载反复作用引起的沥青路面剪切性状动力响应及相关路面早期损坏成因, 进行了相关数值计算研究。根据计算结果着重分析了加速度和阻尼比对沥青路面结构动响应的影响情况, 单次刹车作用下沥青路面最大剪应力与水平位移分布规律, 以及刹车反复作用对沥青路面剪切变形的作用效应和相应的路面早期损坏成因。本文三维有限元数值模拟分析研究成果可供车辆频繁制动地段沥青路面结构设计参考。

1 有限元计算模型及材料参数

垂直轮胎压力作用下沥青路面结构力学行为已有深入研究, 本文主要研究刹车水平荷载引起的路面结构剪切动响应特性。根据本文建立的有限元计算坐标系, 水平荷载作用方向为 - x 方向, 最大剪应力为 S_{xz} , 而对应的水平位移为 U_x 。

1.1 轮胎接地形状的简化

轮胎与地面的接触作用较为复杂。根据黄仰贤的观点^[8], 轮胎与地面的实际接触形状由 1 个矩形和 2 个半圆形组成, 如图 1 所示。根据面积等效原则, 该形状等效为 1 个长度(L') $\times$ 宽度(B') = $0.871\ 2L \times 0.6L$ 的矩形, 面积大小 A_c 即为 $0.522\ 7L^2$, 如图 1 所示。假设接触压力等于轮胎压力, 在标准轴载 BZZ-100(单轮轴载 F 为 25 kN, 胎压 p 为 700 kPa)作用下, 根据公式

$$L = \sqrt{A_c/0.522\ 7} = \sqrt{(F/p)/0.522\ 7},$$
可以计算得到 L 、 L' 与 B' 分别为 0.260、0.226、0.156 m。单轮接地面积 $0.226\ \text{m} \times 0.156\ \text{m} = 0.035\ 256\ \text{m}^2$ 。

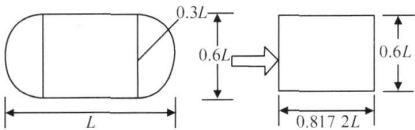


图 1 轮胎与路面的实际与等效接触形状转换关系
Fig. 1 Transform of actual and equivalent contact areas between tire and pavement

1.2 刹车荷载的模拟

车辆制动过程中车与路相互作用的力学行为较为

复杂。为了使计算过程简便易行且具有代表意义, 不考虑车辆制动特性和刹车时程对水平力分布形式和大小的复杂影响, 针对刹车情况作如下假设: (1) 只考虑路面摩阻力的作用; (2) 车-路相互作用为滑动摩擦; (3) 车辆滑行速度在有限滑行距离内迅速衰减为 0; (4) 垂直荷载与水平荷载变化周期相同。

根据上述假设, 有限元模拟刹车过程的方法如下:

(1) 荷载大小计算: 垂直荷载为轮胎压力 0.7 MPa; 水平荷载根据牛顿第 2 定律由行车车速、制动距离、车辆轴载以及荷载作用面积计算得到。(2) 荷载作用形式: 双轮接地区域作用均匀分布的垂直与水平荷载。移动的车辆荷载对滑行路段任意区域的作用可以等效为半正弦荷载形式^[8]:

$$q(t) = q_{\max} \sin^2 \left[\frac{\pi t}{T} \right], \tag{1}$$
$$T = 2S/V, \tag{2}$$

式中, T 为荷载作用周期(即车辆刹车制动总时间); V 为开始刹车前行车速度; S 为制动距离; $q_{\max}$ 为荷载峰值, 垂直荷载峰值为轮胎压力, 水平荷载峰值通过牛顿第 2 定律计算得到。

根据现场刹车力学特性假设, 可认为在垂直行车方向, 刹车滑行区域路面各断面动力响应类同而且皆具代表性, 因此取其中典型位置为研究对象, 该区域作用等效半正弦双轮荷载, 荷载变化规律采用 ABAQUS 显示积分 VLOAD 子程序来描述。

1.3 数值计算几何建模

依据轮胎接地尺寸特性以及荷载大小, 有限元模型的几何尺寸取为: $X \times Y \times Z = 4.4\ \text{m} \times 4.8\ \text{m} \times 8\ \text{m}$ 。其中, X 为行车方向, Y 为道路横向, Z 为竖直方向。选用典型半刚性基层沥青路面进行计算分析, 其结构组成如图 2 所示。假定各结构层为均质、各向同性材料, 层间完全连续。双轮荷载作用区域以及水平力分布如图 3 所示, 其中 O_1 与 O_2 为轮下中心, O 为两轮轮隙中心。三维有限元计算网格如图 4 所示, 荷载作用区域网格划分较为密集, 以便获得较为精确的数值

细粒式沥青混凝土 4 cm	$E=1.34\ \text{GPa}, \nu=0.35$
中粒式沥青混凝土 6 cm	$E=1.26\ \text{GPa}, \nu=0.35$
粗粒式沥青混凝土 8 cm	$E=1.00\ \text{GPa}, \nu=0.35$
水泥稳定碎石 38 cm	$E=1.00\ \text{GPa}, \nu=0.2$
二灰土 20 cm	$E=0.84\ \text{GPa}, \nu=0.2$
土基	$E=0.05\ \text{GPa}, \nu=0.4, \beta=42.5^\circ,$ $K=1.0, \psi=42.5^\circ, \sigma_y=210.8\ \text{kPa}$

图 2 半刚性基层沥青路面结构形式
Fig. 2 Structure of semi-rigid base asphalt pavement

解答。计算模型的边界约束条件为: 土基、底基层、基层与面层四周为水平方向约束, 土基底部为垂直方向约束。

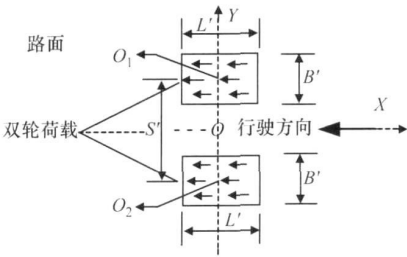


图 3 有限元计算中双轮荷载水平力分布示意图
Fig. 3 Distribution of horizontal load of dual tire in FEA

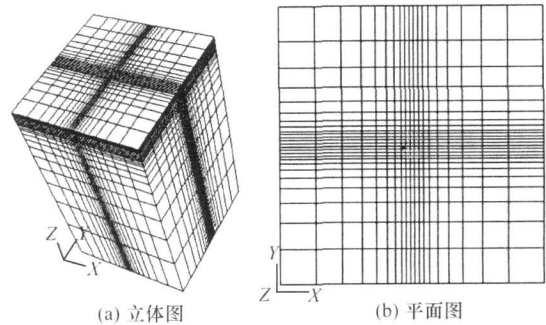


图 4 三维有限元计算网格

Fig. 4 3D finite element mesh

1. 4 材料的模型参数

ABAQUS 有限元计算中土基采用 Drucker-Prager 塑性模型^[9], 材料参数见图 2。路面结构层材料(包括沥青混凝土、水泥稳定碎石与二灰土)采用 ABAQUS 内置的 Concrete Damaged Plasticity 模型^[9], 该模型采用非关联塑性流动法则, 流动势函数为 Drucker-Prager 双曲线函数 $G = \sqrt{(\varepsilon_0 \tan \Psi)^2 + q^2} - p \tan \Psi$, 式中 ε 为偏心率参数, 通常取为 0.1, σ_0 为单轴抗拉强度, 由比值 $K = \sigma_0 / \sigma_{c0}$ 和单轴压缩屈服应力 σ_{c0} 确定, 通常 K 取为 0.8, Ψ 为剪胀角。屈服面采用 Lee 与 Fenves 对 Lubliner 屈服函数的改进形式予以表达^[9-10], 即为:

$$F = [1/(1-\alpha)] [\bar{\sigma}_c - 3\alpha p + \beta(\varepsilon^{pl})] - \frac{\Delta}{\sigma_{max}} - \gamma < -\frac{\Delta}{\sigma_{max}} > J - \bar{\sigma}_c(\varepsilon^{pl}) = 0,$$

硬化规律表达式为:

$$\beta = (1-\alpha) [\bar{\sigma}_c(\varepsilon_c^{pl}) / \bar{\sigma}_t(\varepsilon_t^{pl})] - (1+\alpha),$$

式中, $\bar{\sigma}_t(\varepsilon_t^{pl})$ 和 $\bar{\sigma}_c(\varepsilon_c^{pl})$ 分别为有效拉伸和压缩抗滑应力; 硬化参量 ε_t^{pl} 和 ε_c^{pl} 分别为拉伸等效塑性应变和压缩等效塑性应变; α 和 γ 为材料参数, 通常分别取默认值为 0.12 和 3.00; $\frac{\Delta}{\sigma_{max}}$ 为最大主有效应力^[9]。该模型

定义损伤变量 d 为等效塑性应变 ε^{pl} 与有效应力张量 $\bar{\sigma}$ 的函数, 可模拟塑性状态下材料的刚度劣化与裂纹的生成、发展直至破坏以及拉压应力反转时刚度恢复(裂纹闭合)的本构特性。有限元计算中 Concrete Damaged Plasticity 模型输入参数见图 2 和表 1, 其中 σ_{cu} 为压缩极限应力, σ_{tu} 为拉伸破坏应力。材料阻尼根据 Rayleigh 提出的线性阻尼假设来确定, 即为公式 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ 。实际计算中 α 和 β 常采用简化的取值形式 $\alpha = 2\zeta_1 \omega_1$, $\beta = 2\zeta_2 / \omega_2$, 其中 ω_1 为计算体系的基本固有频率, ζ_1 为该频率时的阻尼比。取路基 ω_1 为 8.2 rad/s, 路面材料 ω_1 为 18.6 rad/s, 由公式可以算得相应阻尼比的 Rayleigh 阻尼系数 α 和 β 。

表 1 路面材料模型参数

Tab. 1 Model parameters of pavement materials					
材料类型	$\gamma_f / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_{c0} / kPa	σ_{cu} / kPa	σ_{tu} / kPa	$\Psi / (^\circ)$
(细、中、粗) 粒	22.7	3.25×10^2	4.27×10^3	1.12×10^3	36.3
沥青混凝土					
水泥稳定碎石	21.6	2.26×10^2	0.95×10^3	0.45×10^3	34.2
二灰土	20.5	1.84×10^2	0.63×10^3	0.18×10^3	31.5

2 控制性影响因素分析

通常车辆频繁制动地段车辆制动距离极短, 行车速度较小。根据相关文献资料, 取制动距离为 2 m, 行车速度分布范围为 $V \leq 10 \text{ m/s}$ 。为计算简便, 在行车速度分布范围内选取对应刹车加速度 20、15、10、5 m/s^2 ; 根据标准轴载 BZZ-100 相关参数, 可以计算得到各自的摩擦阻力(水平荷载)为: 1 418.198、1 063.649、709.099 7、354.550 kPa; 对应的车辆制动所需总时间 T 分别为: 0.447 2、0.516 4、0.6325、0.894 4 s。为了分析刹车状态下沥青路面剪切动力响应, 针对控制性外部影响因素(加速度和阻尼比)进行了参数敏感性分析。符号说明: S_{xz} , $(S_{xz})_{max}$, $(S_{xz})_{res}$ 分别为剪应力, 峰值剪应力和残余剪应力; U_x , $(U_x)_{max}$, $(U_x)_{res}$ 分别为水平位移, 峰值水平位移和残余水平位移。

2.1 加速度的影响

取阻尼比为 2%, 分析加速度为 20、15、10、5 m/s^2 时沥青路面剪切动力响应。有限元计算结果表明: 随着加速度 a 的减小 $20 \rightarrow 15 \rightarrow 10 \rightarrow 5 \text{ m/s}^2$, 沥青路表荷载中心位置的 $(S_{xz})_{max}$ 变化为 $-966.49 \rightarrow -757.64 \rightarrow -476.05 \rightarrow -228.78 \text{ kPa}$; 相应的 $(S_{xz})_{res}$ 为 $-55.85 \rightarrow -85.10 \rightarrow -27.23 \rightarrow -0.34 \text{ kPa}$ 。由图 5 可知: 沥青路表荷载中心位置的 $(U_x)_{max}$ 变化为 $-0.421 \rightarrow -0.204 \rightarrow -0.111 \rightarrow -0.055 \text{ mm}$, 负号指位移

为 $-x$ 方向; 而 $(U_x)_{\text{res}}$ 为 $-0.239 \rightarrow -0.069 \rightarrow -0.020 \rightarrow -0.006 \text{ mm}$ 。

由此可见, 加速度对刹车状态下路面结构动响应影响极大, 峰值剪应力和残余变形随加速度减小而锐减。加速度 a 由 20 m/s^2 变化至 5 m/s^2 , $(S_{xz})_{\text{max}}$ 绝对值减小为原来的约 $1/4$; 而相应的 $(U_x)_{\text{res}}$ 绝对值则减小为原来的约 $1/40$ 倍。峰值剪应力与残余变形是造成路面结构实际损害的主要因素。根据有限元计算结果, 通过非线性拟合分析获得了水平位移 U_x 与加速度 a 的关系式 $U_x = a \ln(1 + bx^3)$ 。如图5所示, 拟合曲线与数值计算结果较为吻合。

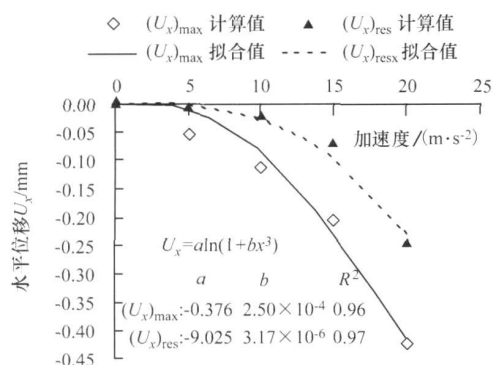


图5 沥青路表水平位移 U_x 与加速度的关系曲线

Fig 5 $U_x - a$ curves of asphalt pavement surface

2.2 阻尼比的影响

取加速度为 20 m/s^2 , 分析阻尼比分别为 0% 、 2% 、 5% 、 8% 时沥青路面剪切动响应。有限元计算结果表明: 随着阻尼比 c 的增加 $0\% \rightarrow 2\% \rightarrow 5\% \rightarrow 8\%$, 沥青路表荷载中心位置的 $(S_{xz})_{\text{max}}$ 变化为 $-966.49 \rightarrow -998.55 \rightarrow -913.71 \rightarrow -903.50 \text{ kPa}$, 相应 $(S_{xz})_{\text{res}}$ 为 $-55.85 \rightarrow -15.28 \rightarrow -18.35 \rightarrow -23.95 \text{ kPa}$ 。由图6可知: 沥青路表荷载中心位置 $(U_x)_{\text{max}}$ 变化为 $-0.421 \rightarrow -0.365 \rightarrow -0.310 \rightarrow -0.299 \text{ mm}$, 负号指位移为 $-x$ 方向; $(U_x)_{\text{res}}$ 为 $-0.239 \rightarrow -0.178 \rightarrow -0.136 \rightarrow -0.124 \text{ mm}$ 。

由此可见, 阻尼比大小对刹车状态下路面结构 $(S_{xz})_{\text{max}}$ 影响较小, 阻尼比由 0 变化至 8% , $(S_{xz})_{\text{max}}$ 绝对值减小了大约 63 kPa , 并始终维持在 900 kPa 以上; 而对残余变形的影响较大, 阻尼比由 0 变化至 8% , $(U_x)_{\text{res}}$ 绝对值减小为原来的 $1/2$ 。根据有限元计算结果, 通过非线性拟合分析得到了水平位移 U_x 与阻尼比 c 的关系式 $U_x = a \ln[1 + b \exp(-c \cdot \sqrt{100c})]$ 。如图6所示, 拟合曲线与数值计算结果较为吻合。

以上控制性影响因素分析表明: 对于刹车状态下

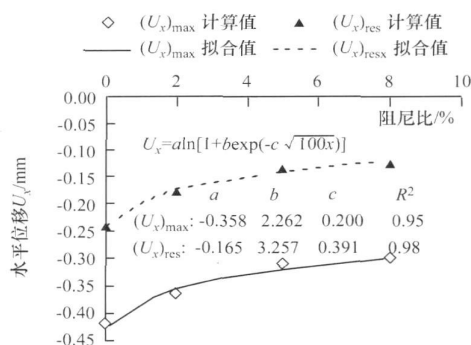


图6 沥青路表水平位移 U 与阻尼比的关系曲线

Fig 6 $U_x - c$ curves of asphalt pavement surface

沥青路面剪切动响应, 加速度的影响大于阻尼比。原因在于加速度直接反映刹车产生的水平力大小, 因此成为路面结构剪切动响应的决定性外部影响因素。

3 刹车状态下沥青路面剪切动响应分析

以下以加速度为 20 m/s^2 、阻尼比为 2% 的刹车情况为例分析刹车状态下沥青路面剪切动响应。

3.1 单次刹车作用下的剪切动响应

由图7有限元计算得到的单次刹车作用下路面结构应力与变形结果可知: 单次刹车荷载作用完毕后, 剪应力关于 x 方向对称分布, 最大剪应力位于荷载作用区(图中网格区)中心部位; x 方向正应力同样关于 x 方向对称分布, 最大拉、压应力分别位于荷载作用区正后方和正前方。

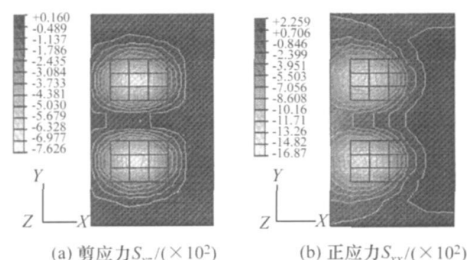


图7 单次刹车荷载作用下荷载区域应力云图

Fig 7 Stress contours of load area with one-cycle brake load

与应力状态对应的变形状况如图8所示: 沿行车 $(-x)$ 方向, 荷载区域前部单元发生水平压缩、竖向拉伸变形, 荷载区域后部单元发生水平拉伸、竖向压缩变形, 而荷载区域中心部位发生纯压缩变形。荷载达到峰值时, 在行车方向沥青路表出现了水平推移变形, 并明显大于相应的竖向变形(弯沉); 而荷载卸除时, 沥青路表出现了残余的水平变形和弯沉。

由图9可知: 沥青路面结构内的剪应力 S_{xz} 与水

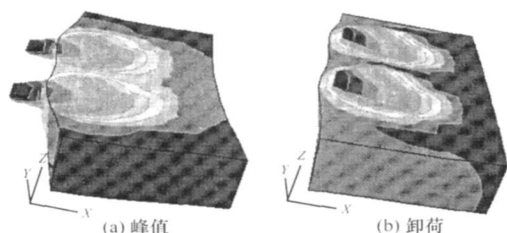


图8 单次刹车作用下荷载作用区域网格变形云图(放大1 000倍)

Fig. 8 Deformation contours of the area with one-cycle brake load

平位移 U_x 随深度增加而迅速衰减,剪应力 S_{xz} 有效影响深度不大于18 cm,影响范围主要局限于沥青面层内。上面层、中面层和下面层顶部的 $(S_{xz})_{\max}$ 大小分别为-966.49、-400.18、-85.14 kPa, $(U_x)_{\text{res}}$ 则分别为-0.239、-0.058、-0.020 mm。根据有限元计算结果,沥青路面结构层内最大 $(S_{xz})_{\max}$ 位于沥青路表,其大小为966.49 kPa,相应最大残余表面水平位移为-0.239 mm。

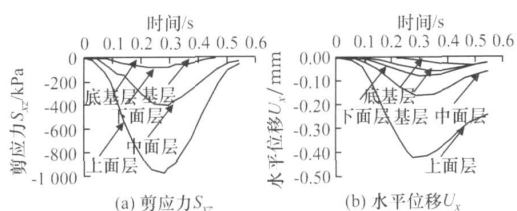


图9 轮下不同结构层 S_{xz} 和 U_x 历时曲线

Fig. 9 Time histories of S_{xz} and U_x under load center at different pavement layers

由图10可知:与轮下单元或节点剪应力和水平位移相比,轮隙单元或节点的 S_{xz} 与 U_x 较小且变化较为复杂。路面结构内的 $(S_{xz})_{\max}$ 方向在上面层与下面层间发生反转,而其大小随深度增加而发生先减小后增加的现象;上面层、中面层和下面层顶部的 $(S_{xz})_{\max}$ 大小分别为60.06、-28.97、-35.15 kPa。残余水平位移 $(U_x)_{\text{res}}$ 随深度增加而不断增加,上面

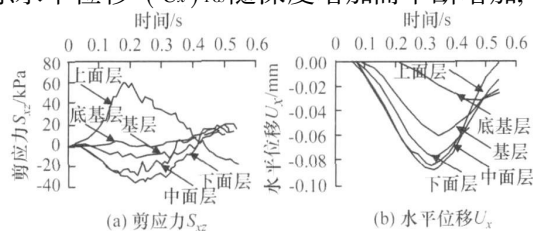


图10 轮隙不同结构层 S_{xz} 和 U_x 历时曲线

Fig. 10 Time histories of S_{xz} and U_x under clearance of dual tire at different pavement layers

层、中面层和下面层顶部节点的 $(U_x)_{\text{res}}$ 分别为-0.002、-0.015、-0.021 mm。

3.2 刹车反复作用下的剪切动响应

在车辆频繁制动地段,刹车荷载的反复作用导致沥青路面剪应力与残余变形的累积。有鉴于循环荷载作用下三维动力有限元计算耗用机时过长的局限性,本文针对刹车荷载连续循环作用5 000次的应力变形进行计算,并基于此进行沥青路表剪切残余变形拟合与预测分析,见图11~14。

由图11可知:轮隙的 S_{xz} 与 U_x 数值远小于轮下相应变量数值,因此以下主要分析轮下的应力变形变化规律。在刹车荷载反复作用下,沥青路面内的剪应力与水平位移发生波动。根据图11(a),由于沥青路表单元直接承受刹车荷载作用而类似于结构受迫稳态振动,相应峰值 $(S_{xz})_{\max}$ 随着作用次数 N 的增加而波动。根据图11(b),尽管每个周期内轮下残余水平位移 $(U_x)_{\text{res}}$ 显著小于相应的弹性变形,却随荷载作用次数的增加而缓慢累积。

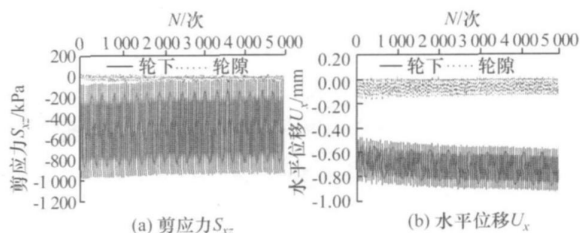


图11 路表 S_{xz} 与 U_x 与作用次数 N 关系曲线

Fig. 11 S_{xz} - N curve and U_x - N curve of pavement surface

如图12所示,非线性拟合有限元计算结果获得了轮下 $(U_x)_{\text{res}}$,轮下和轮隙 $(U_x)_{\text{res}}$,轮隙与荷载作用次数 N 的不同关系式:

$$(U_x)_{\text{res, 轮下}} = mN + a(1 - e^{-bN}), \quad (3)$$

$$(U_x)_{\text{res, 轮隙}} = a(1 - e^{-bN}). \quad (4)$$

拟合曲线与有限元计算结果相当吻合,有关回归参数值如图12。由图12可知: $N \leq 30$, $(U_x)_{\text{res, 轮下}}$ 急剧增加; $N > 30$, $(U_x)_{\text{res, 轮下}}$ 缓慢增加;而 $(U_x)_{\text{res, 轮隙}}$ 相对于 $(U_x)_{\text{res, 轮下}}$ 而言可以忽略不计, N 到达1 000时可以达到稳定状态。

为了分析频繁刹车作用下沥青路面病害形成原因,图13~14给出了 $N=5 000$ 次沥青路表荷载作用区域(图中网格)及其周边拉伸损伤变量 D_t 、水平塑性应变 P_{xx} 与剪切塑性应变 P_{xz} 分布云图,以及有关单元相应变量与作用次数 N 的关系曲线。由此可知,单元的 D_t 与 P_{xx} 大小排序为单元EL12581>EL6010>

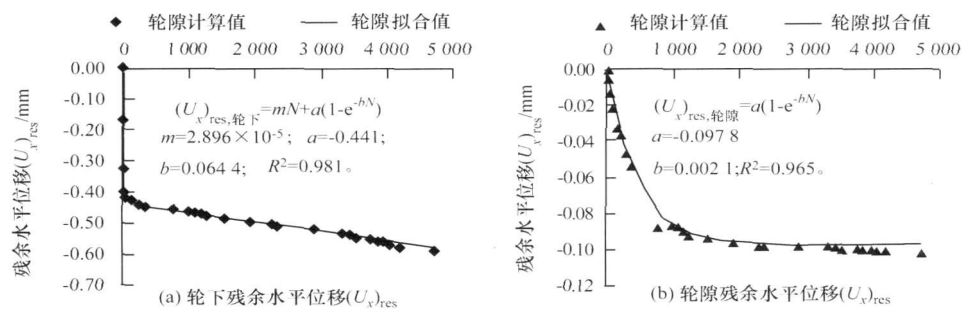


图 12 路表残余水平位移 $(U_x)_{res}$ 与作用次数 N 关系曲线

Fig 12 $(U_x)_{res}$ - N curve of pavement surface

EL6007,而 P_{xz} 大小排序为单元 EL12581 < EL6007 < EL6010。单元EL12581 拉伸损伤变量 D_t 在 $N = 5\,000$ 次时达到 0.78,而水平塑性应变 P_{xx} 达到 0.27%。

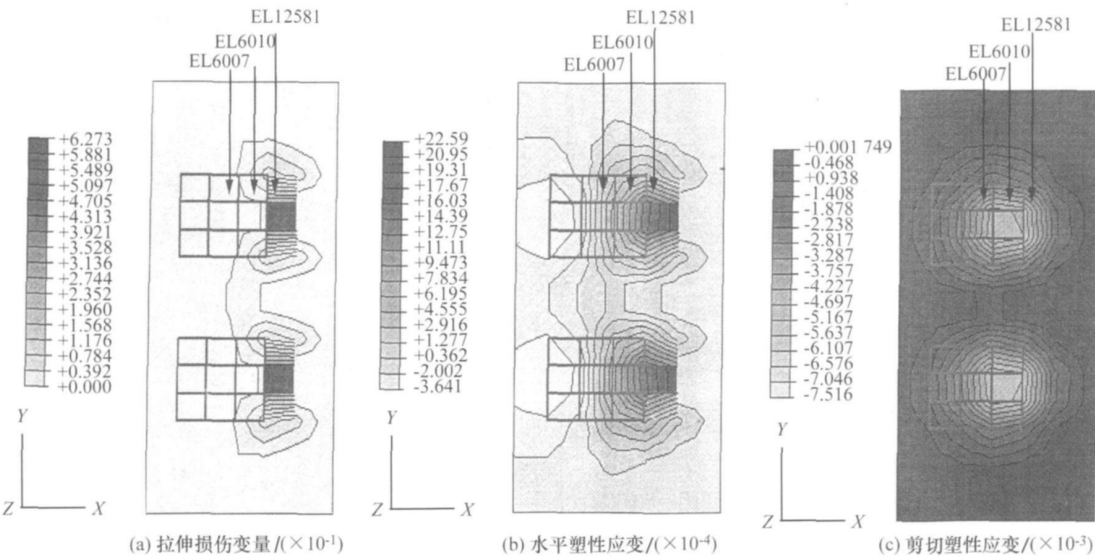


图 13 加荷区域及其附近拉伸损伤变量、水平塑性应变与剪切塑性应变云图($N = 5\,000$ 次)

Fig 13 Contours of D_t , PE_{xx} , and PE_{xz} in load and surrounding area with 5 000-cycle brake load

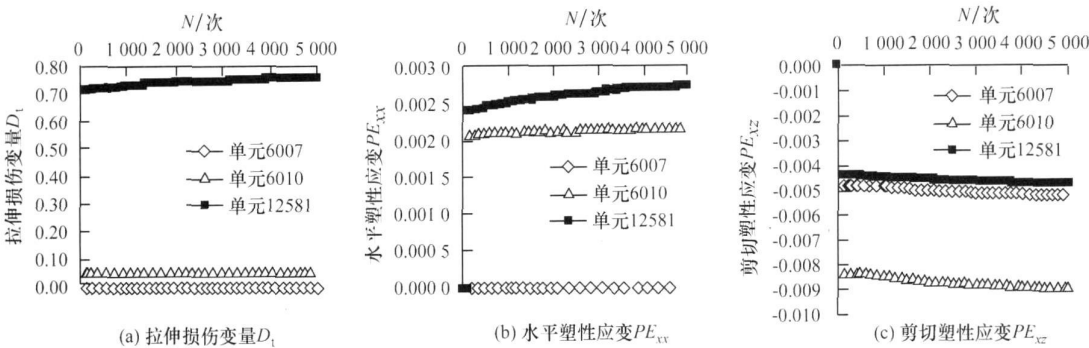


图 14 路表单元拉伸损伤变量、水平塑性变形与剪切塑性应变和作用次数关系

Fig 14 D_t - N , PE_{xx} - N and PE_{xz} - N curves of pavement surface

由此可见,沿行车 $(-x)$ 方向,在水平与竖直荷载的反复作用下,荷载区前部单元主要发生水平推移变形,荷载区后部单元则为拉伸变形,而荷载中心区域则以竖向变形为主。刹车引起的较大水平力作用下,沥青路表局部产生较大的剪应力或拉应力,可使荷载区后部单元出现拉伸损伤和荷载区前部单元产生

明显的剪切水平残余变形。

根据拟合公式 (3) 可以预测得到荷载作用次数 $N = 10^4$ 、 10^5 、 10^6 时, $(U_x)_{\text{res}}$ 轮下分别为 -0.726 、 -3.290 、 -28.931 mm。同时根据荷载作用区域变形分布与变化规律可以预测: 刹车反复作用次数 N 达到百万次后, 沥青路表荷载作用区域发生极为明显的水平推移变形, 伴随明显的竖向残余变形 (车辙) 以及拉伸损伤开裂, 形成波浪、推移或搓板形式的剪切病害。上述预测所得沥青路表变形趋势与南京市城市道路交叉口实际调研资料基本吻合^[11]。

4 结论

(1) 峰值剪应力和残余变形随刹车加速度增加而迅速增加; 峰值剪应力随阻尼比增加而发生微小波动, 残余变形随阻尼比增加而不断减小; 根据非线性拟合分析获得水平位移与加速度及阻尼比的关系式。

(2) 刹车荷载作用下, 剪应力与正应力关于行车方向对称分布, 最大剪应力位于荷载作用区中心部位; 最大拉、压应力分别分布于荷载作用区域正后方和正前方; 荷载作用区域前部单元发生推挤变形, 后部单元发生拉伸变形, 而中心区域则为沉陷变形。

(3) 刹车荷载反复作用下, 峰值剪应力随着作用次数的增加而发生微小波动; 而残余水平位移却随荷载作用次数的增加而缓慢累积。根据非线性拟合分析获得了轮下残余水平变形与荷载作用次数的关系式。

(4) 预测分析认为, $N \geq 10^6$ 时荷载作用区域发生极为明显的水平推移变形, 同时伴随有明显的竖向残余变形 (车辙) 和拉伸损伤开裂, 形成了沥青路表波浪、推移或搓板形式的剪切病害。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
P. R. China Ministry of Communications. JTG D50-2006 Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [2] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
SHEN Jin'an. Pavement Performance of Asphalt and Asphalt Mixtures [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [3] 元松, 李雪莲. 沥青面层反射裂缝荷载型应力强度因子回归分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (12): 76-83.
- [4] 谢水友, 郑传超. 水平荷载对沥青路面结构的影响 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (2): 14-17.
XIE Shuiyou, ZHENG Chuanchao. Influence of Horizontal Loads on Asphalt Pavement Structure [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24 (2): 14-17.
- [5] 邓学钧, 李昶. 水平荷载作用下的路面结构应力 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (4): 427-431.
DENG Xuejun, LI Chang. The Stress of Road Structure under Horizontal load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (4): 427-431.
- [6] 胡小弟, 孙立军, 胡德亮. 非均布水平及竖向力下沥青路面力学响应分析 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2004, 21 (1): 20-24.
HU Xiaodi, SUN Lijun, HU Deliang. Stress Response Analysis of Asphalt Pavement under Non-uniform Distributed Vertical and Horizontal Contact Stress [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2004, 21 (1): 20-24.
- [7] 杨群, 郭忠印, 陈立平. 考虑水平荷载的公路隧道复合式路面表面拉应力分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (1): 16-19.
YANG Qun, GUO Zhongyin, CHEN Liping. Stress Analysis of Compound Pavement in Road Tunnel Considering Level Loads [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (1): 16-19.
- [8] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 余定选, 齐诚, 译. 北京: 人民交通出版社, 1998.
HUANG Yangxian. Analysis and Design of Pavement [M]. YU Dingxuan, QI Cheng, translated. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [9] LUBLINER J J, OLIVER S O, ONATE E. A Plastic Damage Model for Concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25: 299-329.
- [10] LEE J, FENVES G L. Plastic Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124 (8): 892-900.
- [11] 郭咏梅, 刘斌, 倪富健, 等. 南京市道路交叉口路面病害调查及原因分析 [J]. 中国市政工程, 2002 (3): 6-9.
GUO Yongmei, LIU Bin, NI Fujian, et al. Investigation and Analysis of Pavement Distress at Road Intersections in Nanjing [J]. Chinese Journal of municipal Engineering, 2002 (3): 6-9.