

文章编号: 1001-4888(2023)04-0467-06

混凝土路面摩擦特性实验及数值计算研究*

喇世仁¹, 苏西洋², 张兴义²

(1. 青海民族大学 土木与交通工程学院, 青海西宁 810007;

2. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 针对混凝土路面摩擦特性的测试需要, 本文自行搭建不同路况混凝土路面摩擦特性测试装置, 利用该装置对影响混凝土路面摩擦特性的关键因素如温度、粗糙度及砂粒粒径等进行实验分析, 结果表明随着温度的升高, 摩擦力逐渐增大, 砂粒的粒径大小和粗糙度对混凝土路面摩擦性能影响显著。通过改进的弹簧-滑块模型对混凝土路面摩擦特性进行数值计算, 计算结果与实验结果相吻合; 对模型中影响混凝土摩擦的因素如模量和粗糙度进行研究, 结果表明材料表面粗糙度及模量的改变会使混凝土路面的摩擦力曲线出现明显的黏滑效应。

关键词: 混凝土路面; 不同温度; 表面粗糙度; 弹簧滑块模型

中图分类号: O348.9

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-221

0 引言

近年来, 随着车辆打滑而引起的交通事故日益增多, 轮胎-路面接触特性引起了研究人员的高度关注。轮胎作为车辆与路面之间的接触体, 决定着车辆行驶的稳定性、舒适性和安全性, 而轮胎与路面之间的抗滑性能是保证行车安全的重要指标之一。从 20 世纪 30 年代至今, 对轮胎力学的研究已有 90 多年, 研究人员通过分析轮胎-路面之间的动力响应, 对实验数据进行回归分析从而得到经验模型^[1-3]。部分学者基于材料界面参数与轮胎力学特征之间的函数关系建立理论模型^[4-7], 认为路面与橡胶之间的摩擦力可以归结为黏附力和滞后变形的综合影响。郭孔辉^[8]对轮胎稳态半经验侧偏模型进行了修正, 根据刷子模型和试验测试数据提出了一种半经验模型, 该模型能够对复合工况、不同路面和不同速度下的轮胎特性进行准确预测。杨军等^[9]通过引入含静、动摩擦因数的附着系数作为抗滑指标, 利用数值方法模拟车辆在潮湿路面上高速行驶, 发现轮胎与路面间的附着系数随车速提高而下降, 随轮胎荷载增加而增加, 随轮胎胎压的减小而增加。路表抗滑性能主要体现为轮胎与路面之间的接触特性, 研究复杂路况轮胎-混凝土路面的摩擦性能对混凝土路面的防护和交通安全以及工程应用的设计计算是至关重要的, 因此, 本文自行搭建混凝土路面摩擦特性测试装置, 采用该装置对复杂工况下混凝土路面摩擦特性进行测试, 并通过改进的弹簧-滑块模型对混凝土路面摩擦特性进行数值计算。

1 实验装置

针对不同路况轮胎-混凝土路面摩擦特性的测试需要, 自行搭建了高精度摩擦测试装置(图 1(a)), 该装置包括材料试验机(长春机械科学研究院研制的 DNS10)、高精度应变采集仪、牵引线、定滑轮、配重块、橡胶及混凝土等, 其中滑块与高精度传感器采用高弹性的牵引线进行连接, 以此来消除牵引线变

* 收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2022-10-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(11872196); 青海民族大学高层次人才(博士)项目(2021XJG14)

通信作者: 喇世仁(1991-), 男, 博士, 讲师。主要研究领域: 实验力学。Email: lashr16@lzu.edu.cn

形对测试数据的影响。本装置通过高精度传感器采集轮胎与混凝土路面相关滑动产生的电压信号,然后通过转换将电压信号转化为摩擦力信号。在应变传感器下端悬挂不同质量的标准砝码得到电压值,并找到电压值和配重块的对应关系来实现应变采集仪的标定,图 1(b)所示为配重块相对应的电压值,由图可见该电压值与力值表现出很好的线性关系,说明上述装置满足材料混凝土路面摩擦行为的测试需求。

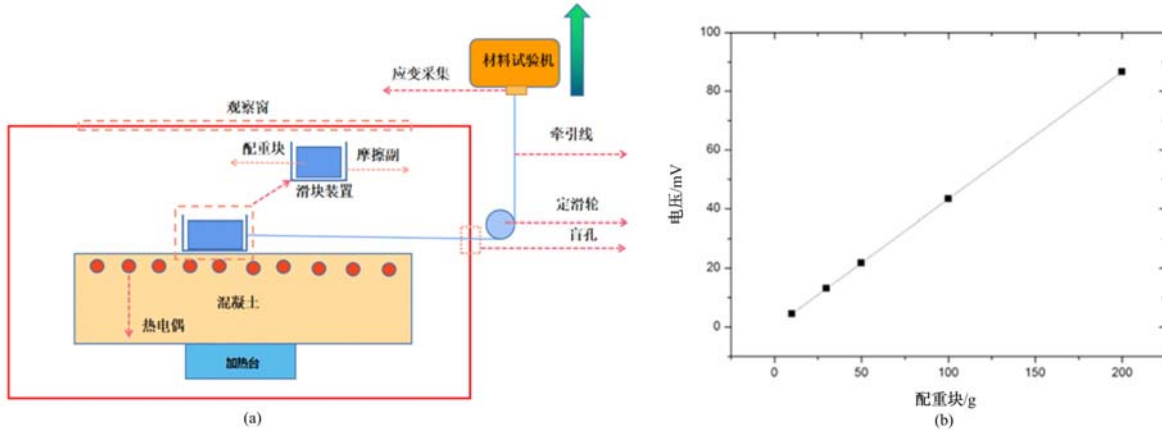


图 1 (a)温度变化混凝土材料摩擦性能测试装置;(b)电压值随配重块的变化曲线

Fig.1 (a) temperature change concrete material friction performance testing device;

(b) Curve of the voltage value varies with the weight of the counterweight

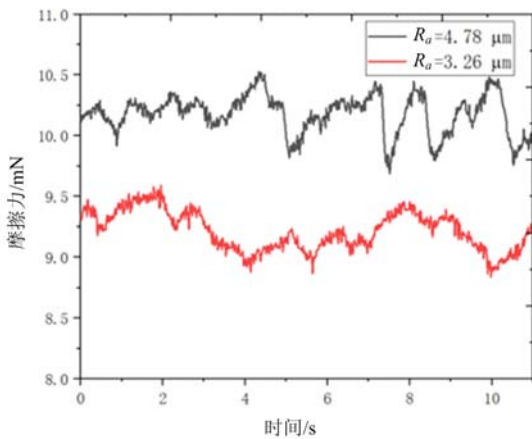


图 2 不同粗糙度混凝土路面
摩擦力随时间变化曲线

Fig.2 Time varying curve of friction force of
concrete pavement with different roughness

2 实验结果与讨论

2.1 粗糙度对混凝土路面摩擦性能的影响

本文通过砂纸打磨混凝土表面来模拟不同的粗糙路面,采用 2000 目砂纸打磨制备过程中产生的硬颗粒,并采用 5000 目或 7000 目砂纸打磨混凝土表面。采用自行搭建的装置对粗糙度 R_a 值为 $4.78\mu\text{m}$ 、 $3.26\mu\text{m}$ 的混凝土表面进行测试,其中相对滑动速率为 $5\text{mm}/\text{min}$,结果表明随着表面粗糙度增大,其摩擦力也随之增大;当表面粗糙度 R_a 为 $4.78\mu\text{m}$ 时,混凝土材料摩擦力为 10.15mN ;当表面粗糙度 R_a 为 $3.26\mu\text{m}$ 时,混凝土材料的摩擦力为 9.22mN ,如图 2 所示。由此可见,随着混凝土路面的粗糙度增大,其摩擦力的振动幅值也逐渐增大,具有显著的黏滑特性。

2.2 砂粒对混凝土路面摩擦性能的影响

砂粒路面对轮胎-混凝土的摩擦行为影响复杂,因此本文采用网筛的方法获得粒径 d 分别为 4.75mm 和 9.5mm 的砂粒,将 2 种砂粒均匀地铺设在混凝土路面。采用自行搭建的测试装置对 2 种粒径的路面进行测试,其中相对滑动速率为 $5\text{mm}/\text{min}$,不同粒径混凝土路面摩擦力随时间的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知,粒径较小的路面静摩擦力明显大于动摩擦力,平均动摩擦力为 2.8mN ,并且有黏滑现象出现,其中最大的黏滞力为 3.4mN ,最小的滑移力为 2.4mN 。而粒径较大的路面其平均摩擦力为 2.6mN ,同样伴有明显的黏滑特性,其中最大的黏滞力为 4.7mN ,最小的滑移力为 3.4mN 。对比不同粒径摩擦力曲线(图 3)发现,粒径较小的路面其滑动摩擦力的值明显较高,并且黏滑现象更为显著。宏观表面光滑的路面,微观则是由大量的微凸体构成的,轮胎和混凝土相对滑动过程中砂粒的粒径越小,

摩擦力的黏滞力越大,因此静摩擦力明显大于动摩擦力,而粒径较大时砂粒伴随着轮胎-混凝土摩擦的整个过程,并伴随有显著的黏滑现象,这与此前的研究结果相一致^[10-11]。

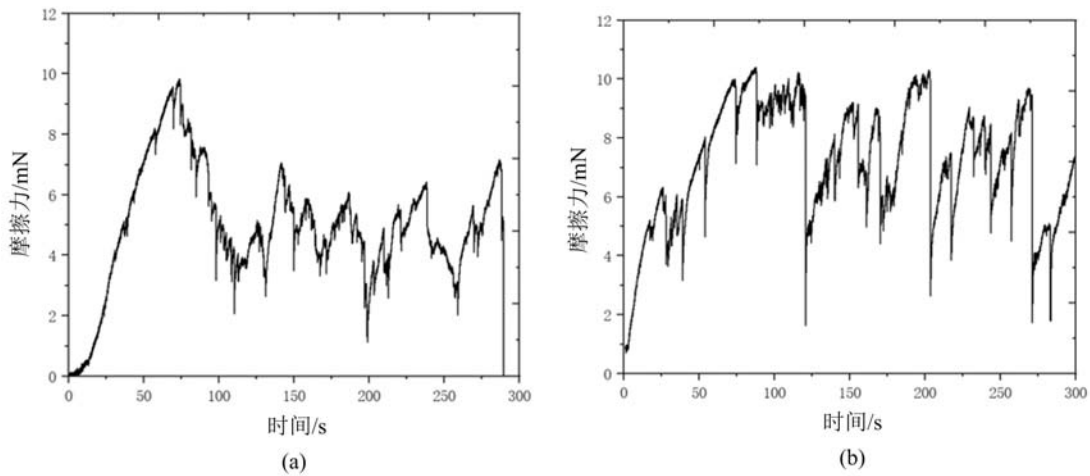


图 3 不同砂粒下混凝土表面摩擦力随时间的变化曲线:(a)细砂粒;(b)粗砂粒

Fig. 3 The surface friction of the concrete surface under different sand particles changes over time:
(a) fine sand particles; (b) coarse sand granules

2.3 温度对混凝土材料摩擦性能的影响

本文将加热台放置在混凝土下端正中心处,通过热传导的方式实现可控的混凝土表面温度。加热台温度功率为 200W,当加热至温度 250℃时保持 20min,其混凝土表面横向的温度变化如图 4(a)所示,其中混凝土表面 0mm~4mm、14mm~18mm 区域的温度较低,而中间的温度较高且均匀,其中中间的 5cm 区域温度为恒值 100℃。由于测试过程中滑块的滑行路程仅有 5mm,因此通过砂纸打磨的区域即

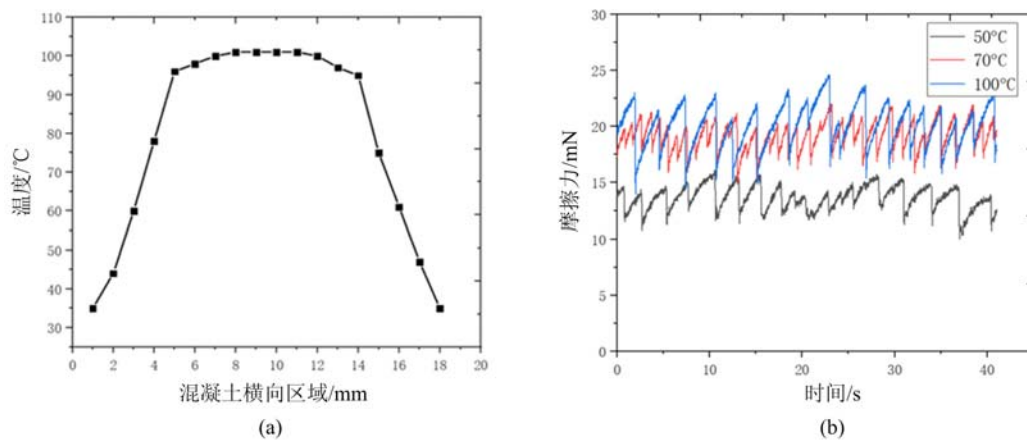


图 4 (a)混凝土表面温度变化曲线;(b)不同温度下混凝土材料摩擦力随时间的变化曲线

Fig. 4 (a) temperature change curve of concrete surface; (b) the change curve of friction force of concrete materials with time at different temperatures

可涵盖滑块滑行的整个过程,经过加热台处理后其混凝土摩擦接触区域的温度始终保持恒定,混凝土表面温度变化曲线如图 4(a)所示。本文采用 3 种温度 50℃、70℃、100℃进行测试,图 4(b)所示为不同温度下混凝土材料摩擦力随时间的变化曲线,由图可知,随着温度的增大,其摩擦力逐渐增大,其中混凝土表面温度为 50℃时,其平均摩擦力为 13.61mN;温度为 70℃时,其平均摩擦力为 19.14mN;当温度为 100℃时,其平均摩擦力为 20.05mN。从图中还可以明显看出摩擦力随时间的变化振动幅值也逐渐增大,当混凝土表面温度为 50℃时其最大摩擦力与最小摩擦力的差值为 1.12mN;而 70℃时其最大摩擦力与最小摩擦力的差值为 1.75mN;100℃时,其最大摩擦力与最小摩擦力的差值为 2.29mN。由于混凝土材料的温度增大会使其材料的黏结特性提高,因而混凝土材料随着温度升高,其摩擦力增大,并具

有显著的黏滑特性。

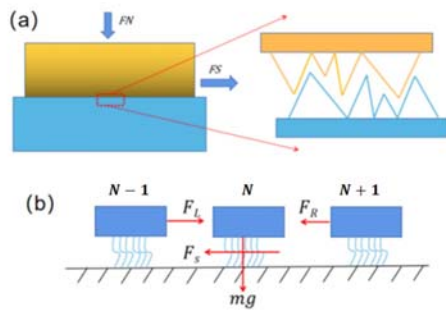


图5 理论建模:(a)材料接触的微观图;
(b)弹簧-滑块模型

Fig. 5 Theoretical modeling: (a) micro map of materials contact; (b) spring-slide model

3 数值计算

材料界面在宏观和微观上的表现形式不同,如宏观尺度上看似光滑连续的材料表面,微观上则是由大量非均匀、离散的凹凸体构成的,材料接触的微观图如图5(a)所示。当相对滑动的物体受到切向力和正压力作用时,微观的凹凸体便咬合(黏滞),当受到牵引力作用时,咬合(黏滞)的凹凸体可能发生破裂,这一过程取决于局部的剪切力是否达到了凹凸体的最大剪切强度。随着滑块的持续运动,破坏(滑移)的凹凸体又重新组合并咬合(黏滞)在一起,因此单个微观凹凸体的咬合—破坏—咬合—破坏就表现出明显的黏滞-滑移现象。基于这种思想,将混凝土表面微观

凸峰用弹簧替代,通过弹簧的连接—断开—连接来模拟滑移过程,将轮胎离散成 N 个相同的刚性滑块,每个滑块之间用弹簧连接,其中滑块和混凝土表面采用界面弹簧连接。对滑块系统进行受力分析,其中第 N 个滑块受到左滑块($N-1$)的力 F_L 和右滑块($N+1$)的力 F_R ,此外,还受到来自界面的摩擦力 F_S ,因此整个弹簧滑块系统的动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{u} + \mathbf{C}\dot{u}(t) + \mathbf{K}u(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为滑块刚度矩阵; \mathbf{Q} 为系统外力; u 为滑块位移函数。左右滑块以及滑块自身的重力主要影响界面弹簧的强度 f_i ,进而影响界面连接弹簧的刚度 k_i 。

分割的滑块数主要影响滑块刚度和剪切强度,改变模型滑块数,相应地改变其系统滑块的刚度及强度。本文选用11个滑块进行数值模拟,模型中所需的参数如混凝土表面粗糙度采用接触式粗糙度仪测得,动力学方程采用中心差分法来求解。实验结果和计算结果如图6所示,由图可以看出,常温下实验

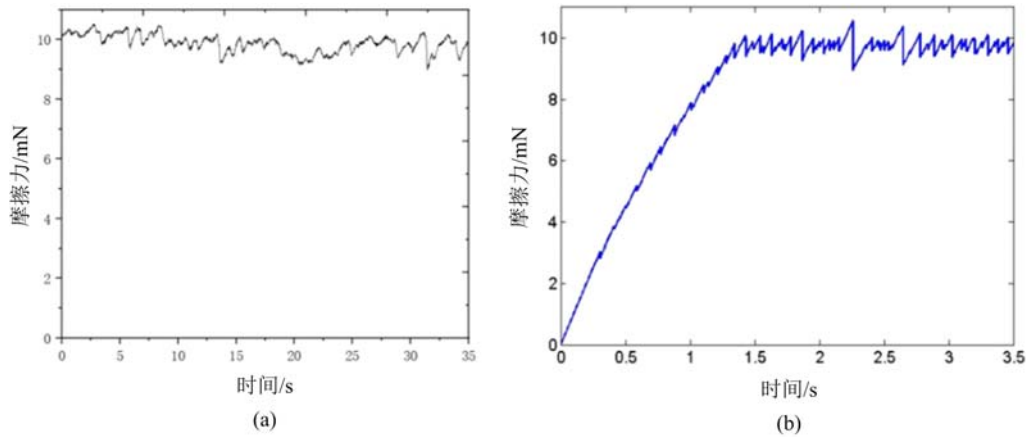


图6 (a)混凝土表面摩擦力随时间的实验结果;(b)混凝土表面摩擦力随时间的数值计算结果

Fig. 6 (a) surgery surface friction over time changes with the curve experiment results;
(b) calculation results of the surface friction of concrete over time over time

和数值计算得到的混凝土表面摩擦力的平均值分别为 9.867mN 和 9.93mN ,此外,数值计算和实验结果都表明混凝土表面摩擦力随时间的变化曲线中有明显的黏滑现象。为理清混凝土路面摩擦特性的黏滑特性,在改进的弹簧-滑块模型上调控关键参数如模量和粗糙度。图7(a)、(b)为不同粗糙度下混凝土路面摩擦力随时间的变化曲线,由图可知混凝土路面摩擦力随着材料表面粗糙度的增大而增大,但摩擦力的波动幅值随时间变化不明显;图7(c)、(d)为不同模量下混凝土路面摩擦力随时间的变化曲线,由图可知模量的增大对混凝土摩擦力影响不明显,但具有显著的黏滑现象。

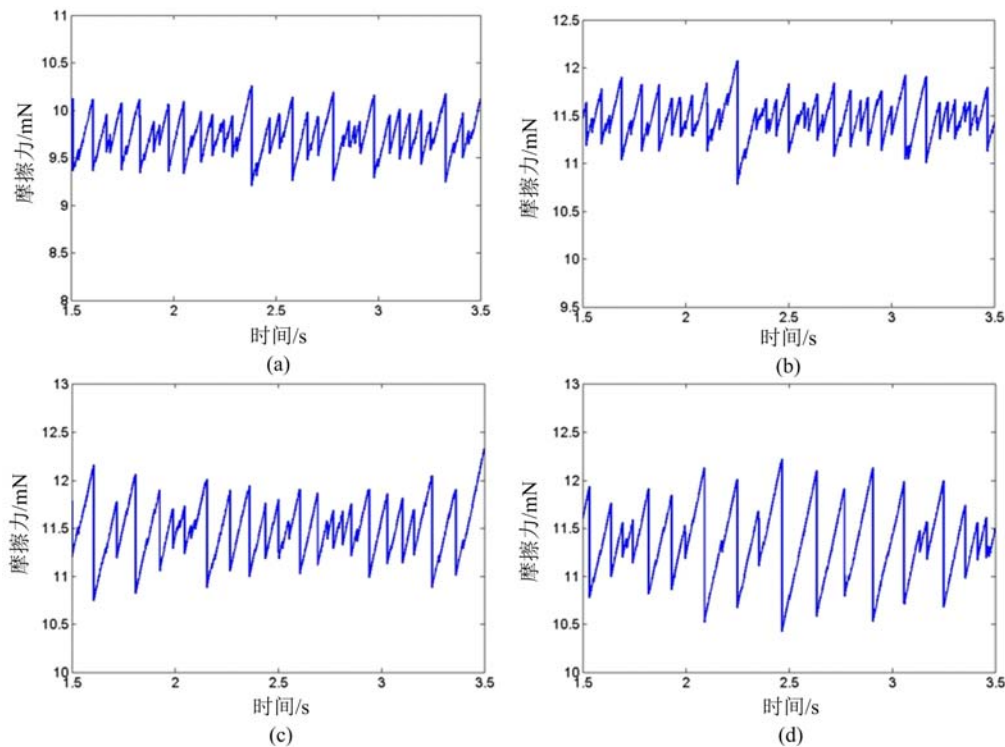


图7 混凝土表面摩擦力随时间的变化曲线:(a)粗糙度值为 $4.78\mu\text{m}$; (b)粗糙度值为 $6.78\mu\text{m}$; (c)模量值为 20MPa ; (d)模量值为 30MPa

Fig. 7 Surgery surface friction is changing with time: (a) roughness value is $4.78\mu\text{m}$; (b) roughness value is $6.78\mu\text{m}$; (c) the modulus value is 20MPa ; (d) the modulus value is 30MPa

4 结论

本文采用自行搭建的混凝土路面摩擦特性测试装置对混凝土路面摩擦特性的关键影响因素(如粗糙度、温度及砂粒粒径等)进行实验测试,结果表明混凝土路面的摩擦力随着温度和粒径的增大而增大,且伴有明显的黏滑现象;通过改进的弹簧-滑块模型对混凝土路面摩擦力曲线进行数值计算,计算结果与实验结果相吻合;对影响摩擦特性的关键因素如模量、粗糙度进行了研究,结果表明材料表面粗糙度及模量的改变会使得混凝土路面的摩擦力曲线出现明显的黏滑效应。

参考文献:

- [1] Bakker G E, Pacejka H B, Lidner L. A new tire model with an application in vehicle dynamics studies[J]. Society of Automotive Engineers, 1989, 4(1):87-89.
- [2] 郑香美, 高兴旺, 赵志忠. 基于“魔术公式”的轮胎动力学仿真分析[J]. 机械与电子, 2012(9):16-20 (ZHENG Xiangmei, GAO Xingwang, ZHAO Zhizhong. Simulation analysis of tire dynamic based on “magic formula”[J]. Machinery and Electronics, 2012(9):16-20 (in Chinese))
- [3] 梁春兰, 盛鹏程, 刘卫泽. 基于“魔术公式”轮胎模型的 MATLAB 仿真研究[J]. 邢台职业技术学院学报, 2013, 30(1):63-66 (LIANG Chunlan, SHENG Pengcheng, LIU Weize. MATLAB simulation research based on the “magic formula” tire mode[J]. Journal of Xingtai Polytechnic College, 2013, 30(1):63-66 (in Chinese))
- [4] Fiala E. Seitenkrafte am rollenden luftreifen[J]. VDI Zeitschrift, 1954, 29(11):81-92.
- [5] Pacejka H B. Analysis of the dynamic response of a rolling string-type tire model to lateral wheel-plane vibrations [J]. Vehicle System Dynamics, 2013(1):37-66.
- [6] 张宝珍. 新型四轮转向车辆稳定性控制分析与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017 (ZHANG Baozhen. Analysis and experimental study on vehicle stability control of the new four wheel steering[D]. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese))

- [7] Li J, Wang Z P, Liu W X, et al. Numerical simulation of tire steady-state temperature field based on ANSYS workbench[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501:382–387.
- [8] 郭孔辉. UniTire 统一轮胎模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12):90–99 (GUO Konghui. UniTire: unified tire model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12):90–99 (in Chinese))
- [9] 杨军, 王昊鹏, 吴琦. 潮湿沥青路面抗滑性能数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(3):25–32 (YANG Jun, WANG Haopeng, WU Qi. Numerical simulation on skid resistance property of wet asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(3):25–32 (in Chinese))
- [10] 喇世仁. 超导材料的低温摩擦性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019 (LA Shiren. Study on low temperature friction properties of superconducting materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019 (in Chinese))
- [11] La S, Liu C, Zhang X. The mechanism of stick-slip phenomenon during friction process at low temperature environment[J]. AIP Advances, 2019, 9(6):065019.

Concrete pavement friction characteristics experiment and numerical calculation research

LA Shiren¹, SU Xiyang², ZHANG Xingyi²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Qinghai Nationalities University, Xining 810007, Qinghai, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China attached to the Ministry of Education of China, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: For the test needs of the friction characteristics of concrete pavement, this article built a test device for concrete road surface friction features at different road conditions, and used this device to experiment with key factors that affected the friction characteristics of concrete pavement, such as temperature, roughness, sand particle size, and positive pressure. As a result, it shows that the friction force increases with the increase in temperature, and the particle size and roughness of the sand particles have significant effects on the performance of the concrete pavement. Then calculating the friction characteristics of the concrete pavement with the improved spring-slide model, which is consistent with the experimental results, and studying the influencing factors that affect the concrete frictions, such as the amount and roughness. The change in quantity makes the friction curve of the concrete pavement significantly sticky.

Keywords: concrete pavement; different temperatures; surface roughness; spring slider model