

文章编号:1007-6735(2013)03-0302-05

泡沫沥青冷再生路面结构剪应力响应分析

武昭融, 李秀君, 谢思昱, 王 冰

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 采用 ANSYS 有限元对泡沫沥青再生路面结构剪应力响应进行了分析, 分析结果表明: 基层模量是影响泡沫沥青再生基层路面面层和基层内最大剪应力的重要因素之一. 面层剪应力随着基层模量增加而降低, 相反, 基层剪应力则提高, 基层内最大剪应力在基层模量达到 2 500 MPa 时几乎等同于面层内的最大剪应力. 通过研究, 论证了研究泡沫沥青冷再生混合料抗剪性能的必要性.

关键词: 沥青路面; 泡沫沥青; 冷再生混合料; 有限元; 抗剪性能

中图分类号: U 416.27 **文献标志码:** A

Shearing Stress in Cold Recycling Mixture of Foamed Asphalt Pavement

WU Zhao-rong, LI Xiu-jun, XIE Si-yu, WANG Bing

(College of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The shearing stress in pavement recycled with foamed asphalt was analyzed by ANSYS finite element software, which concludes that the modulus of base course is one of the key factors which influence the maximum shearing stress in surface course and base course of the pavement recycled with foamed asphalt. The greater the modulus of base course is, the lower the shearing stress in surface course is, and the higher the shearing stress in base course is. When the modulus of base course reaches 2 500 Mpa, the maximum shearing stress in base course is almost equivalent to that in surface course. Thus it's necessary to consider the shearing strength of cold recycling mixtures of foamed asphalt.

Key words: asphalt pavement; foamed asphalt; cold recycling mixture; finite element; shearing performance

泡沫沥青再生混合料属于沥青稳定类材料, 具有粘弹性特点, 对温度有一定敏感性, 剪切变形将是该类材料易出现的病害之一. 据国内外一些资料表明^[1-2], 泡沫沥青冷再生路面易发生的病害是车辙及网裂, 流动性车辙和疲劳开裂与面层、基层内部最大剪应力有关. 此外, 由于泡沫沥青再生层上沥青面

收稿日期: 2012-12-26
第一作者: 武昭融(1990-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 路面结构、路面再生技术研究. E-mail: 499419722@qq.com
通讯作者: 李秀君(1976-), 女, 副教授. 研究方向: 路面结构设计、路面养护技术研究. E-mail: junzixiu@163.com

层较薄,通常为 5~10 cm,泡沫沥青再生层充当着下面层的角色,因此有必要从理论上分析泡沫沥青冷再生基层剪应力的变化规律,为冷再生路面结构设计及混合料设计提供设计依据. 本文采用 ANSYS 有限元对泡沫沥青混合料再生基层的抗剪性能进行研究.

1 有限元模型的建立

1.1 荷载形式

轮胎压力采用实测轮胎压力进行计算^[3]. 轮胎花纹有纵向和横向两种,本文采用纵向花纹轮胎. 为了使有限元计算模型建立方便,胡小弟博士对轮胎接地面的形状进行了简化,具体详见文献[3].

1.2 模型的建立

根据荷载垂直应力及轮胎接地尺寸的特性,采用的实体模型具体尺寸为:路面横向(X)、路面纵向(Y)、路面厚度方向(Z)分别为 2.5 m, 2.5 m, 4.0 m. 该模型边界条件假设为:路面横向及纵向没有位移,底面完全固定,层间接触为完全连续,路基为弹性半空间地基模型,依据弹性层状体系理论进行计算. 路面各层材料假设为各向同性,且均质连续,使用弹性模量 E 和泊松比 μ 表征材料特性,材料的粘弹性性质忽略不计.

1.3 有限元网格划分

有限元网格划分是整个结构分析的基础. 为了保证计算良好的精度,采用六面体八结点等参单元,在 ANSYS 程序中即为 solid45 单元. 有限元模型网格划分后如图 1 所示.

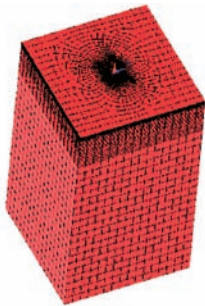


图1 有限元计算模型
Fig.1 Finite element model

2 路面结构参数对剪应力的影响

2.1 原路面当量回弹模量的影响

鉴于目前国内路面再生工程较常用的结构体

系,本研究采用 4 层结构体系,路面结构及各层计算参数列于表 1 中,选用 600 kPa/2 500 kg 为荷载工况,在其它参数不变情况下,变化铣刨后路面当量回弹模量(E_0),分析 E_0 对路面面层及基层内最大剪应力指标的影响.

表1 结构组成及计算参数
Tab.1 Structure composition and calculation parameters

结构层	模量/MPa	材料	μ	厚度/cm
上面层	1 400	HMA	0.35	4
下面层	1 200	HMA	0.35	6
基层	700	泡沫沥青再生混合料	0.35	15
铣刨后路面	*	铣刨后剩余水稳基层	0.20	—

为了解路面铣刨后当量回弹模量大小范围,对浙江省有关泡沫沥青冷再生层下承层顶面回弹弯沉进行了调查,并计算得出回弹模量,结果如表 2 所示. 回弹弯沉通过开挖探坑(开挖深度至泡沫沥青再生层底),然后进行承载板测试得出.

表2 现场承载板法测得回弹模量
Tab.2 Resilient modulus tested by in-situ bearing plate method

工程实例	公路等级	位置	测量深度	回弹模量/MPa
2006 年浙江 04 省道余杭段	一级公路	行车道	铣刨后路面下 10 cm	150.0
2006 年浙江 01 省道平湖段	一级公路	行车道	铣刨后路面下 25 cm	260.0
2007 年湖盐线乌镇支线	二级公路	左幅行车道	铣刨后路面下 20 cm	275.4
2007 年湖盐线乌镇支线	二级公路	右幅行车道	铣刨后路面下 20 cm	445.6
2006 年浙江 320 国道桐乡段	一级公路	行车道	铣刨后路面下 25 cm	237.0
2007 年嘉兴市 区昌盛路	市区主干道	行车道	铣刨后路面下 25 cm	84.4

根据表 2 调查结果,可以看出泡沫沥青冷再生层下承层原路面当量回弹模量在 50~450 MPa,分析其对路面面层及基层内最大剪应力指标的影响. 计算结果列于表 3 及图 2(见下页).

由图 2 可以看出,面层最大剪应力随剩余原路面当量回弹模量 E_0 的增大而减小,而当 E_0 在 150 MPa 以上时,基层最大剪应力随 E_0 增大而有小幅度的增加. 当 E_0 在 50 MPa 至 150 MPa 范围内时,基层和面层内剪应力随着 E_0 的增大而显著降低. 此外,由表 3 数据得出,当 E_0 在 150 MPa 变化

表 3 E_0 对基层面层内最大剪应力的影响
Tab.3 Influence of E_0 on $\tau_{\max}$ in base and surface courses

E_0/MPa	面层 $\tau_{\max}/\text{MPa}$	面层位置 $(x,y,z)/\text{m}$	基层 $\tau_{\max}/\text{MPa}$	基层位置 $(x,y,z)/\text{m}$
450	0.229	(0.256,0.013,-0.050)	0.161	(-0.184,-0.013,-0.115)
350	0.230	(0.256,0.013,-0.050)	0.160	(-0.184,-0.013,-0.115)
250	0.231	(0.256,0.013,-0.050)	0.159	(-0.184,-0.013,-0.115)
150	0.236	(0.279,0.012 4,-0.033)	0.160	(-0.227,-0.013,-0.115)
50	0.285	(-0.043,-0.012 4,-0.007)	0.187	(0.119,-0.013,-0.235)

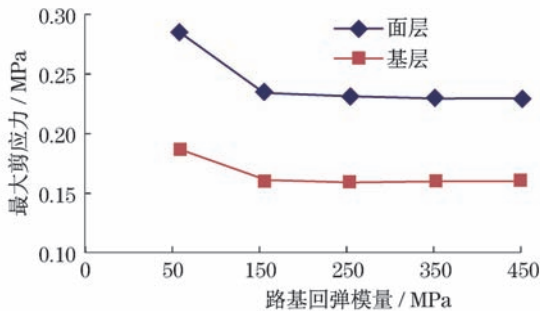


图 2 路基模量对基层面层 $\tau_{\max}$ 的影响
Fig.2 Influence of base modulus on $\tau_{\max}$ in base and surface courses

时,面层及基层内的最大剪应力所处的位置基本不变,但若 E_0 由 150 MPa 进一步减小,面层最大剪应

力越靠近路表,而基层内最大剪应力则下移。
由此可见,当剩余原路面当量回弹模量高于 150 MPa 时,基层面层内最大剪应力变化很小,且最大剪应力位置基本不变.当剩余原路面当量回弹模量低于 150 MPa 时,剩余原路面当量回弹模量越低,基层面层内最大剪应力越高,且变化幅度较大;同时面层内最大剪应力位置上升而基层内最大剪应力出现的位置下移.

2.2 基层回弹模量的影响

采用表 1 的 4 层结构体系,铣刨后路面模量取 250 MPa,固定其它参数不变,变化基层回弹模量 E_3 ,分析其对面层基层内最大剪应力的影响. 计算结果见表 4 及图 3.

表 4 E_3 对基层面层内最大剪应力的影响
Tab.4 Influence of E_3 on $\tau_{\max}$ in base and surface courses

E_3/MPa	面层 $\tau_{\max}/\text{MPa}$	面层位置 $(x,y,z)/\text{m}$	基层 $\tau_{\max}/\text{MPa}$	基层位置 $(x,y,z)/\text{m}$
500	0.252	(-0.184,-0.013,-0.090)	0.151	(-0.184,-0.013,-0.115)
700	0.231	(0.256,0.013,-0.050)	0.159	(-0.184,-0.013,-0.115)
1 000	0.219	(0.256,0.013,-0.050)	0.165	(-0.227,-0.013,-0.115)
1 500	0.208	(0.256,0.013,-0.033 3)	0.171	(-0.240,0.013,-0.115)
2 000	0.204	(0.240,0.013,-0.033 3)	0.176	(0.147,-0.013,-0.235)
2 500	0.203	(0.240,-0.013,-0.033)	0.195	(0.135,-0.013,-0.235)

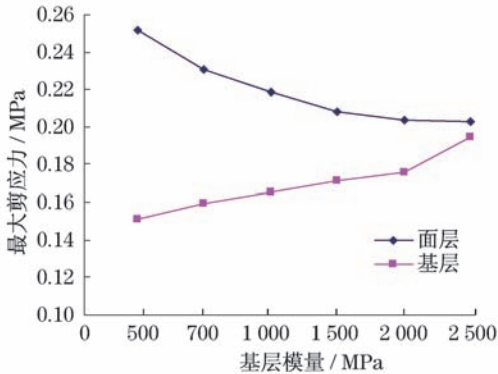


图 3 基层模量对基层面层最大剪应力的影响
Fig.3 Influence of base course modulus on $\tau_{\max}$ in base and surface courses

为达到较好的拌和效果,泡沫沥青在发泡及混合料拌和过程中需加入一定量的水,因此,泡沫沥青再生混合料模量会随着时间的延长而增大.路面维修期间,其模量在 600~750 MPa 范围内,当路面修筑完通车半年左右,泡沫沥青再生基层模量进一步增大,其模量值在 1 000 MPa 左右.随着时间的延长,泡沫沥青再生混合料中水泥进一步硬化,沥青老化,该混合料模量将继续有所提高.因此有必要分析研究再生基层模量变化对路面基层面层内最大剪应力的影响.

由图 3 看出,当基层模量在 500 MPa 至 2 500 MPa 范围内,面层内最大剪应力随着基层模量的增大而减小,而基层内最大剪应力变化趋势则

相反.由图 3 可见,当基层模量达到 2 500 MPa 时,基层内最大剪应力与面层内的最大剪应力相当.可见,随着时间的延长,泡沫沥青再生基层产生剪切破坏或剪切疲劳的可能性增大.

当基层模量由 500 MPa 增加到 700 MPa 时,面层内最大剪应力位置由下面层下部提高至下面层上部;当模量增加至 1 500 MPa 时,面层内最大剪应力位置由下面层上部提高至上面层;而当基层模量增加至 2 000 MPa 时,基层内最大剪应力位置才突然从基层上部下移至基层下部位置.

由此说明,基层模量过小,面层内剪应力增大,路面易产生车辙、拥包等病害.因此泡沫沥青再生基层路面铺筑完后,延长路面养生时间可有效提高整个路面的使用寿命.这也说明了为什么以往有些泡沫沥青试验路若出现病害的话,都是在路面通车几天或一两个月内出现.

此外,当基层模量高于 2 000 MPa 时,泡沫沥青再生基层最大剪应力将出现于下部,由于压实度不一致的缘故,泡沫沥青再生层下部的密实性不如上部^[4].因此,当泡沫沥青再生层厚度超过 15 cm 时,为提高泡沫沥青再生基层的抗剪性能,有必要严格控制泡沫沥青再生层下部的压实度.

2.3 基层厚度的影响

采用表 1 的 4 层结构体系,铣刨后路面模量取 250 MPa,固定其它参数不变,变化基层厚度,分析其对路面基层面层内最大剪应力的影响.计算结果见表 5 及图 4.

从以上计算结果可见,面层和基层内最大剪应力随着基层厚度的增加而有较小幅度的减小.另外,当基层厚度达到 15 cm 时,面层内最大剪应力均出现在下面层,而且随着基层厚度的增加,面层内最大剪应力位置基本不变,而基层内最大剪应力将下移.

表 5 基层厚度对基层面层内最大剪应力的影响
Tab.5 Influence of base thickness on $\tau_{\max}$ in base and surface courses

基层厚度/cm	面层 $\tau_{\max}$ /MPa	面层位置(x, y, z)/m	基层 $\tau_{\max}$ /MPa	基层位置(x, y, z)/m
10	0.235	(0.279,0.012,-0.033 3)	0.163	(-0.184,-0.013,-0.113)
15	0.231	(0.256,0.013,-0.050)	0.159	(-0.184,-0.013,-0.115)
20	0.229	(0.256,0.013,-0.050)	0.157	(-0.184,-0.013,-0.117)
25	0.228	(0.256,0.013,-0.050)	0.156	(-0.184,-0.013,-0.118)
30	0.227	(0.256,0.013,-0.050)	0.157	(-0.184,-0.013,-0.117)

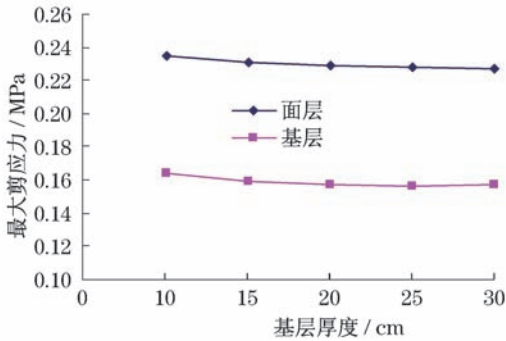


图 4 基层厚度对基层面层最大剪应力的影响
Fig.4 Influence of base thickness on $\tau_{\max}$ in base and surface courses

2.4 不同荷载工况影响分析

不管是重型货车还是轻型货车,当其轮胎胎压超过该型号轮胎胎压的限定值,而车辆负荷并不超过额定负荷时,其对路面结构的不利影响十分显著^[3].因此本文计算泡沫沥青再生路面典型 4 层结构在 4 种工况(460 kPa/2 500 kg、600 kPa/2 500 kg、810 kPa/2 500 kg、1 050 kPa/6 250 kg)下

的应力应变响应,分析泡沫沥青再生路面对车辆载重的敏感程度.计算结果见图 5.

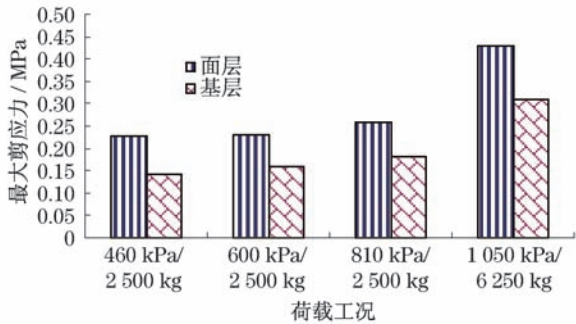


图 5 不同荷载工况下面层基层内最大剪应力
Fig.5 $\tau_{\max}$ in base and surface courses under different load condition

由图 5 看出,荷载不变,但胎压增大,路面面层基层内最大剪应力增加,但增加幅度较小;而当胎压增加 75%,荷载超载 150%时,面层及基层内最大剪应力大幅增加,增加幅度达一倍左右.由此可见,超载将直接导致泡沫沥青再生路面上层结构内剪应力增大.因此,该研究结论进一步表明研究泡沫沥青冷

再生混合料抗剪性能的必要性.

3 结 论

通过 ANSYS 有限元对泡沫沥青混合料再生路面面层及基层内最大剪应力进行计算分析,得出以下结论:

a. 基层模量是影响泡沫沥青再生基层路面面层和基层内最大剪应力的重要因素之一,基层模量增加,面层剪应力降低而基层剪应力提高.当基层模量达到 2 500 MPa 时,基层内最大剪应力与面层内的最大剪应力相当.可见,研究泡沫沥青再生混合料抗剪性能是必要的.

b. 面层厚度增加,基层面层内最大剪应力都显著降低.

c. 当剩余原路面当量回弹模量高于 150 MPa 时,基层面层内最大剪应力受原路面回弹模量影响很小.若 E_0 由 150 MPa 减低至 50 MPa 时,基层和面层内剪应力大大增加.

d. 基层厚度的变化对基层面层内最大剪应力

的影响很小.

e. 当胎压增加 75%,荷载超载 150% 时,面层及基层内最大剪应力均增加了近一倍.

参考文献:

- [1] Jenkins K J, van de Ven M F C, Molenaar A A A, et al. Performance prediction of cold foamed bitumen mixes [C] // Ninth International of Conference on Asphalt Pavement. Copenhagen, 2002.
- [2] He G P, Wong W G. Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21 (8): 1809 - 1819.
- [3] 胡小弟. 轮胎接地压力分布实测及沥青路面力学响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [4] Marquis B, Bradbury R L, Coloson S, et al. Design, construction and early performance of foamed asphalt full depth reclaimed (FDR) pavement in maine [C] // The 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC, 2003.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 301 页)

4 结 语

研究了在电流模式下 Buck-Boost 变换器的分岔与混沌现象,在该模型的基础上,研究了以输入电压、参考电流和负载电阻为电路变化参数的分岔现象. 仿真结果表明, Buck-Boost 变换器呈现出一个大范围的非线性行为. 当分岔参数发生变化时,系统通过倍周期分岔轨迹进入混沌. 而且,多倍的周期叠加会发生在倍周期轨迹中. 还可以看到,在一个定性系统中,即使没有随机输入,系统方程的解也表现出随机性行为. 同时也发现,当使用正常的电路参数时,分岔与混沌现象也会发生. 在 Buck-Boost 变换器中,丰富的非线性现象表明,线性方程导致了这种复杂的行为,并且在不同系统中具有类似行为. 尽管并没有在本文中列出实验结果,但实际上,上述的仿真结果已经起到验证的目的.

参考文献:

- [1] 金爱娟, 陈明, 李少龙. 开关延迟对 Buck 变换器分岔的

影响[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(6): 575 - 579.

- [2] Hamill D C. Modeling of chaotic DC-DC converters by iterated nonlinear mappings[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1992, 7(1): 25 - 36.
- [3] Yuan G H. Border-collision bifurcation in the buck converter[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I, Fundamental Theory and Applications, 1998, 45(7): 707 - 716.
- [4] Tse C K. Chaos from a current-programmed cuk converter[J]. Int J Circuit Theor Appl, 1995, 23(3): 217 - 225.
- [5] Deane J H B. Chaos in a current-mode controlled boost DC-DC converter [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, Part I: Fundamental Theory and Applications, 1992, 39(8): 680 - 683.
- [6] Bemardo M D. Discrete-time maps for the analysis of bifurcations and chaos in DC-DC converters[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, Part I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(2): 130 - 143.
- [7] Deane J H B. Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1990, 5(3): 260 - 268.

(编辑: 石 瑛)