

Review of Mechanical Response Analysis of Asphalt Pavement

Chengzuo Xie

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

Abstract: For research of asphalt pavement damage mechanism and the effects of different loading conditions, material properties, and environmental factors Pavement Stress and strain variation, this paper describes the influence mechanism of the load, temperature and contact states to response of bituminous pavement structural mechanics and the main research methods systematically. It is more fully to reflect the really condition about human factor and natural factor, providing the reference for correlation analysis research.

Keywords: Pavement mechanical response; Load; Contact station

沥青路面力学响应分析综述

谢承作

重庆交通大学, 重庆, 400074

摘要: 为了研究沥青路面的破坏机理以及在不同荷载条件和温度和各层间接触状态等条件下, 路面应力应变变化规律, 本文系统阐述了荷载、温度以及层间接触状态对沥青路面结构力学的响应机理和研究方法。结合人为因素和自然因素等实际情况, 为相关分析研究提供参考。

关键词: 路面力学响应; 荷载; 层间状态

1 引言

自从上个世纪 80 年代以来, 我国第一条高速公路沪嘉高速通车, 我国高速公路发展进入了快速的阶段。截止到 2015 年年底, 我国高速公路的运行总里程达到 12.3 万公里, 其中大部分路面采用沥青混凝土铺装。然而, 我国在公路里程数走向世界前列的同时, 技术不成熟所导致的危害也逐渐产生。随着我国经济的快速发展, 车辆的超载、重载不断增多, 此外又由于施工管理的措施不当, 路面在使用过程中不断有各种病害状况出现, 如开裂、车辙等, 不仅路面的使用年限达不到设计年限的标准, 而且道路返修费用高, 会引起巨大的经济损失和诸多的社会问题。

半刚性路面具有整体结构强度高、造价低的优点, 半刚性基层沥青路面也被我国目前的大多数高等级沥青路面结构广泛采用。国内外大量研究表明, 对沥青路面力学响应影响比较明显的因素主要有荷载、温度以及各层间接触状态等。作用的不同组合形式、荷载的不同大小也会对路面力学响应产生不同影响。沥青作为一种典型的温度敏感性材料, 温度的变化会对其力学特性产生明显影响。层间接触状态的良

好与否, 同样也层间是否出现滑移剪切破坏的重要原因。研究在不同因素影响下的路面力学响应, 理解并掌握路面的破坏机理, 为更加科学合理的路面设计方案提供必要的参考。

2 荷载

在对沥青路面的力学性能进行具体分析过程中, 通常把影响区域设置为轮胎与路面的接触面, 从而行路面受力分析。为了计算方便, 一些学者对沥青混合料模量的研究时, 常将接触面假定为规则的几何图形进行力学计算。胡小弟[1]等认为, 汽车轮胎与路面的接触面近似为矩形, 当作用的荷载越大时, 接触面就越接近矩形。而谢水友[2]等认为, 作用的荷载大小不同, 接触面形状也会随之不同, 荷载较小时, 接触面形状为椭圆形; 荷载较大时, 接触面的形状为矩形。彭卫兵[3]等还做了进一步的研究。不同的假定接触面形状, 会得到不同的力学分析结果。为此, 在荷载的接触面形状对沥青路面力学响应影响的方面进行了后续的研究。沙爱民[4]认为, 计算结构设置为半刚性基层上两层式沥青混凝土面层结构, 如图 1 所示。通过有限元软件的分析, 作路面为均质、连续、

各向同性的弹性体的假设。模拟正方形、长方形、圆形、椭圆形、矩形加两半圆五种接触形状，如图 2 所示。在等面积为 $A=365.33 \text{ cm}^2$ 的情况下，通过三维有限元数值计算五种工况。

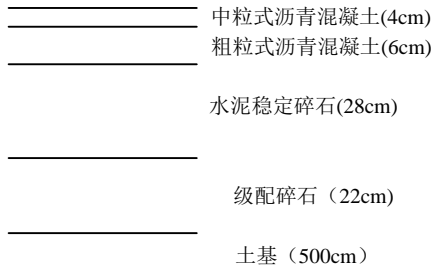


Figure 1. Pavement structure calculation diagram
图 1. 路面结构计算图示

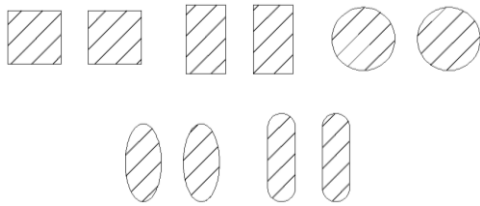


Figure 2. Contact surface shape
图 2. 接触面形状

经过对结果的分析得到在路面力学应力分析时，考虑最不利情况，应选择矩形加两半圆或长方形形状作为接触面形状进行分析。

刘仕贵[5]采用了 ABAQUS 对沥青混凝土路面进行有限元计算分析，选择了长方形接触面形状作为分析模型的接触面，建立的有限元模型如图 3。研究中结合实际，考虑了 4 种常见的荷载作用形式，分别是常载、超载、常载+刹车和超载+刹车，对着四种工况进行路面力学分析。该研究[6]认为，建立的四种空间模型分别是横向的 Z1、Z2，纵向的 H1 以及深度方向的 S1。为更精准确定沥青路面力学响应的峰值所在的位置，分析选取了内侧轮和外侧轮的五个荷载作用位置如图 4 所示。

据文献分析[7]，路表弯沉值是路基和路面竖向变形的总和，当弯沉值大于设计弯沉，就说明路面出现了损坏现象。国外路面设计的控制指标常选用路基顶面压应变，通过研究得出层底弯拉应力和层间剪应力是路面疲劳破坏的原因之一。因此研究选用了路表

弯沉值、路基顶面压应变、层底弯拉应力以及层间剪应力作为分析指标。

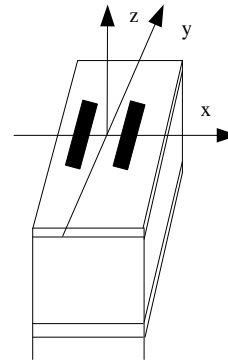


Figure 3. Finite element model
图 3. 有限元模型示意

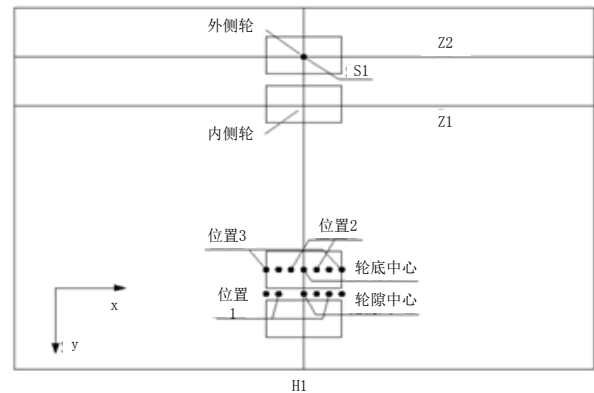


Figure 4. Path indication and load position
图 4. 路径示意及荷载位置

静力学作为国内沥青路面的设计基础，经验修正系数为动荷载影响基础。梁世斌[8]为了计算方便，会把车辆荷载的情况设置为随时间变化而变化，所以此实验计算出来的结果往往跟真实结果存在差异。张维全[9]、张浩[10]研究了动荷载规律。其中刘宁[11]、孙杰[12]研究过程中，为模拟真实状况下车辆行驶的情况，并加以均匀荷载的作用，得以研究在此状态下车辆对路面结构的影响情况。结合弹性层状体系结构的基本假设和弹性动力学理论，得出移动荷载作用下的路面有限元动力方程为：

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中： $[M]$ ——路面质量矩阵；

- [C]——路面阻尼矩阵；
[K]——路面刚度矩阵；
{u}——路面离散点位移矩阵；
[F]——车辆荷载矩阵。

然而在实际道路结构中，阻尼存在于移动荷载下的道路各结构层，使道路的动力学响应产生很大的影响。吴玉[13]等研究得到结论。在阻尼结构的分析计算时采用应用较为广泛的粘性阻尼假设，即认为材料的阻尼随着速度的提高而变大，材料阻尼与速度成正比。非静态考虑影响因素，作单元

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中， α 、 β 为阻尼系数。

通过分析得到在移动荷载下波动性存在于不同的变化组合中，随之产生不同影响。据研究[14]分析，车辆轴载和车辆行驶的不同波动情况，会对路面的各个层面产生不同影响。然而该研究过程中只考虑了车辆在路表匀速行驶状况，只考虑了水平荷载的情况，未考虑水平、竖直荷载的联合作用。

3 温度

由于沥青面层材料力学特性和使用性能随温度的变化而产生明显变化。据李仕华[15]，温度同时影响路面的各个结构特点。路面经常受到不稳定热流，热流会通过路面传入路面结构。刘英伟[16]、谭继宗[17]等分析证明，从而产生膨胀或收缩的现象。当路面为沥青混凝土面层时，开裂现象会发生在温度应力超过结构层的抗拉强度的时候。以往的研究中，实验所用的温度一般都是假设而定，并不是现实温度。而针对这个问题，董泽蛟[18]等考虑温度梯度，并在非均匀温度应力场下，做不同强度和条件的路面力学响应实验。

为进行对最不利情况的研究，模拟夏季一天的温度场分布。据文献[19]分析，同时通过运用 ABAQUS 软件中实现了太阳辐射、空气辐射换热及对流换热的作用，以便模拟更加真实的温度场分布。其路面结构温度分布模拟结果如表 1 所示。参考陈亚章[22]实验，并由表 1 可知，夏季高温时段，路面温度与路面竖直距离成正比，为正温度梯度。研究表明：温度场对结构动力响应小于荷载对结构动力响应的影响，但响应的幅值需考虑温度场影响；夏季高温时段，等温模型忽略了结构的正温度梯度，从而使研究

结引起上面层剪应力和抗剪应力逐渐增大，中层面的剪应力和抗剪应力逐渐减小；夏季低温时段，等温模型忽略了结构的负温度梯度，从而使剪应变和竖向应变都偏低。温度场分布影响较大的为竖向应变、纵向应变和剪应变，影响较小的是横向应变值。

Table 1. Temperature distribution of pavement structure
表 1. 路面结构温度分布

深度/m	温度/℃	
	夏季高温时段	夏季低温时段
0	54.8	21.2
0.025	50.5	21.7
0.050	46.4	22.1
0.085	41.0	22.9
0.120	36.9	23.6
0.180	32.1	25.1
0.240	30.2	26.8
0.290	29.6	28.3

在高原地区，昼夜温差大，加之有冻土的情况，温度对路面力学响应的影响就更加明显。王磊[20]、外文文献[21]进行了温度应力计算，其计算结果表明，对温度应力有巨大影响的有沥青路面面层厚度、材料的弹性模量及材料的线膨胀系数。特别在冻土地地区，合理的选择沥青的用料、增加沥青混凝土路面面层厚度、降低沥青混凝土弹性模量和线膨胀系数等方法都能有效的减小路面的温度应力。

4 层间接触状态

据陈亚章[22]分析，由于沥青路面的结构的特性，多层式之间的层间连接和情况，对路面的力学情况产生较大影响。李彦伟[23]、外文文献[24]等实验中，在建立结构有限模型时，考虑到脱层失效理论具有能动的反应粘结界面的强度损失，同时又能体现层间材料厚度、模量及损伤影响等优势，更真实地反应半刚性基层的受力状态，将脱层失效理论作为有限元建模的理论基础。结果表明，在路面厚度小时，采用精铣刨处理和胶粉改性沥青这类层间黏结力大的处理方式比较有效为满足要求，做了不同的适应条件。宋学艺[25]也研究不同层间处治措施对路面粘结性能以及路面使用寿命的影响，得出煤油稀释沥青+SBS 改性沥青封层能够更好的改善层间状态，延长路面的使用寿命。

高源[26]较为系统地分析了弯沉、拉应力对路面应力的影响后，得出在面层和基层由连续状态到滑动

状态过程中,路面的各层底部受力及路基顶面压应变都有明显变化,尤其当路面处于超载情况下,影响更为显著。白雪梅[27]、张艳红[28]等分析当层间接触不稳定时,由于剪应力和抗剪应力的减小,因此层间易引起层间滑移破坏。另外姚新国[29]等还进行了实验,比较了柔性路面、半刚性路面和复合性路面的应力状态,发现柔性路面在结构上层的剪应力相比其他两种路面更高,从而易产生推移的剪切破坏。

胡钢[30]运用 FORTRAN 语言进行正交设计实验,实验对象为 μ_1 、 μ_2 及 μ_3 。发现 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 变化,上中下各层底部的最大特性因素也会变化,第一接触面 μ_1 越大越好;路面纵向形变作为一般参考条件,所以常被当做参考指标。

5 结语

本文主要从车辆荷载、温度以及层间接触状态三个方面系统阐述沥青路面力学响应影响因素及其研究方法。得出以下结论:

在当前路面力学响应分析中,研究应从最不利情况出发,车辆荷载与路面的接触面形式选择矩形+双半圆形式或者长方形,荷载形式也应多样化。在实际行车过程中,特别是在刹车的情况,由于摩擦力的存在,应将竖向和水平荷载的结合考虑。

温度对于沥青混合料的各个性能和性质等都有明显影响。实际情况下,结构竖直方向也存在温度的变化,在改变温度场分布的情况下,影响较大的为竖向应变、纵向应变和剪应变值,影响较小的为横向应变值。

实际情况下分析,层间接触状态越好,就越不易产生层间滑移剪切破坏。

目前对于沥青路面力学响应分析研究大多都局限在单个因素,由此来建立有限元模型分析。结合工程实际情况,在综合考虑其他各方面因素基础上的研究,将是今后的沥青路面力学响应研究的重点方向。

References (参考文献)

[1] 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.华中科技大学学报.2004,20,20-24.
[2] 谢水友.轮胎-路面接触压力研究.华东公路,2009,94-96.
[3] 彭卫兵,刘萌成,刘书锦.刹车荷载反复作用下沥青路面剪切响应三维有限元分析.公路交通科技.2009,26,46-52.
[4] 沙爱民,江晓霞.路面动态特性分析.交通运输工程学报.2001,1,63-67.

[5] 刘仕贵,于新.不同荷载作用下半刚性沥青路面力学响应规律.重庆交通大学学报.2013,32,198-202.
[6] Hager R. Silicones for concrete protection. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland. 1996, 361-367.
[7] Pourasee A., Hansson C.M. Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution. Cem Concr Res. 2012, 37, 1127-1133.
[8] 梁世斌.不同层间连续状态下沥青路面力学响应.内蒙古公路与运输.2017,01,6-8.
[9] 张维全,俞仁怡.倒装路面结构在移动荷载下的力学响应分析.路基工程.2010,1,19-21.
[10] 张浩.竖向动态荷载作用下沥青路面力学响应分析.太原理工大学学报.2006,37,355-357.
[11] 刘宁.半刚性基层长寿命路面力学响应的现场测试与分析.哈尔滨工业大学.2012.
[12] 孙杰.两种均布荷载作用下沥青混凝土路面结构力学响应的对比分析.建材技术与应用.2017,4,15-18.
[13] 吴玉,蒋鑫,梁雪娇,冯文青.轮载作用下典型沥青路面结构力学行为分析.西南交通大学学报.2017,6,563-570.
[14] Nanga parbat revisited: evolution and dynamics of sociohydrological interactions in the northwestern himalaya. Expert Systems with Applications. 2011, 38, 1382-1392.
[15] 李仕华,王修山.动载作用下半刚性沥青路面力学响应分析.中外公路.2016,10,49-53.
[16] 刘英伟.基于层状弹性体系理论的沥青路面结构力学响应研究.中国水运(下半月).2014,1,278-279.
[17] 谭继宗,张树芬.层间接触状态对沥青路面结构性能影响分析.中外公路.2017,07,36-38.
[18] 董泽蛟,潘小康,邵显智,周兴业.温度场及非均布移动荷载作用下沥青路面力学响应分析.同济大学学报(自然科学版).2016,44,740-746.
[19] Bazant Z P. Physical model for steel corrosion on concrete sea structures theory. Journal of Structural Division, ASCE. 2013, 105, 111-132.
[20] 王磊,胡浩,马磊,褚凯.青藏公路沥青路面结构温度应力影响因素分析.长安大学学报.2010,30,28-32.
[21] Alonso C., Andrade C., Gonzalez J.A. Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. Cem Concr Res. 2013, 18, 687-698.
[22] 陈亚章,吕继群.层间状态对沥青路面力学性能与疲劳寿命影响研究.湖南交通科技.2017,3,88-91.
[23] 李彦伟,穆科,石鑫,王选仓.基层层间接触状态对沥青路面力学响应影响.长安大学学报.2014,30,38-44.
[24] Heow Pueh Lee, Benson Mun Pun Ng, Abhishek Vishwanath Rammohan. An investigation of the sound absorption properties of flax/epoxy composites compared with glass/epoxy composites. International Journal of Automation and Computing. 2010, 7, 115-122.
[25] 宋学艺,朱金鹏,张健等.沥青路面基层层间接触状态对路面力学响应的影响分析.公路工程.2014,30,131-135.
[26] 高源.层间接触状态对沥青路面力学响应的影响研究.道路工程.2013,68,17-21.
[27] 白雪梅.层间接触状态对沥青路面结构力学响应的影响.重庆交通大学学报(自然科学版).2009,28,215-218.
[28] 张艳红,王晓帆.层间接触条件对沥青路面力学响应的影响张艳红.长安大学学报(自然科学版).2012,32,7-11.
[29] 姚新国.层间接触对半刚性沥青路面力学响应的影响.低碳世界.2016,2,187-188.
[30] 胡钢.层间接触状态对路面结构力学响应的影响.公路.2015,3,34-39.