

旧水泥混凝土路面加铺水泥 - 泡沫沥青 半柔性混合料的力学响应分析

李秀君, 李梦晨, 武昭融

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 针对旧水泥路面加铺沥青面层易出现反射裂缝问题, 本文提出在旧水泥混凝土路面上铺筑水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料再铺筑沥青面层, 可显著降低面层开裂的可能性。为合理指导路面结构设计, 论文采用 ANSYS 有限元软件进行路面结构力学计算, 研究水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料对路面结构力学的响应。研究得出旧水泥板上加铺水泥 - 泡沫沥青半柔性材料, 可显著减弱沥青面层层底拉应力及层内最大剪应力, 可有效缓解沥青层的反射裂缝的出现, 同时还可以显著降低沥青面层对旧水泥板裂缝宽度的敏感性。在旧水泥混凝土板上加铺水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料, 其厚度不宜低于 8 cm。

关键词: 旧水泥路面; 水泥 - 泡沫沥青混合料; 有限元; 反射裂缝; 力学响应

中图分类号: TU528.42

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)03-0184-05

Analysis of mechanical response of semi - flexible mixture material of cement - foam asphalt overlayed on old concrete pavement

LI Xiujun, LI Mengchen, WU Zhaorong

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

Abstract: Aimed at the problem that old concrete pavement overlayed with asphalt surface is prone to reflective cracking, the paper proposed that the old concrete pavement overlayed with the semi - flexible mixture of cement - foam asphalt should significantly reduce the possibility of surface cracking. In order to guide pavement structure design, the paper studied the mechanical performance of the old concrete pavement by using ANSYS finite - element method, and got the conclusion that the method would significantly reduce the tensile stress and maximum shearing stress in asphalt layer and relieve the cracking of the asphalt pavement. In addition, it would reduce the sensitivity of asphalt surface crack width of the old cement board. The thickness of semi - flexible mixture material paved on the old concrete pavement should not less than 8cm.

Key words: old concrete pavement; cement - foam asphalt mixture material; finite element; reflective crack; mechanical response

旧水泥混凝土路面修复的常见方法是在其上直接加铺沥青混合料面层(简称“白加黑”), 但大量实践表明, 旧水泥混凝土路面上的沥青加铺层在反复荷载作用下, 很容易出现反射裂缝, 尤其是在水泥路面板的接缝处^[1-2]。本文在水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料特性研究基础上, 为有效防止反射裂缝的出现, 将水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料用作“白加黑”路面中的应力吸收层。本文将采用 ANSYS 有限元软件进行路面结构力学计算, 研究水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料对路面结构力学的响应及旧水泥路面整体强度、旧水泥板裂缝宽度、水泥 - 泡沫沥青混合

料模量等对加铺层应力的影响, 从而合理指导路面结构设计。

1 有限元模型的建立

1.1 路面结构组成

本文利用有限元理论计算时视路面结构为弹性层状体系, 研究对象由沥青加铺层、水泥 - 泡沫沥青半柔性混合料应力吸收层、带有接缝的水泥混凝土路面板和地基组成, 结构各层弹性模量和泊松比如图 1。其中地基是指旧板以下包括土基的原路面结构, 其模量值按规范取为当量抗压回弹模量。地基尺

收稿日期: 2012-12-26; 修回日期: 2013-01-20

作者简介: 李秀君(1976-), 女, 江苏江阴人, 博士, 副教授, 主要从事路面工程及路面材料的教学和研究工作。

寸长和宽分别是在双车道总尺寸的基础上各个边分别延伸 1 m,所分析的旧水泥混凝土板宽为 400 cm,长为 500 cm,板厚 30 cm,旧水泥板横向接缝宽度为 5 mm。不做特殊说明,各结构层参数见表 1。

表 1 各结构层参数		cm, MPa	
路面组成	h	E	μ
沥青面层	5	1400	0.25
泡沫沥青层	12	1200	0.25
旧水泥板	30	35000	0.15
地 基	1000	150	0.30

1.2 荷载计算参数及临界荷位

1.2.1 荷载计算参数 应力分析采用黄河 JN – 100 标准车型,轴重 100 kN,轮压 0.7 MPa,双轮中心距为 32 cm,轮距 182 cm。有关资料及其试验结果显示,汽车轮胎作用于路面的形状更接近于矩形,因此分析时将轮胎接地面积假设为矩形^[3-4]。分析时具体采用的计算参数如下:接地面积:单轮 18.88 cm × 18.88 cm;接地压力:0.7 MPa;双轮中心距:32.0 cm;两侧之间双轮中心间距:182.0 cm。

1.2.2 临界荷位的选取 行驶车辆驶经沥青加铺后的复合路面结构的不同部位时,沥青加铺层中会产生不同的应力分布。在各种设计方法中,为了简化计算工作,通常选取一个使路面结构产生最大损坏的荷载作用位置进行计算,该荷载作用之位置称为临界荷位。

周富杰等人曾对使沥青加铺层产生最大应力荷载作用位置进行对比分析,该文分析了单轴单侧双轮荷载作用在板边和板中、正荷载和偏荷载等 4 种情况下沥青加铺层中的应力情况;分析了单轴双侧

沥青面层	h_1	E_1	$\mu_1=0.25$
泡沫沥青应力吸收层	h_2	E_2	$\mu_2=0.25$
旧水泥板	h_3	E_3	$\mu_3=0.15$
地基	E_0	$\mu_0=0.3$	

图 1 路面结构示意图(h 厚度, E 模量, μ 泊松比)

2 路面结构参数对结构力学响应分析

水泥混凝土路面加铺沥青面层后的结构应力分布不仅受外部因素(行车荷载、环境等)影响,还受到沥青面层、泡沫沥青应力吸收层及水泥板接缝等特性的影响。此类路面最易出现的病害为反射裂

四轮荷载作用在板上沿路面板接缝横向移动和沿车辆行驶方向移动等多种情况下沥青加铺层中的应力情况。研究得出单轴双侧四轮荷载一侧作用于罩面层边缘、一侧作用于罩面层内部又紧靠接缝边缘时,罩面层中的应力最大,对罩面层的损害最大^[5]。因此将该荷位作为临界荷位,如图 2 所示。因此本文选取该图示的单轴双侧四轮荷载进行分析计算。

1.3 计算模型及参数

计算的路面结构可视为半无限弹性多层体系,路面各层采用实体单元建立模型,实体单元可以承受三个方向的不规则变形而且不至于失真,比平面更接近实际。所以在选择单元类型时,选用了一般的 8 结点空间实体单元 Solid45,这种单元的每个节点具有 X、Y、Z 三个方向的自由度,此类单元不需要额外的设定参数,只须把各层材料的弹性模量 E 和泊松比 μ 同时赋予到各个结构层,即可在空间任意布置并且可以多项数据输出。为了简化计算,减轻计算机的工作量,计算时对各结构层作如下假定:

- 各结构层为均匀、连续、各向同性的连续弹性体;
- 各层层间竖向、水平位移均连续;
- 地基地面各向位移为零,地基侧面各向位移为零;
- 不计路面结构的自重影响;
- 不做说明,接缝宽度为 5 mm,且接缝处无传荷能力。

为了反映半空间地基的特性,地基采用扩大尺寸,有限元法的计算精度会受到地基尺寸、网格密度等因素的影响。结构计算模型如图 3 所示。

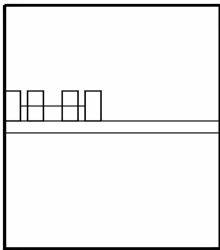


图 2 临界荷位

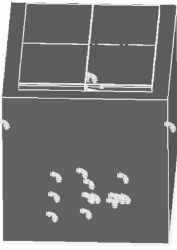


图 3 结构计算模型

缝,而反射裂缝产生的原因主要有两个方面:沥青加铺层的层底正应力 σ_y 引起的张开型反射裂缝和由剪应力 τ_{yz} 引起的剪切型反射裂缝。以下将对不同影响因素下两种荷载应力及路表弯沉进行计算分析,找出产生反射裂缝及路表弯沉的主要影响因素及防治措施,下文中 σ_{max} 代表 Y 方向(行车方向)的最大

正应力, $\tau_{\max}$ 代表垂直于 Y 轴的平面在 Z 方向上的最大剪应力。 U_z 代表路表最大弯沉。

2.1 沥青面层厚度的影响

路面结构组成如图 1 所示, 固定其他参数不变, 变化沥青面层厚度 h_1 , 计算面层厚度从 3 cm 变化至 15 cm 时荷载应力及路表弯沉, 计算结果见图 4、图 5。图中 $\sigma_{1\max}$ 为面层层底最大拉应力; $\sigma_{2\max}$ 为水泥 - 泡沫沥青半柔性层层底最大拉应力; $\tau_{1\max}$ 为面层内最大剪应力; $\tau_{2\max}$ 为水泥 - 泡沫沥青半柔性层最大剪应力; U_z 路表弯沉。

由图 4 可看出, 沥青面层及泡沫沥青半柔性层层底拉应力及最大剪应力随着沥青面层厚度的增加而降低, 而沥青面层层底及泡沫沥青半柔性层层底拉应力是产生反射裂缝的主要原因, 加铺层内最大剪应力是路面开裂另一原因, 因此通过增加沥青面层厚度可以降低加铺层层底拉应力及最大剪应力,

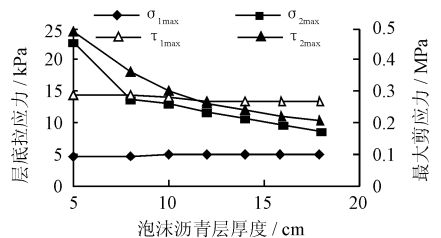
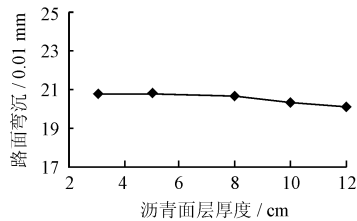
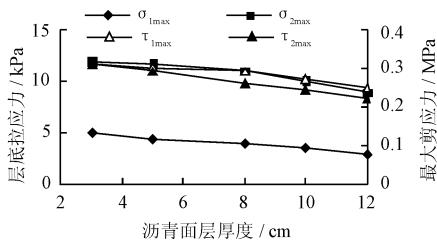


图4 在层厚度对加铺层底应力的影响

图5 面层厚度对路表弯沉的影响

图6 泡沫沥青层厚度对加铺层应力影响

由图 6 看出, 当水泥 - 泡沫沥青半柔性层厚度从 5 cm 增加至 18 cm 时, 沥青面层的层底拉应力升高, 但幅度不显著, 最大剪应力基本不变, 而泡沫沥青半柔性层层底拉应力及层内最大剪应力会显著降低。从图中看出, 当泡沫沥青半柔性层厚度低于 8 cm 时, 泡沫沥青半柔性层层底拉应力及最大剪应力显著增加, 而这也增加了泡沫沥青层层底开裂的可能性。

在旧水泥混凝土板上加铺泡沫沥青半柔性混合料, 其厚度不宜低于 8 cm。同时, 由于泡沫沥青半柔性层厚度的增加, 也使得路表弯沉增加, 路面出现车辙几率增大, 因此, 鉴于经济性 & 旧路改造中路面标高所限, 泡沫沥青半柔性层厚度不宜过高。

2.3 水泥 - 泡沫沥青层模量的影响

水泥 - 泡沫沥青混合料是一种粘弹塑性材料, 其模量和强度随着水分的挥发及温度的变化有着很大的差别, 尤其是随着水泥用量的变化及水泥水化硬化程度的不同, 水泥 - 泡沫沥青混合料的模量会发生较大变化。为了寻求水泥 - 泡沫沥青混合料模量变化对沥青面层及泡沫沥青层层底拉应力及层内最大剪应力的影响, 根据泡沫沥青混合料室内模量的测定结

可有效防止旧水泥路面反射裂缝及路表开裂。同时图 5 显示随着沥青面层厚度的增加弯沉会逐渐减小, 但减小幅度较小。

由以上分析可知, 适当的增加沥青面层厚度对于防治反射裂缝十分有效, 但沥青面层厚度增加到一定的程度后, 再增加面层厚度以防治反射裂缝则不经济, 且效果还可能适得其反。在实际工程中, 特别是穿镇道路改造中, 由于受标高的限制, 罩面层也不可能太厚。因此, 对于老路加铺, 为了减少反射裂缝, 需要根据具体情况确定合适的沥青面层厚度, 同时应尽量采用路用性能较好的改性沥青混合料。

2.2 水泥 - 泡沫沥青层厚度的影响

路面结构组成如图 1, 固定其他参数不变, 变化水泥 - 泡沫沥青层厚度 h_2 , 计算泡沫沥青半柔性层厚度从 8 cm 变化至 18 cm 时加铺层应力及路表弯沉, 计算结果见图 6、图 7。

果, 依次改变泡沫沥青层模量大小, 进而计算旧水泥板上各加铺层应力及路表弯沉。路面结构组成如图 1, 固定其他参数不变, 计算结果见图 8、图 9。

由图 8 看出, 随着泡沫沥青层模量的增加, 沥青面层层底拉应力、层内最大剪应力及路表弯沉均显著降低, 尤其当模量小于 800 MPa 时, 影响幅度更为显著。这充分说明在旧水泥板及沥青面层中加铺应力缓解层, 缓解层所用材料的模量高低将直接影响沥青面层能否出现反射裂缝的可能性大小。当应力缓解层模量低于 800 MPa 时, 沥青层层底开裂可能性大大增加。

由于路面冷再生技术中常用的泡沫沥青冷再生混合料模量在通车前期, 因水分的存在及水泥水化硬化的不充分, 其模量较低, 通常在 600 ~ 700 MPa 左右, 因此, 本文研究中可通过改变混合料级配组成、结构类型及调整水泥用量等适当提高混合料模量, 鉴于模量过高, 会增加泡沫沥青层疲劳开裂的可能性, 因此本研究中泡沫沥青层模量维持在 800 MPa ~ 1 200 MPa 之间, 本研究中也将模量在这一范围内的泡沫沥青混合料定义为水泥 - 泡沫沥青半柔性材料。

由图 8 还可见,泡沫沥青层模量的增加使得泡沫沥青层层底拉应力及层内最大剪应力增大,但幅度不大,尤其当泡沫沥青层模量从 800 MPa 增加至 1 200 MPa 时,应力增加甚小。而水泥 – 泡沫沥青半柔性材料的抗拉强度及抗剪强度均比普通的泡沫沥青冷再生混合料强度要高,因此由此引起的不利影响可忽略不计。图 9 表明,泡沫沥青层模量增加,路表弯沉显著减小。

2.4 地基模量的影响

本模型计算中的地基指由旧水泥板下基层、垫层和土基组成的支撑体系。地基强度高、稳定性好,面层就不容易破坏;反之,若由于施工不严、降水侵入等原因使得地基强度下降,稳定性减小,面层就很容易破坏,这一点已得到广大道路工作者的认同。

对于“白加黑”路面结构,虽然行车荷载通过沥青加铺层传到地基上的压力一般都比较小,但如果地基稳定性较差,加铺后的路面结构在行车荷载的反复作用和周围水温状况变化的影响下出现较大变形(可以反映为地基模量 E_0 变小)时,沥青加铺层在接缝区的开裂将更容易产生,严重影响加铺层的使用寿命。因此,有必要研究地基模量对沥青面层应力及路表弯

沉影响。

路面结构组成如图 1,固定其他参数不变,计算地基模量从 50 MPa 增加至 400 MPa 时加铺层应力及弯沉,计算结果见图 10、11。

由图 10、11 可见,地基模量由 50 MPa 增加至 400 MPa,沥青面层层底拉应力及层内最大剪应力变化幅度甚微,而泡沫沥青层层底拉应力、层内最大剪应力及路表弯沉显著减低,尤其当地基模量从 50 MPa 增加至 150 MPa 时,泡沫沥青层内最大剪应力及路表弯沉降低幅度尤为显著。

由此说明,当地基强度较低,应对地基进行适当处理,提高其模量和稳定性,可以有效地降低行车荷载在接缝区产生反射裂缝及出现车辙的可能性。

2.5 旧水泥板接裂缝宽度的影响

上文应力分析中都是假设接裂缝宽度为 5 mm,由于加铺层层底的应力集中现象起源于旧水泥路面中存在的裂缝或接缝,因此,接裂缝的宽度对加铺层中应力分布应该有一定的影响。变化接缝宽度,使其从 5 mm 递增至 25 mm,计算不同接裂缝下路面结构应力及路表弯沉,结果见图 12、13 所示。

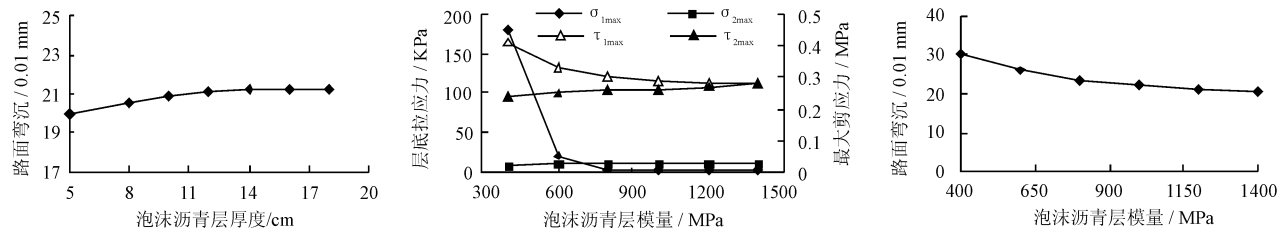


图 7 泡沫沥青层厚度对路表弯沉影响 图 8 泡沫沥青层模量对加铺层应力影响 图 9 泡沫沥青层模量对路表弯沉影响

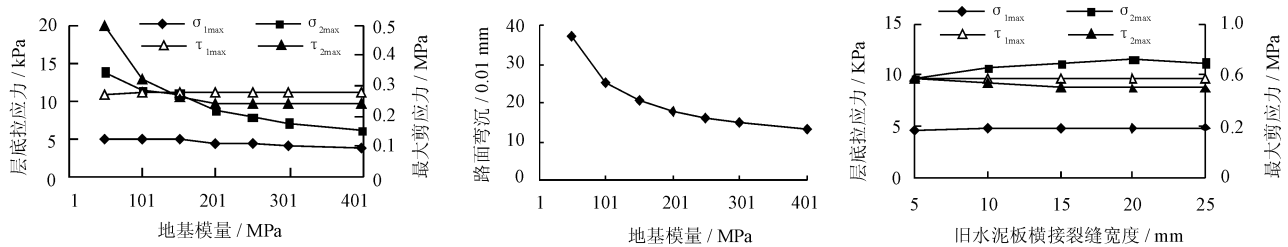


图 10 地基模量对加铺层应力的影响 图 11 地基模量对路表弯沉影响 图 12 裂缝宽度对加铺层应力影响

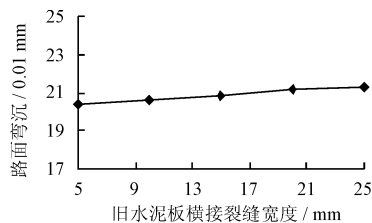


图 13 裂缝宽度对路表弯沉影响

从图 12 可见,随着旧水泥板接裂缝宽度的增加,荷载作用对侧的旧水泥板对荷载作用侧沥青加铺层的挤压作用减小,故沥青加铺层受到拉伸,但由于面层与旧水泥板之间有 12 cm 厚的水泥 – 泡沫沥青半柔性层,接缝处产生的应力由该半柔性层吸收缓解,因此沥青面层的层底拉应力较泡沫沥青层层底拉应力小,且面层层底拉应力及层内最大剪应力随接缝宽

度增加而变化的幅度很小,而泡沫沥青层层底拉应力随着接缝宽度增加显著增加。由此进一步说明,在旧水泥板上加铺一定厚度的水泥-泡沫沥青半柔性混合料后再铺筑沥青面层,可以大大减小沥青面层产生反射裂缝的可能性,并可以显著降低沥青面层对旧水泥板裂缝宽度的敏感性。图 13 表明,随着旧水泥板裂缝宽度的增加,路表弯沉有较小幅度的增加。

3 结 语

通过以上研究,可得出以下结论:

(1)适当的增加沥青面层厚度对于防治反射裂缝十分有效,但沥青面层厚度增加到一定的程度后,再增加面层厚度以防治反射裂缝则不经济,且效果还可能适得其反。在实际工程中,特别是城市道路改造中,由于受标高的限制,罩面层也不可能太厚。

(2)在旧水泥混凝土板上加铺泡沫沥青半柔性混合料,其厚度不宜低于 8 cm。同时,由于泡沫沥青半柔性层厚度的增加,也使得路表弯沉显著增加,路面出现车辙几率增大,因此,鉴于经济性,及旧路改造中路面标高所限,泡沫沥青半柔性层厚度不宜过高。

(3)旧水泥板上加铺水泥-泡沫沥青半柔性材料,可显著减弱沥青面层层底拉应力及层内最大剪应力,可有效缓解沥青层的反射裂缝的出现。研究得出,水泥-泡沫沥青混合料模量在 800 ~ 1 200 MPa

时,对路面结构稳定性较有效。

(4)地基模量增加,沥青面层层底拉应力显著降低,路表弯沉减小。当地基回弹模量较低,对地基进行适当处理,提高其模量和稳定性,可以有效地降低行车荷载在接缝区产生反射裂缝的可能性。

(5)在旧水泥板上加铺一定厚度的水泥-泡沫沥青半柔性混合料后再铺筑沥青面层,可以显著降低沥青面层对旧水泥板裂缝宽度的敏感性。

参考文献:

- [1] 周富杰,孙立军. 防治反射裂缝的措施及其分析[J]. 华东公路,1996,102(5):25-31.
- [2] Caltabiano M A, Brunton J M. Reflection cracking in asphalt overlays[J]. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists,1991,60:310-331.
- [3] 催胜明,余 群. 汽车轮胎行驶性能与测试(第一版)[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [4] Kenji Himeno, Tsuyoshi Kamijima and Taluya Ikeda. Distribution of tire contact pressure of vehicles and its influence on pavement distress[C] // 8th International Conference on Asphalt Pavement, International Society for Asphalt Pavement, Seattle, Washington, 1997. 8.
- [5] 周富杰,孙立军. 沥青罩面层荷载应力的三维有限元分析[J]. 中国公路学报,1999,12(4):1-6.