

基层修补材料及荷载位置对沥青路面力学响应的影 响

刘赫然¹, 崔 凯², 葛玉宁², 田 隽³, 管延华¹, 孙仁娟^{1*}

¹山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

²山东省路桥集团有限公司, 山东 济南

³山东高速股份有限公司, 山东 济南

Email: *786701038@qq.com

收稿日期: 2021年7月13日; 录用日期: 2021年7月27日; 发布日期: 2021年8月12日

摘 要

为了研究基层修补材料类型及荷载作用位置对沥青路面力学响应的影 响, 通过ABAQUS有限元软件建立三维路面结构模型, 分析沥青面层、基层修补结构以及原基层等路面结构层相应的力学响应指标随修补材料弹性模量和荷载作用位置的变化规律。计算结果表明: 修补材料与原结构的弹性模量越接近时, 基层修补结构剪应力、原基层层底拉应力就越小, 路面结构整体受力性能越好; 修补材料的弹性模量为 32,000 MPa时, 基层层底拉应力最大值为0.21 MPa, 是最小值的2倍。荷载作用于修补结构纵缝处时, 沥青面层层底拉应变、基层修补结构层底拉应力等值均大于其他位置处的值; 荷载作用于修补结构正中位置时, 各结构层的应力应变均较小。基层结构疲劳寿命最大值出现在修补材料弹性模量与原材料最接近、荷载位于修补结构正中时, 最大值为 1.36×10^{10} 轴次, 最小值出现在修补材料为柔性材料、荷载作用于修补结构纵缝处时, 最小值为 1.64×10^9 轴次, 最大值是最小值的8.3倍。研究成果为选择基层修补材料类型及修补位置提供了参考依据。

关键词

沥青路面, 基层修补, 有限元, 弹性模量, 荷载位置

Influence of Base Repair Material and Load Position on Mechanical Response of Asphalt Pavement

Heran Liu¹, Kai Cui², Yuning Ge², Juan Tian³, Yanhua Guan¹, Renjuan Sun^{1*}

¹School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

*通讯作者。

²Shandong Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan Shandong

³Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

Email: *786701038@qq.com

Received: Jul. 13th, 2021; accepted: Jul. 27th, 2021; published: Aug. 12th, 2021

Abstract

In order to study the influence of the type of base repair material and the location of load on the mechanical response of asphalt pavement, a three-dimensional pavement structure model was established by ABAQUS finite element software, and the change law of the corresponding mechanical response indexes of asphalt surface layer, base repair structure and original base with the elastic modulus of repair material and the location of load was analyzed. The results show that the closer the elastic modulus of the repair material to the original structure, the smaller the shear stress of the base repair structure and the tensile stress at the bottom of the original base layer are, and the better the overall mechanical performance of the pavement structure. When the elastic modulus of the repair material is 32,000 MPa, the maximum tensile stress at the bottom of the base course is 0.21 MPa, which is twice the minimum. When the load acts on the longitudinal joint of the repaired structure, the equivalent values of the tensile strain at the bottom of the asphalt layer and the tensile stress at the bottom of the repaired structure layer are greater than those at other positions; when the load acts on the middle position of the repaired structure, the stress and strain of each structural layer are small. The maximum fatigue life of the base structure appears when the elastic modulus of the repair material is closest to the raw material and the load is located in the middle of the repair structure; the maximum value is 1.36×10^{10} axial times. The minimum value appears when the repair material is flexible and the load acts on the longitudinal joints of the repair structure; the minimum value is 1.64×10^9 axial times, and the maximum value is 8.3 times of the minimum value. The research results provide a reference for selecting the type and location of base repair materials.

Keywords

Asphalt Pavement, Base Repair, Finite Element Method, Elastic Modulus, Load Location

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

截至 2020 年我国高速公路总里程居世界第一, 在建或已建成的高速公路中 90% 以上采用了沥青路面 [1], 绝大部分是半刚性基层沥青路面。在交通量大、轴载重的交通荷载条件下, 许多沥青路面在使用初期即出现车辙、开裂、坑槽等病害 [2] [3] [4], 这些病害会造成雨水汇集、下渗, 当水分渗透至基层时, 在水分和荷载反复作用下, 造成基层损坏、路面结构的承载能力降低 [5] [6] [7]。

对于半刚性基层损坏的沥青路面而言, 沥青路面坑槽修补应用较多的材料有沥青混合料类、无机结合料类以及混凝土等类型 [8], 但采用沥青类与混凝土类材料的修补效果不佳。延丽丽 [9] 建立三维有限元模型模拟坑槽修补情况, 研究发现不同弹性模量的修补材料, 其力学性能各不相同, 修补结构拉应力随

着弹性模量的增大而增大；田耀刚等[10]研究发现修补材料模量对坑槽修补结构的力学性能影响显著。因此通过具体的力学分析确定最佳修补材料类型是十分必要的。但目前大多数研究仅针对沥青路面的面层修补进行分析[6] [10] [11] [12]，忽略了基层产生破坏对路面的不利影响。

坑槽修补后的路面结构承受着车辆载荷的作用，不同荷载位置对修补后沥青路面结构受力性能的影响不同。徐清华[6]分析了不同荷载位置对修补结构的影响，提出在行车过程中尽量使车轮荷载作用在坑槽中间或者远离坑槽。王彦飞[13]根据修补结构有限元模型的五个不同荷载位置的受力情况对比分析，得出拉应力最不利位置出现在坑槽中心，剪应力最不利位置出现在坑槽的左下角。

基于此，本文根据沥青路面弹性层状体系理论，采用 ABAQUS 有限元软件针对不同的基层修补材料和荷载作用位置进行模拟研究，通过对沥青面层层底拉应变、基层修补结构纵缝剪应力、基层修补结构层底拉应力、原基层层底拉应力以及路基竖向压应变等指标的分析，得出基层修补材料弹性模量与荷载位置对沥青路面结构力学响应的影响，并进一步计算分析基层疲劳开裂寿命的变化规律，为基层坑槽修补提供更合理的依据。

2. 模型建立及参数设置

2.1. 模型尺寸

对路面进行有限元分析时，通常将路面各层结构视为平面无限大的弹性体，把路基假定为弹性半空间体。在进行模型建立时，若模型尺寸过大，相应的计算量会增大；若模型尺寸过小，无法消除边界条件的影响，计算结果的有效性会明显降低。因此，应该合理选择道路结构模型尺寸，本研究采用的模型尺寸选取为 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 8\text{ m}$ [13]。

根据如图 1 所示的沥青路面结构，建立三维有限元模型开展道路结构的力学响应分析，如图 2 所示。具体参数设定见表 1。



Figure 1. Schematic diagram of asphalt pavement structure

图 1. 沥青路面结构示意图

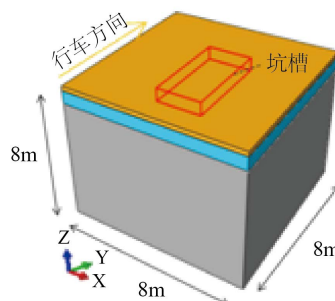


Figure 2. Finite element model of road structure

图 2. 道路有限元模型示意图

Table 1. Material parameters of each structural course
表 1. 结构层及材料参数设定

结构层	弹性模量/MPa	泊松比	厚度/m
面层	9000	0.25	0.18
基层	19,000	0.25	0.54
土基	50	0.4	8
基层修补结构	7000~32,000	0.25	0.54

2.2. 层间接触与边界约束条件

沿横向路宽方向(X方向)固定 X 方向,沿纵向行车方向(Y方向)固定 Y 方向,道路深度方向(Z方向)在土基底部完全固定,各层间为完全接触[14]。

2.3. 荷载与网格划分

本模型采用 C3D8R 单元类型,为八结点线性六面体单元,减缩积分,沙漏控制[15] [16]。单元网格的疏密直接关系到计算结果的精度与计算量的大小,对面层、基层的网格划分较密,而对于下部的土基结构,由于随着深度的增加,受荷载影响较小,因此网格划分较为稀疏,网格划分情况如图 3 所示。

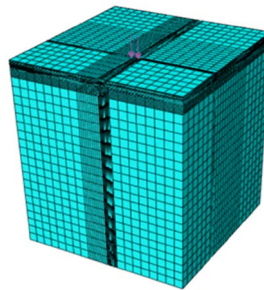


Figure 3. Graphical representation of model meshing
图 3. 模型网格划分图示

轮胎与路面的接触形状受轴载大小及轮胎类型等的影响,本研究把车轮荷载作用模型简化为正方形,将车轮荷载视为均布荷载。将标准轴(BZZ-100)车轮荷载简化为正方形均布荷载,取车轮荷载压强为 0.7 MPa。经过换算的正方形荷载作用面积为 $0.189 \times 0.189 \text{ m}^2$,两轮内缘间距为 0.13 m,即两轮中心距为 0.319 m,荷载模型如图 4 所示。

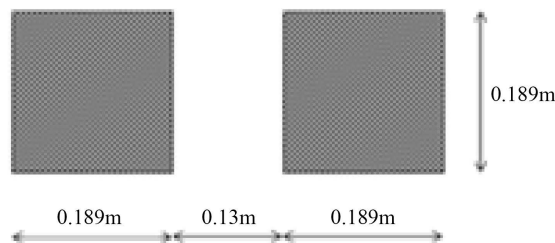


Figure 4. Wheel load model
图 4. 荷载模型图示

2.4. 工况设置

本研究选用沥青混合料、水泥稳定土、水泥稳定碎石以及混凝土材料 4 种具有代表性的修补材料，弹性模量分别为 7000 MPa、19,000 MPa、26,000 MPa、32,000 MPa。分别选取荷载位于修补结构正中、纵缝内侧、横缝内侧、边角处四种位置情况，如图 5 所示。

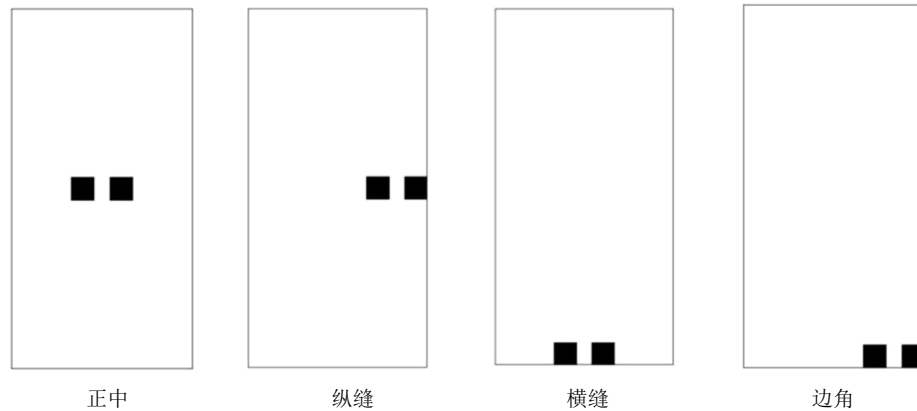


Figure 5. Schematic diagram of load location
图 5. 荷载位置示意图

选取基层修补结构纵缝剪应力、修补结构层底最大拉应力、沥青面层层底拉应变、原基层层底拉应力以及路基顶面压应变等指标，分析修补后的沥青路面结构的力学响应。

3. 计算结果与分析

3.1. 基层修补结构的力学响应

1) 修补结构纵缝剪应力

修补结构纵缝最大剪应力如图 6 所示。

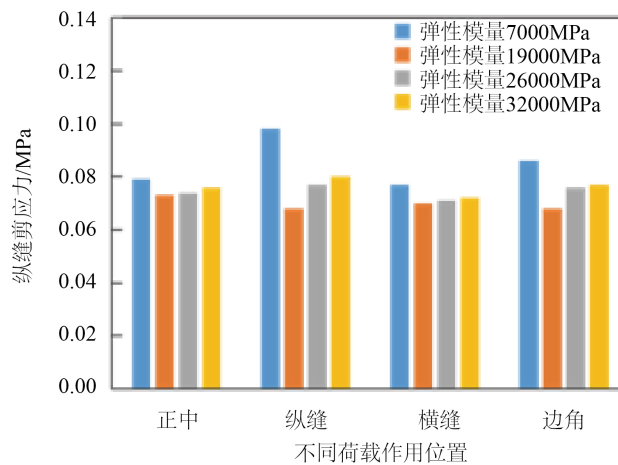


Figure 6. Shear stress of longitudinal joint in base repair structure
图 6. 基层修补结构纵缝剪应力

由图 6 可以看出，不同荷载位置情况下，基层修补材料类型的变化对修补结构纵缝剪应力的影响规

律是一致的。即随着修补材料弹性模量的增加，修补结构纵缝剪应力先减小后增大，最小值出现在修补材料弹性模量为 19,000 MPa 时。当修补材料与原材料弹性模量更接近时，两种结构协同变形，二者之间差生的剪应力最小，降低了基层结构发生剪切破坏的可能性；而当修补材料与原基层弹性模量有差异时，修补结构纵缝剪应力随着两种结构模量比的增大而增大。

荷载位于修补结构纵缝处时，修补材料类型对修补结构纵缝剪应力的影响最大，位于修补结构正中时影响最小。当荷载作用于基层修补结构纵缝位置时，基层修补结构纵缝剪应力相对较大，最大值出现在荷载作用于纵缝左侧、修补材料弹性模量为 7000 MPa 时，为 0.098 MPa。当修补材料与原基层材料刚度相近时，荷载作用位置对基层修补结构纵缝剪应力的影响不大，剪应力均约为 0.070 MPa。

因此，在实际路面修补时，应尽量保持新旧路面材料弹性模量的比值接近 1，且可通过适当增大或减小修补面积的方式，使修补结构纵缝远离路面荷载轮迹线，避免修补结构与原结构的纵缝处发生剪切破坏。

2) 修补结构最大拉应力

修补结构层底最大拉应力如图 7 所示。

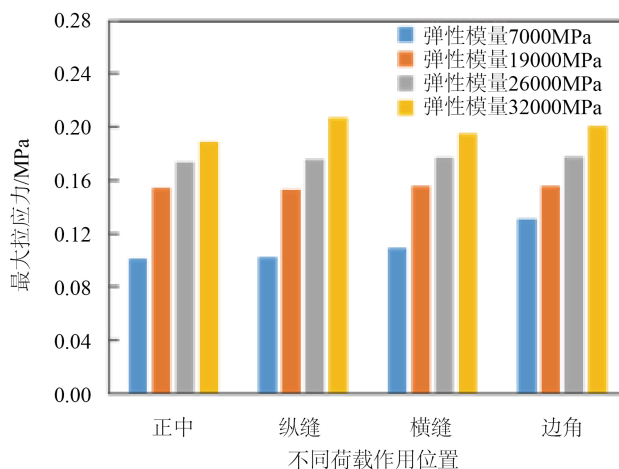


Figure 7. Maximum stress of base repair structure
图 7. 基层修补结构最大应力

由图 7 可以看出，各荷载位置情况下，基层修补材料类型的变化对修补结构最大拉应力的影响规律是一致的。即基层修补结构最大拉应力随着修补材料弹性模量的增加呈增大的趋势，说明修补结构刚度越大，所承担的应力值就越大。

荷载作用于修补结构正中位置时，不同弹性模量下基层修补结构最大拉应力均小于荷载作用于其他三种位置时，最小值出现在修补材料弹性模量为 7000 MPa 时，为 0.101 MPa。荷载作用于纵缝处、修补材料弹性模量 32,000 MPa 情况下，基层修补结构承担的拉应力最大，最大拉应力值为 0.207 MPa。

因此，修补结构弹性模量较大、荷载作用于修补结构纵缝处是导致弯拉破坏较不利的工况。说明基层修补材料选择柔性材料、通过适当改变修补面积使荷载作用位置处于修补结构正中，可减小基层修补结构的最大拉应力。

3.2. 沥青面层的力学响应

沥青面层最大拉应变如图 8 所示。

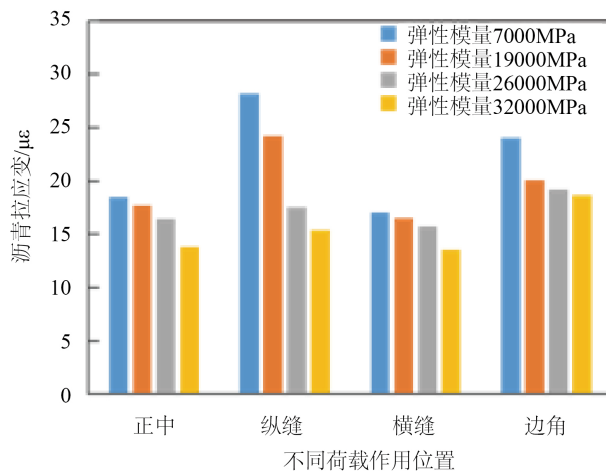


Figure 8. Maximum tensile strain of Asphalt Pavement

图 8. 沥青面层最大拉应变

由图 8 可以看出, 各荷载位置情况下, 基层修补材料类型的变化对沥青面层拉应变的影响规律是一致的。即沥青面层最大拉应变随着修补材料弹性模量的增加而减小, 因为基层弹性模量增大, 相当于基层对面层由柔性支撑过渡为刚性支撑, 荷载作用时面层不易发生弯拉变形。

荷载位于修补结构纵缝处时, 沥青面层最大拉应变受修补材料弹性模量的影响最大, 位于修补结构正中时影响最小。沥青面层最大拉应变出现在荷载位于修补结构纵缝处时, 最大值为 $28.2 \mu\epsilon$ 。荷载作用于修补结构正中、修补材料弹性模量 $32,000 \text{ MPa}$ 情况下, 沥青面层拉应变最小, 最小拉应变值为 $13.8 \mu\epsilon$, 仅为最大值的 49%。说明荷载位于修补结构正中位置有利于沥青面层的受力, 避免沥青面层发生弯拉破坏。

因此, 为保证沥青面层有良好的受力情况, 修补时应尽量使荷载远离修补结构纵缝处, 且基层修补材料不宜过柔。

3.3. 原基层的力学响应

原基层的最大拉应力如图 9 所示。

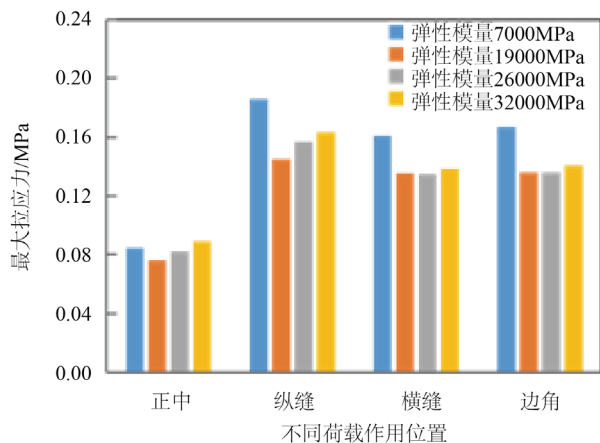


Figure 9. Maximum tensile stress at the bottom of original base course

图 9. 原基层层底最大拉应力

由图 9 可以看出, 各荷载作用位置情况下, 随着修补材料弹性模量的增大, 原基层最大拉应力均先减小后增大, 最小值出现在修补材料弹性模量为 19,000 MPa, 即修补材料弹性模量与原基层相同时。当修补材料为柔性材料时, 基层所受的应力主要由弹模较大的原基层结构承担, 原基层层底最大拉应力较大, 最大拉应力位于荷载作用位置正下方; 当修补材料弹性模量为半刚性/刚性材料时, 原基层材料与修补材料刚度均较大, 二者共同承担传递到基层的荷载, 因此原基层承担的拉应力随修补材料弹性模量的增大而增大。因此, 应选择与原基层材料弹性模量接近的修补材料, 才能保证原基层结构有较好的受力情况。

原基层层底拉应力的最大值出现在荷载作用于修补结构纵缝处时, 最大值为 0.186 MPa; 荷载作用于修补结构正中位置时的原基层层底拉应力值, 远小于荷载位于其他位置时, 为其他位置处的 50% 左右, 最小值为 0.076 MPa。

说明荷载作用位置对原基层结构受力的影响较为明显, 选择与原基层材料弹性模量接近的修补材料, 且使荷载位于修补结构正中处有利于提高路面结构的整体受力。

3.4. 路基的力学响应

路基的竖向压应变如图 10 所示。

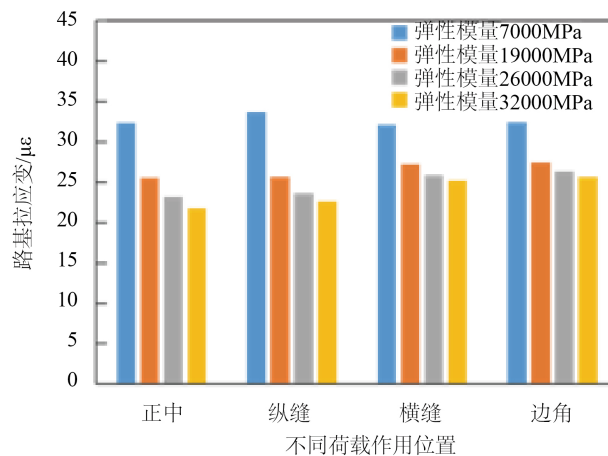


Figure 10. Vertical compressive strain on top of subgrade
图 10. 路基顶面竖向压应变

由图 10 可以看出, 各荷载位置情况下, 路基顶面竖向压应变受基层修补材料类型的变化的影响规律是相同的。即路基顶面竖向压应变随着修补材料弹性模量的增加而减小, 说明适当增加修补材料的刚度, 可减小路基顶面压应变。

荷载作用于基层修补结构纵缝处的路基顶面竖向压应变值均大于其他位置处, 最大值出现在修补材料弹性模量为 7000 MPa、荷载作用于修补结构纵缝处时, 最大值为 33.7 $\mu\epsilon$; 路基竖向压应变最小值出现在荷载作用于修补结构正中时, 最小值为 21.7 $\mu\epsilon$ 。因此, 修补时可通过调整修补面积使修补结构正中位置位于轮迹线处。

3.5. 疲劳开裂寿命计算

对于沥青路面, 在行车荷载的反复作用下, 路面基层层底产生交变应力幅, 随着荷载作用次数的增加, 路面结构累积变形逐渐增大, 会出现疲劳开裂现象[17], 故根据《公路沥青路面设计规范》[18]验算

基层疲劳开裂寿命。选择原基层层底最大拉应力作为分析指标，代入式(1)、式(2)，对基层疲劳开裂寿命进行计算，式中参数取值情况如表 2 所示，计算结果如图 11 所示。

Table 2. Fatigue life parameters of base course
表 2. 基层疲劳寿命参数取值

式中参数	取值
目标可靠指标 β	1.65
季节性冻土地区调整系数 k_a	1
温度调整系数 k_{T2}	1.32
疲劳试验回归系数 a	13.24
疲劳试验回归系数 b	12.52
参数 c_1	14
参数 c_2	-0.0076
参数 c_3	-1.47
面层厚度 h_a (mm)	180
计算点以上无机结合料稳定层厚度 h_b (mm)	540
无机结合料稳定类材料的弯拉强度 R_s (MPa)	1.5
现场综合修正系数 k_c	公式(2)计算
基层层底拉应力 σ_t (MPa)	模型中直接读取

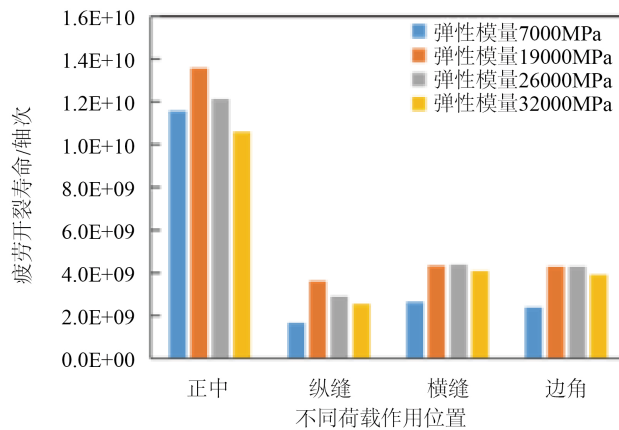


Figure 11. Effect of elastic modulus on fatigue cracking of base course

图 11. 弹性模量对基层疲劳开裂的影响

$$N_{f2} = k_a k_{T2}^{-1} 10^{a - b \frac{\sigma_t}{R_s} + k_c - 0.57\beta} \quad (1)$$

$$k_c = c_1 e^{c_2(h_a + h_b)} + c_3 \quad (2)$$

由图 11 可看出，各荷载位置情况下，随着修补材料弹性模量的增加，基层疲劳开裂寿命均呈现先增大后减小的趋势，不同修补材料弹性模量下疲劳寿命的最大值均出现在修补弹性模量为 19,000 MPa 时。说明修补材料弹性模量与原基层材料越接近时，基层结构越不易发生疲劳破坏，因此应尽量选择与原结

构刚度接近的修补材料。

基层疲劳开裂寿命不仅与基层修补材料类型有关,而且受荷载作用位置的影响。同种修补材料情况下,荷载作用于修补结构正中时,疲劳寿命最大;荷载作用于修补结构纵缝处时有最小疲劳寿命。

基层结构疲劳寿命最小值出现在修补材料弹性模量为 7000 MPa、荷载位于修补结构纵缝时,最小值为 1.635×10^9 轴次;最大值出现在修补材料弹性模量为 19,000 MPa、荷载位于修补结构正中时,最大值为 1.36×10^{10} 轴次,是最小疲劳寿命的 8.3 倍。因此,基层修补时应尽量选择与原基层材料弹性模量接近的材料,且通过调整修补面积避免修补结构纵缝位于荷载作用位置处,以保证路面结构的整体受力性能。

4. 结论

1) 修补结构纵缝剪应力及原基层层底拉应力的最小值出现在修补材料与原材料弹性模量最接近时,因此,在路面修补时,应尽量使新旧路面材料弹性模量接近。

2) 基层修补结构最大拉应力随着修补材料弹性模量的增加呈增大的趋势。沥青面层最大拉应变及路基顶面竖向压应变随着修补材料弹性模量的增加而减小,因此适当增加修补材料的弹模,可改善面层与路基的受力性能。

3) 荷载作用于基层修补结构纵缝处时,修补结构纵缝剪应力、修补结构拉应力、原基层层底拉应力及路基顶面竖向压应变等值均大于其他位置处,最小值出现在荷载作用于正中处,因此通过调整修补面积使修补范围正中位于轮迹线处,以保证路面结构的整体受力性能。

4) 基层疲劳开裂寿命最大值均出现在修补弹性模量为 19,000 MPa 时,说明该种工况下基层结构不易发生疲劳破坏。荷载作用于修补结构正中时,疲劳寿命最大;荷载作用于修补结构纵缝处时疲劳寿命最小。因此,应尽量选择与原基层材料弹性模量接近的材料,且应使修补结构纵缝远离轮迹处。

参考文献

- [1] 周岚. 高速公路沥青路面使用性能评价及预测研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2015.
- [2] 路进. 公路沥青路面病害与养护处理分析[J]. 智能城市, 2021, 7(9): 93-94.
- [3] 银廷俊. 沥青路面坑槽冷态修补材料设计及修补工艺[J]. 中国公路, 2019(14): 106-107.
- [4] 索德. 沥青路面病害及养护技术分析[J]. 交通企业管理, 2019, 34(6): 88-89.
- [5] 徐清华. 沥青路面坑槽修补技术及其计算机仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.
- [6] 张凤合. 浅析公路养护管理中存在的问题及半刚性沥青路面养护维修技术对策[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(3): 85-88.
- [7] 冯迪. 半刚性基层反射裂缝分析模型和参数研究[J]. 交通世界, 2019, 4(18): 14-15+57.
- [8] 韩赣, 高明月. 沥青路面坑槽快速修补技术施工工艺研究[J]. 科学技术创新, 2021, 4(8): 116-117.
- [9] 延丽丽. 基于 ANSYS 的沥青路面坑槽修补结构仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [10] 田耀刚, 延丽丽, 陈长征, 经冠举. 材料模量对沥青路面坑槽修补结构力学性能影响分析[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(11): 58-62.
- [11] 王彦飞. 沥青路面半刚性基层快速修补关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [12] 高菲, 魏连雨, 马士宾. 基于有限元的沥青路面坑槽修补结构力学特征研究[J]. 河北工业大学学报, 2012, 41(2): 92-95+100.
- [13] 阙宪聪. 橡胶沥青路面结构优化设计[J]. 交通世界, 2020, 4(13): 64-65.
- [14] 李超. 交通荷载作用下沥青路面开裂的有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [15] 侯芸, 董元帅, 张艳红, 田佳磊. 基于界面力学响应的沥青路面坑槽修补研究[J]. 公路, 2020, 65(5): 294-299.
- [16] 杨彦海, 闫羲钦, 安中华, 杨野. 沥青路面坑槽修复材料研发及结构力学响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然

科学版), 2020, 36(2): 314-322.

- [17] 栾利强. 半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 118-128.
- [18] 中交路桥技术有限公司. JTG D50-2017, 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.