

基于横观各向同性的沥青路面 加铺层力学分析*

刘能源, 颜可珍[†], 胡迎斌, 游凌云
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:考虑到沥青混凝土呈现一定的横观各向同性特性,采用有限元数值分析方法,建立沥青加铺层路面三维有限元模型;将沥青加铺层及旧沥青面层视为横观各向同性体,并考虑了加铺层温度场特性和沥青混合料模量随温度变化的特性以及层间接触状态,研究了不同温度条件下沥青加铺层路面的力学行为,分析了沥青混合料的横观各向同性对加铺层路面的变形和应变等的影响.研究表明,沥青混凝土的横观各向同性及模量梯度特性和层间结合条件对加铺层受力状况都有较大影响.

关键词:沥青路面;沥青加铺层;横观各向同性;模量梯度;有限元模拟

中图分类号:U416. 217

文献标志码:A

Mechanical Analysis of Asphalt Concrete Overlay over Old Asphalt Pavements Considering Cross-anisotropy Properties

LIU Nengyuan, YAN Kezhen[†], HU Yingbin, YOU Lingyun
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Considering the cross-anisotropy properties of asphalt concrete (AC), finite element numerical analysis was introduced to develop the three-dimensional (3D) Finite Element Model (FEM) of AC overlay placed on old asphalt pavements. The AC overlay and old asphalt layer were assumed to be cross-anisotropic, and the temperature field characteristics of AC overlay as well as the variations of its modulus versus temperature were considered. And the mechanical behaviors of AC overlay at high and low temperatures and the effects of the cross-anisotropy properties of AC on its deformations and strains were then investigated. The results show that the cross-anisotropy properties and modulus gradients of AC induced by temperature fields both had great effects on its mechanical behaviors.

Key words: asphalt pavement; asphalt concrete overlay; cross-anisotropy; modulus gradients; finite element simulation

* 收稿日期:2016-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50808077,51278188),National Natural Science Foundation of China(50808077,51278188);湖南省青年骨干教师资助计划项目,Hunan Province Foundation For Young Key Teacher

作者简介:刘能源(1985-),男,河南郑州人,湖南大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: yankz@hnu.edu.cn

旧沥青路面上铺筑沥青混凝土加铺层是提高路面结构承载力、恢复路面使用性能的有效修复措施。近年来,随着沥青加铺工程的日益增多,国内外许多研究者针对旧沥青路面的加铺进行了大量的研究工作,取得了不少研究成果^[1-4]。但这些研究都是基于各向同性的线弹性层状体系假设,实际上,沥青混合料是一种典型的粘弹性材料,其模量等特性对温度有明显的依赖性,又由于沥青路面中温度场呈一定周期变化,而且路面顶面和底面会存在一定的温差,因此实际上沥青路面的模量呈一定的梯度规律变化^[5-8]。而且近年来的许多研究也已表明,沥青混合料呈现明显的各向异性特征,沥青路面分析和设计考虑沥青混合料的横观各向同性特性非常必要^[9-10]。因此,本文综合考虑沥青混合料的横观各向同性特性和路面结构温度场引起的模量梯度特性,研究沥青加铺层路面结构的力学行为特性,探讨路面结构层模量的非均匀性和各向异性对加铺沥青路面力学特性的影响规律。

1 沥青混凝土模量的横观各向同性和梯度特性

1.1 沥青混凝土的横观各向同性

沥青混凝土是由不同形状的颗粒材料组成,其内部结构又呈各向异性。这种各向异性特性主要是由于颗粒的分布、形状、方位和空隙结构及压实等原因造成的^[11],这种各向异性可以近似为横观各向同性。

横观各向同性材料主要参数包括竖向弹性模量 E_v , 水平向弹性模量 E_h , 垂直和水平向的泊松比 μ_{vh} , 水平和水平向的泊松比 μ_{hh} , 垂直方向剪切模量 G_v 。在路面力学分析计算中通常假定 $\mu_{vh} = \mu_{hh}$, 并引入参数横观各向同性度 α (水平向弹性模量 E_h 和竖向弹性模量 E_v 之比, 即 $\alpha = E_h/E_v$) 来表征材料的横观各向同性特性。Masad 等^[12] 最先研究发现了 Superpave 旋转压实仪成型的沥青混凝土的横观各向同性特性。Wang 等^[11] 通过三轴试验测得现场成型沥青混凝土的横观各向同性度为 0.2~0.5。Motola 和 Uzan^[13] 通过测量沥青混凝土试件垂直和水平方向的动态模量, 测得其横观各向同性度为 0.4。国内鞠达^[14] 通过室内实验, 测得不同温度下 AC-20 沥青混凝土横观各向同性度为 0.75~0.85。

1.2 沥青混凝土的模量梯度特性

沥青混凝土是一种对温度变化十分敏感的材料。

在复杂的路面温度场条件下, 沥青混凝土的路用性能及力学性能都将随之产生显著的变化, 而且不同路面深度处的温度呈一定梯度变化, 这会致使路面结构各深度范围内的沥青混凝土劲度模量呈现明显的梯度特性^[5-8]。本文分析时作如下假设: 低温情况代表路表温度低于路面结构内部温度, 高温情况代表路表温度高于路面结构内部温度。

1.2.1 沥青混凝土的低温模量梯度特性

沥青混凝土材料温度随路面结构深度的变化规律受很多因素的影响(如大气温度、日照、降雨、霜降等)。孙立军通过大量现场实测及统计分析的方法拟合出了沥青混凝土材料温度随路面结构深度变化预测模型, 其低温条件下的温度梯度模型如式(1)所示^[15]:

$$T_{\min} = \beta_1 + \beta_2 T_{a,\min} + \beta_3 H + \beta_4 H^2 + \beta_5 T_{m,\text{av}} \quad (1)$$

式中: T_{\min} 为深度 H 处沥青混合料的日最低温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{a,\min}$ 为当地日最低温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为路面深度, cm ; $T_{m,\text{av}}$ 为当地月平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $\beta_1 \sim \beta_5$ 为回归系数。

选取北京地区沥青混凝土路面低温场的试验数据进行研究, 相关试验数据表明, 北京地区 1 月月平均气温 -4.3°C ; 日最低气温 -15°C , 式(1)拟合的回归系数 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5) = (-3.399, 0.721, 0.377, 0.010, 0.488)$ 。沥青混凝土为沥青与矿物集料的混合物, 低温条件下沥青粘度急剧上升, 导致集料颗粒间粘结力升高, 从而沥青混凝土的劲度模量随着温度的降低而升高, 表 1 所示为本文采用的沥青混凝土在不同低温情况下进行静载蠕变试验, 加载相同时间所得到的低温劲度模量^[16]。

表 1 低温条件下沥青混凝土劲度模量试验数据
Tab. 1 The experimental data of stiff modulus of asphalt concrete (AC) at low temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	5	0	-5	-10	-20
E/MPa	205.1	629.6	1 911.5	2 969.3	5 246.0

对表 1 数据进行拟合发现沥青混凝土的低温劲度模量与温度呈二次多项式关系, 且相关系数 $R^2 = 0.979 4$, 得到如式(2)所示的低温劲度模量与材料温度的关系式:

$$E = 1.854 7T^2 - 155.58T + 1 123.5 \quad (2)$$

1.2.2 沥青混凝土的高温模量梯度特性

高温条件下沥青混凝土路面温度场的不均匀分布是导致路面结构各层沥青混凝土的温度呈现明显的梯度变化。孙立军利用统计分析的方法结合大量

的现场实测数据,拟合得到了如式(3)所示的高温梯度模型^[15].

$$T_{\max} = \gamma_1 + \gamma_2 T_{a,\max} + \gamma_3 T_{a,\max} H + \gamma_4 H + \gamma_5 H^2 + \gamma_6 H^3 + \gamma_7 T_{m,\text{av.}} \quad (3)$$

式中: T_{\max} 为深度 H 处沥青混合料的日最高温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{a,\max}$ 为当地日最高温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为路面深度, cm ; $T_{m,\text{av.}}$ 为当地月平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $\gamma_1 \sim \gamma_7$ 为回归系数.

选取北京地区沥青混凝土路面高温场的试验数据进行研究,相关试验数据表明,北京地区 7 月月平均气温 26.2°C ;日最高气温 36°C ,式(3)拟合的回归系数 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_7) = (3.04, 0.994, -0.007, -1.676, 0.201, -0.008, 0.498)$.此外,高温条件下沥青混合料中的沥青粘度急剧下降,导致集料之间的粘结力降低,从而导致沥青混合料的劲度模量随温度升高而急剧变小,表 2 所示为沥青混凝土在不同高温情况下进行静载蠕变试验,加载相同时间所得到的高温劲度模量^[16].

表 2 高温条件下沥青混凝土劲度模量试验数据

Tab. 2 The experimental data of stiff modulus of asphalt concrete(AC) at high temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	45	40	35	30	25	20
E/MPa	223	361	516	683	790	895	999

对表 2 数据进行拟合发现,沥青混合料的高温模量梯度与温度呈二次多项式关系,且相关系数 $R^2 = 0.9983$,得到如式(4)所示的高温条件下高温劲度模量与材料温度的关系式:

$$E = -0.2571T^2 - 8.2143T + 1266.4 \quad (4)$$

综上所述,将式(1)~(4)联立可得到低温和高温条件下沥青混凝土劲度模量与路面结构层深度之间的关系曲线,如图 1 所示.

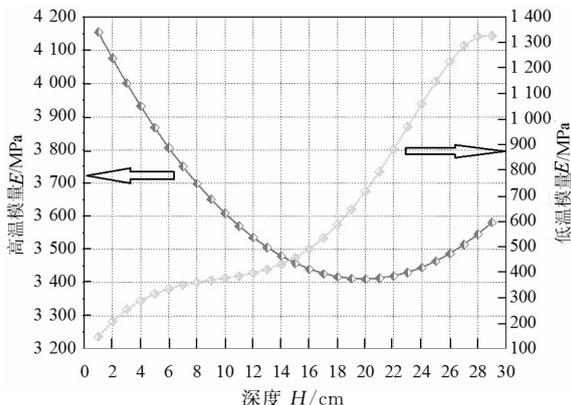


图 1 高/低温条件下沥青混凝土劲度模量与路面结构深度的关系

Fig. 1 Variation of stiff modulus of AC versus the depth of pavement structure at low temperatures & high temperatures

2 有限元模型的建立

2.1 路面结构和材料参数

本文采用典型的三层旧沥青路面加铺沥青层结构形式:10 cm 沥青加铺层、18 cm 旧沥青面层、35 cm 基层及半无限体土基.将沥青加铺层和旧沥青面层视为横观各向同性弹性材料,基层材料和土基视为各向同性弹性材料,并考虑加铺层沥青混凝土的模量梯度特性.横观各向同性材料的竖向模量设为固定值,水平向模量取 $E_h = \alpha E_v$,本文研究中取 α 分别为 0.3, 0.5, 0.7 和 1.0,代表不同水平的横观各向同性特性,路面材料参数如表 3 所示.旧沥青路面经长时间使用其性能会发生一定程度的劣化,本文在模拟旧路材料时适当地对其弹性模量进行折减.

表 3 路面材料参数

Tab. 3 Pavement materials parameters

层位	弹性模量 /MPa	泊松比 μ	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
沥青加铺层	—	0.25	2 400
旧沥青面层	$E_v = 1\ 200 \text{ MPa}; E_h = \alpha E_v$	0.25	2 400
基层	700	0.25	2 300
土基	80	0.35	1 800

为体现沥青混凝土加铺层的模量梯度变化特性,将其按 1.0 cm 一个梯度层进行子层划分,分别赋予低温和高温模量梯度,如图 2 所示,并与常温 20°C 模量情况进行对比.



图 2 模型结构层划分-XOZ

Fig. 2 Model structure layers-XOZ

2.2 荷载参数

荷载采用现行公路沥青路面结构设计所用标准轴载 BZZ-100,即单轴双轮组 100 kN 双圆静载,轮胎接地胎压 0.7 MPa ,对应接触面为直径 $d = 0.213 \text{ m}$ 的当量圆.

2.3 模型参数

将路面结构视为竖向荷载作用下的多层弹性体

系体. 以应力计算结果收敛稳定为依据, 确定路面结构模型尺寸为 $6.0\text{ m}(x) \times 6.0\text{ m}(y) \times 10.0\text{ m}(z)$. 数值计算过程中, 各结构层采用三维实体单元 (C3D8R) 模拟. 为使计算更加符合实际路面情况, 假定模型垂直于行车方向的 2 个端面法向位移为 0 (即 x 方向)、沿行车方向的 2 个端面法向位移为 0 (即 y 方向) 及模型底部为固定面; 为提高计算精度, 模型荷载作用区域网格进行局部细化, 其他区域网格尺寸渐变处理, 如图 3 所示.

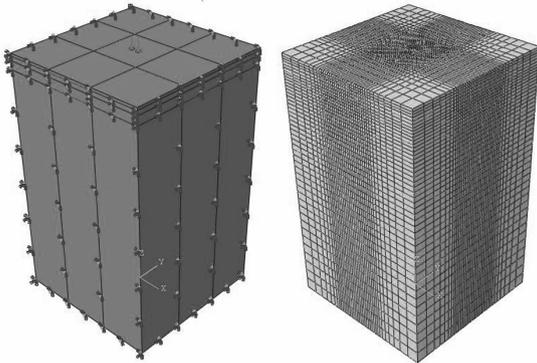


图 3 三维有限元计算模型: 边界条件和网格划分
Fig. 3 Illustration of the developed 3D FEM; boundary conditions and element mesh

另外, 沥青加铺路面结构层间粘结比较薄弱, 一般处于半光滑状态, 且层间通过层间接触传递应力. 为更合理地模拟沥青加铺路面结构层间接触状态, 本文层间接触采用 PENALTY 函数摩擦模型描述接触面之间的相互作用. 在考虑高/低温模量梯度情况时, 层间摩擦因数取 0.5. 另外, 本文还探究层间接触对沥青加铺路面结构的影响. 本文主要考虑两种层间状态. 第一种是加铺层与旧路面间为完全连续状态, 将层间相互作用属性设为绑定约束, 使路面结构成为一个整体, 用 LX 表示; 第二种是加铺层与旧路面间为层间接触状态, 摩擦因数取值 0.2~1.0 之间, $f=1$ 时层间状态为接近连续, 其仍然是接触模型.

3 计算结果分析

3.1 低温情况下沥青加铺层力学行为分析

图 4 给出了考虑加铺层低温模量梯度特性的不同横观各向同性条件下加铺层表弯沉值 U_z 随着距离荷载作用中心的距离 (D) 的变化曲线, 并与常温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 情况进行对比.

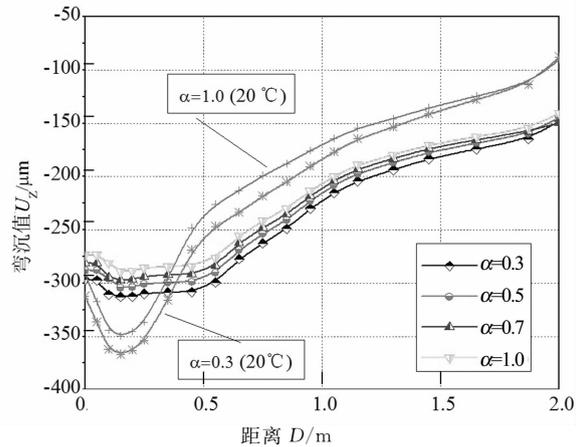


图 4 低温情况下加铺层表弯沉值分布
Fig. 4 Surface deflections at low temperature

从图 4 可以看出, 低温模量梯度情况下加铺层表弯沉值随着与荷载中心距离先增大后减小, 最大值出现在圆形荷载圆心附近, 荷载作用区域附近弯沉值变化幅度较小. 值得注意的是, 随着横观各向同性系数 α 的减小, 层表弯沉值小幅增大. 相对于常温情况, 低温模量梯度情况下荷载作用区域附近的层表弯沉值变化趋势较缓, 但荷载对路面结构变形影响范围大.

图 5 和图 6 分别给出了考虑加铺层低温模量梯度特性的荷载作用中心处剪应力随深度的分布情况及其云图. 从图 5 可以看出, 不同横观各向同性条件下 ($\alpha=0.3, 0.5, 0.7, 1.0$) 加铺层剪应力在距离路表大约 3.0 cm 附近最大, 且其剪应力最大值分别为: $136.96\text{ kPa}, 144.89\text{ kPa}, 147.67\text{ kPa}$ 和 148.28 kPa . 值得注意的是, 在距离路表 $0\sim 4.0\text{ cm}$ 范围内剪应力均随着横观各向同性系数的增加而变大, $4.0\sim 10.0\text{ cm}$ 范围内剪应力均随着横观各向同性系数的增加而变小. 同时从图 5 也可以看出, 随着横观各

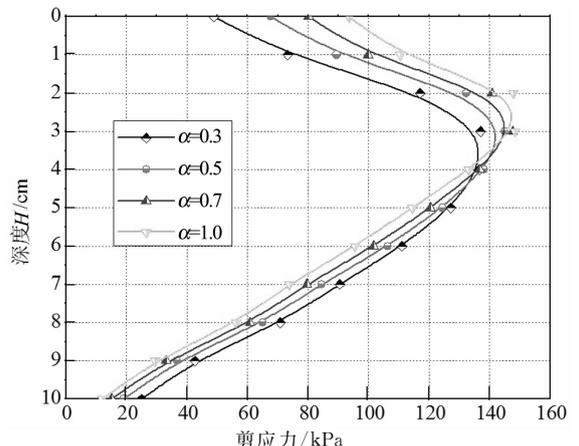


图 5 低温情况下加铺层剪应力分布
Fig. 5 Shear stresses of AC overlay at low temperature

向同性系数减小,剪应力应力峰值均明显减小.从图6可以看出,沥青加铺层的剪应力分布呈现明显的梯度分布.上述分析表明,沥青混凝土的横观各向同性特性对考虑加铺层低温模量梯度特性的加铺层剪应力分布影响较大.

3.2 高温情况下沥青加铺层力学行为分析

图7给出了考虑加铺层高温模量梯度特性的不同横观各向同性条件下加铺层表弯沉值 U_z 随着距离荷载作用中心的距离 (D) 的变化曲线,并与常温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 情况进行对比.

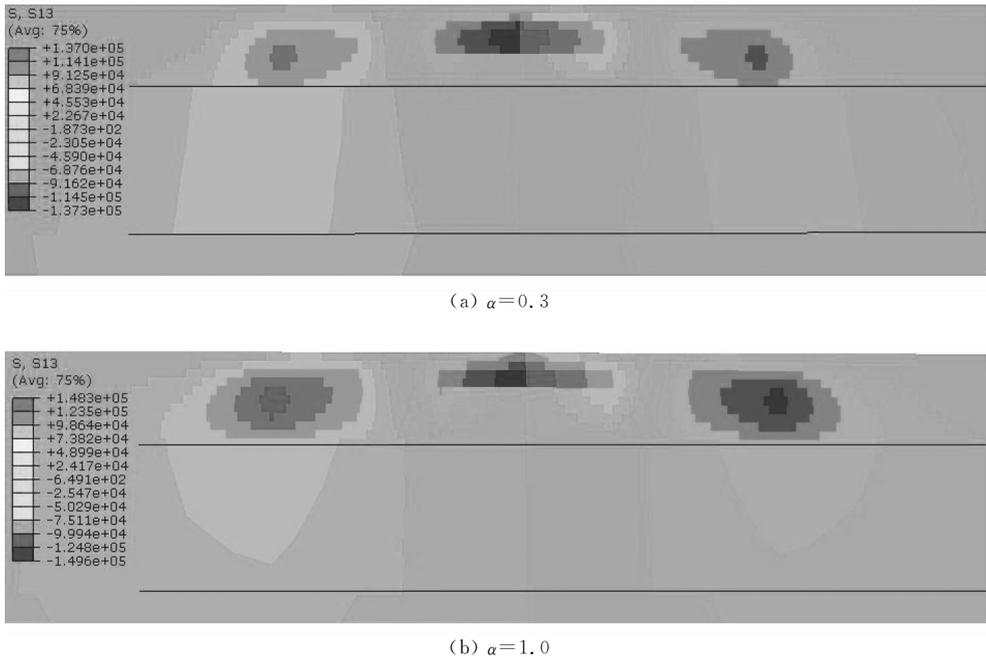


图6 低温情况下加铺层剪应力云图
Fig. 6 Contour plot of shear stresses of AC overlay at low temperature

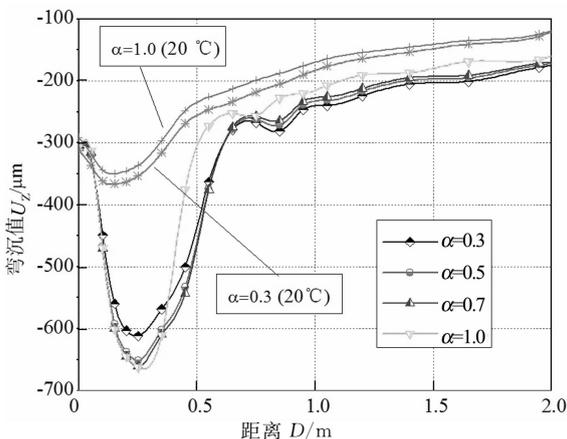


图7 高温情况下沥青加铺层表弯沉值分布
Fig. 7 Surface deflections at high temperature

从图7可以看出,高温模量梯度情况下加铺层表弯沉值随着与荷载中心距离先增大后减小,最大值出现在圆形荷载圆心附近,荷载作用区域附近变化趋势非常明显.值得注意的是,当横观各向同性系数 $\alpha=0.3$ 时路表弯沉值峰值最小 ($-611.60\text{ }\mu\text{m}$), $\alpha=1.0$ (各向同性) 时弯沉值峰值最大 (-661.90

μm),且在圆形荷载圆心附近范围内, $\alpha=1.0$ 时的路表弯沉值大于 $\alpha=0.3, 0.5$ 及 0.7 时的路表弯沉值,而其他位置 $\alpha=1.0$ 时的路表弯沉值小于其他情况.相对于常温情况,高温模量梯度情况下的弯沉值明显增大,变化趋势较陡.图8和图9分别给出了考虑加铺层料高温模量梯度特性的荷载作用中心处剪应力随深度的分布及其云图.从图8可以看出,不同横观各向同性条件下 ($\alpha=0.3, 0.5, 0.7$ 和 1.0) 加铺层剪应力在距离路表 $2.0\sim 3.0\text{ cm}$ 范围内最大.值得注意的是,在距离路表 $0\sim 4.0\text{ cm}$ 范围内剪应力与应变均随着横观各向同性系数的增加而变大, $4.0\sim 10.0\text{ cm}$ 范围内剪应力与应变均随着横观各向同性系数的增加而变小.从图8还可以看出,随着横观各向同性系数减小,剪应力峰值明显减小(横观各向同性系数从 1.0 减小为 0.3 时,剪应力峰值减小了大约 12%),表明沥青混凝土的横观各向同性特性在一定程度上可减小加铺层最大剪应力,从而减轻高温情况下加铺层的流动型车辙.

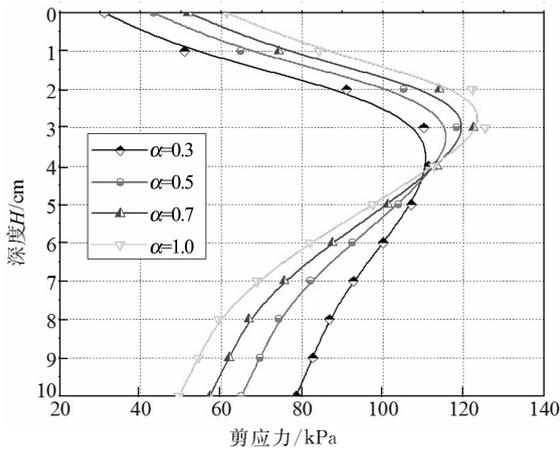


图 8 高温情况下加铺层剪应力分布

Fig. 8 Shear stresses of AC overlay at high temperature

从图 9 可以看出,沥青加铺层的剪应力分布呈现明显的梯度分布,上述分析表明,沥青混凝土的横

观各向同性特性对考虑加铺层高温模量梯度特性的加铺层剪应力分布影响较大.

3.3 综合影响分析

图 10 中比较了不同温度及横观各向同性条件下弯沉值峰值,图 11 给出了横观各向同性系数为 0.3 及各项同性条件下的弯沉盆云图.

从图 10 和图 11 可以看出,在相同的横观各向同性系数条件下,不同的温度条件(低温/常温/高温)对加铺层表弯沉值峰值影响显著.考虑沥青加铺层高温模量梯度特性情况下的路表弯沉值最大,考虑低温模量梯度特性情况下最小,这也反映出适当提高加铺层模量可有效减小路表弯沉值,降低路面的竖向变形.另外,随着横观各向同性系数的增大,高温环境下的加铺层表弯沉值变大,而常温和低温环境下加铺层表弯沉值变小,但变化幅度均较小.

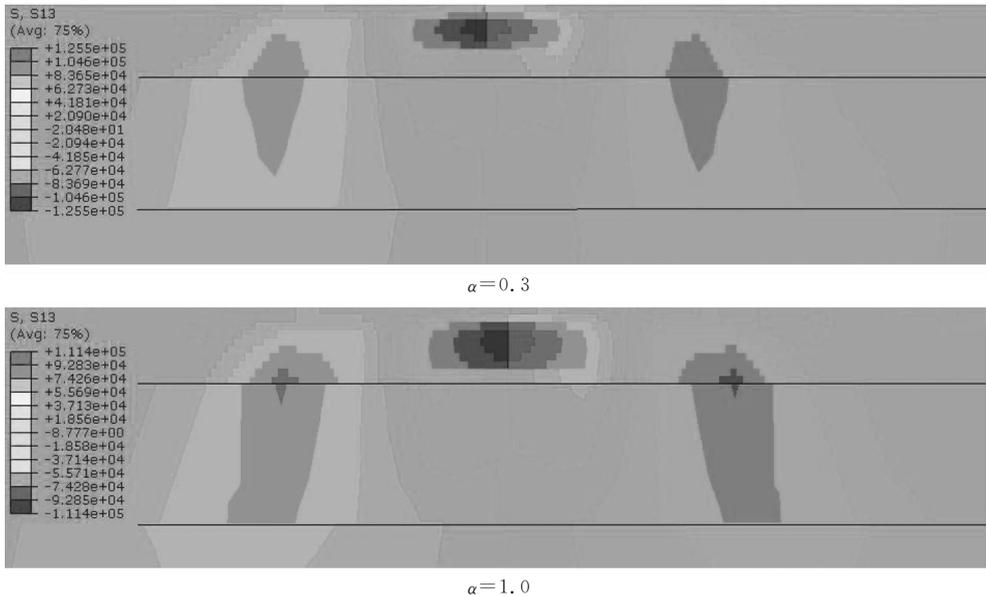


图 9 高温情况下加铺层剪应力分布云图

Fig. 9 Contour plot of shear stresses of AC overlay at high temperature

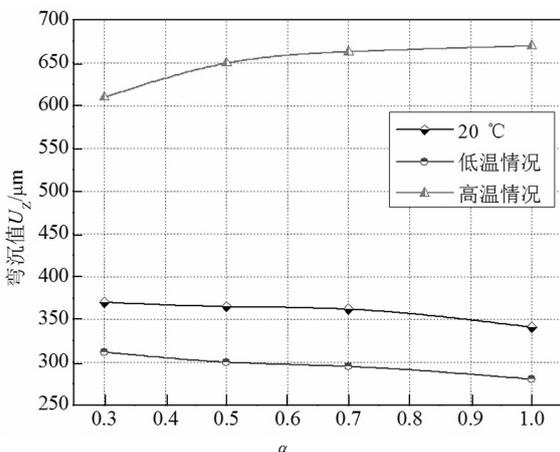


图 10 沥青加铺层表弯沉值峰值比较

Fig. 10 Comparison of maximum surface deflections

上述分析表明,沥青混凝土的横观各向同性特性对不同温度条件下的路表弯沉值峰值影响较小.沥青加铺层层底拉应变是控制沥青加铺层疲劳开裂的关键性指标.从图 12 可以看出,随着横观各向同性系数 α 减小,常温、高温模量梯度和低温模量梯度情况下的加铺层底拉应变均增大,而且常温和高温情况下增幅更显著.层底拉应变是控制加铺层疲劳损坏的重要指标,说明沥青混凝土的横观各向同性对沥青加铺层抗疲劳性能是不利的.另外,考虑高温模量梯度特性的加铺层底部拉应变最大,考虑低温模量梯度特性情况下最小,表明适当增大加铺层模

量,可以减小沥青加铺层层底拉应变,有利于提高沥青加铺层的抗疲劳性能.

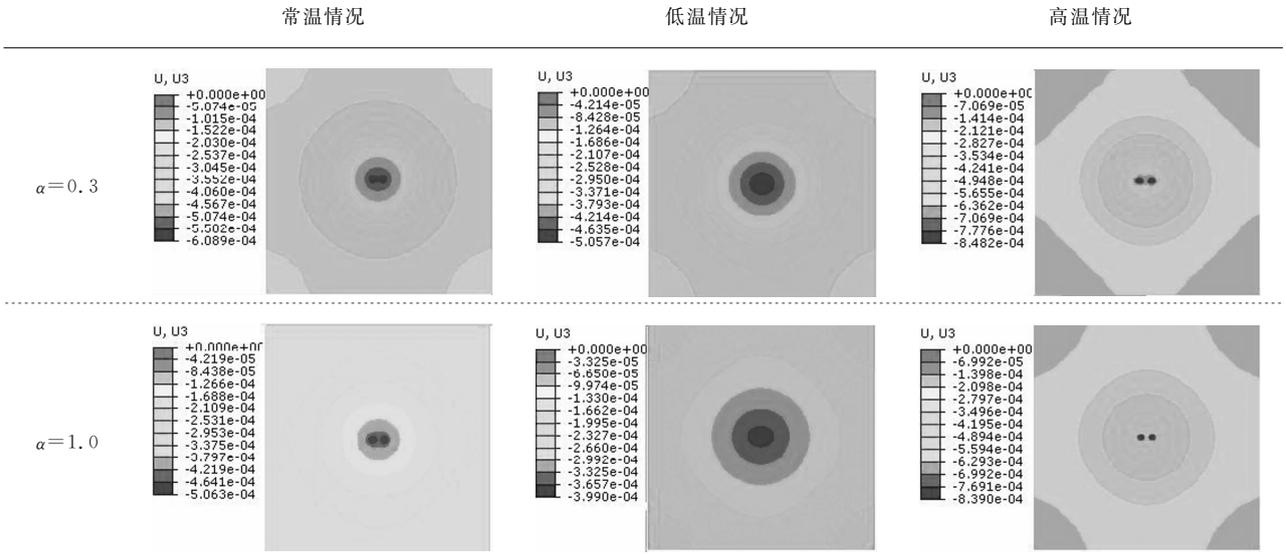


图 11 不同温度情况下加铺层表弯沉盆云图比较
Fig. 11 Contour plot of surface deflections under different temperature conditions

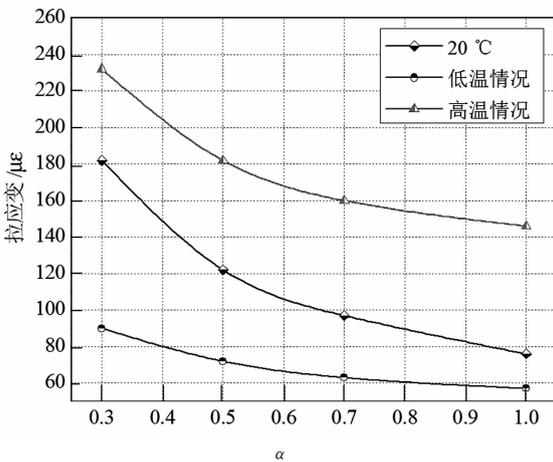


图 12 沥青加铺层底部水平拉应变比较
Fig. 12 Comparison of horizontal tensile strain at the bottom of the overlay

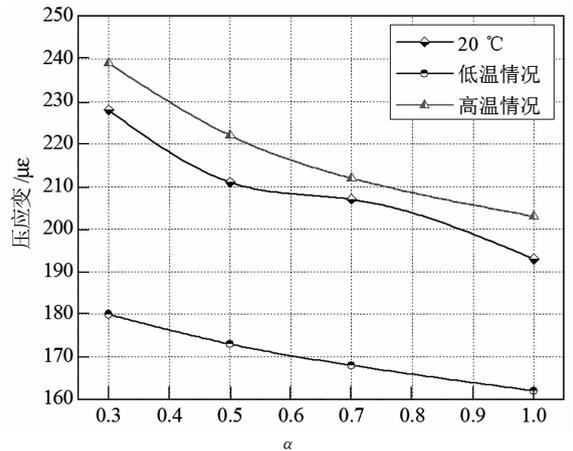


图 13 土基顶部竖向压应变比较
Fig. 13 Comparison of vertical strain at top of subgrade

3.4 层间接触影响分析

图 14 和图 15 给出了不同层间接触情况时加铺层表弯沉值和层底拉应力的变化曲线. 不同横观各向同性系数的沥青加铺层表弯沉和层底拉应变均随着层间结合状况的劣化而明显增大. 层间完全连续情况(LX)下弯沉和应变明显小于层间接触情况时. 层间为接触状态时,随着层间摩擦因数减小,弯沉和应变均逐渐增大,且这种影响逐渐增强. 分析表明,沥青加铺层路用性能随着加铺层与旧路面层的连续性呈正相关变化,即层间连续性越好,加铺层路用性能越优.

土基顶部压应变是控制路面车辙的重要指标. 从图 13 可以看出,常温、高温模量梯度和低温模量梯度条件下土基顶部压应变均随横观各向同性系数 α 减小而明显增大. 考虑高温模量梯度特性的土基顶部压应变最大,考虑低温模量梯度特性情况下的最小. 上述分析表明,沥青混凝土的横观各向同性特性对考虑加铺层模量梯度特性的土基顶部压应变影响较大,考虑沥青混凝土的横观各向同性时,相较于传统路面设计,沥青加铺层的抗车辙能力降低;适当提高沥青加铺层的模量可一定程度上减小土基顶部压应变,缓解加铺路面结构的的车辙.

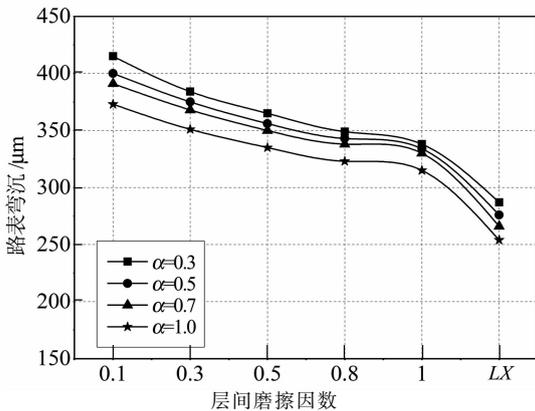


图14 沥青加铺层表弯沉值峰值比较

Fig. 14 Comparison of maximum surface deflections

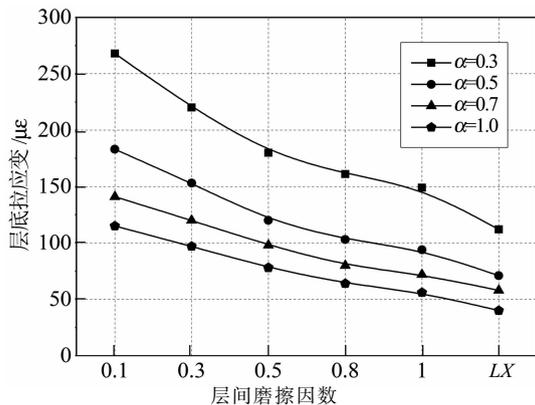


图15 沥青加铺层底部水平拉应变比较

Fig. 15 Comparison of horizontal tensile strain at the bottom of the overlay

4 结语

1) 沥青混凝土的横观各向同性特性对沥青加铺层路面路表弯沉值影响较小;对沥青加铺层的剪应力、层底拉应变和土基顶部压应变影响较大,均会随着横观各向同性系数减小而增大。

2) 沥青混凝土的温度场引起的梯度模量特性对沥青加铺层路面的变形特性及力学响应影响都很大。考虑低温模量梯度时各项力学指标较常温和高模量梯度均显著减小。

3) 沥青加铺层路用性能与加铺层与旧路面层的层间结合状态呈正相关变化,即层间连续性越好,加铺层路用性能越优。

4) 考虑到沥青混凝土的横观各向同性及梯度模量特性和加铺层与旧路面层的层间结合状态对沥青加铺层力学行为的明显影响,因此建议在沥青加铺层设计时适当考虑这些因素。

参考文献

[1] 刘黎萍,孙立军. 旧沥青路面面层有效厚度模型研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 9-13.

LIU Liping, SUN Lijun. Research on effective thickness model of existing asphalt pavement surface course[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(6): 9-13. (In Chinese)

[2] 陈团结,钱振东,黄卫. 交通荷载作用下旧沥青路面裂缝对加铺层的影响[J]. 公路交通科技, 2002, 23(4): 23-26.
CHEN Tuanjie, QIAN Zhendong, HUANG Wei. Influence of pavement cracking on the overlay under traffic load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 23(4): 23-26. (In Chinese)

[3] 王朝辉,王选仓. 基于沥青加铺层结构疲劳寿命的夹层位置确定[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 29-34.
WANG Chaohui, WANG Xuancang. Interlayer position ascertainment based on fatigue life of asphalt overlay structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 29-34. (In Chinese)

[4] 颜可珍,林峰,江毅. 交通荷载下沥青加铺层路面力学分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2011, 42(7): 2078-2085.
YAN Kezhen, LIN Feng, JIANG Yi. Mechanics analysis of asphalt concrete overlay on old asphalt pavements under traffic load[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(7): 2078-2085. (In Chinese)

[5] 张其践,黄志义,刘卓. 沥青路面模量梯度变化分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(5): 48-50.
ZHANG Qijian, HUANG Zhiyi, LIU Zhuo. Analysis of gradient modulus of asphalt pavements [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(5): 48-50. (In Chinese)

[6] BUTTLAR W G. Application of graded finite elements for asphalt pavements [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(3): 240-249.

[7] 李峰,孙立军,方伽俐. 考虑沥青层模量梯度的路面结构剪应力分析[J]. 交通科技, 2005(4): 1-3.
LI Feng, SUN Lijun, FANG Jiali. Pavement structure shear stress analysis considering stiffness gradients of asphalt course [J]. Transportation Science and Technology, 2005(4): 1-3. (In Chinese)

[8] NAZARIAN S, ALVARADO G. Impact of temperature gradient on modulus of asphaltic concrete layers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(4): 492-499. (In Chinese)

[9] 董泽蛟,刘美丽,郑好,等. 考虑横观各向同性特性的沥青路面动力学分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 18-23.
DONG Zejiao, LIU Meili, ZHENG Hao, et al. Dynamic mechanical analysis of asphalt pavement based on cross-isotropic properties[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 18-23. (In Chinese)

[10] AHMED M U, RAHMAN A, ISLAM M R, et al. Combined effect of asphalt concrete cross-anisotropy and temperature variation on pavement stress-strain under dynamic loading[J]. Construction & Building Materials, 2015, 93: 685-694.

[11] WANG L, HOYOS L R, WANG J, et al. Anisotropic properties of asphalt concrete: characterization and Implications for pavement design and analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 535-543.

[12] MASAD E, TASHMAN L, SOMEDAVAN N, et al. Micromechanics-based analysis of stiffness anisotropy in asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374-383.

[13] MOTOLA Y, UZAN J. Anisotropy of field-compacted asphalt concrete material[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2007, 35(1): 103-105.

[14] 鞠达. 沥青混凝土材料的各向异性及其对路面结构受力的影响[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2011.
JU Da. Anisotropy of asphalt concrete and the influence in pavement [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2011. (In Chinese)

[15] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 51-95.
SUN Lijun. Structural behavior theory of asphalt pavements[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 51-95. (In Chinese)

[16] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 138-145.
SHEN Jinan. Road performance of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 138-145. (In Chinese)