

荷载参数对多裂缝沥青路面动力响应的影响

陈 桥¹ 吉泽中²

1. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 201100

2. 江苏高速公路工程养护有限公司, 江苏 淮安 223001

[摘要]为揭示既有沥青路面在移动荷载下的动力响应与破坏机理, 此文采用数值模拟方法, 系统研究了轴载速度和大小对含有两条横向基层反射裂缝路面结构的影响。结果表明, 路面动力响应存在显著的临界车速效应, 在车速达到 108km/h 时, 路面结构的宏观应力因共振作用达到峰值, 表明此速度下的损伤最为严重; 贯穿裂缝是应力响应的主要控制点, 而位移响应的控制点随着车速变化在两条裂缝之间动态“漂移”; 贯穿裂缝处的剪应力和 II 型应力强度因子远高于拉应力和 I 型应力强度因子, 表明其破坏主要由剪切作用主导; 轴载大小与所有响应指标呈线性关系, 重载会加剧结构的破坏风险。研究揭示了贯穿裂缝作为复合损伤路面的薄弱环节, 其破坏进程由剪切作用主导, 并在临界车速下因共振效应加剧, 研究结果可为此类路面的状态评估和养护决策提供理论依据。

[关键词]沥青路面; 数值模拟; 荷载参数; 力学响应; 应力强度因子

DOI: 10.33142/aem.v8i5.19918

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

The Influence of Load Parameters on the Dynamic Response of Multi Crack Asphalt Pavement

CHEN Qiao¹, JI Zezhong²

1. China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd., Shanghai, 201100, China

2. Jiangsu Expressway Engineering Maintenance Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu, 223001, China

Abstract: In order to reveal the dynamic response and failure mechanism of existing asphalt pavement under moving loads, this paper uses numerical simulation methods to systematically study the influence of axle load speed and size on the pavement structure containing two transverse base reflection cracks. The results indicate that there is a significant critical vehicle speed effect on the dynamic response of the road surface. When the vehicle speed reaches 108 km/h, the macroscopic stress of the road structure reaches its peak due to resonance, indicating that the damage is most severe at this speed; Penetrating cracks are the main control points for stress response, while the control points for displacement response dynamically "drift" between two cracks with changes in vehicle speed; The shear stress and Type II stress intensity factor that penetrate the crack are much higher than the tensile stress and Type I stress intensity factor, indicating that its failure is mainly dominated by shear action; The magnitude of axle load is linearly related to all response indicators, and heavy loading will exacerbate the risk of structural damage. The study revealed that through cracks are the weak link in composite damaged road surfaces, and their failure process is dominated by shear forces, which are exacerbated by resonance effects at critical vehicle speeds. The research results can provide theoretical basis for the state assessment and maintenance decision-making of such road surfaces.

Keywords: asphalt pavement; numerical simulation; load parameters; mechanical response; stress intensity factor

引言

半刚性基层沥青路面是我国高等级公路的主流结构形式, 在荷载与环境长期耦合作用下, 基层反射裂缝是其最常见且危害最严重的病害之一^[1]。路面结构承受高速移动车辆荷载时, 动力效应会显著改变裂缝区域的应力状态, 使实际损伤远大于静态分析结果, 这是准确评估路面服役

状态不可忽视的关键因素。

国内外学者已开展大量相关研究。在动力响应方面, Mshali 等通过全尺寸试验发现车速低于 30km/h 时路面变形呈指数级增长^[2]; Deng 等揭示了高速移动荷载下路面变形盆的非对称性, 提出“滞后角”可作为路面健康评价指标^[3]。在裂缝力学行为方面, 扩展有限元法 (XFEM)

已成为模拟裂缝扩展的主流方法，黄立葵等基于 XFEM 模拟了 AC+CRC 复合式路面温缩反射裂缝的疲劳扩展过程^[4]；龙光等通过三维有限元分析发现，面层模量增加会抑制 I 型反射裂缝但促进 II 型裂缝扩展^[5]。

然而，现有研究大多针对单一理想化裂缝，而实际路面往往存在贯穿与非贯穿裂缝并存的复合损伤状态，不同裂缝间的相互作用及主导破坏机制尚不明确。为此，本文基于江苏省典型半刚性基层路面结构^[6]，构建含双裂缝的三维有限元模型，系统研究轴载速度与大小对路面动力响应及裂缝断裂行为的影响，为复合损伤路面的养护决策提供理论依据。

1 沥青路面有限元模拟

1.1 三维有限元模型

本文参考江苏省典型半刚性基层沥青路面结构，采用 ABAQUS 建立 1/2 对称三维有限元模型，结构层为 4cmSMA-13 上面层、6cmSUP-20 中面层、8cmSUP-25 下面层、36cm 水稳碎石基层及 20cm 水稳碎石底基层。模

型横向宽度 3.0m，沿行车方向长 12.0m，深度 1.74m，各结构层间设置为完全连续接触。

基于扩展有限元在基层底部设置两条平行横向反射裂缝，间距 3.0m：裂缝 1（Y=4.0m）贯穿整个基层，代表既有成熟病害；裂缝 2（Y=7.0m）长 18cm（基层厚度的一半），代表萌生阶段的潜在病害。模型底部采用固定约束，左右边界施加对称约束，前后边界限制 Y 向位移。采用 C3D8R 单元划分网格，对荷载带、沥青面层及裂缝区域进行加密处理。路面有限元模型如图 1 所示。

1.2 材料参数设置

在动载作用下，沥青面层呈现典型的粘弹性特征，常通过 Prony 级数表征。为了贴合既有路面的真实情况，刘震通过对既有路面进行取芯并进行动态模量试验，进一步计算其 Prony 级数。基层和路基视为线弹性材料，相关参数根据 FWD 的测试结果进行模量反算。本文的材料参数参考其试验结果进行设置，如表 1、表 2 所示。

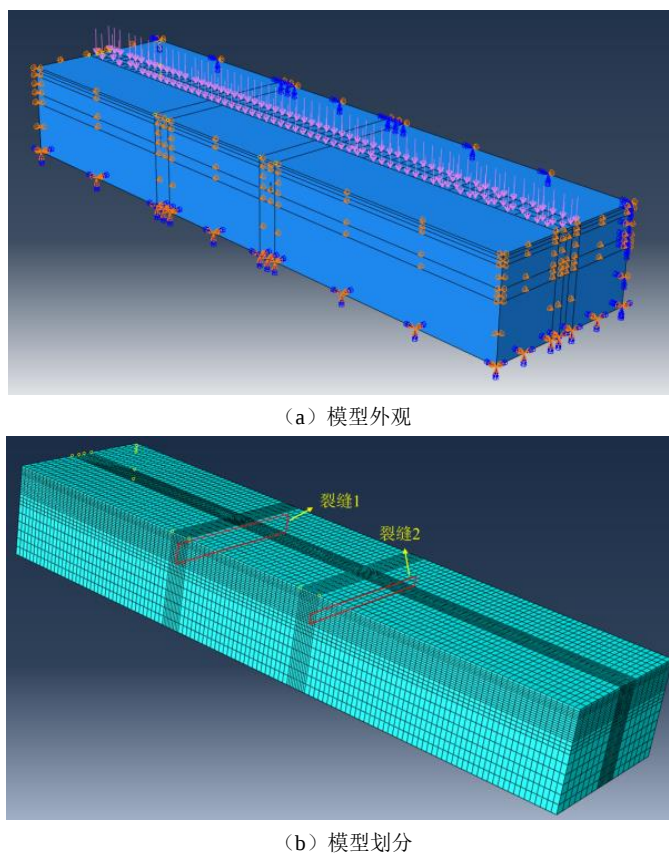


图 1 沥青路面有限元模型及网格划分

表 1 沥青面层粘弹性参数

τ_i	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
g_i	0.51857	0.20794	0.120967	0.06998	0.02716	0.01027	0.00511	0.00148	0.00113

表 2 各层位材料参数

层位	密度 (kg/m ³)	模量 (MPa)	泊松比	阻尼
基层	2350	14000	0.25	0.8
底基层	2150	10500	0.25	0.6
土基	1850	165	0.4	0.4

1.3 动载设置

在有限元计算中,车辆荷载通常简化为矩形荷载,单个车轮荷载为 0.192m×0.186m,两轮间距为 0.128m。为实现荷载移动,模型表面设置了两条与车轮宽度相同的行车轨迹带,并将其分割为多个小矩形。标准轴载为 0.70MPa,荷载施加通过 Fortran 子程序完成。

1.4 模型验证及工况设置

通过静态弯沉盆实测数据验证模型可靠性,结果显示 9 个测点平均相对误差 1.96%,最大误差不超过 5%,荷载中心点误差仅 0.27%,满足工程精度要求。

本研究设置 6 组车速工况 (30~120km/h) 和 5 组轴载工况 (0.70~1.40MPa),如表 3、4 所示。其中 108km/h 为前期研究确定的 3m 裂缝间距下的共振临界速度。

表 3 轴载速度设置

编号	轴载速度 (km/h)	轴载大小 (MPa)
1	30	0.70
2	60	
3	80	
4	100	
5	108	
6	120	

表 4 轴载大小设置

编号	轴载速度 (km/h)	轴载大小 (MPa)
1	108	0.700
2		0.875
3		1.050
4		1.225
5		1.400

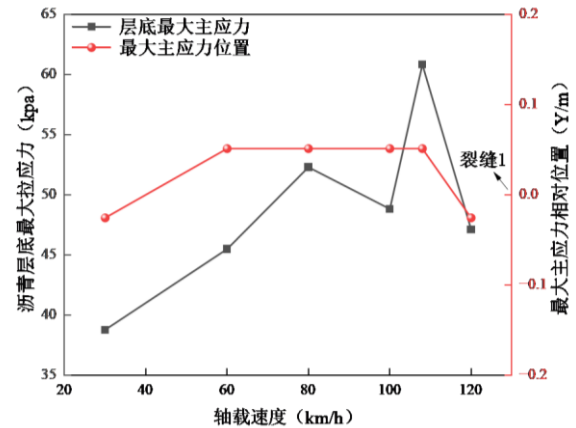
2 结果与分析

2.1 动载参数对路面结构动力响应的影响

2.1.1 轴载速度的影响

不同车速下沥青层底最大主应力呈现“先增后减”的变化趋势:从 30km/h 开始持续增长,80km/h 达到局部峰值后下降,108km/h 跃升至全局最大值 60.83kPa,随后随车速进一步提高迅速减小。这一规律源于荷载作用时间与结构动力响应的耦合作用:低速阶段荷载作用时间长,动力放大效应逐渐增强;车速超过 80km/h 后,路面结构因惯性和粘滞性未能及时响应,应力下降;108km/h 时移动荷载激励频率与结构固有频率耦合,引发强烈共振,导致应力显著放大。因此,108km/h 是本研究路面结构的临界损伤速度。

应力分布分析表明,所有车速下最大拉应力和剪应力均集中在贯穿裂缝(裂缝 1)邻近区域,说明贯穿裂缝是控制路面承载能力的薄弱环节。最大剪应力同样在 108km/h 达到全局峰值 107.73kPa,但其中低速(30~80km/h)变化趋势更为平缓。这种差异源于两者的产生机制:拉应力由结构整体弯曲变形主导,对动力放大效应更敏感;剪应力反映层间界面的抗滑移作用,对弯曲变形的梯度变化更敏感。


图 2 不同车速下沥青层底最大主应力

值得注意的是,所有速度工况下最大剪应力均显著高于最大拉应力,表明复合损伤路面的破坏进程可能由剪切作用主导,而非单纯的弯拉疲劳。在评估此类路面病害时,应重点关注层间粘结失效和裂缝边缘的剪切破坏风险。

与应力响应的集中性不同,基层顶部最大竖向位移的控制点随车速在两条裂缝间动态转移:30、80km/h 时最大位移出现在裂缝 2 处,60、108km/h 时转移至裂缝 1 处。这种“漂移”现象是不同频率动载激励下结构振动模式切换的体现。竖向位移在 60km/h 和 108km/h 形成两个峰值,全局最大位移出现在 120km/h,位移峰值速度与应力峰值速度不重合,表明两者具有不同的驱动机理。

2.1.2 轴载大小的影响

不同轴载下沥青层底最大拉应力与轴载大小呈显著线性正相关,经线性拟合,二者关系可精确表示为式 1,其 $R^2 \approx 1.0$,有力地证明在所研究的荷载范围内,该路面结构的力学响应遵循线弹性原理。在所有荷载水平下,最大拉应力均稳定出现在裂缝 1 后方约 0.05m 处,说明轴载大小不会改变由结构几何不连续决定的应力集中控制点。

$$y_T = 86895.94286x \quad (1)$$

其中, y_T 为沥青层底部最大拉应力 (N), x 为轴载大小 (MPa)。

最大剪应力与轴载大小同样呈线性关系,其拟合关系

式为式 2，且其发生位置同样恒定在裂缝 1 附近。将两组应力进行对比可以看出，在相同的轴载水平下，最大剪应力均显著地大于最大拉应力。这进一步验证了前文的论断，即对于该双裂缝路面模型，在贯穿裂缝处，剪切破坏可能先于弯拉疲劳发生。

$$y_s = 153900x + 0.8 \quad (2)$$

其中， y_s 为沥青层底部最大剪应力（N）， x 为轴载大小（MPa）。

荷载经过两条裂缝时会产生两个深度相近的沉降谷值，两个局部最大位移均与轴载大小呈线性正相关，拟合关系式为式（3），两个最大位移值均与轴载大小呈现出明确的线性正相关关系，这与应力响应的规律一致，再次验证了该模型在所研究荷载范围内的线性弹性特征。

$$y = 5.58045 \times 10^{-5}x \quad (3)$$

其中， y 为基层顶部最大竖向位移（m）， x 为轴载大小（Mpa）。

与位移控制点随车速漂移不同，轴载变化时两个位移控制点始终稳定在裂缝 1 和裂缝 2 处，说明轴载大小不会改变由结构几何和材料特性决定的“双薄弱点”，重载会等比例加剧两条裂缝处的累积变形，增加永久变形和差异

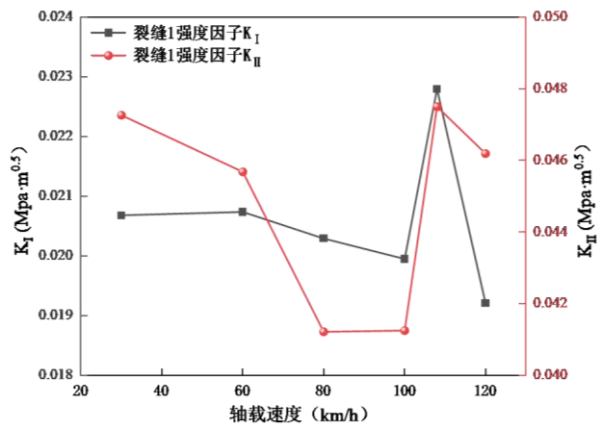


图 3 不同轴载速度下裂缝 1 的应力强度因子 K_I

2.2.2 轴载大小的影响

两条裂缝的 I 型和 II 型应力强度因子均与轴载大小呈线性正相关，与宏观应力、位移的响应规律一致。在所有荷载水平下， K_{II} 的值均显著高于 K_I ，说明无论荷载大小，水平剪切作用始终是驱动基层裂缝扩展的主要力学因素。

相同轴载下，裂缝 1 的 SIF 显著高于裂缝 2。标准轴载下，裂缝 1 的 K_{II} 值约为 $0.047\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ，比裂缝 2（ $0.026\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ）高出约 80%，表明贯穿裂缝对荷载变化更敏感，重载对其损伤加剧效应远甚于非贯穿裂缝。在路面承载能力评估和超载管理中，应将贯穿裂缝作为首要

沉降破坏的风险。

2.2 基层裂缝的断裂行为分析

2.2.1 轴载速度的影响

采用 J-积分法计算裂缝尖端的张开型（ K_I ）和滑移型（ K_{II} ）应力强度因子。结果显示，在非共振的 30~100km/h 区间内，裂缝 1 的 K_I 和 K_{II} 总体呈下降趋势，这与宏观应力的上升趋势形成对比。其原因在于：宏观应力反映结构整体的动力放大效应，而应力强度因子对荷载作用时长和应力波局部效应更敏感，高速下荷载作用时间缩短，应力来不及在裂缝尖端充分集中，导致 SIF 下降。但在 108km/h 临界速度下，共振效应使裂缝尖端应力场急剧放大， K_I 和 K_{II} 均达到峰值。

裂缝 2 的 SIF 变化规律与裂缝 1 显著不同，未在 108km/h 出现共振峰值，整体随车速增加而减小，证明荷载作用时间缩短对非贯穿裂缝尖端应力集中的削弱效应更明显。对比 K_I 和 K_{II} 的大小，两条裂缝的潜在开裂模式均以 II 型滑移开裂为主导。

所有工况下裂缝 2 的 SIF 均远小于裂缝 1，进一步证实贯穿裂缝是断裂破坏的绝对控制点，其扩展风险远高于非贯穿裂缝。

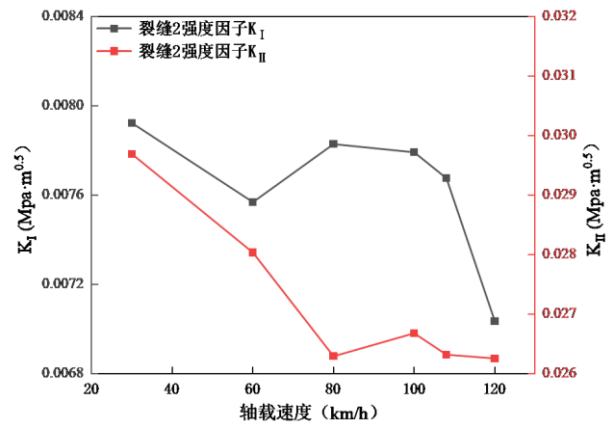


图 4 不同轴载速度下裂缝 2 的应力强度因子 K_{II}

控制指标。

3 结论

本文通过数值模拟研究了动载参数对含贯穿与非贯穿复合基层裂缝沥青路面的影响，得出以下结论：

（1）贯穿裂缝是结构响应的薄弱点，所有动载工况下最大拉应力、剪应力及应力强度因子均集中于此。

（2）路面存在 108km/h 的临界车速，共振效应使该速度下结构损伤最为严重。

（3）剪切作用是贯穿裂缝的主要破坏方式，其剪应力和 II 型应力强度因子远高于拉应力和 I 型值。

(4) 应力响应与位移响应机理不同, 位移控制点随车速在裂缝间漂移, 而轴载变化不改变控制点位置。

(5) 轴载大小与所有响应指标呈线性关系, 重载对贯穿裂缝的损伤加剧效应最显著。

本研究未考虑温度变化与材料非线性, 未来可引入温度-荷载耦合模型并结合实试验证, 以提升结论的工程适用性。

[参考文献]

- [1] 于新, 陈晨, 董夫强, 等. 长期服役状态下既有沥青路面结构延寿关键技术综述[J]. 中国公路学报, 2024, 37 (12): 161-181.
- [2] Mshali M R S, Steyn W J M. Effect of truck speed on the response of flexible pavement systems to traffic loading[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(4): 1213-1225..
- [3] Deng Y, Luo X, Gu F, et al. 3D simulation of deflection basin of pavements under high-speed moving loads[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 868-878..
- [4] 黄立葵, 欧阳子捷, 邹清华, 等. AC+CRC 复合式路面温缩反射裂缝的疲劳扩展[J]. 公路工程, 2023, 48(2): 62-67.
- [5] 龙光, 王昌衡, 刘建荣. 高等级沥青路面反射裂缝的三维数值分析[J]. 公路工程, 2008(2): 139-142.
- [6] 刘震. 基于探地雷达与弯沉检测的道路结构状况精细化评价方法研究[D]. 江苏: 东南大学, 2023.

作者简介: 陈桥 (1993—), 男, 汉族, 江苏徐州人, 硕士, 现任职于中国建筑第八工程局有限公司, 工程师, 研究方向为道路桥梁。