

基于胎面咬合与压力胶片技术的路面抗滑机理研究

李智, 李东晟, 刘勇, 姚泽瑞

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要:为了给路面抗滑性能的评价提供参考,基于压力胶片技术高精度测量压强的特性,探究胎面咬合在抗滑性能中的作用,设计进行了制动条件下轮胎在路面主骨料颗粒上滚动的动态简化模拟试验。用钢珠钢板简化体系模拟路面主骨料,在不同的荷载条件下,用压力胶片测量轮胎和简化路面之间的压强。分析试验数据表明:并非随着骨料颗粒粒径增大,轮胎与路面的咬合效果越好,随着主骨料颗粒增大,应力集中的峰值减小,同时应力集中分布度指标的值也降低。试验表明:胎面咬合力的阻力作用在制动过程中影响很大。同时混合料中的大颗粒在抗滑性能上的表现为增加了咬合深度,但是在力学上的咬合效果不是更加显著,相比于大颗粒,4.75~9.5 mm 骨料与轮胎有更好的咬合效果。此外,试验数据阐明了轮胎与路面制动接触过程中,主骨料颗粒先与轮胎接触的一侧对轮胎存在拉扯作用的接触力学规律。

关键词: 抗滑; 压力胶片; 胎一面咬合; 接触力学; 应力集中

目前路面抗滑性能的主要评价方法包括摆值、横向力系数、动态摩擦系数、构造深度、附着系数、分形维数和粗糙度等,也有研究团队进行了基于复杂路面纹理的接触应力集中的研究,在统计学上分析应力集中的分布来刻画路面抗滑性能的衰减。这些评价指标对于路面抗滑性能的评价停留在宏观、模糊的模拟试验的尺度,在指导工程实际的过程中表现为不能合理、严谨地通过施工工艺或者控制指标来提升抗滑性能,无法满足目前国家公路行业不断发展的进程和推进新时代公路建设的客观需要。现行的评价方法对于路面抗滑性能的描述没有结合轮胎与路面的接触力学特性,都是基于经验和模拟简化试验,无法表现抗滑构造和级配对于抗滑性能的力学影响,大部分轮胎行业研究、虚拟力学研究都将路面简化为光滑的刚性面,忽略了路面的纹理结构,导致在道路结构设计环节,不能严格控制路面的抗滑性能,只通过增大级配加大接触面积的手段来提高路面的抗滑性能,但道路投入使用过程中又会导致水损害问题愈发严重,所以研究能切实评价路面抗滑性能指标的工作亟待推进。级配与路面抗滑性能联系紧密,目前业内普遍认为集料越粗,抗滑性能越好,但这种普遍的认识是否能够经过试验的验证。该文通过“咬合”的角度来验证不同粒径集料的实际抗滑性能,以此来指导抗滑级配设计。

路面抗滑性能是轮胎和路面二者综合作用的结果,双方的材料种类、接触形式、车辆的行驶速度都将会最终影响路面的抗滑性能,该文着重研究轮胎和路面二者接触的咬合作用,研究何种粒径的骨料与轮胎之间有更好的接触咬合效果。轮胎与路面的接触过程中,由于路面纹理的不规律性以及轮胎作为超弹性材料的复杂本构关系,接触力学模型十分复杂,难以刻画。加入对路面耐久性能的考虑,路面主骨料在道路投入使用过程中,存在磨损,导致颗粒的棱角逐渐被磨光,因此研究用不同直径的钢珠模拟路面主骨料的抗滑作用,为切入轮胎路面接触力学模型的研究,设计简化试验,将不同直径的钢珠粘在钢板上模拟路面主骨料,在准动态条件下,用高精度压力胶片测量轮胎滚动作用在钢珠上的压强值,运用 Matlab 工具分析压力胶片的试验数据,总结得出轮胎与路面主骨料颗粒的部分接触力学模型。

1 轮胎路面接触力学特性

目前对于轮胎与路面的接触作用描述,基于如下假设:轮胎与路面的接触作用由摩擦力(F_a)、咬合力(F_b)以及黏滞力(F)三部分组成。摩擦力(F_a)为轮胎与主骨料颗粒破碎面之间,轮胎表面和主骨料颗粒

收稿日期:2020-05-16(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378223);广东省交通运输厅科技项目(编号:2016-02-002)

作者简介:李智,男,博士,副教授。E-mail:lizhi@scut.edu.cn

被磨损后的曲面之间的接触摩擦力;咬合力(F_h)为主骨料颗粒本身的凸起与轮胎之间的咬合力以及颗粒的棱角与轮胎之间的咬合力;黏附力(F)为在道路使用初期沥青胶浆和细集料与轮胎接触时产生的分子作用力。由于黏附力的影响对于宏观力学数值的影响较小,因此该文忽略分子作用力的影响。而为了总结细化具体的接触模型,将重点放在咬合力(F_h),主要研究主骨料颗粒的受力特征,方法是分析轮胎与主骨料的接触压力值以及同样起制动作用的压力在水平方向上的分力大小。

轮胎与路面接触过程中,接触界面上的应力分布因路面纹理和轮胎类型呈现不均匀分布。目前在仿真平台上的分析轮胎与路面接触的研究表明:基于不同的行驶状态,路面结构的受力形式和应力峰值点等表征都不相同。朱晟泽通过 CT 扫描技术建立了具有宏观纹理的沥青路面模型,与轮胎模型拟合进行了静压仿真试验,结果表明:随着胎压等参数的变化,路面接触应力集中的位置和接触应力的峰值都会相应变化。

路面的纹理结构极其复杂,要整体分析与轮胎拟合的接触力学模型难度较大。因此将重点放在路面上的凸起大颗粒上,分析这些对抗滑性能有主要贡献的颗粒在轮载作用下的受力情况,推进总结接触力学模型。

汽车在制动过程中,轮胎外缘线速度小于车辆的行驶速度,此时轮胎必然受到路面的制动力作用,在车轮中心向前位移过程中,轮胎发生变形,主骨料颗粒受力不均匀,车轮前方的胎体会受到拉扯阻滞作用(图 1)。这种拉扯作用主要是靠颗粒与轮胎之间的摩擦力和颗粒先接触到轮胎的“前峰”所提供的水平阻力提供,也就是咬合力(F_h)在水平方向上的分力,下文通过试验验证这一结论。

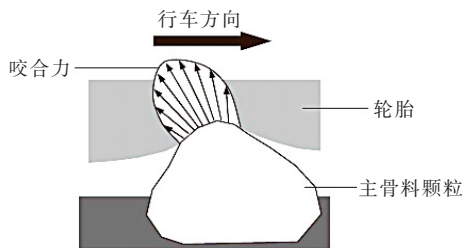


图 1 主骨料颗粒拉扯作用示意图

2 压力胶片测量技术简介

Prescale 压力胶片测量技术是一种可以测量压强数值的测力装置(图 2),由两层聚酯片组成,其中一片

涂有承受压力后便会破裂的微囊剂,另一片则涂有可以和微囊剂发生显色反应的化学试剂,所以受压区域的压力胶片呈现红色,其颜色的浓度随着压力强度的变化而变化,可以检测出压力的不均匀分布。将受压完毕后染色的胶片放入专用扫描仪中扫描后,可用压力胶片的数字分析软件 FPD-8010E 进行量化分析,通过不同的颜色深度可以区别出不同的受压强度,从而方便分析试验数据。

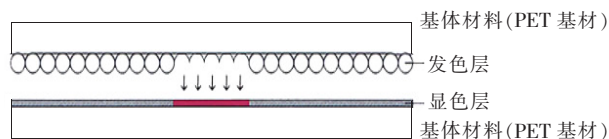


图 2 压力胶片结构

压力胶片支持静态连续受压和动态瞬时受压两种测力形式,在 FPD-8010E 软件中也有对应的两种分析模式。此处将用压力胶片的动态压力测量功能,测量轮胎和简化路面颗粒接触滚动状态下的压力分布,从而总结出二者之间的接触力学规律。

由于研究期望获得不同粒径骨料的受压高峰值的规律,所以选用大量程 2.5~10 MPa 的压力胶片进行试验。

3 试验方案设计与试验过程

3.1 试验设计

试验主要目的是研究颗粒与轮胎接触过程中的接触力学模型,为简化分析,采用由钢珠钢板制作的简易路面模型进行试验,通过变化钢珠直径来模拟粒径范围的骨料颗粒,在相同荷载条件下观察不同大小的颗粒受力状态的不同。荷载条件采用真实小型客车进行碾压试验,总结应力集中规律。由于真车荷载对压力胶片的量程要求过大,为得到不同颗粒应力峰值的分布规律,减小荷载使用人力自行车进行试验。在得到压强数据后,取钢珠最高点在车轮移动方向上的单线压强数值进行分析。

3.2 简化路面模型

为合理简化路面模型,并作对照试验,采用钢板和钢珠拟合的试验器材(图 3),材料刚度大,在压力作用下的变形可忽略不计。采用钢珠直径为 7、9、13 mm,不同直径的钢珠代表不同粒径档位的主骨料,小钢珠代表小骨料颗粒和未受到磨损的大颗粒的棱角,大钢珠则代表大骨料以及受到磨损以后的大骨料颗粒。

钢珠和钢板之间用高强度丙烯酸胶黏连,这种胶

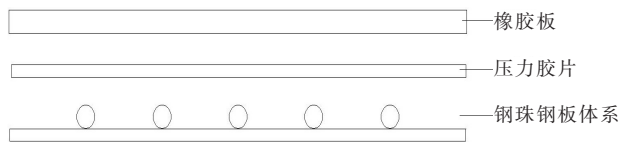


图 3 钢珠钢板测压模型

在 100 ℃ 以下不发生变形,不具备热塑性,因此可忽略黏结剂造成的压强值测定误差。

在试验过程中,为了抵消轮胎纹理对压力测定值的影响,受压时在钢珠钢板上铺压力胶片后,在整个体系上黏接橡胶板,橡胶板材料采用邵氏硬度为 65 的硬质橡胶材料,以此方法来模拟光面轮胎的碾压,同时用黏结剂固定以保证橡胶板在车轮荷载下不产生滑移。

3.3 试验过程

3.3.1 小客车荷载试验

试验采用普通小型客车,胎压为 0.4 MPa,实测前轮轮载为 7.1 kN。为研究制动过程中的压力规律,故用从动轮前轮进行试验,减弱轮胎自身转矩的影响。压力胶片型号选用 2.5~10 MPa 的大量程压力胶片,让从动轮以缓慢匀速的起步速度压过钢珠钢板测压模型。

由于轮胎本身的特性,对于路面的作用是不均匀的,在胎肩处会存在明显的应力集中,因此在真车荷载过程中,钢板上的钢珠垂直于车轮滚动方向横向排布 5 颗,钢珠中心间隔为 3 cm,并保证其完全排布在同一直线上,保证每次试验钢珠受压位置都在轮胎的相同位置。压力胶片在力的作用下会产生变形,从而得到整个轮胎与颗粒接触表面上的应力,该应力在行车方向上存在水平分力,可着重分析。在扫描得到压力胶片数据后,取上文所述每一颗钢珠最高点在车轮移动方向上的单线压强数值的平均值来进行试验分析。

3.3.2 小荷载试验

由于真实荷载较大,用压力胶片无法度量其最大值,故用真实车辆荷载分析不同直径钢珠的应力集中,而用减小的荷载值进行轮载试验,获得不同直径钢珠受压的压强最大值数据进行比较。试验用自行车实测单轮轮载为 94 N,同样使用橡胶板弱化轮胎纹理的影响,由于自行车轮宽度小,故用单个钢珠进行荷载,将 5 次荷载试验的钢珠中心单线压强数值取平均值进行分析。

4 试验结果及数据分析

4.1 小客车荷载试验

4.1.1 压强分析

在真车荷载条件下,7、9、13 mm 直径的钢珠在车

轮行驶方向上,整个滚动过程中的 5 颗钢珠的最高点所在的线上最大压强平均值如图 4 所示。

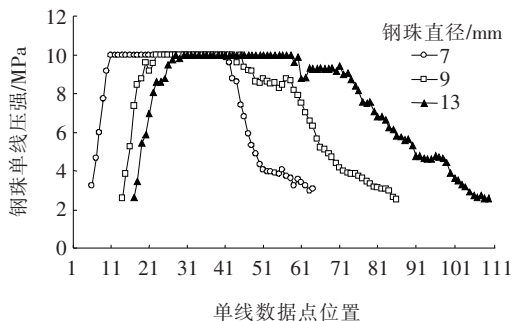


图 4 不同直径钢珠小客车荷载单线压强图

由图 4 可知:① 随着钢珠直径增大,大于 2.5 MPa 的受压范围增大,即大尺寸的钢珠有着更大的咬合范围;② 钢珠最高点的数据点位置为 50,观察钢珠中点上的受力值可知,虽然最大荷载值因为量程不足无法测得,但是可以明确看出,整个滚动过程中的最大压强值并不是出现在钢珠的最高点上,即钢珠突出的最高点并不是压强值最大的地方,与静载试验不同,受力的最大值位置出现了偏移,压力的最大值出现在钢珠颗粒先与车轮接触的一侧。表明车轮在制动状态下与突起颗粒的接触过程中,先接触的一侧压力值更大,考虑轮胎的变形特性,说明确实存在突起颗粒前峰对轮胎的拉扯作用。

4.1.2 咬合数据分析

(1) 试验数据去除了压力胶片量程范围之外的点,即去除了小于 2.5 MPa 和大于 10 MPa 的数据。压力胶片的扫描精度为每间隔 0.125 mm 取一个数据点,因此在得知大于 2.5 MPa 的数据点个数后,可以用 0.125 mm 乘以点的个数,得到钢珠最高点所在的线在轮胎滚动方向上的受力最大值大于 2.5 MPa 的圆弧长度。经过几何换算(图 5),由圆弧长度即可算得在滚动过程中轮胎与钢珠咬合力达到 2.5 MPa 以上区域的咬合深度。这里提出咬合比例的概念,即咬合深度与钢珠半径大小的比值,用咬合比例指标来评价和比较各尺寸钢珠的咬合效果。计算结果见图 6。

图 6 表明:随着钢珠直径增大,咬合比例不断减小。说明在相同荷载条件下,大颗粒骨料不一定就有更好的咬合效果,7 mm 的钢珠代表的 4.75~9.5 mm 级配范围内的骨料,相对具有更好的咬合效果。

(2) 在分析咬合效果的过程中,使用接触应力集中度的概念:

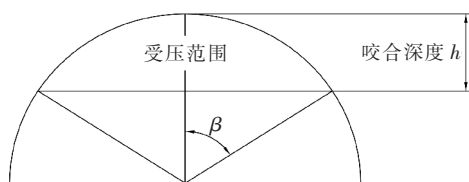


图 5 几何计算示意图

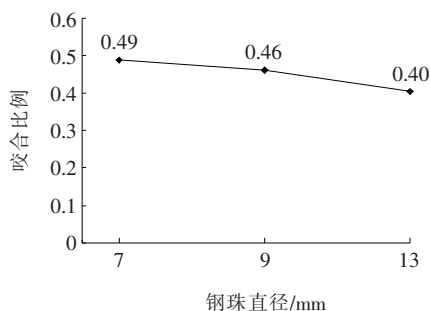


图 6 不同直径钢珠咬合比例计算结果

$$S = \frac{\int_a f(x, y) dx dy}{\int_A f(x, y) dx dy} \quad (1)$$

式中: S 为应力分布集中度(%); a 为应力集中区域, 此处采用(2.5, 10)MPa 的应力区间计算应力集中; A 为轮胎与路面的有效接触区域; $f(x, y)$ 为胎/路界面的单点接触应力(MPa)。

按式(1)可以计算出 3 种直径钢珠在上文应力区间中的应力分布集中度(图 7)。

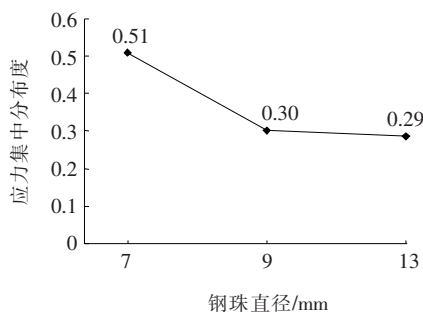


图 7 应力集中分布度

由图 7 可知:虽然大颗粒的骨料有着更大的咬合深度,但是实际应力分布度指标却随着颗粒增大而减小,说明小颗粒骨料应力集中的实际力学效能要优于大颗粒,也可以说磨损前具有棱角的大颗粒骨料相比磨损后的大颗粒骨料,有更好的咬合性能。

4.2 小荷载试验

4.2.1 压强分析

在其他因素不变的情况下,将真车荷载减小为人

力自行车荷载,对单个钢珠进行压力胶片试验,试验结果如图 8 所示。

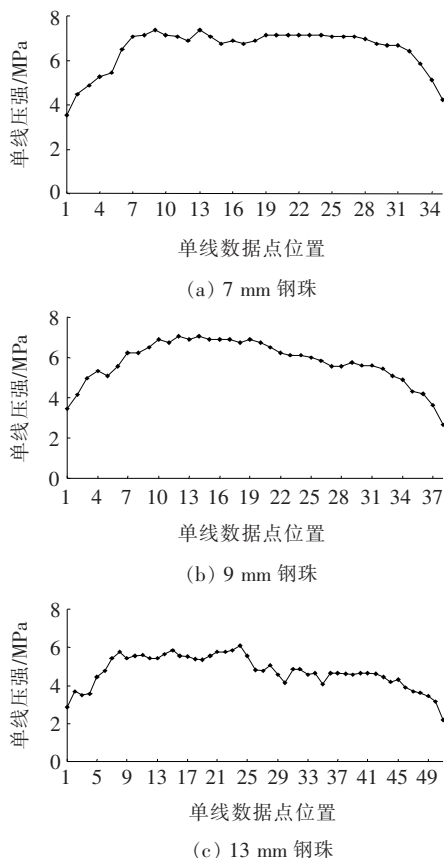


图 8 不同直径钢珠小荷载单线压强图

由图 8 可知:① 随着钢珠直径增大,小荷载试验压强峰值逐渐减小,说明小颗粒或者未经磨耗的大颗粒棱角具有更大的咬合力;② 图中钢珠的最高点位置为第 25 个像素点,可知应力峰值的出现位置与真车荷载试验一样都出现在钢珠与轮胎先接触的一侧,这进一步解释了轮胎与突出骨料制动接触下的拉扯作用。

4.2.2 水平力分析

已知钢珠与轮胎接触的压强数值之后,由于钢珠是圆球形,便于计算,在已知最高点坐标的前提下,通过推算压力胶片数据点的个数,算得每个数据点在钢珠上的位置,从而可以知道每个数据点与钢珠球心的连线与垂直方向的夹角。在夹角已知的情况下,由于压力胶片测量的压力数值垂直于接触面,因此可用三角函数计算出压力的水平分力值(用压强数值代替微分后的钢珠单线上的压力数值),结果见图 9。

图 9 中,正值为逆向车轮行进方向,负值为与车轮行进方向同向,同向的力在这里对于制动效果没有贡献作用,不做讨论。与车轮行进方向反向水平分力起

到了制动的作用,对路面的抗滑性能有所贡献。由图 9 可知:水平分力的数值约为 2 MPa,约占相同直径钢珠总压力值的 30%,而如果在全滑动条件下,在轮胎与骨料之间有压力的前提下二者发生滑动摩擦,在雨雪天轮胎与路面之间摩擦系数为 0.22~0.29,在这种情况下水平分力的大小和主骨料颗粒上的滑动摩擦力有同等量级。这说明在制动效果上咬合力水平分力对制动的作用也相当重要。

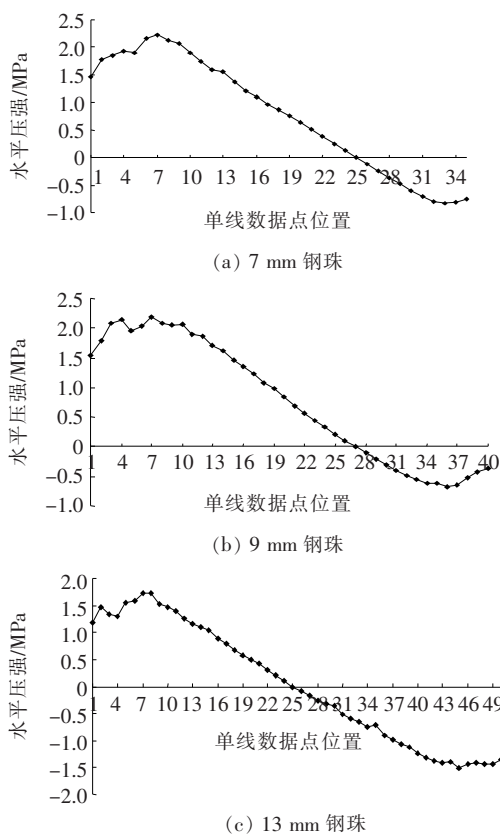


图 9 水平分力计算结果

5 结论

通过真车荷载试验和小荷载试验,用高精度压力胶片测量了以钢珠简化后的路面突起骨料在轮胎制动滚动荷载作用下的压强数值。分析了不同粒径骨料的咬合效果,为轮胎与路面抗滑作用机理的理论研究提供了试验依据,得出如下结论:

(1) 在制动阻滞力中,轮胎与主骨料颗粒表面的摩擦力和在咬合作用下颗粒对轮胎作用力的水平分力共同参与制动过程,二者对制动效果都有很大影响。说明胎面咬合力是重要的路面抗滑制动影响因素。

(2) 轮胎与路面制动接触过程中,路面突出颗粒

先与轮胎接触的一侧在整个受力过程中承受最大的压力,甚至大于突出颗粒的最高点,说明在制动过程中颗粒造成了轮胎变形,且先接触的一侧对轮胎存在拉扯作用的理论是合理的。

(3) 随着路面沥青混合料主颗粒的增大,轮胎与路面的咬合范围增大,但咬合比例(咬合深度占骨料粒径的比例)以及集中度指标逐渐减小,且小荷载试验中应力的峰值也随着粒径增大而减小,即骨料颗粒粒径增大虽然能明显增加接触面积与咬合深度,但基于接触力学的咬合效果并不是粒径越大越好,相对地 4.75~9.5 mm 的骨料颗粒与轮胎有更好的咬合效果。

(4) 试验中小钢珠代表小粒径骨料的同时,也代表着大颗粒骨料在磨耗前的棱角结构。试验表明,未经磨耗的路面突出颗粒的棱角结构咬合效果必然优于被磨耗后的颗粒。

参考文献:

- [1] 朱洪洲,廖亦源. 沥青路面抗滑性能研究现状[J]. 公路, 2018(1).
- [2] 童申家,谢祥兵,赵大勇. 沥青路面纹理分布的分形描述及抗滑性能评价[J]. 中国公路学报, 2016(2).
- [3] 闫梦华,何欢,周围,等. 水环境下常用沥青路面的摩擦试验研究[J]. 中外公路, 2018(3).
- [4] 王端宜,王刚,李智,等. 基于压力胶片技术的沥青混合料抗滑耐久性评价[J]. 中国公路学报, 2017(9).
- [5] 李智,苏冠宇. 基于搓揉磨耗试验机的沥青路面宏观轮廓试验研究[J]. 中外公路, 2018(6).
- [6] Chen B, Zhang X, Yu J et al. Impact of Contact Stress Distribution on Skid Resistance of Asphalt Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 330-339.
- [7] 董城,周轮,陈丽萍,等. 基于不同行驶状态下轮胎一路面接触应力响应研究[J]. 公路工程, 2018(6).
- [8] 朱晨泽. 基于路面宏观纹理的轮胎抗滑行为数值模拟研究[D]. 东南大学博士学位论文, 2017.
- [9] 薛矫智. 关于汽车车轮与地面接触状态的分析[J]. 交通标准化, 2008(5).
- [10] 张淑文. 基于界面接触特性的多尺度沥青路面抗滑性能评价及应用研究[D]. 华南理工大学博士学位论文, 2015.
- [11] 谭利,易文,何贤锋,等. 防滑降噪沥青路面施工工艺及质量控制[J]. 中外公路, 2017(2).
- [12] 王强,齐晓杰,王云龙,等. 车辆轮胎冰雪路面摩擦特性与橡胶材料物理力学性能的相关性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018(4).