

轮胎胎面橡胶块与刚性路面 摩擦接触数值分析*

王吉忠 庄继德 李日春
(吉林工业大学) (青岛建筑工程学院)

摘 要 建立了轮胎胎面橡胶块与刚性路面摩擦接触非线性有限元分析模型,对轮胎胎面橡胶块与刚性路面相互作用时的变形特性和接触应力分布规律进行了数值分析,讨论了界面摩擦因数和橡胶块的厚度对接触应力的影响。

关键词 胎面橡胶块 刚性路面 摩擦接触 非线性有限元分析

车辆的支承、导向和操纵要通过轮胎与路面之间的相互作用才能实现。在轮胎与路面相互作用过程中,轮胎胎面与路面的接触状态决定了两者之间的载荷传递特性,并对车辆的乘坐和操纵特性、安全与效率,以及轮胎的磨损与寿命产生重要影响^[1,2]。因此,研究轮胎与路面相互作用过程中,胎面橡胶块的变形特性和接地行为,对了解轮胎的接地特性,对轮胎性能的评价和轮胎设计具有重要意义。

1 轮胎胎面橡胶块与刚性路面摩擦接触问题的特点

轮胎胎面橡胶块与刚性路面摩擦接触问题具有下列特点^[3,4]:

- 1) 胎面橡胶块变形较大,导致几何非线性;
- 2) 胎面橡胶复合物属超弹性材料,其本构关系是非线性的;
- 3) 橡胶具有不可压缩性;
- 4) 胎面橡胶块的变形受地面摩擦条件的限制,这种摩擦条件是非线性的。

2 有限元分析模型与边界条件

本文采用 ANSYS 程序(美国 ANSYS 公司开发的大型通用有限元分析程序)和以下各模型对轮胎胎面橡胶块与刚性路面摩擦接触问题进行数值分析。

2.1 材料模型

橡胶材料的不可压缩性用泊松比 $\nu = 0.49$ 近似表示,其非线性本构关系用门尼-雷福林(Mooney-Rivlin)应变能密度函数表示^[5],即

$$W = A(I_1 - 3) + B(J_2 - 3) + C(I_1 - 3)^2 + D(I_1 - 3)(J_2 - 3)$$

收稿日期: 1997-10-10 1998-05-10 修订

* 国家教委博士学科点专项科研基金资助项目(9518506)

王吉忠, 博士, 副教授, 长春市人民大街 142 号 吉林工业大学研究生部 94A 博, 130025

$$\begin{aligned}
 &+ E(J_2 - 3)^2 + F(J_1 - 3)^3 + G(J_1 - 3)^2(J_2 - 3) \\
 &+ H(J_1 - 3)(J_2 - 3)^2 + I(J_2 - 3)^3 + O 5K(J_3 - 1)^2 \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中 A, B, \dots, I —— 九参数三次门尼-雷福林关系常数, MPa; $J_1 = I_c III_c^{1/3}$, $J_2 = II_c III_c^{2/3}$, $J_3 = III_c^{1/2}$; I_c, II_c, III_c —— 右柯西-格林变形张量 C_{ij} 的不变量, $I_c = C_{ij}$, $II_c = O 5(I_c^2 - C_{ij}C_{ij})$, $III_c = \det C_{ij}$; K —— 体积模量, MPa, $K = 6(A + B)/(3(1 - 2O))$; O —— 泊松比。

柯西应力为

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{III_c}} f_{ik} S_{kl} f_{jl} \quad (2)$$

式中 $f_{ik} \cdot f_{jl}$ —— 相应方向上的橡胶材料的变形梯度; S_{kl} —— 第二克希霍夫应力张量, MPa。

2.2 接触模型

本文采用罚函数法和库仑摩擦模型计算胎面橡胶块与刚性路面之间的摩擦接触问题。罚函数法通过法向接触刚度强制接触相容, 法向力为

$$f_n = \begin{cases} K_n c & c < 0 \\ 0 & c > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 K_n —— 法向接触刚度, N/mm; c —— 根据接触节点相对于目标平面的位置确定的间隙值, mm。

对库仑摩擦, 切向力为

$$f_t = \begin{cases} K_t \eta & \text{粘着} \\ \mu f_n & \text{滑动} \end{cases} \quad (4)$$

式中 K_t —— 切向刚度, N/mm; η —— 接触节点相对于目标表面的弹性变形, mm; μ —— 滑动摩擦因数。

2.3 有限元模型及边界条件

本文建立了两种厚度的矩形胎面橡胶块(A: 40 mm × 20 mm × 20 mm, B: 40 mm × 20 mm × 10 mm)与刚性路面摩擦接触非线性有限元分析模型。其中胎面橡胶块和刚性路面分别用三维超弹性单元和三维实体单元模拟, 橡胶块与刚性路面之间的摩擦接触用三维接触单元模拟。两模型的节点总数分别为 736 和 528 个, 接地面中的节点数均为 104 个。

根据轮胎自由滚动和制动、驱动时的受力情况, 仅对两模型受垂直载荷作用和受垂直与切向载荷同时作用两种工况计算。每种工况两橡胶块受载相同, 并通过指定位移加载。第一工况橡胶块上表面节点 x 、 z 向(两切向)位移为零, y 向(垂向)位移约束到指定值。第二工况橡胶块上表面节点 z 向位移为零, y 向位移保持第一工况数值不变, x 向位移约束到指定值。模拟刚性路面的实体单元各节点固定约束。

3 计算结果及分析

3.1 在压缩载荷作用下, 胎面橡胶块的变形特性和接触应力分析

在法向受载和界面摩擦因数相同的条件下, 本文计算了橡胶块 A、B 的变形。计算结果

表明,受压缩载荷作用时,橡胶块的自由表面向外膨胀,在中间高度部位变形较大,在垂直棱边中部变形最大。界面摩擦因数为 0.6 时,橡胶块的压缩载荷—变形关系如图 1 所示。由图可见,橡胶块的压缩刚度随其变形的增加而略有增大,随其厚度的增加而降低,并且刚度的变化率大于厚度的变化率。

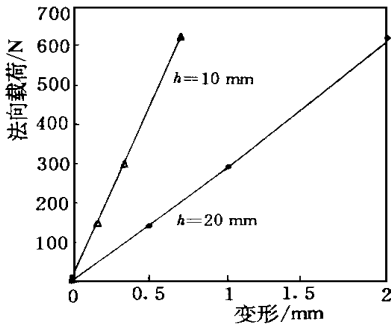


图 1 橡胶块的压缩载荷—变形关系

Fig 1 Relationship between normal load and deformation of the rubber block

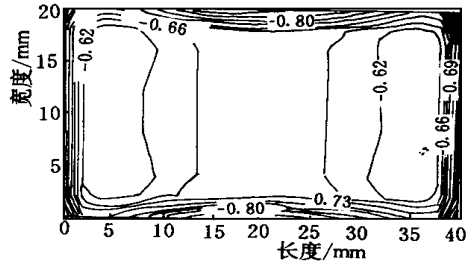


图 2 橡胶块 A 接触压力分布等值线 (MPa)

Fig 2 The contour of contact pressure distribution of rubber block A

本文计算了摩擦因数为 0.3, 0.5, 0.6, 0.9 时两种厚度橡胶块的接触应力。图 2 是摩擦因数为 0.3 时橡胶块 A 的接触压力分布等值线。受法向载荷作用时,橡胶块的接触压力为非均匀分布,并随摩擦因数和橡胶块的厚度而变化,在接触边界附近,应力有奇异现象。在同一厚度条件下,法向接触压力先随摩擦因数的增加而增大,当摩擦因数达到某一数值以后,接触压力不再变化,接地面处于粘着状态。在同一摩擦因数条件下,厚度较大的橡胶块在接地中心压力有极大值,离开中心压力逐渐降低后又缓慢增大,至边界附近压力急剧增大,在四个角点压力达到最大值;厚度较低的橡胶块在接地中心压力最高,离开中心压力降低,至边界附近压力又趋增大。

摩擦因数为 0.3 时,橡胶块 A 接地面切向应力分布等值线如图 3 所示。切向应力在接地中心为零,在边界附近奇异,在四个角点处有极大值。摩擦因数降低,切向应力由中心至边界为非单调变化,厚度低时变化复杂。摩擦因数增高,切向应力由中心至边界先是缓慢增加后又急剧增大。当摩擦因数超过某一数值以后,切向应力分布不再发生变化,接地面处于粘着状态。

3.2 在压缩和剪切载荷同时作用时,橡胶块的变形和接触应力分析

在压缩和剪切载荷同时作用下,橡胶块的剪切载荷—变形关系按线性规律变化,对同一厚度的橡胶块,切向刚度为一常数,厚度增加橡胶块的切向刚度减小,并且切向刚度的变化率大于厚度的变化率。

摩擦因数为 0.3 时,橡胶块 A 法向接触压力分布等值线如图 4 所示。在左边界法向压力为零,局部出现分离现象,自左至右压力逐渐增加,在右边界法向压力急剧增大出现奇异。摩擦因数增加,右边界应力奇异严重,并且前后边界压力局部增大。厚度降低,前后方向中间部位压力增高。

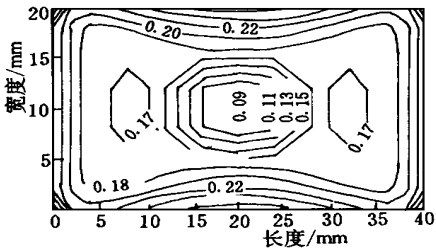


图 3 橡胶块 A 切向应力分布等值线 (MPa)

Fig 3 The contour of tangential stress distribution of rubber block A

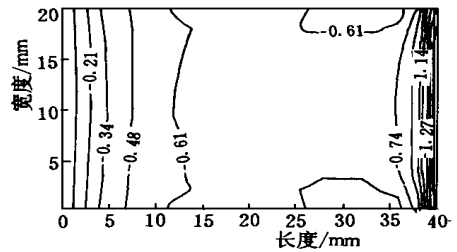
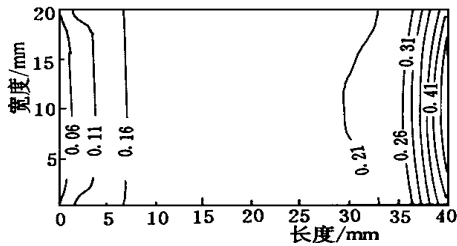


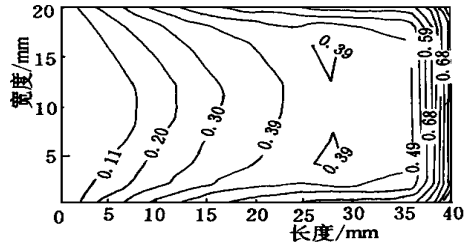
图 4 橡胶块 A 法向压力分布等值线 (MPa)

Fig 4 The contour of normal pressure distribution of rubber block A

摩擦因数为 0.3 和 0.6 时, 橡胶块 A 接地面切向应力分布等值线分别如图 5(a)、(b) 所示。切向应力在左边界处为零, 自左至右应力增加, 在右边界附近应力急剧增大出现奇异。摩擦因数增大, 右边界附近应力奇异严重, 并在两角点处出现最大值; 摩擦因数降低, 切向应力在右边界中部出现最大值。



(a) 摩擦因数为 0.3



(b) 摩擦因数为 0.6

图 5 橡胶块 A 切向应力分布等值线 (MPa)

Fig 5 The contour of tangential stress distribution of rubber block A

4 结 论

本文考虑几何、材料和边界条件的非线性以及橡胶的不可压缩性特点, 采用简化的矩形橡胶块模型对轮胎胎面橡胶块与刚性路面之间的摩擦接触问题进行了数值分析, 结果表明:

1) 橡胶块的压缩刚度随其变形的增加略有增大, 但剪切刚度与变形无关, 为一常数。橡胶块厚度不同, 其压缩和剪切刚度也不相同。厚度增加, 橡胶块的压缩和剪切刚度减小, 并且压缩和剪切刚度的变化率均大于厚度的变化率。

2) 受压缩载荷作用时, 橡胶块的接触应力为非均匀分布, 并随界面摩擦因数和橡胶块的厚度而变化。橡胶块的接触应力在边界附近存在奇异现象, 摩擦因数增加奇异程度严重。

3) 受压缩和剪切载荷同时作用时, 橡胶块的接触应力沿剪切载荷作用方向逐渐增加, 当剪切载荷超过某一定值时, 前侧边界出现分离现象, 后侧边界的接触应力急剧升高出现奇异。

参 考 文 献

- 1 Akasaka T et al A nalysis of the contact deformation of tread blocks Tire Science and Technology, TSTCA, 1992, 20(4): 230~ 253
- 2 酒井秀男 ゴムとタイヤの接触圧力分布の測定と画像処理に関する研究 日本ゴム協会志, 1994, 67(5): 79~ 88
- 3 Tabaddor F. Finite element analysis of a rubber block in friction contact Computers&Structures, 1989, 32(3/4): 549~ 562
- 4 Gall R et al On the incorporation of friction effects in the tire/ground contact area Tire Science and Technology, TSTCA, 1993, 21(1): 2~ 22
- 5 Lindtner E K, Tseng N T. Finite element analysis of tread pattern model Presented at the Eleventh Annual Meeting of Tire Society and Conference on Tire Science and Technology, 1992 1~ 5

Numerical Analysis for Frictional Contact of Tread Rubber-Block With Rigid Road Surface

Wang Jizhong Zhuang Jide

Li Richun

(Jilin University of Technology, Changchun) (Qingdao Architectural and Engineering Institute)

Abstract The non-linear finite element method model for frictional contact analysis of tread rubber-block with rigid road surface is established. The deformation and contact stresses generated while the tread block interacting with the road surface were calculated. The effects of the frictional coefficient and the height of the rubber block on the contact stresses were analyzed.

Key words tyre tread rubber block, rigid road surface, frictional contact, non-linear finite element analysis