



刚柔复合式路面沥青层压剪行为与模量过渡研究

刘朝晖 余时清 黄优 刘靖宇

Research on compression-shear behavior and modulus transition design of asphalt layer in rigid-flexible composite pavement

LIU Zhaohui, YU Shiqing, HUANG You, LIU Jingyu

引用本文:

刘朝晖, 余时清, 黄优, 刘靖宇. 刚柔复合式路面沥青层压 - 剪行为与模量过渡研究[J]. 北科大: 工程科学学报, 2026, 48(3): 517-532. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2025.04.15.003

LIU Zhaohui, YU Shiqing, HUANG You, LIU Jingyu. Research on compression-shear behavior and modulus transition design of asphalt layer in rigid-flexible composite pavement[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2026, 48(3): 517-532. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2025.04.15.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2025.04.15.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内置应变传感器对沥青混合料力学性能的影响

Influence of built-in strain sensor on the mechanical properties of asphalt mixture

工程科学学报. 2025, 47(1): 179 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.04.22.003>

原煤弹塑性局部化损伤本构模型

Research on the elastoplastic localized damage constitutive model of raw coal

工程科学学报. 2025, 47(4): 620 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.06.08.001>

基于虚拟材料复模量非均匀分布的螺栓连接薄板结构半解析建模

Semianalytical modeling of a bolted thin plate structure based on nonuniform distributions of the complex modulus of a virtual material

工程科学学报. 2021, 43(6): 843 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.20.005>

古砖塔子结构压剪复合受力性能分析

Analysis of the composite mechanical properties of the substructure of a masonry pagoda

工程科学学报. 2022, 44(2): 277 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.08.12.004>

带有非均质刚柔耦合翼的无人机边界控制

Boundary control for an unmanned aerial vehicle with a nonhomogeneous rigidflexible coupling wing

工程科学学报. 2024, 46(9): 1574 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.09.30.001>

金属薄板面内压剪变形的损伤断裂行为

Damage and fracture behavior of a metal sheet under in-plane compressionshear deformation

工程科学学报. 2021, 43(2): 263 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.09.23.002>

刚柔复合式路面沥青层压-剪行为与模量过渡研究

刘朝晖¹⁾, 余时清¹⁾, 黄 优^{1,2)✉}, 刘靖宇^{3,4)}

1) 长沙理工大学交通学院, 长沙 410114 2) 长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 长沙 410114 3) 湖南省高速公路集团有限公司, 长沙 410005 4) 长沙理工大学土木工程学院, 长沙 410114

✉通信作者, E-mail: hyzju@csust.edu.cn

摘 要 基层刚度影响着沥青路面结构的受力状态及破坏模式, 为了深入研究刚性基层上沥青面层的力学行为特征, 改善刚柔复合式路面的结构力学性能, 推导了沥青混合料的黏弹塑性本构, 建立了刚柔复合式路面热-力耦合模型, 提取了沥青层内部的温度-模量场, 开展了热力耦合作用下刚柔复合式路面力学行为分析, 提出了刚柔复合式路面模量梯度结构. 结果表明: 沥青层内部在环境温度下存在明显温度梯度, 导致沥青层内部产生随时空变化的模量梯度; 研究明确了热力耦合作用下复合式路面沥青层压-剪力学行为, 设计时应重点考虑刚性基层上沥青面层的剪应力; 当基层模量与面层模量接近以及沥青面层模量沿深度梯度增加时, 沥青层剪应力较小, 因此有必要在复合式路面设置模量过渡层, 以协调面层与基层之间的模量差异, 降低沥青面层的剪应力; 最后基于响应曲面模型, 以复合式路面沥青层最大剪应力最小为优化目标, 得到复合式路面模量过渡结构为: 沥青上面层厚度 4 cm, 过渡层厚度 8 cm, 过渡层模量为沥青层模量的 2 倍, 上面层剪应力与过渡层剪应力较不设过渡层的复合式路面对应层位分别降低了 14.3% 和 20.5%. 研究成果可为刚性基层沥青路面的结构力学行为及材料研发提供参考.

关键词 道路工程; 压-剪应力; 黏弹塑性本构; 刚柔复合式路面; 模量过渡结构

分类号 U416.21

Research on compression-shear behavior and modulus transition design of asphalt layer in rigid-flexible composite pavement

LIU Zhaohui¹⁾, YU Shiqing¹⁾, HUANG You^{1,2)✉}, LIU Jingyu^{3,4)}

1) School of Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

2) Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of the Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

3) Hunan Provincial Expressway Group Co. LTD, Changsha 410005, China

4) School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

✉Corresponding author, E-mail: hyzju@csust.edu.cn

ABSTRACT The stiffness of base layers significantly influences the mechanical response and failure mode of asphalt pavement structures. To investigate the mechanical behavior of the asphalt layer and enhance its structural performance, this study systematically analyzed the compression-shear behavior within the asphalt layer and developed a novel modulus gradient design. A viscoelastic-plastic constitutive model was derived for asphalt mixtures. Subsequently, a thermomechanically coupled model specific to composite pavements was established. This model facilitated the extraction of the temperature field within the asphalt layer under environmental

收稿日期: 2025-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278437, 52478442); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40479); 湖南省交通运输厅科技创新计划资助项目(202236); 长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(kj210401); 湖南省研究生科研创新项目(CX20230838)

conditions, enabling the direct characterization of its modulus gradient field owing to the high-temperature dependence of asphalt. Comprehensive coupled thermomechanical analyses were performed to elucidate the mechanical behavior of composite pavements under combined thermal and loading stresses. Results revealed a distinct temperature gradient within the asphalt layer in response to ambient conditions. This temperature gradient inherently induced time- and space-dependent modulus gradients in the asphalt material. The analysis clearly identified the critical compression-shear mechanical behavior exhibited by the asphalt layer in the composite pavement under thermomechanical coupling, indicating that the shear stress within the asphalt layer atop the rigid base warrants paramount consideration during structural design. This study demonstrates that minimizing the shear stress within the asphalt layer can be achieved under two key conditions: (1) when the base modulus closely approaches the modulus of the asphalt layer and (2) when the asphalt layer modulus gradually increases with depth. These findings strongly support the necessity of incorporating a modulus transition layer between the asphalt layer and rigid base. This transition layer effectively mediates the modulus disparity between the softer asphalt and rigid base, thereby reducing the shear stress concentrations within the asphalt. To optimize this modulus transition design, a response surface methodology (RSM) was employed, with the optimization objective set to minimize the maximum shear stress occurring within the asphalt layers (surface and transition). RSM optimization yielded the following optimal modulus transition structure parameters: a 4 cm thick upper asphalt surface layer, an 8-cm thick transition layer, and a transition layer modulus requirement of twice the modulus of the asphalt surface layer. Implementing this optimized design significantly reduced the shear stress levels. Specifically, the maximum shear stress in the upper surface layer was reduced by 14.3%, and the maximum shear stress in the transition layer was reduced by 20.5% compared to equivalent locations in the composite pavement without a modulus transition layer. This study provides an in-depth understanding of the thermomechanical behavior, particularly the compression-shear response, of composite pavement asphalt layers and successfully introduces a targeted modulus transition layer design strategy. The optimized modulus-gradient structure offers a practical solution for mitigating critical shear stresses, ultimately contributing to enhanced durability. These findings provide fundamental insights for understanding the structural mechanics and guiding the development of asphalt mixtures for rigid base pavements.

KEY WORDS road engineering; compression-shear stress; viscoelastic-plastic constitutive; rigid-flexible composite pavement; modulus transition structure

基层在路面结构中起着承上启下的重要作用, 基层刚度的大小影响了整个路面结构的力学行为模式. 刚性基层沥青路面(又称刚柔复合式路面)是指在水泥混凝土、碾压混凝土或连续配筋混凝土等刚性基层上铺筑沥青面层的路面结构, 是我国重载交通长寿命路面结构形式之一, 广泛应用于重载交通路面、特殊地质道路结构、机场混凝土道面加铺、桥隧铺装等路面结构^[1-2].

沥青面层承受交通荷载和环境因素的耦合作用, 应力状态十分复杂. 国内外学者围绕刚性基层上沥青面层的荷载应力与温度应力分布开展了大量研究, 分析了结构力学行为特点及其影响因素^[3-4]. 在行车荷载作用下沥青路面表现出双向疲劳损伤模式, 即沥青路面同时产生自上而下和自下而上的疲劳损伤, 其中自上而下的疲劳损伤主要是压-剪作用所致, 同时还表现为 Top-down 裂缝与车辙变形的对偶式损伤^[5-8]. 相较于半刚性和柔性基层沥青路面, 刚性基层沥青面层厚度通常较薄(一般 < 15 cm), 且与基层模量差异显著(根据温度的不同, 面层模量为基层的 1/60 ~ 1/3), 因而沥青层应力响应规律较普通沥青路面和水泥路面均有所不同^[9-10]. 刚性基层模量高、刚度大, 能够提高路面

结构的整体强度和抗变形能力, 在荷载作用下, 刚柔复合式路面的刚性基层处于弯拉应力状态, 而沥青面层处于受压状态^[11]. 但当基层模量远远大于面层模量时, 会显著提高沥青面层内的剪应力, 对沥青层的抗剪性能提出了更高要求^[12-13]. Xu^[14]采用四点弯曲梁试验发现复合式试件中 L/4 跨和支点的层间界面均发生压缩破坏, 而跨中处层间界面呈现出剪切破坏特征. Nian^[15]使用有限元方法研究了沥青路面应力分布规律, 发现当层间完全连续时, 最大剪应力主要集中在面层的上、中层, 且沥青上面层主要承受压缩-剪切荷载耦合作用. Wan 等^[16]发现桥面铺装结构的水泥混凝土调平层与沥青铺装层层间表现出压-剪组合破坏, 层间结构最不利剪切荷位并不是所受层间剪应力最大位置, 还与其受到的压应力有关.

大量研究表明, 基层和面层的模量组合对结构应力分布有显著影响^[17-19]. 当基层模量远大于面层时, 会显著提高沥青面层内剪应力. 当沥青面层各层模量不产生跳跃变化且结构组合较协调时, 可以提高路面结构整体抗车辙能力. 通过设计各层模量相当的路面结构以及适当增加中面层厚度, 能有效分散荷载作用力. 因此设置合理的模量

过渡结构对改善刚柔复合式路面结构力学性能、提高复合式路面耐久性具有理论意义和实际价值。

现有研究普遍采用线弹性模型描述沥青层力学行为,且忽略服役温度场导致的模量梯度效应,导致力学响应预测偏差^[20-22]。本研究通过构建沥青混合料黏弹塑性本构模型,结合温度场分析数据,建立考虑模量梯度效应的刚柔复合式路面热力耦合分析模型。基于该模型开展沥青路面力学行为分析,并提出模量梯度优化结构。研究成果可为刚柔复合式路面的梯度材料设计与长寿命结构优化提供理论与技术支撑。

1 刚性基层沥青路面热力耦合模型

1.1 沥青混合料黏弹塑性本构

(1) 黏弹性本构

对于黏弹性材料,应力张量可拆分为体应力张量与偏应力张量叠加的形式^[23],如式(1)所示。

$$\sigma_{ij}(t) = \delta_{ij} \int_0^t K(\tau) \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial \tau} d\tau + \int_0^t 2G(\tau) \frac{\partial e_{ij}^{ve}}{\partial \tau} d\tau \quad (1)$$

式中: ε_{kk} , e_{ij}^{ve} 分别为体应变张量与偏应变张量; δ_{ij} 为克罗内克符号; $K(t)$ 、 $G(t)$ 分别为体积松弛模量与剪切松弛模量。

松弛模量 $E(t)$ 采用公式(2)所示广义 Maxwell 模型的 Prony 级数形式表示,假设沥青混合料为各向同性材料时, $K(t)$ 与 $G(t)$ 可根据公式(3)、(4),由松弛模量 $E(t)$ 与泊松比 ν 直接计算得出。

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^m E_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (2)$$

$$K(t) = \frac{E(t)}{3(1-2\nu)} \quad (3)$$

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

式中: $E(t)$ 为松弛模量函数; E_∞ 为长期松弛模量; ρ_i 为松弛时间; E_i 为对应于 ρ_i 的松弛模量。

获取 Prony 级数的参数 E_∞ 、 ρ_i 、 E_i 是构建沥青混合料黏弹性本构模型的关键。实际应用中通常采用式(2)对沥青混合料频率域动态模量主曲线进行最小二乘法求解,得到松弛模量的 Prony 级数参数^[24-27]。频率域动态模量主曲线采用 Sigmoidal 模型,其函数式为:

$$\lg|E^*| = \lg|E^*|_{\min} + \frac{\lg|E^*|_{\max} - \lg|E^*|_{\min}}{1 + e^{\beta + \gamma(\lg f)}} \quad (5)$$

式中: $|E^*|$ 为动态模量; $\lg f$ 为缩减频率; β 、 γ 为拟合参数。 $\lg|E^*|_{\min}$ 、 $\lg|E^*|_{\max}$ 分别为沥青混合料动态模量对数最小值、最大值。

动态模量试验测试方法参照美国 AASHTO TP 62-03 的规定,试验过程分别见图 1 和图 2 所示。采用式(5)建立频率域动态模量主曲线,采用公式(2)所示广义 Maxwell 模型的 Prony 级数式对频率域动态模量主曲线进行最小二乘法拟合,得到松弛模量的 Prony 级数参数,见表 1 所示。



图 1 沥青混合料试件安装

Fig.1 Installation of asphalt mixture specimen



图 2 动态模量试验

Fig.2 Dynamic modulus test

(2) 黏塑性本构

研究基于 Perzyna 本构模型表征沥青混合料黏塑性特征,在关联流动法则下(即屈服函数=塑性势函数),Perzyna 本构模型的黏塑性应变率表达式为^[28]:

$$\dot{\varepsilon}_{VP} = \Gamma \langle \psi(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (6)$$

式中: $\Gamma=1/\eta$; F 为塑性势函数、屈服准则; $\psi(F)$ 为流动函数; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macaulay 括号,即 $\langle x \rangle = \frac{x+|x|}{2}$ 。

假设沥青混合料的硬化是各向同性的,根据 Gibson 在 Perzyna 模型的基础上加入 HISS 屈服面后提出的 Perzyna-Hiss 模型,作为沥青混合料黏塑性行为的屈服准则^[29],Perzyna-Hiss 屈服函数表达式为:

$$F = J_2 - \left\{ \gamma' [I_1 + R(\xi)]^2 - \alpha(\xi) [I_1 + R(\xi)]^n \right\} \quad (7)$$

$$\alpha(\xi) = \alpha_0 e^{\xi k_1} \quad (8)$$

$$R(\xi) = R_0 + R_1 \xi^{k_2} \quad (9)$$

式中: I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为偏应力张量

表 1 松弛模量的 Prony 级数参数

Table 1 Prony series parameters of relaxation modulus

ρ_i	Time/s	E_i	Modulus/MPa	Frequency-dependent dynamic modulus master curve
ρ_1	0.000001	E_1	5538	
ρ_2	0.00001	E_2	6188	
ρ_3	0.0001	E_3	6475	
ρ_4	0.001	E_4	2712	
ρ_5	0.01	E_5	1216	
ρ_6	0.1	E_6	713	
ρ_7	1	E_7	404.3	
	∞	E_∞	391.4	

第二不变量; γ' 、 n 为极限参数和相变参数; ζ 为有效塑性应变; $\alpha(\zeta)$ 、 $R(\zeta)$ 为控制屈服面的形状和大小, 即硬化准则; k_1 、 k_2 为硬化参数; α_0 、 R_0 、 R_1 为控制初始屈服面形状和大小的参数。

流动法则表达式为:

$$\psi(F) = \lambda \left(\frac{F}{F_0} - 1 \right)^N \quad (10)$$

式中, F 为当前应力状态下的屈服函数值, 见公式 (7); F_0 为当前应力状态下屈服面尺寸的参考应力值, λ 是取决于塑性流动方向的拟合参数, 其表达式如下:

$$\lambda = \left(\frac{\theta}{0.528} \right)^{k_3} \quad (11)$$

式中: θ 为应力矢量在 I_1 和 J_2 空间下的方向; k_3 为拟合参数。

为确定黏塑本构模型参数, 采用 Materials test system(MTS) 810 液压伺服机对沥青混合料进行了分级间歇加载的单轴压缩试验, 如图 3 所示. 试验开始前以低应力预压 1 s, 然后进入分级加载试验, 荷载级位分别为 0.1 MPa、0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa, 每级荷载依次加载 2 s、5 s、10 s, 卸载 20 s、50 s、100 s. 对于每一个加载周期内的应变及回弹应变, 按照图 4 的处理方式提取黏塑性应变, 可得到各加载周期内的黏塑性应变值, 如图 5 所示. 根据式 (6) ~ (11) 对模型参数进行最小二乘法求解, 表 2 为拟合后的黏塑性模型参数。

1.2 数值实现

有限元分析时, 若要通过黏弹性响应方程对当前分析步的应力进行计算, 需要对材料的整个应变历史进行存储与计算, 即对于黏弹性模型应力-应变关系的卷积形式的遗传积分进行计算, 这将不可避免地产生巨大的存储与计算需求. 利用前述松弛模量所使用的 Prony 级数自然对数形式的特点, 将应力改写为增量的格式, 即可避免对历



图 3 单轴压缩分级间歇加载试验

Fig.3 Graded intermittent loading test under uniaxial compression

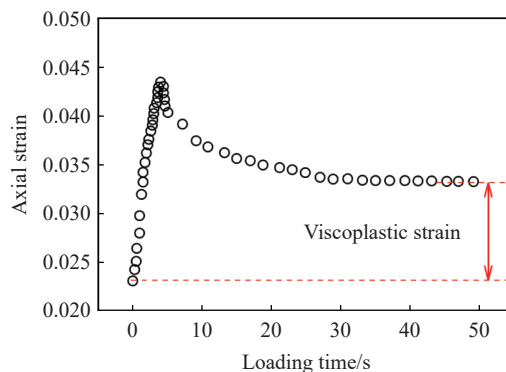


图 4 单个加载周期内的轴向应变

Fig.4 Axial strain within a single loading cycle

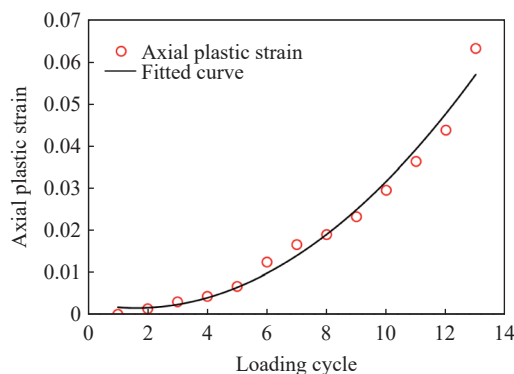


图 5 轴向黏塑性应变

Fig.5 Axial viscoplastic strain

表2 黏塑性本构模型参数取值

Table 2 Parameter values for the viscoplastic constitutive model			
Model parameter	Value	Model parameter	Value
$\Gamma/(\text{kPa}\cdot\text{s}^{-1})$	1.433×10^{-9}	k_1	-73.54
a_0	0.0064	k_2	0.397
R_0/kPa	40.09	k_3	2.172
R_1/kPa	3514.2	n	2.245
γ'	0.0398	N	1.068

史数据进行存储与计算,形式如式(12):

$$\begin{aligned} \sigma^n &= \sigma^{n-1} + \Delta\sigma \\ &= \underbrace{\left(\frac{1}{3}\sigma_{kk}^{n-1} \cdot \delta_{ij} + \frac{1}{3}\sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}\right)}_{\text{Volumetric stress term}} + \underbrace{(S_{ij}^{n-1} + \Delta S_{ij})}_{\text{Deviatoric stress term}} \quad (12) \end{aligned}$$

式中,上角标 n 、 $n-1$ 表示在数值计算时的增量步,下角标 ij 、 kk 为应力张量符号。

偏应力张量计算步骤如式(13),体积应力增量张量计算步骤如式(14)所示。偏应力历史变量 H 和体积应力历史变量 Q 递推更新表达式如式(15)所示:

$$\begin{aligned} \Delta S_{ij} &= \int_0^{t_n} 2G(\tau) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau} d\tau - \int_0^{t_{n-1}} 2G(\tau) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau} d\tau + \\ &\quad \underbrace{\int_0^{t_{n-1}} \{2G(t_n - \tau) - 2G(t_{n-1} - \tau)\} \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau} d\tau}_{\text{Historical deviatoric stress}} + \\ &\quad \underbrace{\int_{t_{n-1}}^{t_n} 2G(t_n - \tau) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau} d\tau}_{\text{Deviatoric stress rate}} = \sum_{i=1}^m 2G_i (e^{-\Delta t/\rho_i} - 1) H_i^{n-1} + \\ &\quad \left\{ G_\infty + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m G_i (1 + e^{-\Delta t/\rho_i}) \right\} \Delta e_{ij} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{kk} &= \int_0^{t_n} 3K(\tau) \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial \tau} d\tau - \int_0^{t_{n-1}} 3K(\tau) \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial \tau} d\tau + \\ &\quad \underbrace{\int_0^{t_{n-1}} \{3K(t_n - \tau) - 3K(t_{n-1} - \tau)\} \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial \tau} d\tau}_{\text{Historical volumetric stress}} + \\ &\quad \underbrace{\int_{t_{n-1}}^{t_n} 3K(t_n - \tau) \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial \tau} d\tau}_{\text{Volumetric stress rate}} = \sum_{i=1}^m 3K_i (e^{-\Delta t/\rho_i} - 1) Q_i^{n-1} + \\ &\quad \left\{ K_\infty + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m K_i (1 + e^{-\Delta t/\rho_i}) \right\} \Delta \epsilon_{kk} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} H_i^n = e^{-\Delta t/\rho_i} H_i^{n-1} + \frac{\rho_i}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/\rho_i}) \Delta e_{ij} \\ Q_i^n = e^{-\Delta t/\rho_i} Q_i^{n-1} + \frac{\rho_i}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/\rho_i}) \Delta \epsilon_{kk} \end{cases} \quad (15)$$

与黏弹性模型实现方法相比,黏塑性模型的数值实现方法较为简单,所有本构方程按照顺序线性计算,不涉及复杂计算问题。此外,由于与总应变增量相比,单个分析步在荷载作用下产生的黏塑性应变的增量要小很多,因此,对于黏塑性应变,仅需要对应力进行单次修正即可。

1.3 路面有限元模型

基于 ABAQUS 有限元建立路面结构模型,其几何参数依据交通运输部足尺路面试验环道(RIOHTrack)STR5 段刚性基层沥青路面结构确定。模型尺寸及各结构层厚度见图6。温度场计算中,通过 FILM 子程序定义时变环境温度边界条件(气温及对流热交换系数),并利用 DFLUX 子程序加载太阳辐射热流密度,模拟连续变温工况下复合式路面结构的非稳态热传导过程^[30]。

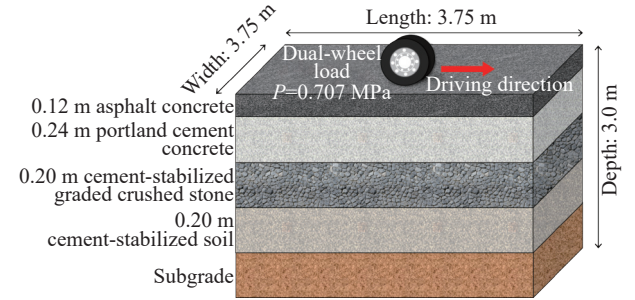


图6 足尺环道 STR5 段刚性基层沥青路面结构组成

Fig.6 Composite pavement structure composition of STR5 section of a RIOHTrack

研究采用夏季温度场作为温度边界条件,主要原因为夏季高温条件下面层-基层间刚度差异更大,路面刚-柔复合特征更为显著。此外,沥青混合料在高温条件下黏弹性行为与温度梯度的耦合效应更易被捕捉,而冬季低温条件下,沥青混合料近似线弹性。环境外部气象数据取自 2018 年 7 月 21 日 RIOHTrack 实测数据^[31]。路面材料热物性参数见表 3。

模型采用层间完全连续假设,底部完全约束,路面两端约束沿行车方向的位移和垂直行车方向的旋转,荷载选用标准轴载 BZZ-100,接地压强 0.7 MPa。采用顺序热力耦合方法,将温度场分析的输出结果作为温度边界条件导入力学模型,其顺序耦合流程详见图 7。模型中,沥青层力学行为通过广义 Maxwell 模型与 Perzyna 黏塑性理论描述的

表 3 路面材料热物性参数

Table 3 Thermal parameters of pavement materials

Parameter	Asphalt concrete	Portland cement concrete	Cement-stabilized graded crushed stone	Cement-stabilized soil	Subgrade
Thermal conductivity, $k/(J \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	4900	6200	4420	4200	5600
Density, $D/(kg \cdot m^{-3})$	2300	2400	2200	1900	1800
Heat capacity, $C/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	924	780	910	890	1040

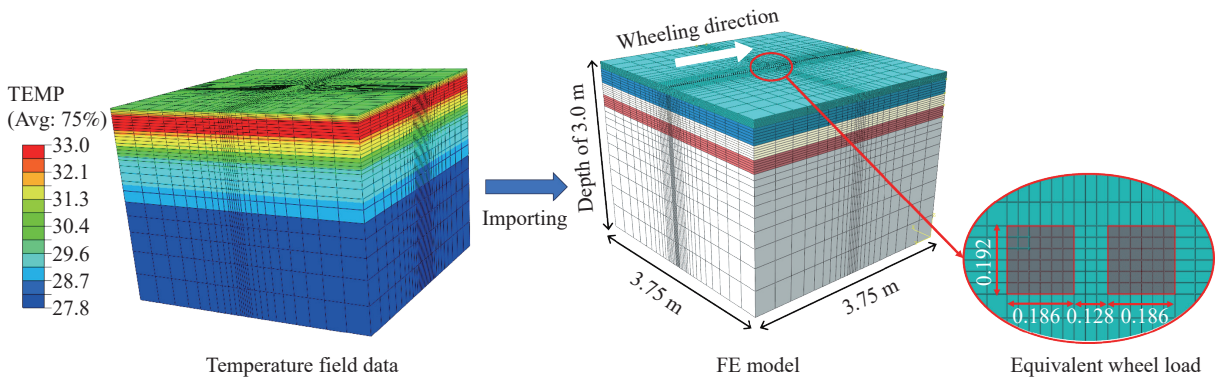


图 7 热-力耦合过程示意图

Fig.7 Schematic of the thermomechanical coupling process

用户自定义材料子程序(UMAT)实现, 基层与土基则简化为线弹性材料, 参数参照文献 [30] 选取. 路面结构层厚度、材料参数详见表 4.

表 4 有限元建模参数

Table 4 Finite element model parameters

Materials	Thickness/m	Young's modulus/MPa	Poisson's ratio
Asphalt concrete	0.12		
Portland cement concrete	0.24	30000	0.15
Cement-stabilized graded crushed stone	0.20	1200	0.25
Cement-stabilized soil	0.20	1000	0.30
Subgrade	2.24	60	0.40

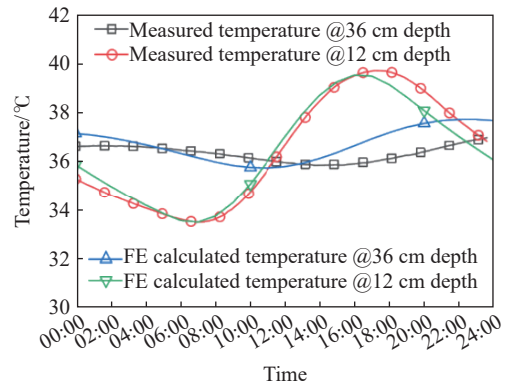


图 8 不同深度处温度的计算值与实测值比较

Fig.8 Comparison between calculated and measured temperatures at different depths

1.4 模型验证

为保证有限元模型的可靠性, 对模型的温度和变形数据进行了验证. 首先, 将有限元模型的温度场计算结果与足尺环道 STR5 段实测的路面结构内部温度进行了对比, 如图 8 所示. 同时, 将有限元模型计算的弯沉与落锤式弯沉仪(FWD)测得的弯沉数据进行了比较, 如图 9 所示.

通过比较温度的计算值和测量值, 可以发现计算值与测量值吻合较好, 最大误差小于 2 °C. 此外, FWD 得到的弯沉曲线与由有限元模型得到的弯沉曲线吻合较好, 最大误差保持在 5% 以内. 这些误差受软件计算方法、材料特性变化以及云量、

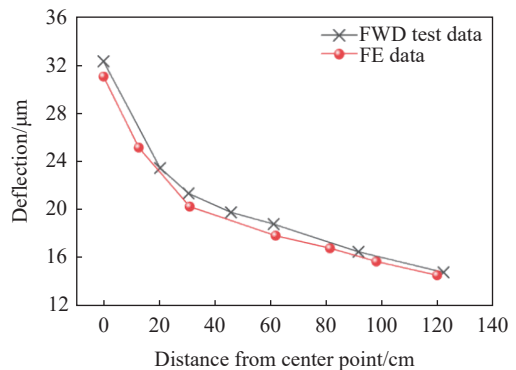


图 9 FWD 实测弯沉与有限元计算值对比

Fig.9 Comparison between FWD-measured deflection and finite element results

风速、湿度、行车荷载等因素配置的影响. 但考虑到误差均在工程应用可接受的范围内, 因此, 认为所建立的有限元热力耦合模型合理可靠, 可用于计算复合式路面的应力和温度场.

2 沥青层内部温度梯度与模量梯度分析

2.1 沥青层温度场

夏季复合式路面沥青面层 1 天 24 h 温度变化如图 10 所示. 路面结构不同深度、不同时间的温度并非定值, 而是随时间与深度变化. 在 7:00 ~ 18:00 内路面温度差异较大, 沥青面层表面最高温度接近 53 °C, 沥青层表面与底面温度差异最高达到 14 °C 左右. 选取 0:00、7:00、13:00、18:00 温度差异较明显时刻的沥青面层瞬态温度数据作为研究对象, 以每 2 cm 深度处的平均温度梯度作为该深度区域的代表值, 绘制沥青面层内部沿深度方向的温度梯度变化图, 如图 11、12 所示.

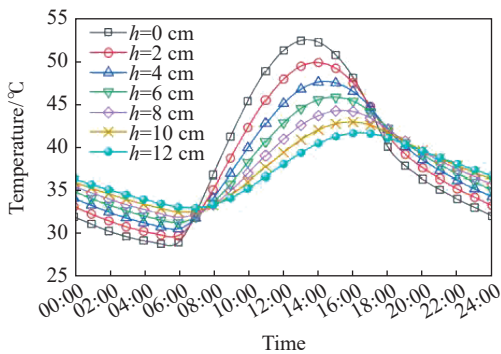


图 10 24 h 路面结构温度数据

Fig.10 Hourly pavement temperature data over 24 h

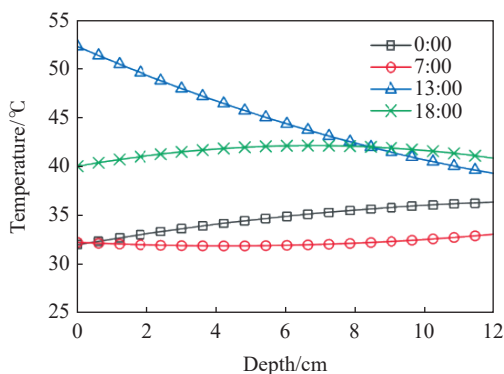


图 11 不同路面深度处温度

Fig.11 Temperature at different pavement depths

由图 11、12 可知, 沥青层内部存在随时间-空间不断变化的温度场, 不同时刻路面温度均在靠近表面处变化最大. 0:00 时刻, 沥青面层温度整体接近 35 °C 左右, 由于表面的热量损失, 沥青层表

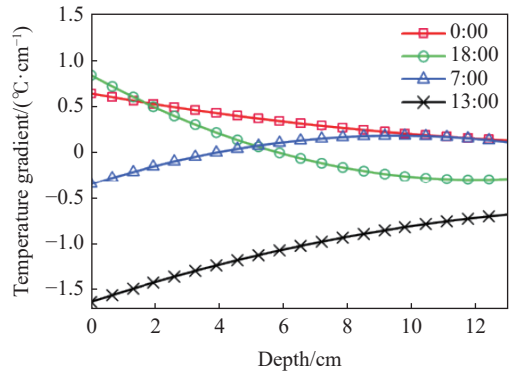


图 12 不同路面深度处温度梯度

Fig.12 Temperature gradients at different pavement depths

面的温度低于内部温度, 因此沿沥青层深度方向存在 0.6 °C·cm⁻¹ 左右的正温度梯度. 到 7:00 时刻, 沥青面层整体温度均匀, 为 32 °C 左右, 温度梯度也较小; 至 13:00 时刻, 沥青面层温度继续上升, 最高温度达到 53 °C, 平均温度达到 46.5 °C, 由于受到太阳辐射, 沥青层表面的温度高于内部温度, 因此 13:00 时刻沿沥青深度方向出现明显负温度梯度, 最大达到 -1.5 °C·cm⁻¹, 到 18:00 时刻表面和底面温度接近, 温度梯度较小, 但是沥青层整体温度较高, 接近 42 °C.

7:00 ~ 18:00 为温度剧烈变化期, 表层与底层的温差逐渐扩大至峰值(13:00 左右), 随后温差随太阳辐射减弱而缩小. 因此工程实践中继续采用均匀温度场假设不再合适, 对于路面内部温度梯度较大时刻, 宜采用图 10 中的瞬态梯度数据作为热力分析输入, 建立温度梯度-力学响应耦合模型, 用于评估复杂气候下路面的长期耐久性.

2.2 沥青层模量场

不同温度和荷载频率下, 路面沥青层沿深度方向会表现出不同的动态模量值. 因此, 与温度场对应, 沥青层内部存在模量场, 其模量梯度对复合式路面力学响应特征与破坏行为具有重要意义. 研究基于时温等效原理, 采用 Boltzmann 函数对温度域动态模量主曲线进行非线性拟合, 横坐标为温度, 主曲线的平移系数由动态模量曲线进行确定, 见式 (16) 所示:

$$\lg|E^*| = \frac{\lg|E_{\max}^*| - \lg|E_{\min}^*|}{1 + e^{(T-T_0)/dx}} + \lg|E_{\min}^*| \quad (16)$$

式中, $\lg|E_{\min}^*|$ 、 $\lg|E_{\max}^*|$ 分别为沥青混合料动态模量对数最小值、最大值; T 为温度; T_0 为动态模量变化曲线斜率最大处对应的试验温度, dx 为模型拟合参数.

研究表明选择 10 Hz 的荷载频率可以较好的

反应路面实际受力作用^[32]. 因此研究以 10 Hz 为基准频率, 将其他频率下的动态模量曲线平移至基准频率, 采用式 (16) 进行非线性拟合, 即得到沥青混合料温度域的动态模量主曲线. 动态模量主曲线见 图 13 所示, 拟合后的主曲线模型见式 (17).

$$\lg|E^*| = 3.26 + \frac{1.18}{1 + e^{(T-21.61)/10.28}} \quad (17)$$

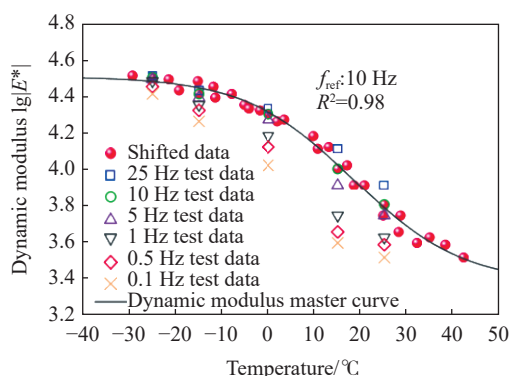


图 13 沥青混合料基准频率 10 Hz 下动态模量主曲线

Fig.13 Dynamic modulus master curve of the asphalt mixture at a reference frequency (10 Hz)

根据基准频率下的动态模量主曲线, 结合复合式路面结构内部温度场数据, 可得到不同时刻瞬态温度场下沥青面层内部的模量梯度. 计算得到的不同时刻(1:00、7:00、13:00、18:00)沥青面层内部动态模量沿深度的变化如图 14 所示, 沥青面层内部沿深度方向的模量梯度见图 15.

由 图 15 可知, 沥青层内部模量场呈现出与温度场显著的反向分布特征. 在夏季高温季节, 0:00 时刻尽管温度场梯度较小, 但平均温度靠近动态模量主曲线斜率最大区域, 因此仍形成 $-120 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的陡峭模量梯度; 7:00 时 0 ~ 12 cm 深度温度

均匀, 模量稳定在 3600 MPa 左右, 梯度范围收窄至 $\pm 60 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^{-1}$. 至 13:00 时, 沥青面层整体平均温度 ($46.5 \text{ }^\circ\text{C}$) 偏离主曲线敏感区 ($T_0=21.61 \text{ }^\circ\text{C}$), 尽管此时温度梯度达最大, 但模量梯度峰值仅 $63 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^{-1}$. 18:00 时温度场趋于平衡, 模量均匀分布于 2500 MPa 水平, 梯度峰值降至 $-65 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^{-1}$. 研究表明, 模量梯度幅值不仅取决于温度梯度, 更与温度区间相对于主曲线斜率最大处 T_{E0} 的偏移量相关. 这种时空动态变化的模量场会显著影响复合式路面的应力分布, 在力学响应分析中需充分考虑模量梯度的时变特性.

3 刚性基层沥青路面力学响应分析

3.1 拉压状态分析

层底应变状态是判断沥青路面结构破坏模式的重要判据, 可以根据材料单元应力偏量第三不变量 J_3 对刚柔复合式路面沥青层内部应变状态进行判断. 根据弹塑性理论基本公式, J_3 的数值决定了主应力空间中 π 平面上的应力罗德角 θ . 当 $J_3 > 0$ 时, 单元产生拉伸类应变, 当 $J_3 = 0$ 时, 产生平面应变, $J_3 < 0$ 时, 产生压缩类应变^[33]. 在热力耦合仿真模型中导入高温季节 0:00、7:00、13:00、18:00 时刻的瞬态温度场, 计算不同时刻复合式路面结构沥青层内部应力偏量第三不变量 J_3 , 研究 J_3 在沥青层内部的分布特征, J_3 分布云图如图 16 所示.

由 图 16 可知, 以 0:00 时刻的瞬态温度场为例, 荷载直接作用区域的沥青层内部应力偏量第三不变量 J_3 均为负值, 且离荷载作用区域越近, 沥青层 J_3 越小. 不同时刻瞬态温度场下, J_3 分布区域有细微区别, 但沥青层内部 J_3 整体均以负值为主.

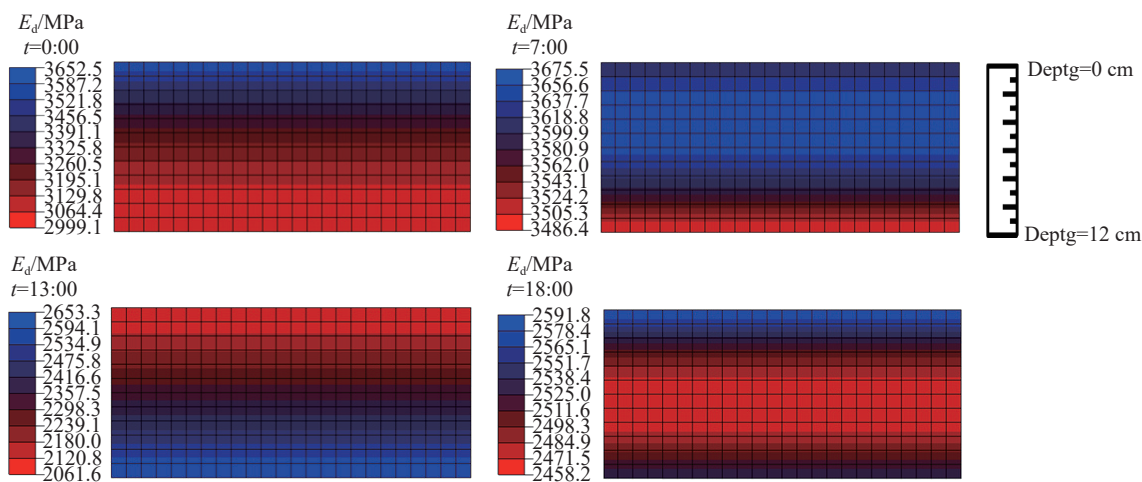


图 14 不同时刻沥青层内部动态模量场

Fig.14 Dynamic modulus distribution in the asphalt layer at different times

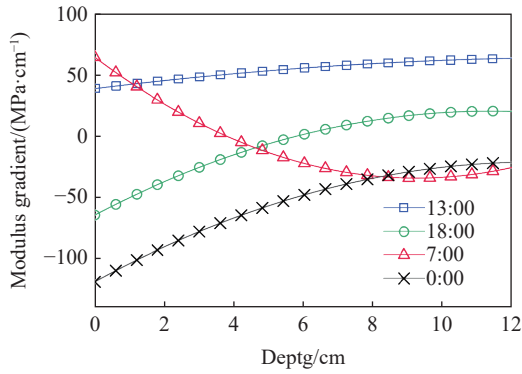


图 15 沥青层内部不同深度处模量梯度

Fig.15 Modulus gradients at different depths of an asphalt layer

结合应力偏量第三不变量 J_3 与单元体受力状态的关系, 可知在荷载-温度共同作用下, 复合式路面沥青层主要表现为压缩类应变. 为进一步量化温度梯度对沥青面层力学响应的的作用机理, 对温度梯度范围进行了扩展, 设置了表 5 所示的 15 类温度梯度; 基层模量变动范围为 100 ~ 30000 MPa, 涵盖了工程中不同基层类型的模量水平; 沥青面层厚度变动范围为 4 ~ 20 cm, 包含了常用的沥青层厚度. 对复合式路面在不同结构参数及温度场条件下的应力应变响应进行单因素影响分析. 不同结构参数及温度场条件下沥青层层底纵向应力以及沥青面层弯拉应变(拉为正, 压为负)如图 17、18 所示, 图 18 中, h_{Asphalt} 代表沥青层厚度.

由图 17(a)可知, 随着基层模量的逐渐增大, 沥青面层底部纵向应力由受拉转为受压, 存在一

个使沥青面层层底拉压转换的基层模量临界点: 当基层模量为 10000 MPa、30000 MPa 时(无机结合料和水泥混凝土模量代表值), 沥青层底受压; 基层模量为 100 MPa、500 MPa、1000 MPa 时(粒料类基层和沥青结合料基层模量范围), 沥青层底受拉. 由图 17(b)可知, 层底压应力水平随面层厚度增加而降低, 但是沥青面层厚度在 4 ~ 20 cm 范围内的变化不会扭转其层底拉压状态. 由图 17(c)可知, 不同温度场下复合式路面沥青层层底均为受压状态, 平均温度越高, 应力水平越高. 温度梯度对层底应力影响规律受平均温度影响, 温度梯度从 $-1.67 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 到 $+1.67 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的过程中, 当平均温度为 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 层底应力水平不断降低, 当平均温度为 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 层底应力水平不断升高, 平均温度为 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 温度梯度对层底应力水平影响较小.

由图 18(a)可知, 基层模量对沥青面层弯拉应变起主要作用, 面层厚度和温度梯度变化对应变影响较小. 随着基层模量增大, 沥青面层层底弯拉应变逐渐减小, 当基层模量超过 1000 MPa 时, 沥青面层主要受压. 由图 18(b)可知, 复合式路面面层厚度较薄时(4 ~ 12 cm), 主要承受压应变, 面层厚度增加至 20 cm 时, 下半部分面层出现拉应变, 但应变水平较小; 由图 18(c)可知, 平均温度为 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时表现为压应变, 平均温度为 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 沥青面层会产生较小的拉应变; $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 温度梯度变化对应变影响不大, 在平均温度为 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,

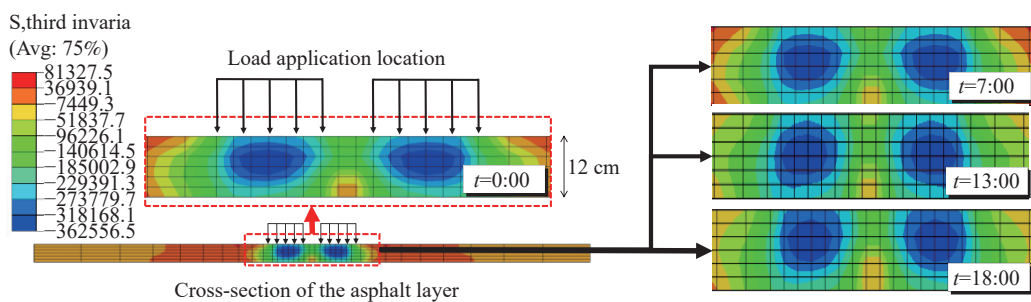


图 16 0:00 ~ 18:00 应力偏量第三不变量 J_3

Fig.16 Third invariant of deviatoric stress (J_3) (from 0:00 to 18:00)

表 5 温度场参数

Table 5 Temperature field parameters

Parameter	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15
Temperature gradient/ $(^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1})$	-1.67	-0.83	0	0.83	1.67	-1.67	-0.83	0	0.83	1.67	-1.67	-0.83	0	0.83	1.67
Top surface temperature/ $^\circ\text{C}$	10	5	0	-5	-10	35	30	25	20	15	60	55	50	45	40
Bottom surface temperature/ $^\circ\text{C}$	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Average temperature/ $^\circ\text{C}$	0	0	0	0	0	25	25	25	25	25	50	50	50	50	50

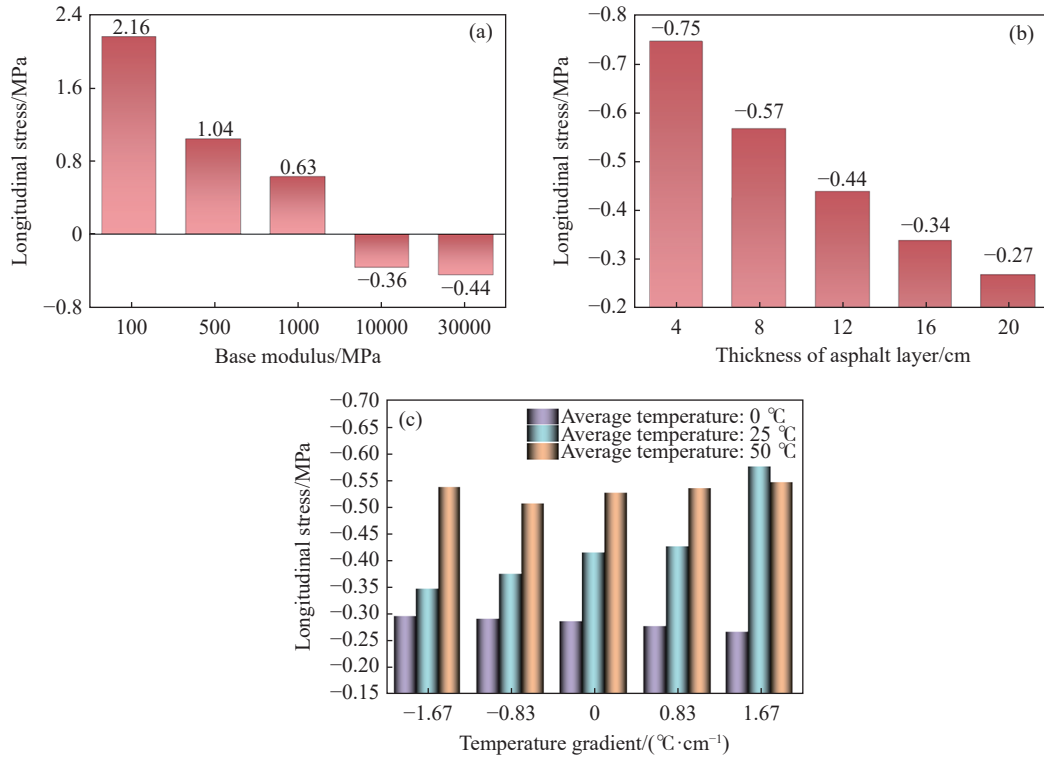


图 17 沥青面层底部纵向应力变化规律。(a) 不同基层模量; (b) 不同面层厚度; (c) 不同温度梯度

Fig.17 Longitudinal stress at the bottom of the asphalt layer: (a) under different base layer moduli; (b) under different asphalt layer thicknesses; (c) under different temperature gradients

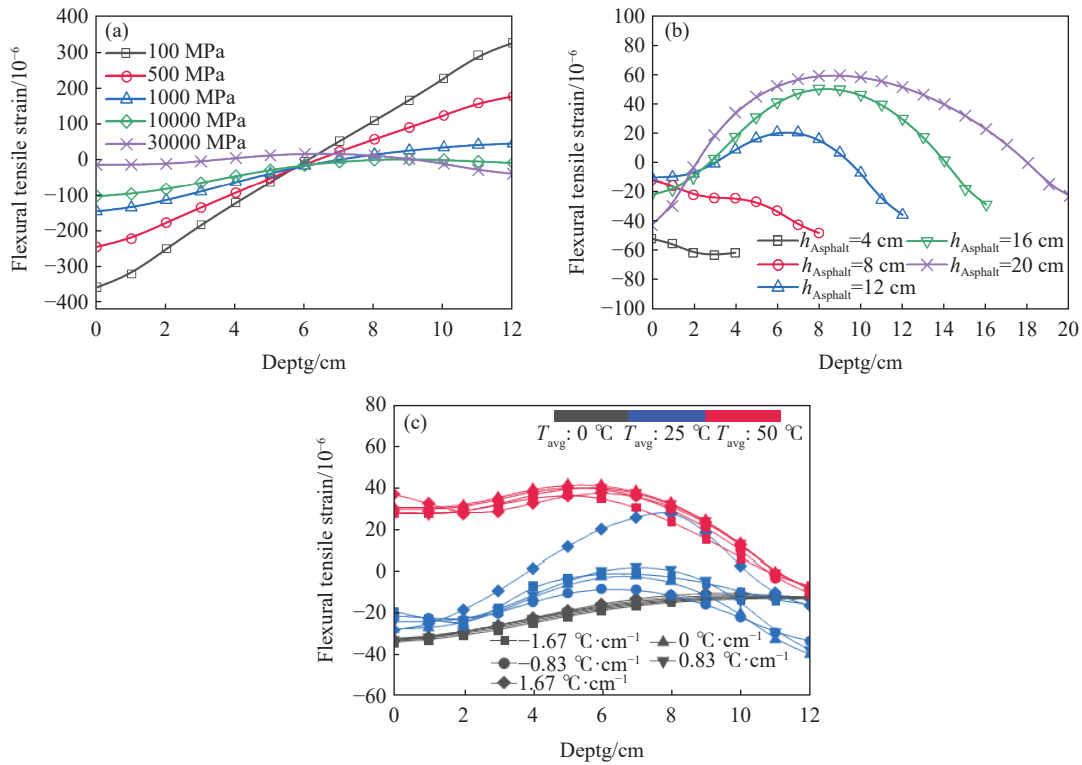


图 18 沥青面层弯拉应变。(a) 不同基层模量; (b) 不同面层厚度; (c) 不同温度梯度

Fig.18 Flexural tensile strength of asphalt layer: (a) under different base layer moduli; (b) under different asphalt layer thicknesses; (c) under different temperature gradients

温度梯度越大, 应变越大. 综上所述, 对于沥青层较薄、基层刚度较大的复合式沥青路面结构, 其沥

青面层主要承受压应变, 因此沿用半刚性/柔性基层路面结构中以沥青层层底最大拉应变作为设计

指标不再符合其受力特征.

3.2 剪应力分析

前期计算结果显示基层模量对剪应力影响较大, 因此对基层模量进行了细化, 以基层模量与面

层模量的比值作为研究变量, 其他参数不变, 分别研究了不同基层/面层模量比、沥青层厚度及温度梯度下刚性基层沥青路面最大剪应力变化规律, 如图 19 所示.

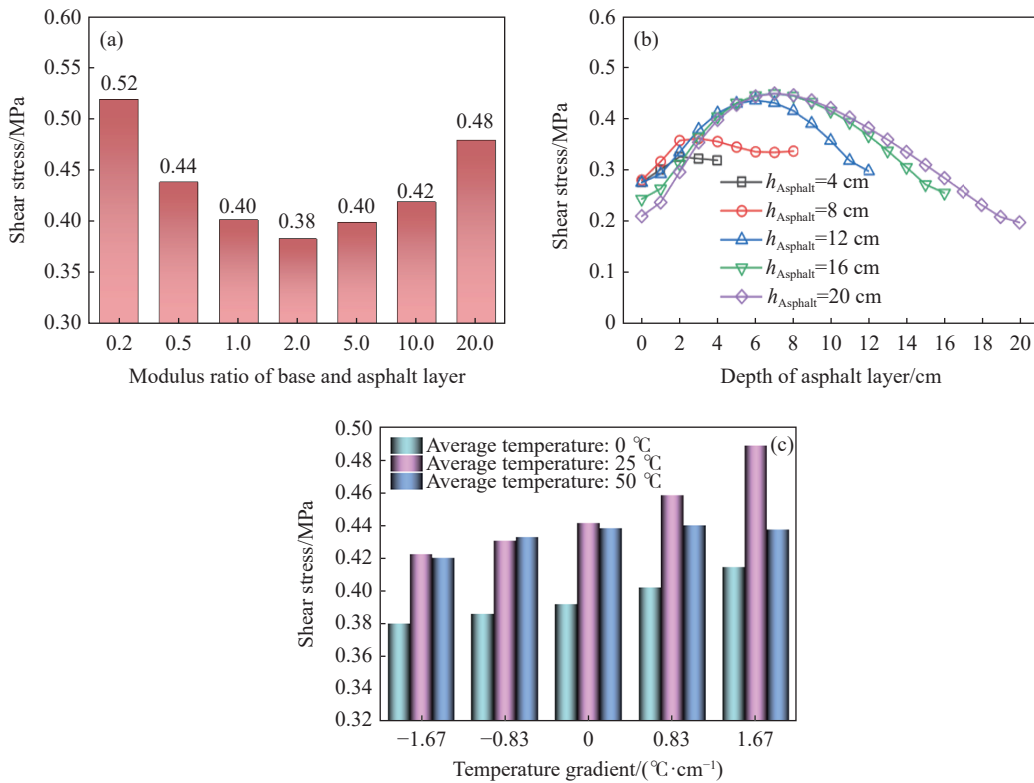


图 19 复合式路面沥青层剪应力变化规律. (a) 不同模量比; (b) 不同面层厚度; (c) 不同温度梯度

Fig.19 Shear stress of asphalt layer of composite pavement: (a) under different base modulus ratios; (b) under different asphalt layer thicknesses; (c) under different temperature gradients

由图 19(a)可知, 沥青面层剪应力随基层和面层的模量比先减小后增大, 当基层模量为面层模量 2 倍左右的时候, 沥青面层剪应力最小, 因此合理地设置刚性基层-沥青面层模量过渡有利于降低复合式路面沥青层剪应力. 由图 19(b)可知, 沥青面层厚度增加会使得沥青面层剪应力增大, 4、8 cm 厚度的沥青层剪应力水平较 12 ~ 20 cm 小. 不同厚度的沥青面层最大剪应力均出现在中上部, 4 ~ 20 cm 厚度的沥青面层最大剪应力依次出现在 2 cm、3 cm、5 cm、7 cm、7 cm 深度处. 由图 19(c)可知, 温度梯度越小, 剪应力越小; 不同平均温度下 (0 °C、25 °C、50 °C), 温度梯度由 -1.67 °C·cm⁻¹ 负梯度转变为 1.67 °C·cm⁻¹ 正梯度时, 剪应力分别增大了 9.1%、15.7%、5%. 结合沥青混合料动态模量主曲线可知, 沿深度方向的正模量梯度有利于降低沥青层剪应力水平.

根据 RIOHTrack 及长潭高速公路复合式路面结构钻芯取样结果 (图 20)可知, 对于刚性基层沥

青路面, 主要发生 Top-Down 开裂, 从工程角度验证了刚性基层上沥青面层的破坏主要是压-剪作用造成的自上而下疲劳开裂^[5,31]. 综合以上分析结果可知, 刚柔复合式路面沥青层在热力耦合作用下主要表现出压-剪组合受力特征, 热力耦合作用下复合式路面最大剪应力发生在沥青面层上半部



图 20 复合式路面 Top-Down 裂缝芯样. (a) 长潭高速公路; (b) RIOHTrack

Fig.20 Top-down crack core samples of composite pavement: (a) Chang-Tan expressway; (b) RIOHTrack

位,且路面结构温度场对荷载作用下沥青层内部剪应力具有较大影响,在路面力学分析与结构设计时应重视温度变化造成的沥青内部材料性能差异及模量梯度对结构力学性能的影响。

4 路面模量过渡研究

由第 3 章路面力学响应分析可知,缩小面层和基层之间的模量差距、设置沿深度方向的正模量梯度均可以减小沥青面层的剪应力水平。因此考虑在面层和基层中间设置模量过渡层,主动构建沿深度方向的正模量梯度,以协调面层与基层的刚度差异,降低路面沥青层剪应力水平。为探究适宜的复合式路面模量过渡结构参数,研究采用响应曲面法,设置不同的面层厚度、过渡层厚度及过渡层模量,开展含模量过渡结构的复合式路面剪应力分析。

4.1 响应曲面试验方案

响应曲面法是一种寻找最优试验条件的方法,适用于解决非线性数据处理问题,尤其在系统

特性受多个变量影响的情况下,考虑多个变量对响应值的交互作用,在小区域内以多项式模型拟合复杂未知函数关系,能降低试验成本,提高试验质量^[34]。研究以沥青上面层剪应力、过渡层剪应力及最大剪应力为输出变量,以沥青上面层厚度(A)、过渡层厚度(B)和过渡层模量与沥青面层模量比值(简称模量比,C)为输入变量,参考 3.2 节分析结果,每个因素取高、中、低三个水平。采用 Box-Behnken 法设计三因素-三水平响应曲面试验方案,具体设计方案如表 6 所示。

4.2 响应面分析与模量过渡结构

由响应曲面试验方案计算的 17 组试验数据见表 7。此外,研究设置了对照组试验,对比无过渡层(对照组)与含过渡层(试验组)结构的沥青面层最大剪应力,其中对照组增设等厚沥青下面层以保证总厚度一致。对照组路面结构参数与剪应力数据见表 8,路面结构示意图见图 21,剪应力对比见图 22。 τ_{max} 为各层剪应力最大值,即 $\tau_{max}=\text{MAX}$ (上面层剪应力,下面层\过渡层剪应力)。

表 6 响应曲面试验设计方案

Table 6 Response-surface experimental design

No.	A. h_{upper} /cm	B. $h_{transition}$ /cm	C. Modulus ratio	No.	A. h_{upper} /cm	B. $h_{transition}$ /cm	C. Modulus ratio
R1	4	4	6	R10	6	8	2
R2	8	4	6	R11	6	4	10
R3	4	8	6	R12	6	8	10
R4	8	8	6	R13	6	6	6
R5	4	6	2	R14	6	6	6
R6	8	6	2	R15	6	6	6
R7	4	6	10	R16	6	6	6
R8	8	6	10	R17	6	6	6
R9	6	4	2				

表 7 响应曲面试验数据

Table 7 Response surface test data

No.	Upper layer shear stress/MPa	Transition layer shear stress/MPa	Maximum shear stress/MPa	No.	Upper layer shear stress/MPa	Transition layer shear stress/MPa	Maximum shear stress/MPa
1	0.38	0.53	0.53	10	0.40	0.39	0.40
2	0.41	0.41	0.41	11	0.39	0.66	0.66
3	0.35	0.46	0.46	12	0.40	0.57	0.57
4	0.42	0.36	0.42	13	0.39	0.47	0.47
5	0.38	0.36	0.38	14	0.39	0.47	0.47
6	0.42	0.40	0.42	15	0.39	0.47	0.47
7	0.38	0.70	0.70	16	0.39	0.47	0.47
8	0.42	0.53	0.53	17	0.39	0.47	0.47
9	0.38	0.34	0.38				

表 8 对照组路面结构参数与剪应力数据

Table 8 Pavement structure parameters and shear stress data of control group

Total asphalt layer thickness/cm	Upper layer thickness/cm	Lower layer thickness/cm	Upper layer shear stress/MPa	Lower layer shear stress/MPa	Maximum shear stress/MPa
8	4	4	0.41	0.41	0.41
10	4	6	0.42	0.43	0.43
10	6	4	0.42	0.42	0.42
12	4	8	0.42	0.44	0.44
12	6	6	0.44	0.44	0.44
12	8	4	0.44	0.42	0.44
14	6	8	0.44	0.45	0.45
14	8	6	0.45	0.44	0.45
16	8	8	0.45	0.45	0.45

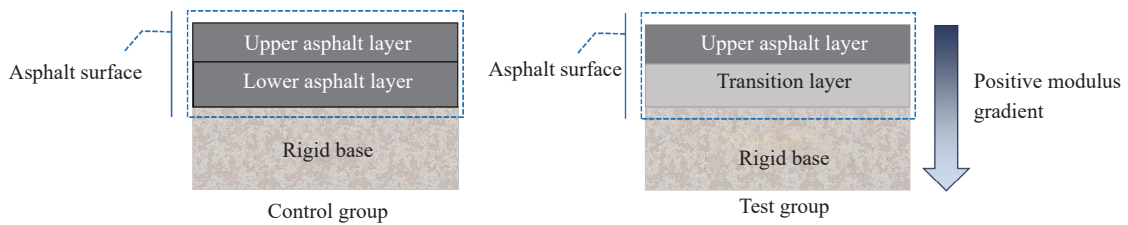


图 21 路面结构示意图

Fig.21 Schematic of pavement structure

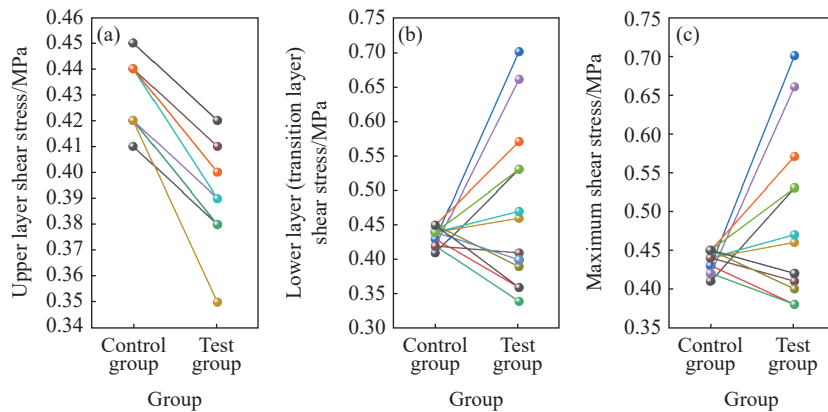


图 22 沥青面层剪应力对比图。(a) 上面层剪应力;(b) 下面层/过渡层剪应力;(c) 最大剪应力

Fig.22 Comparison of shear stress in an asphalt layer: (a) upper layer shear stress, (b) lower layer/transition layer shear stress, and (c) maximum shear stress

由图 22(a)可知, 相同厚度组合下, 试验组沥青上面层的剪应力较不设过渡层的对照组均有不同程度的降低, 8 ~ 16 cm 厚度范围内, 沥青上面层剪应力分别平均降低了 8.0%、10.5%、12.2%、9.4%、7.4%, 证明设置过渡层可以有效降低沥青上面层剪应力水平. 但由图 22(b)、(c)可知, 由于过渡层模量较大, 导致在过渡层内部剪应力在一些结构组合下仍处于较高水平, 最高达到 0.7 MPa, 因此, 仍需进一步分析响应曲面试验数据以寻找

整体受力最佳的复合式路面模量过渡结构.

采用二次模型对最大剪应力数据进行拟合, 拟合公式见式 (18), 方差分析结果见表 9:

$$\tau_{\max} = -0.215419 + 0.013313A + 0.012925B + 0.056975C + 0.004937AB - 0.006756AC - 0.003331BC - 0.001631A^2 - 0.002594B^2 + 0.002639C^2 \quad (18)$$

从表 9 方差分析可以看出, 拟合模型的 F 检验统计量值为 864.16, P 值小于 0.05, 说明模型是显

表 9 方差分析表

Table 9 Table of Analysis of Variance

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	
Model	0.137	9	0.0152	864.16	<0.0001	significant
$A:h_{upper}$	0.0094	1	0.0094	536.02	<0.0001	
$B:h_{transition}$	0.0023	1	0.0023	133.23	<0.0001	
C: Modulus ratio	0.1012	1	0.1012	5747.02	<0.0001	
AB	0.0016	1	0.0016	88.6	<0.0001	
AC	0.0117	1	0.0117	663.58	<0.0001	
BC	0.0028	1	0.0028	161.32	<0.0001	
A^2	0.0002	1	0.0002	10.18	0.0153	
B^2	0.0005	1	0.0005	25.74	0.0014	
C^2	0.0075	1	0.0075	426.3	<0.0001	
Residual	0.0001	7	0			
Lack of fit	0.0001	3	0			
Pure error	0	4	0			
Cor total	0.1371	16				

著的, A 、 B 、 C 、 AB 、 AC 、 BC 、 A^2 、 B^2 、 C^2 均为显著的模型项. 由此可见, 沥青上面层厚度、过渡层厚度, 过渡层与沥青面层模量比及其交互作用均为沥青面层最大剪应力 τ_{max} 显著影响因素. 根据回归模型绘制最大剪应力 τ_{max} 在 AOB 、 AOC 和 BOC 平面的响应曲面图, 直观分析沥青上面层厚度 A 、过渡层厚度 B 和模量比 C 的交互作用对沥青最大剪应力 τ_{max} 的综合影响, 考虑两因素交互作用时, 另一因素均取中间水平, 结果如图 23 所示.

由图 23(a) 可知, 当模量比为 6 时, 沥青上面层厚度越小, 过渡层厚度越大, 面层整体最大剪应力越小. 由图 23(b) 可知, 当过渡层为 6 cm 厚度时, 模量比越大, 沥青层整体剪应力越大, 当模量比接近 10 倍的时候, 沥青上面层厚度越大, 整体剪应力越小. 由图 23(c) 可知, 当上面层厚度为 6 cm 时, 过渡层厚度越大和模量比越小, 沥青面层整体剪应力最

小. 通过上述响应曲面模型, 对路面结构设计进行优化, 以复合式路面沥青层 τ_{max} 最小为优化目标, 可以求得沥青路面在最优化性能条件下所对应的结构参数为: 沥青上面层厚度 4 cm, 过渡层厚度 8 cm, 过渡层模量为沥青层模量 2 倍. 经验算, 此时的沥青上面层剪应力为 0.36 MPa, 过渡层剪应力为 0.35 MPa, 剪应力较不设过渡层的对照组分别降低了 14.3%、20.5%.

在实际工程应用中, 由于上面层材料种类繁多且模量性能差异显著, 过渡层模量指标的具体值需要结合上面层材料的实际模量特性和工程所在地的具体温度场来确定. 以本文研究对象为例: 在最不利工况下, 0 ~ 4 cm 深度(上面层)温度范围为 46.7 ~ 52.4 °C, 对应的动态模量为 2059 ~ 2249 MPa, 则 4 ~ 12 cm 深度(过渡层)的模量目标值应为 4118 ~ 4497 MPa. 因此过渡层材料的动态

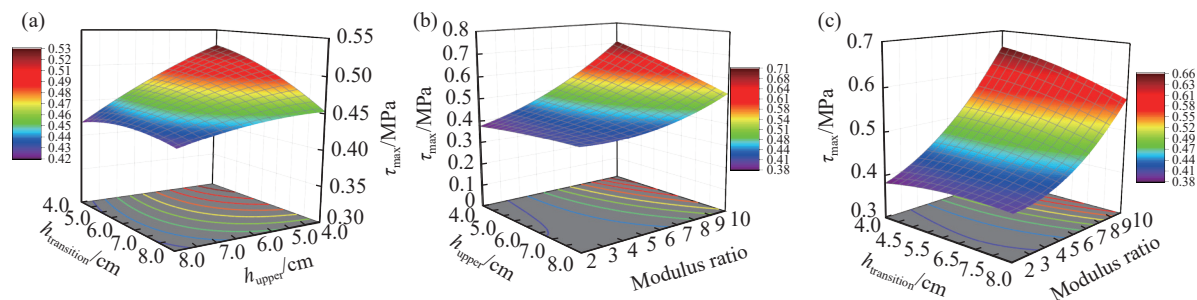


图 23 最大剪应力 τ_{max} 与各影响因素的响应曲面. (a) 沥青上面层厚度-过渡层厚度; (b) 沥青上面层厚度-模量比; (c) 过渡层厚度-模量比

Fig.23 Response surface of τ_{max} and influencing factors: (a) upper layer thickness-transition layer thickness; (b) upper layer thickness-modulus ratio; (c) transition layer thickness-modulus ratio

模量主曲线在 39.3 ~ 46.7 °C 温度区间内应具备 4118 ~ 4497 MPa 的模量水平。

5 结论

本研究通过构建沥青混合料黏弹塑性本构模型,结合沥青层温度场时空演变规律建立模量梯度场,系统开展刚柔复合式路面热力耦合力学行为分析。基于热-力耦合仿真结果,采用响应曲面法优化提出模量梯度协调结构,实现各结构层剪应力降幅。主要结论如下:

(1) 建立了热力耦合的有限元模型并采用实测温度和实测 FWD 弯沉进行验证,实现了沥青路面结构内部温度场和力学行为的准确表征;沥青面层内部存在明显的温度梯度,进而导致沥青层内部存在随时空变化的模量梯度,最大可达 $-120 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

(2) 不同瞬态温度场下,沥青层内部应力偏量第三不变量 J_3 整体以负值为主,即复合式路面沥青层在热力耦合作用下主要产生压缩变形;基层模量、面层厚度及温度梯度等均会影响沥青面层的受力模式,其中基层刚度对沥青面层底部的拉压状态起决定性作用。

(3) 面层和基层的模量差会使得沥青面层剪应力增大,当基层模量为面层模量 2 倍左右时,沥青面层剪应力最小;沿深度方向的正模量梯度有利于降低沥青层剪应力水平,通过在沥青面层下部设置模量过渡层,可以协调刚性基层和沥青面层的模量差异,降低复合式路面沥青层剪应力。

(4) 基于响应曲面模型,以沥青面层最大剪应力最小为优化目标,得到复合式路面模量过渡结构组合为:沥青上面层厚度 4 cm,过渡层厚度 8 cm,过渡层模量为沥青层模量的 2 倍,上面层剪应力与过渡层剪应力较不设过渡层的复合式路面结构对应层位分别降低了 14.3%、20.5%。

(5) 材料设计时要考虑的因素复杂多变,包括级配、沥青、改性剂等影响因素。受限于研究主题与篇幅,论文对过渡层材料具体设计相关内容讨论较少。后续将考虑服役环境温度梯度影响,围绕动态模量主曲线特征,深入开展宽温度域模量协调结构及模量过渡材料研究。

参 考 文 献

- [1] Li S, Yu S Q, Sun Y, et al. A new method for evaluating load transfer capacity of transverse crack of continuously reinforced concrete pavement in service. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2024, 55(2): 742
- (李盛,余时清,孙煜,等.在役连续配筋混凝土路面横向裂缝传荷能力评价新方法. *中南大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(2): 742)
- [2] Li M Q, Zhang F, Feng D C, et al. Dynamic response of steel deck asphalt pavement considering vehicle-bridge coupling effect. *Eng Mech*, 2019, 36(12): 177
- (李梦琪,张锋,冯德成,等.车桥耦合下钢桥面沥青铺装层动力响应研究. *工程力学*, 2019, 36(12): 177)
- [3] Liu Z H, Liu J Y, Huang Y, et al. Experimental study on compressive-shear strength of rigid-flexible composite pavement structure. *J Southeast Univ (Nat Sci Ed)*, 2019, 49(6): 1130
- (刘朝晖,刘靖宇,黄优,等.刚柔复合式路面结构室内压剪强度试验研究. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(6): 1130)
- [4] Huang Y, Liu Z H, Liu J Y, et al. Laboratory study on mechanical properties of composite pavement under partial compression-shear load. *Constr Build Mater*, 2022, 356: 129240
- [5] Lyu S T, Zhao P, Lu W W, et al. Review on long-life-oriented life extension design of existing expressway asphalt pavement. *J Traffic Transp Eng*, 2024, 24(2): 20
- (吕松涛,赵霏,鲁巍巍,等.面向长寿命的既有高速公路沥青路面延寿设计综述. *交通运输工程学报*, 2024, 24(2): 20)
- [6] Ma X Y, Quan W W, Dong Z J. Analytical solution for dynamic response of transversely isotropic viscoelastic asphalt pavement. *China J Highw Transp*, 2020, 33(10): 135
- (马宪永,全蔚闻,董泽蛟.横观各向同性黏弹性沥青路面动力响应解析解. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 135)
- [7] Wang X D, Zhang L, Zhou X Y. Bidirectional fatigue damage analysis of asphalt pavement. *China J Highw Transp*, 2023, 36(5): 21
- (王旭东,张蕾,周兴业.沥青路面的双向疲劳损伤. *中国公路学报*, 2023, 36(5): 21)
- [8] Dong Z J, Quan W W, Ma X Y, et al. Analytical solution and effect analysis of asphalt pavement considering the spatial difference of material parameters. *China J Highw Transp*, 2020, 33(10): 91
- (董泽蛟,全蔚闻,马宪永,等.考虑沥青路面材料参数空间差异性的解析计算及影响分析. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 91)
- [9] Zhang H, Gao P W, Zhang Z X, et al. Experimental study of the performance of a stress-absorbing waterproof layer for use in asphalt pavements on bridge decks. *Constr Build Mater*, 2020, 254: 119290
- [10] Kim S M, Cho Y K, Lee J H. Advanced reinforced concrete pavement: Concept and design. *Constr Build Mater*, 2020, 231: 117130
- [11] Muho E V, Beskou N D. Review on dynamic analysis of road pavements under moving vehicles and plane strain conditions. *J Road Eng*, 2024, 4(1): 54
- [12] Liu L, Li L, Liu Z H, et al. Influence of built-in strain sensor on the mechanical properties of asphalt mixture. *Chin J Eng*, 2025, 47(1): 179

- (柳力, 李理, 刘朝晖, 等. 内置应变传感器对沥青混合料力学性能的影响. *工程科学学报*, 2025, 47(1): 179)
- [13] Sun L J. *Mechanics of behavior of asphalt pavements*. Shanghai: Tongji University Press, 2021
(孙立军. 路面行为力学. 上海: 同济大学出版社, 2021)
- [14] Xu Y L, Fan W, Cheng P F, et al. Mechanical characterisation of interface shear strain of multi-layer composite pavement. *Int J Pavement Eng*, 2021, 22(9): 1116
- [15] Nian T F, Li S W, Li P, et al. Mechanical response of interlayer structural shear performance of asphalt pavement with functional layer considering interlayer contact state. *Case Stud Constr Mater*, 2023, 18: e01934
- [16] Wan C G, Shen A Q, Guo Y C. Shear behavior of leveling layer and asphalt pavement of bridge deck pavement. *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2017, 51(7): 1355
(万晨光, 申爱琴, 郭寅川. 桥面铺装调平层与沥青面层间剪切行为. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(7): 1355)
- [17] Huang Y, Liu J Y, Yang X, et al. Characterization of permanent deformation of asphalt pavement with rigid base. *Constr Build Mater*, 2025, 460: 139808
- [18] Zhang X, Chen E L, Li N P, et al. Micromechanical analysis of the rutting evolution of asphalt pavement under temperature-stress coupling based on the discrete element method. *Constr Build Mater*, 2022, 325: 126800
- [19] Selsal Z, Karakas A S, Sayin B. Effect of pavement thickness on stress distribution in asphalt pavements under traffic loads. *Case Stud Constr Mater*, 2022, 16: e01107
- [20] Ling J M, Ren L, Tian Y, et al. Analysis of airfield composite pavement rutting using full-scale accelerated pavement testing and finite element method. *Constr Build Mater*, 2021, 303: 124528
- [21] Ling J M, Wei F L, Zhao H D, et al. Analysis of airfield composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method. *Constr Build Mater*, 2019, 212: 596
- [22] Liu Z H, Yu S Q, Huang Y, et al. A systematic review of rigid-flexible composite pavement. *J Road Eng*, 2024, 4(2): 203
- [23] Park S W, Schapery R A. A viscoelastic constitutive model for particulate composites with growing damage. *Int J Solids Struct*, 1997, 34(8): 931
- [24] Han D D, Xia X, Liu G Q, et al. Improved parameter acquisition of generalized Maxwell model in asphalt mixtures by continuous relaxation spectrum. *Constr Build Mater*, 2023, 408: 133775
- [25] Chen H, Hoff I, Liu G, et al. Development of finite element model based on indirect tensile test for various asphalt mixtures. *Constr Build Mater*, 2023, 394: 132085
- [26] Huang Y, Liu Z H, et al. A comparative study on dynamic modulus of asphalt concrete with different loading mode. *J Test Eval*, 2020, 48(2): 721
- [27] Huang Y, Liu Z H, Wang X D, et al. Comparison of HMA dynamic modulus between trapezoid beam test and SPT. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2017, 48(11): 3092
(黄优, 刘朝晖, 王旭东, 等. 沥青混合料动态模量梯形梁与 SPT 试验比较研究. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(11): 3092)
- [28] Perzyna P. Fundamental problems in viscoplasticity. *Adv Appl Mech*, 1966, 9: 243
- [29] Gibson N H. A. *Viscoelastoplastic Continuum Damage Model for the Compressive Behavior of Asphalt Concrete* [Dissertation]. College Park: University of Maryland, 2006.
- [30] Qiu A B. Analysis of crack evolution in large-volume concrete based on thermal mechanical coupling finite element method. *Chin J Eng*, 2025, 47(5): 995
(仇安兵. 基于热-力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析. *工程科学学报*, 2025, 47(5): 995)
- [31] Li S, Yu S Q, Zhang H, et al. Research on fatigue propagation of Top-Down cracks on continuously reinforced concrete composite asphalt pavement. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2022, 53(11): 4473
(李盛, 余时清, 张豪, 等. 连续配筋混凝土复合式沥青路面 Top-Down 裂缝疲劳扩展研究. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(11): 4473)
- [32] Meng A X, Xu H N, Fu X G, et al. Dynamic modulus and prediction model of asphalt mixture based on structural natural frequency. *China J Highw Transp*, 2019, 32(2): 31
(孟安鑫, 徐慧宁, 傅锡光, 等. 基于结构固有频率的沥青混合料动态模量及预估模型研究. *中国公路学报*, 2019, 32(2): 31)
- [33] Wang Z R, Zhang Z H. On the physical significance of the third invariant of stress deviator J_3 and the third invariant of stress tensor I_3 and their geometric significance in the space of principal stresses. *J Harbin Inst Technol*, 1982, 14(2): 108
(王仲仁, 张泽华. 论应力偏量及应力张量第三不变量的物理意义及其在主应力空间中的几何意义. *哈尔滨工业大学学报*, 1982, 14(2): 108)
- [34] Zhang M Z, Wang Y M, Wang Z K, et al. Research on the strength evolution law and ratio optimization of expansive backfill based on response surface methodology. *Chin J Eng*, 2024, 46(5): 800
(张敏哲, 王贻明, 王志凯, 等. 基于响应面法的膨胀性充填体强度演化规律及配比优化. *工程科学学报*, 2024, 46(5): 800)