

旧水泥混凝土路面微裂均质化处治后路面结构力学响应分析

刘 惊¹ 潘学奎² 俞金龙³ 徐 东³

1 东阳市公路与运输管理中心, 浙江 东阳 322100

2 江苏路易达工程科技有限公司, 江苏 南京 210000

3 河海大学, 江苏 南京 210024

[摘要]微裂均质化技术作为一种新兴的白改黑技术, 目前正处于推广阶段, 对于微裂后路面结构的力学响应缺乏定量分析。此文首先调研常见的水泥混凝土路面的结构形式, 总结出四类典型路面结构。随后通过 Abaqus 力学软件, 计算出加铺沥青面层后, 路面结构在动态行车荷载的作用下, 沥青加铺层层底拉应变、路表弯沉、沥青加铺层最大剪应力等路面设计指标随基层模量, 加铺层厚度, 破碎层模量改变而产生的变化规律, 最终得出各类型结构破碎程度的建议值以及加铺层厚度适宜的使用范围。

[关键词]微裂均质化; 典型结构; Abaqus; 力学响应

DOI: 10.33142/aem.v5i8.9446

中图分类号: U418.6

文献标识码: A

Response Analysis of Structural Mechanics of Old Cement Concrete Pavement after Microcrack Homogenization Treatment

LIU Jing¹, PAN Xuekui², YU Jinlong³, XU Dong³

1 Dongyang Highway and Transportation Management Center, Dongyang, Zhejiang, 322100, China

2 Jiangsu Luyida Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

3 Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210024, China

Abstract: Micro crack homogenization technology, as an emerging white to black technology, is currently in the promotion stage and lacks quantitative analysis of the mechanical response of the pavement structure after micro cracks. This article first investigates the common structural forms of cement concrete pavement and summarizes four typical pavement structures. Then, Abaqus mechanics software is used to calculate the change rule of pavement design indicators such as tensile strain at the bottom of the asphalt overlay layer, surface deflection, maximum shear stress of the asphalt overlay layer and other pavement design indicators with the change of base modulus, overlay thickness, and broken layer modulus under the action of dynamic driving load, and finally obtain the recommended value of the degree of fragmentation of various typical structures and the appropriate use range of overlay thickness.

Keywords: microfracture homogenization; typical structure; Abaqus; mechanical response

引言

微裂均质化作为一项主流的面板破碎处理技术, 该技术通过专用设备将水泥混凝土面板破碎, 并使得水泥混凝土面板内部形成均匀的细微斜向裂纹, 使得各块体紧密嵌锁, 既能有效地克服反射裂缝, 又能最大限度地保留水泥混凝土面板的原有强度, 较好地避免了打裂压稳及碎石化技术的弊端。由于微裂均质化技术尚处于起步阶段, 国内外并没有对微裂后路面的力学响应进行深入分析, 因此本文通过 Abaqus 力学软件模拟, 分析沥青加铺层层底拉应变、路表弯沉、沥青加铺层最大剪应力等路面设计指标随基层模量, 加铺层厚度改变而产生的变化规律, 最终得出各类典型结构加铺层厚度适宜的使用范围, 为后续的研究提供理论基础。

1 典型水泥混凝土路面结构调研

为了对微裂均质化结构进行力学定量分析, 本文对浙江、江苏省内的近 3 年的白改黑工程路段进行分析, 总结

出以下四类典型路段:

结构一: 24cm 水泥混凝土面板+20cm 水泥稳定碎石基层+20cm 级配碎石底基层+土基。该结构对应的是高等级国省道公路。

结构二: 24cm 水泥混凝土面板+20cm 水泥稳定碎石基层+土基。该结构对应的是低等级国省道公路。

结构三: 24cm 水泥混凝土面板+20cm 级配碎石基层+土基。该结构对应的是县乡道级别的农村公路。

结构四: 20cm 水泥混凝土面板+土基。该结构对应的村道级别农村公路。

2 路面结构有限元模型的建立

2.1 模型基本信息

(1) 路面交通荷载模拟方法

为模拟路面交通荷载的真实情况, 本文根据 Barksdale 和 Brown^[1-2]等人的研究, 用振动移动荷载的形式进行模拟, 即采用固定振动频次的周期性动载模拟实际

的车辆荷载。

本次模拟为了便于有限元建模中的网格划分,将双圆均布荷载转化为矩形均布荷载,经过相关计算,矩形均布荷载的尺寸为 21.3cm×16.7cm,行车速度采用 36km/h,由上式计算荷载作用时间为 t 为 0.2s。取荷载周期为 2s,分析步时间取 60s,则共循环 30 次。

(2) 材料参数

研究李赫^[3]以及曾志远^[4]对沥青混合料及沥青路面黏弹性力学响应分析,本次模拟沥青面层采用广义的麦克斯韦模型参数。同时本次模拟主要分析振动行车荷载作用下沥青面层材料的黏弹性,因此为简化计算,忽略基层和土基的黏弹性或黏弹塑性^[5],根据张鹏^[6]的研究,结合《混凝土结构设计规范》,将破碎层模量定为 C40 水泥混凝土模量的 70%,各结构层材料参数见表 1。

表 1 模型结构层相关参数

材料	模量 (MPa)	泊松比	质量密度 (kg/m ³)
旧水泥混凝土破碎层	21000	0.2	2400
水泥稳定碎石	14000	0.25	2300
级配碎石	350	0.35	2100
土基	80	0.4	1800

3.2 模型的建立

利用 Abaqus 有限元软件建立循环荷载作用下沥青路面有限元模型,沥青面层厚度定义为 12cm,材料为 5cm AC-13+7cm Sup-20。考虑结构和荷载的对称性,选取路面结构 1/2 建立模型。模型宽度 2.5m,深度方向取 3m。各层之间接触关系为完全连续,对称轴处为对称约束;与对称轴平行且远离对称轴方向约束 X 方向的位移,底边完全约束。对路面结构整体施加重力荷载,对面层施加车轮均布荷载,荷载强度为 0.7MPa^[7],路面结构几何模型如图 1 所示。

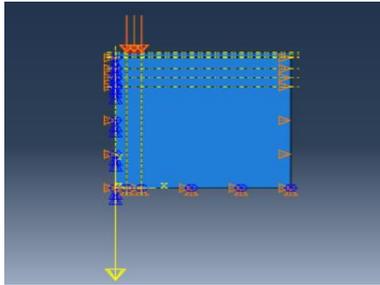


图 1 路面结构模型图

通过前文调研 4 种常见的典型路面结构,在加铺 12cm 沥青面层的基础上,进行力学响应分析。

4 力学模拟结果与分析

4.1 基层(土基)模量对加铺层力学响应的影响

本小节通过调整上述 4 个路面结构的基层模量,并保持其他结构层的参数不变,来分析不同基层模量下加铺层力学响应的变化规律。

(1) 路表弯沉变化

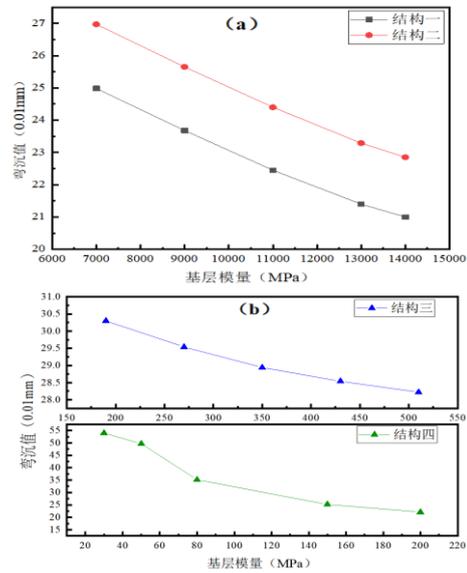


图 2 路表弯沉随基层模量变化趋势图: (a) 结构一、二; (b) 结构三、四

(2) 沥青加铺层最大剪应力变化

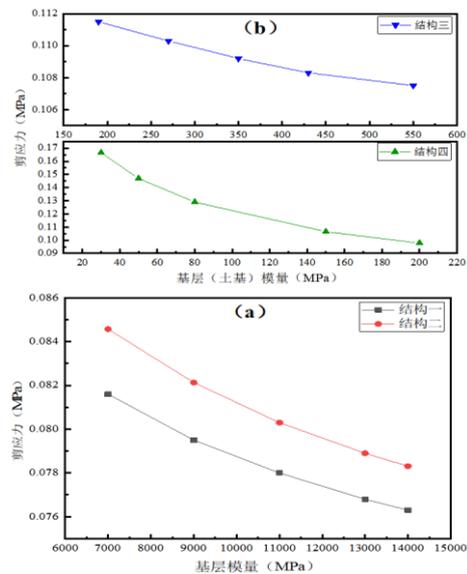
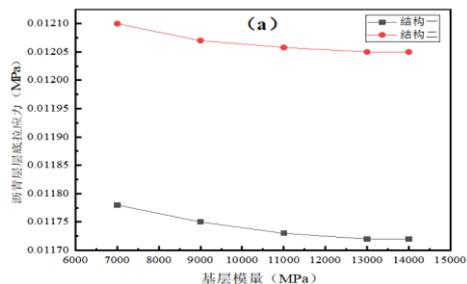


图 3 加铺层最大剪应力随基层强度变化趋势图: (a) 结构一、二; (b) 结构三、四

(3) 沥青加铺层底拉应力变化



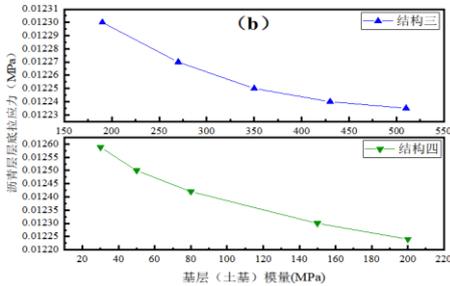


图4 加铺层层底拉应力随基层模量变化趋势图:(a) 结构一、二;
 (b) 结构三、四

针对结构一、结构二,较高的水稳基层模量使路表弯沉值保持在较低水平,但水稳基层模量的变化对于沥青面层最大剪应力与沥青层层底拉应力的影响不大。针对结构三,基层模量对路表弯沉、沥青层层底拉应力、沥青面层最大剪应力的影响均不大;针对结构四,由于土基层厚度较大,土基模量对路表弯沉、沥青面层最大剪应力影响较大。

3.2 加铺层厚度对其力学响应的影响

本小节通过调整上述4个路面结构的加铺层厚度(旧水泥混凝土面板),并保持其他结构层的参数不变,来分析在不同加铺层厚度的状况下,加铺层力学响应的变化规律。通过该部分模拟分析,得出不同结构加铺层厚度的变化对各项指标的影响效果,根据设计弯沉值等条件,确定加铺层厚度的合理范围。

(1) 路表弯沉变化

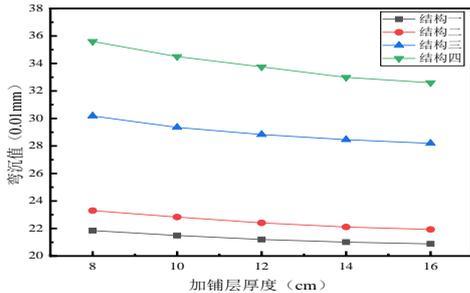


图5 路表弯沉随加铺层厚度变化趋势图

(2) 沥青面层最大剪应力变化

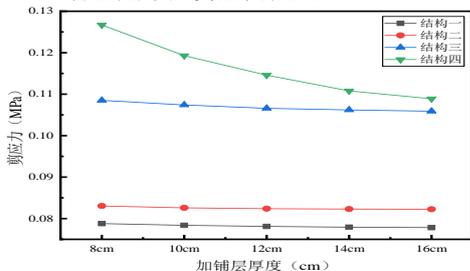


图6 沥青面层最大剪应力随加铺层厚度变化情况图

(3) 沥青层层底拉应力变化

针对以上四种路面结构,由于旧水泥混凝土面板微裂均质化技术能够保留较高的破碎层残余强度,沥青加铺层厚度的变化对沥青层层底拉应力、路表弯沉值以及沥青层最

大剪应力的影响均较小。因此,各力学指标对加铺层厚度的变化不敏感,在实际工程应用中,可以将此作为降低沥青面层加铺层厚度的依据。针对结构一、二,结合工程经验,建议加铺层厚度取10cm~14cm;针对结构三与结构四,考虑到公路等级较低,交通荷载等级较低,结合工程经验,建议结构三、四的加铺层厚度取8~12cm。

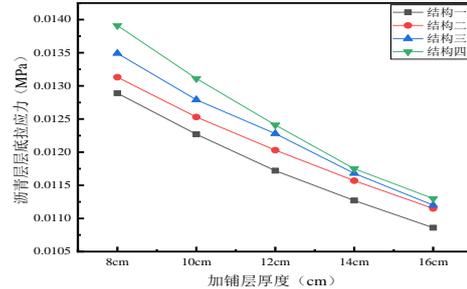


图7 沥青层层底拉应力随加铺层厚度变化情况图

3.3 破碎层模量对加铺层力学响应的影响

在沥青路面设计规范中,一般将各结构层模量视为路面结构验算中的重要参数。本小节通过改变旧水泥混凝土面板微裂后的模量,并保持其他结构层的参数不变,来分析不同破碎层模量下加铺层力学响应的变化规律。力学响应状况通过路表弯沉、沥青加铺层剪应力、沥青加铺层层底拉应力三大指标来表征。微裂破碎层模量分别取15000 MPa、17000 MPa、19000 MPa、21000 MPa、23000 MPa。通过该部分模拟分析,得出不同结构破碎层模量变化对各项指标的影响效果,结合设计弯沉值等条件,确定各结构破碎程度的合理范围。

(1) 路表弯沉变化

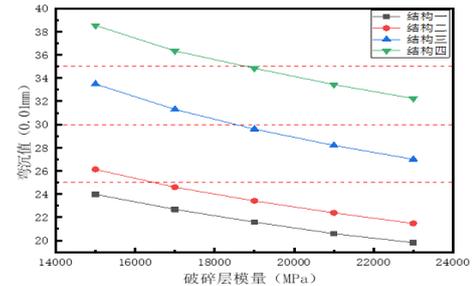


图8 路表弯沉随破碎层模量变化趋势图

(2) 沥青加铺层最大剪应力变化

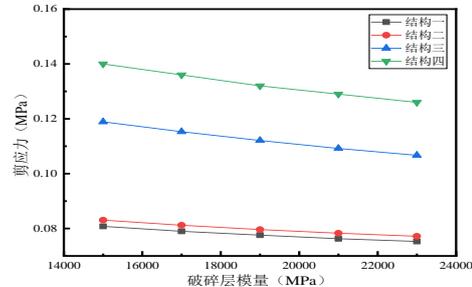


图9 沥青面层最大剪应力随破碎层模量变化趋势图

(3) 沥青加铺层层底拉应力变化

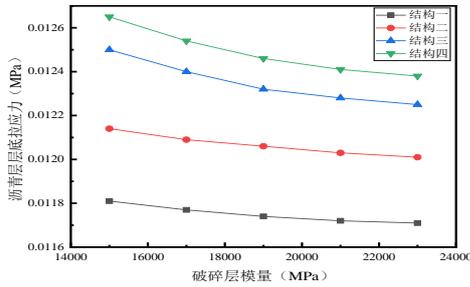


图 10 沥青面层层底拉应力随破碎层模量变化趋势图

由图 8~10 可知,随着破碎层模量的不断提高,结构一、二、三、四的路表弯沉、沥青面层最大剪应力和沥青面层层底拉应力均呈现下降趋势,结构一、二的下降速率低于结构三、四的下降速率,且沥青面层最大剪应力和沥青面层层底拉应力的数值均处于较低水平。

(4) 破碎程度分析。结合破碎层模量对弯沉、沥青面层层底拉应力、沥青层最大剪应力的整体分析可得,对于结构一、结构二,破碎层模量对沥青层最大剪应力、沥青面层层底拉应力的影响程度较小,几乎可忽略,对路表弯沉的影响较大,故在选择破碎层模量时,应将路表弯沉作为首要控制因素。为此,本文调研了近年进行过微裂白改黑工程的国省道,将其设计弯沉作为参考,针对于结构一、结构二,实际工程中常见的设计弯沉值大多在 0.28mm~0.3mm。根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)对设计弯沉的计算公式,设交通荷载等级为重等级交通,设计弯沉值应在 0.25mm~0.3mm 之间。综合调研结果与计算结果,应保证路表弯沉值不大于 0.25mm。结合图 8 可得,结构二的水泥混凝土面板的破碎层模量应大于 17000MPa,结构一在水泥混凝土破碎层模量为 15000MPa 时弯沉值同样小于 0.25mm,但此时路面模量损失过大,残余模量已不足水泥混凝土面板原模量的 50%,板体处于过碎状态,对路用性能会产生较大的影响,考虑到结构一与结构二路面结构类似,结构一的破碎层模量同样取大于 17000MPa。

针对于结构三与结构四,破碎层模量对沥青层最大剪应力、沥青面层层底拉应力的影响程度较小,且都随着破碎层模量的增加而降低,因此,理论上应在保证面板微裂破碎效果的情况下,尽可能使破碎层保持较大的模量。由于结构三、四多为低等级农村公路,交通荷载等级较低,设交通荷载等级为中等交通荷载,经设计弯沉公式计算,设计弯沉值应在 0.3mm~0.35mm,结合工程经验,结构三的弯沉应保持在 0.3mm 以下,结构四的弯沉值应保持在 0.35mm 以下。因此参考结构三、四的弯沉图,结构三、四的破碎层模量应保持在 19000MPa 以上。

基于以上分析,本小节定义破碎程度的概念如下:

$$\text{破碎程度} = \frac{\text{微裂前面板模量} - \text{微裂后破碎层模量}}{\text{微裂前面板模量}}$$

根据相关研究^[8],微裂破碎程度小于 20%时,裂缝发

展不明显,无法达到较好的破碎效果,而破碎程度大于 20%后,裂缝发展速度逐渐变快,水泥混凝土面板可达到较好的微裂效果。

结合上文对各结构破碎层模量的取值范围与破碎程度的定义,各强度的水泥混凝土面板在微裂后应达到的破碎程度如下:

表 2 结构一、二微裂破碎程度建议表

结构类型	水泥混凝土面板强度	水泥混凝土面板模量	微裂破碎程度建议值
结构一、二	C30	3000MPa	20%~44%
	C35	3150MPa	20%~46%
	C40	3250MPa	20%~48%
结构三、四	C30	3000MPa	20%~37%
	C35	3150MPa	20%~40%
	C40	3250MPa	20%~42%

4 结论

本文通过 Abaqus 计算出加铺后沥青面层在动态行车荷载的作用下,沥青面层层底拉应力、路表弯沉、沥青面层最大剪应力等力学指标的随基层强度,加铺层厚度的变化规律,总结如下:(1)针对于结构四(对应于村道级别的农村公路),由于土基层厚度较大,土基模量对路表弯沉、沥青面层最大剪应力影响较大,因此,在实施微裂均质化技术前,有必要对土基进行加固处理。(2)结合工程经验,建议结构一、结构二加铺层厚度取 10cm~14cm。考虑到结构三、四为农村公路,交通荷载等级较低,结合工程经验,建议结构三、四的加铺层厚度取 8~12cm。(3)对于上述四种路面结构,水泥混凝土面板破碎层模量对沥青面层最大剪应力、沥青面层层底拉应力的影响程度较小,对路表弯沉的影响较大。故在选择面板破碎参数时,应将路表弯沉作为首要控制因素。结合工程经验及设计弯沉值的计算公式,确定了四种结构微裂破碎程度的建议值。

【参考文献】

- [1]李赫.动静荷载作用下沥青混合料及沥青路面黏弹性力学响应分析[D].吉林:吉林大学,2021.
 - [2]曾志远.玄武岩纤维沥青路面性能及结构分析[D].浙江:浙江大学,2013.
 - [3]朱玉琴.半刚性基层沥青路面设计控制指标研究[D].江苏:东南大学,2019.
 - [4]张鹏.水泥混凝土路面微裂均质化技术在白改黑工程中的应用研究[D].江苏:河海大学,2021.
 - [5]廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].江苏:东南大学出版社,2008.
 - [6]谢文凯.旧水泥路面微裂破碎技术对沥青加铺层力学行为影响研究[D].陕西:西安建筑科技大学,2018.
- 作者简介:刘惊,男,东阳市公路与运输管理中心,高级工程师,公路工程,研究方向为公路与桥梁范围。