

文章编号:1005-0523(2017)01-0061-06

不同速度下制动沥青路面结构动力响应研究

顾彦梁, 吴 中, 沈才华, 刘 泉

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用 Hypermesh/LS-DYNA 建立轮胎及路面结构有限元模型, 研究制动速度和上面层与中面层刚度比两种因素对路面结构动力响应的影响规律。研究表明: 制动过程中, 车辆荷载主要作用在沥青路面面层, 其中中面层受到的水平力、垂直力最大。随着制动速度的增加, 路面各层结构中应力、弯沉也随之增加; 随着上面层与中面层刚度比的增加, 路表弯沉呈现下降趋势。所以, 在频繁刹车路段可考虑提高上中面层刚度比及控制刹车速度以减弱荷载对路面的破坏。

关键词:路面结构; 动力响应; 制动; LS-DYNA; 速度

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.010

在交叉口、收费站等路段, 由于交通量大、汽车频繁制动、启动, 路面车辙、拥包等早期病害时有发生^[1-3]。汽车以不同速度、轴载在沥青路面频繁制动是路面结构早期破坏的重要原因^[4]; 因此, 研究不同速度制动时沥青路面结构动力响应具有重要意义。

刹车时, 汽车轮胎受到路面摩阻力的作用, 同时轮胎会反作用于路面结构。偶昌宝等采用 ANSYS 软件, 分析了沥青路面在移动荷载下粘弹性、弹性的路面动力响应, 结果表明轮胎受到水平力的作用时, 路面弯沉明显增大^[5]。单景松, 黄晓明等采用 ABAQUS 分析了移动的车辆荷载在正常行驶速度、慢速及刹车时路面结构内部应力响应。研究发现刹车时在路面产生的水平荷载对路表层水平剪应力影响较大^[6]。李江等也采用 ABAQUS 分析软件, 建立了 3D 动力有限元模型, 分析了车辆以不同速度匀速通过和刹车状态下路面结构的动力响应^[7]。

本文采用 Hypermesh/LS-DYNA 建立轮胎、路面结构有限元模型。通过拟合得到摩擦力系数随速度的变化规律, 从而模拟刹车过程中水平力不断变化的实际状况。分析了汽车在不同速度刹车时, 路面结构动力的响应规律, 并考虑了面层刚度比对路面弯沉的影响。

1 轮胎及沥青路面结构有限元模型的构建

1.1 轮胎模型的建立

以子午线轮胎 8R17 作为原型, 采用 SolidWorks 建立轮胎及道路结构模型。轮胎宽度为 205 mm、轮辋直径为 432 mm、汽车后轮轮距为 1.6 m。胎面及轮辋采用线弹性材料, 采用阻尼弹簧模拟胎面。为了对轮胎充气进行真实的模拟, 在轮胎内部建立气囊模型^[8]。汽车轮胎胎压为 0.7 MPa, 阻尼系数为 600, 轴载 60 kN。轮胎胎面、轮辋参数见表 1。

收稿日期: 2016-06-29

作者简介: 顾彦梁(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为路面结构、道路稳定性。

表 1 轮胎结构参数表
Tab.1 Tire structure parameter list

轮胎结构	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	模量 E/MPa	泊松比 μ
胎面	6 880	2 610	0.3
轮辋	14 200	210 000	0.3

1.2 沥青路面结构模型的建立

路面结构各层考虑其粘弹性,采用 Drucker Prager 模型^[9]。路面宽度为 4.5 m、长 5 m、边坡坡度为 0.5、高 2.35 m。由《公路沥青路面设计规范》(JTGD50-2006),选取路面各层参数,见表 2。

表 2 路面材料参数
Tab.2 Material parameters of pavement

路面结构	材料类型	厚度 h/cm	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	模量 E/MPa	泊松比 μ	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚值 c/MPa
上面层	AC-13	4	2 500	850	0.35	60	0.35
中面层	AC-16	6	2 500	1 200	0.35	60	0.35
下面层	AC-25	10	2 500	1 000	0.35	60	0.35
基层	水泥稳定碎石	20	2 400	1 500	0.25	40	0.25
底基层	12%石灰土	35	2 200	550	0.25	35	0.2
路基	6%石灰土	160	1 900	275	0.35	22	0.055

1.3 轮胎及路面有限元模型的建立

采用 Hypermesh 建立路面结构及轮胎有限元模型。轮胎沿着 Z 方向行驶,垂直方向为 Y 方向。汽车轮胎采用壳单元,胎面与轮辋采用固-连接触。轮轴负载 60 kN,网格尺寸为 16 mm×16 mm。路面各结构层连续,采用 8 节点实体单元,上面层网格尺寸 40 mm×40 mm×40 mm;中面层网格尺寸 60 mm×60 mm×60 mm;下面层网格尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm;基层网格尺寸 200 mm×200 mm×200 mm;底基层网格尺寸 400 mm×400 mm×350 mm;路基网格尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm。路面结构四周采用无反射边界,路基底面采用固定边界。轮胎及路面有限元模型见图 1。

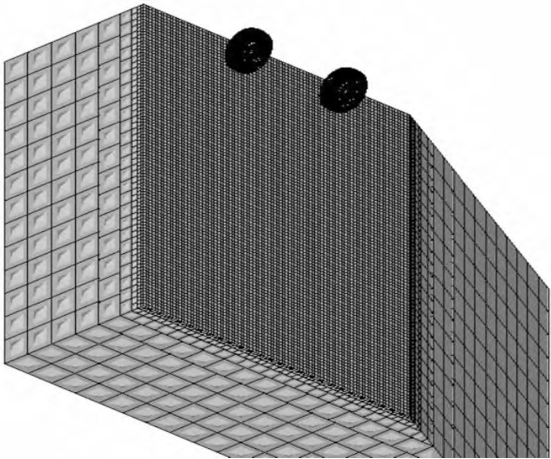


图 1 轮胎及路面结构有限元模型
Fig.1 Finite element model of tire and pavement structure

2 轮胎与路面接触摩擦模型及参数拟合

轮胎与路面接触产生的摩阻力影响行车的安全。汽车刹车时,轮胎受到摩阻力的影响,速度不断减小。此时,轮胎处于滑动状态。LS-DYNA 中接触摩擦公式为

$$\mu=FD+(FS-FD)\exp(-DC|v|)$$

式中: μ 为轮胎与路面摩擦系数; FD 为动摩擦因子; FS 为静摩擦因子; DC 为指数衰减系数; v 为轮胎与路面相对滑动速度, m/s。

轮胎与路面摩擦受到车速、路面状况及轮胎构造等因素有关^[10-12];因此,本文根据文献[13]中二级公路沥

青路面摩擦系数随速度变化实测值,采用规划求解对上述摩擦公式进行拟合,得到 FS 为 0.58; FD 为 0.33; DC 为 0.33。摩擦系数随速度变化公式为

$$\mu = 0.33 + 0.33 \exp(-0.33|v|)$$

拟合结果见图 2。

3 有限元计算结果及分析

刹车时,由于摩擦力的存在,速度不断变小。根据上面的摩擦公式,随着速度的变小,摩擦系数也不断变化。本文通过建立轮胎不同速度下刹车模型,得到垂直应力、层底拉应力、弯沉值随速度变化曲线,从而分析刹车时路面结构动力响应规律。

3.1 沥青路面面层刚度比变化对路面结构的影响

沥青路面受到汽车轮胎的直接作用,路面刚度变化可以改善路面抗变形能力,提高行车舒适度。选取轮胎驶过路面中心剖面时轮胎中点作为研究节点,研究轮胎以 100 km/h 沿着路面行驶时,路面弯沉的变化规律。选取中面层刚度为 1 200 MPa,上面层分别为 700, 850, 900, 1 100, 1 300, 1 500 MPa, 结果见图 3。

由图 3 可以看出,随着上面层与中面层刚度比的增加,路面弯沉不断减小。刚度比在 0.58~0.7 之间时,路面弯沉变化率为 8.1%;刚度比在 0.75~1.3 之间时,弯沉变化率为 4.2%。中面层弯沉值随着刚度比变化率为 1.1%。

当刚度比小于 0.7 时,上面层弯沉增加速率提高了 1 倍;因此,在路面结构设计时,上面层与中面层刚度比应不小于 0.7。本文选择刚度比在 0.7 时,路面结构的动力响应规律。

3.2 不同速度下刹车时路表垂直压应力随位移变化规律

选择刹车距为 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 m 轮胎中心点,研究各点垂直压应力在 40, 60, 80 km/h 变化规律,结果见图 4。

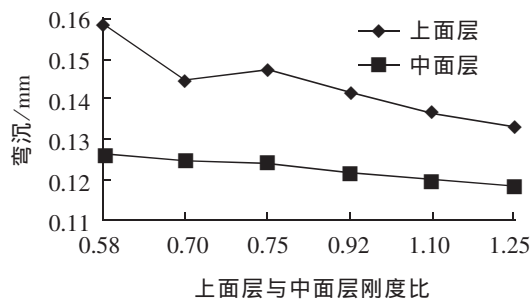


图 3 路面弯沉随路面刚度比变化曲线
Fig.3 Curve of pavement stiffness ratio

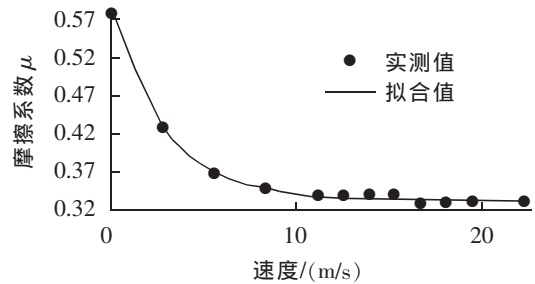


图 2 沥青路面摩擦系数随速度变化曲线
Fig.2 Curve of friction coefficient of asphalt pavement

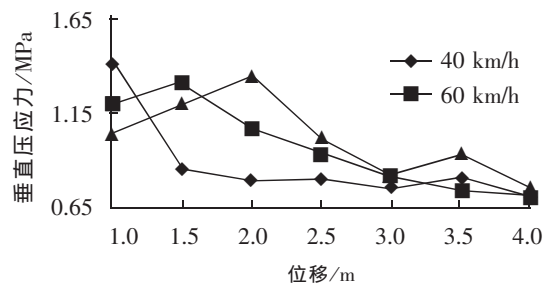


图 4 不同速度下路表面垂直压应力随位移变化曲线
Fig.4 Curve of vertical compressive stress of the road surface at different speeds

由图 4 可以看出:车速度为 40 km/h 时,随着刹车距的增加,路表面垂直应力不断减小;车速为 60, 80 km/h 时,路表面垂直应力随着刹车距的增加先变大后减小。

汽车轮胎开始刹车时,速度越大,路表面垂直应力越小。随着刹车距的增加,速度越大,路表面垂直应力先变大后减小,但整体呈现减小的趋势。这是因为开始刹车时,速度越大汽车轮胎与路面接触越不充分,路面受到的应力越小。随着刹车距增加,速度越小,轮胎变形幅度越大,使得应力减小速度较快;因此,汽车应避免超速行驶;在频繁刹车路段,应该限制车速。

3.3 刹车时路面弯沉值随速度变化规律

以汽车轮胎驶过路面中心剖面,轮胎中点作为研究节点。汽车轮胎以 40,60,80,100,120 km/h 在路面行驶,路面各层表面弯沉值变化规律结果见图 5。

从图 5 可以看出,汽车刹车时,路面面层、基层、底基层表面弯沉值随速度的增加而变大。在车速为 40~80 km/h 时,路面弯沉变化较快;80~120 km/h,路面弯沉增长速度变小。在相同的车速下,弯沉值随着深度的增加而减小。其中,底基层、路基弯沉值较小,仅为面层的 12.5%~30%。

由于上面层受到轮胎的直接作用,弯沉最大。由 3.1 随着刚度比增加,弯沉减小;因此在路面设计时,要保证上面层结构的刚度,提高行车的舒适性。

3.4 刹车时路面层底拉应力随速度变化规律

汽车轮胎以 40,60,80,100,120 km/h 在路面行驶,研究路面各层层底弯拉应力变化规律,结果见图 6。

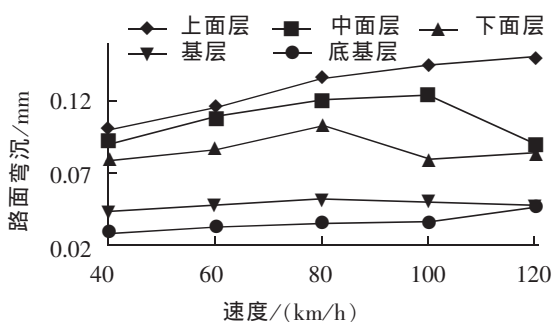


图 5 路面表面弯沉随速度变化曲线

Fig.5 Curve of surface deflection of pavement at different speeds

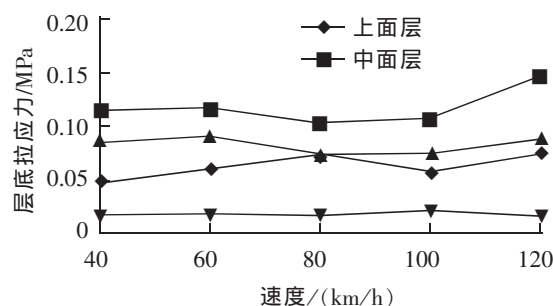


图 6 路面层底弯拉应力随速度变化曲线

Fig.6 Curve of the bending tensile stress at the bottom of pavement at different speeds

从图 6 可以看出,汽车刹车时,路面各层层底弯拉应力随着速度的增加而变大。在相同的车速下,中面层>下面层>上面层>基层。

由此可以看出,当汽车荷载在路面反复作用时,首先在中面层、下面层达到抗拉极限强度,形成裂缝,进而延伸到路面;因此在路面施工中,尤其在频繁刹车路段路面,应注意中面层、下面层材料级配、压实度以及采用改性沥青。

3.5 刹车时路面各层表面垂直应力随速度变化规律

汽车轮胎以 40,60,80,100,120 km/h 在路面行驶,研究路面各层表面垂直应力变化规律,结果见图 7。

由图 7 可以看出,汽车刹车时,路面各层垂直应力随着速度的增加而变大。在相同车速下,路面各层表面垂直应力随着深度的增加而减小。垂直应力主要作用在中面层及上面层并在中面层达到最大。下面层仅为其 30%,基层垂直应力仅为其 10%。因此,汽车荷载作用下,路面面层为主要的受力层。

3.6 刹车时应力作用深度随速度变化曲线

选取车速为 40,60,80 km/h 时,垂直应力随速度变化曲线结果见图 8。

由图 8 可以看出,同一车速下,路面深度为 0~0.05 m 时,垂直应力不断增加;路面深度为 0.05~0.4 m 时,垂直应力急剧减小。在深 0.4 m 处垂直应力仅为 0.04 MPa。刹车时,车速对路面结构内应力作用深度影响很小。应力作用深度为 0.4m,即基层底面。路面各层厚度变化及路面刚度改变时,作用深度变化规律值得进一步探讨。

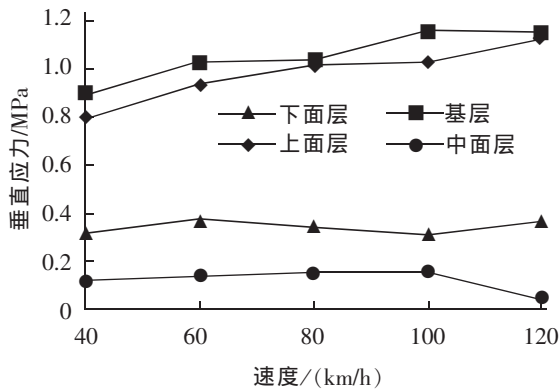


图 7 路面表面垂直应力随速度变化曲线

Fig.7 Curve of vertical stress of the pavement at different speeds

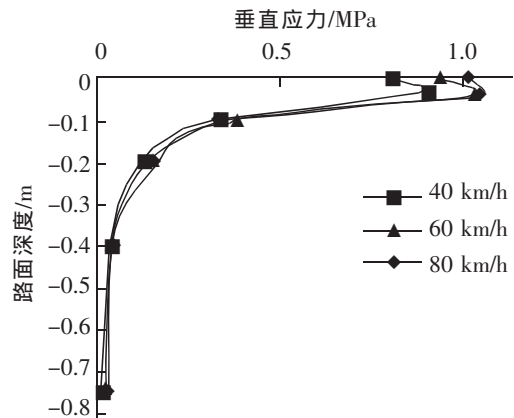


图 8 不同车速下垂直应力随深度变化曲线

Fig.8 Curves of vertical stress at different speeds

4 结论

通过 Hypermesh/LS-DYNA 建立路面结构、轮胎有限元模型,研究不同速度下刹车路面结构动力响应规律。研究表明:

- 1) 沥青路面面层是主要受力层。路面弯沉在上面层达到最大;中面层层底拉应力、垂直应力最大。路面应力作用深度受车速的影响较小;因此,在路面施工中,应注意中面层、下面层材料级配、压实度以及采用改性沥青。
- 2) 刹车时应力、弯沉随着速度增大而变大;因此,汽车在沥青路面行驶时,应该控制刹车速度。在高等级公路中,应设置紧急停车带,缓解紧急停车对路面的影响。
- 3) 面层刚度比增加,路面弯沉减小。在交叉口、收费站等路段应提高面层结构刚度比,提高路面抵抗车辙、拥包等变形能力。

参考文献:

- [1] 史春娟. 车辆-沥青路面系统耦合动力学研究[D]. 西安:长安大学,2012:1-10.
- [2] 杨树萍,鹿中山,程新春,等. 半刚性基层沥青路面病害的原因与防治[J]. 合肥工业大学学报,2002,25(5):748-752.
- [3] 路永捷. 重载汽车与路面相互作用动力学研究[D]. 北京:北京交通大学,2011:1-15.
- [4] 卢正,姚海林,胡智. 基于车辆-道路结构耦合振动的平整路面动力响应分析[J]. 中国公路学报,2013,35(1):232-238.
- [5] 偶昌宝. 沥青路面结构动力响应分析[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [6] 单景松,黄晓明,廖公云. 移动荷载下路面结构应力响应分析[J]. 公路交通科技,2007,24(1):10-13.
- [7] 李江,王晓涛,余胜军. 不同车速下沥青路面结构的动力响应[J]. 公路交通科技,2015,32(8):6-11.
- [8] 李皓玉,杨绍普,李韶华. 车、路相互作用下沥青路面动力学特性分析[J]. 振动与冲击,2009,28(4):86-89.
- [9] 吴中,陶帅. 高铁外流场对站台建筑物的影响[J]. 华东交通大学学报,2015,32(2):8-12.
- [10] 董泽蛟,刘美丽,郑好. 考虑横观各向同性特性的沥青路面动力学分析[J]. 中国公路学报,2012,25(5):18-23.
- [11] 胡朋,潘晓东. 不同状态下路面摩擦系数现场试验研究[J]. 公路,2011(2):20-24.
- [12] 和松,夏礼秀. 高速公路路面摩擦系数的测试与评价[J]. 公路交通科技,2002,19(1):8-11.
- [13] 秦浪潮. 路面摩擦系数的检测与评价方法的研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015:33-40.

Study on Dynamic Response of Asphalt Pavement Structure at Different Speeds

Gu Yanliang, Wu Zhong, Shen Caihua, Liu Quan

(School of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The finite element model of tire and pavement structure was established by Hypermesh/LS-DYNA, by which effects of the braking speed and the stiffness ratio of the upper layer and the middle surface layer on the dynamic response of the pavement structure were studied. Results show that the main effect of vehicle load on asphalt pavement surface layer is the horizontal force and vertical force in the process of braking. With the increase of the braking speed, the stress and deflection of the pavement structure also increased; with the increase of the stiffness ratio of the upper layer and the middle surface layer, the road surface deflection showed a downward tendency. So, in frequent braking sections it is advisable to improve surface layer stiffness ratio and control braking speed to reduce the load on the pavement damage.

Key words: pavement structure; dynamic response; brake; LS-DYNA; speed

(责任编辑 刘棉玲)