

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202211242024081986

文章编号: 1674-599X(2024)04-0021-11

引用格式: 潘勤学, 张同升, 魏玉峰, 等. 基于双模量理论的不同沥青路面力学分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 21-31.

Citation: PAN Qinxue, ZHANG Tongsheng, WEI Yufeng, et al. Mechanical analysis of typical asphalt pavement based on bi-modulus theory[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 21-31.

基于双模量理论的不同沥青路面力学分析

潘勤学¹, 张同升¹, 魏玉峰⁵, 甄西东², 孙杰², 宋小金³, 蒋宇翔⁴, 姜舜君¹, 胡嘉¹

(1.长沙理工大学 公路养护技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410114; 2.济南城建集团有限公司, 山东 济南 250031; 3.湖南华城检测技术有限公司, 湖南 长沙 410036; 4.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083; 5.济南城建动能转换开发建设集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 为研究考虑拉压模量差异的沥青路面结构力学响应变化规律, 基于双模量理论对5种典型沥青路面结构进行了力学对比分析。研究结果表明: 基于传统线弹性理论与双模量理论计算得到的关键力学响应差距巨大, 用这两种方法计算得到的倒装式沥青路面结构、柔性基层沥青路面结构及刚性基层沥青路面结构的力学响应的最大差距分别达55%、33%及50%; 5种沥青路面结构路表均存在较大的横向拉应变, 建议在路面结构设计时将路表轮隙区纳入拉应变验算点位; 基层刚度与厚度对路面结构层关键力学响应影响显著, 路表水平横向拉应力与拉应变均随着基层刚度及厚度的增大而增大, 基层底部纵向拉应力则随着基层厚度的增大而减小。建议采用双模量理论开展沥青路面结构分析, 且在路面设计时合理控制基层的厚度与刚度可有效优化路面结构的受力。

关键词: 沥青路面; 力学分析; 双模量理论; 力学响应; 数值计算

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Mechanical analysis of typical asphalt pavement based on bi-modulus theory

PAN Qinxue¹, ZHANG Tongsheng¹, WEI Yufeng⁵, ZHEN Xidong², SUN Jie², SONG Xiaojin³,
JIANG Yuxiang⁴, JIANG Shunjun¹, HU Jia¹

(1.National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Ji'nan Urban Construction Group Co., Ltd., Ji'nan 250031, China; 3.Hunan Huacheng Testing Technology Co., Ltd., Changsha 410036, China; 4.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 5.Ji'nan Urban Construction Kinetic Energy Conversion Development and Construction Group Co., Ltd., Ji'nan 250000, China)

Abstract: To study the variation law of mechanical response of asphalt pavement structures considering the difference in tensile and compressive modulus. The mechanical comparative analysis of five typical asphalt pavement structures was based on the bi-modulus theory. The results indicates a significant disparity in the critical mechanical responses calculated using traditional linear elastic theory and the bi-modulus theory. The maximum discrepancies in the mechanical responses of inverted, flexible base, and rigid base asphalt pavement structures, calculated by two different methods, amounted to 55%, 33%, and 50%, respectively. Significant transverse tensile strains were observed on the pavement surface across all five asphalt pavement structures. It is recommended that the wheel gap

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378441, 51908071); 湖南省自然科学基金项目(2024JJ5037); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(202107)

通信作者: 潘勤学(1986—), 男, 副教授, 主要从事路面结构计算与测试等方面的研究工作。E-mail: pqx123456789pqx@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

area on the pavement surface should be considered a critical point for checking tensile strain during pavement design. The stiffness and thickness of the base layer have a significant impact on the critical mechanical response of the pavement structure layer. The horizontal transverse tensile stress and tensile strain of the pavement surface increase with the stiffness and thickness of the base layer, while the longitudinal tensile stress at the bottom of the base layer decreases with increased the base layer thickness. It is recommended that the bi-modulus theory could be used to analyze the asphalt pavement structure, and that reasonable control of the thickness and stiffness of the base layer during pavement design can effectively optimize the stress on the pavement structure.

Key words: asphalt pavement; mechanical analysis; bi-modulus theory; mechanical response; numerical calculation

研究表明大多数工程材料具有拉压模量不同的力学性质^[1-4],导致许多工程结构表现出拉压不同的力学特性^[5-7]。1941年,TIMOSHENKO^[8]针对此种特性首次提出了双模量材料的概念,而苏联学者阿姆巴尔楚米扬^[9]推导了双模量问题的广义弹性定律,于1982年正式发表了关于不同模量弹性理论的专著,由此奠定了双模量理论的基础。1989年,张允真等^[10]在国内首次提出了针对拉压模量差异的有限元方法,此后国内学者以此为基础展开了深入研究,如2000年,刘相斌等^[11]提出了一种加速收敛的算法;2001年,YE等^[12]提出了一种泊松比不变的改进算法;2012年,张洪武等^[13]利用变量变分原理,将双模量问题转化成互补问题进行求解。近年来,张宇鹏^[14]、PAN等^[15]相继提出了基于双模量理论的切线算法。上述研究均有力推动了双模量理论

的快速发展,但其针对的是简单构件及简单受力状态,对大型复杂受力工程结构分析的适用性还有待进一步深入研究。在道路领域,YANG等^[16]测试得到水泥稳定碎石的单轴压缩和直接拉伸模量之比约为1.7~1.8;吕松涛等^[17-18]通过测试得到沥青混合料压缩模量与拉伸模量之比约为1.3~1.6,这些研究均说明道路材料亦存在显著的拉压模量差异。因此,在现行路面设计规范中仍采用单一的压模量作为材料的模量设计参数,将导致路面结构计算结果与路面实际受力情况存在较大差异^[19-21]。本文基于迭代思想建立了主应力空间中剪切模量的计算模型及基于弹性矩阵的补全算法^[22],由此建立了高效的三维双模量结构有限元计算方法,为开展基于双模量理论的路面结构计算奠定了基础。

综上所述,现行双模量问题的数值分析研究基本针对简单工况下的双模量结构,且在道路结构分

析领域亦未开展系统深入的研究。基于此,本文采用作者建立的双模量结构有限元计算方法,开展了基于双模量理论的半刚性基层沥青路面、倒装式沥青路面、柔性基层沥青路面及刚性基层沥青路面等常用的典型沥青路面结构的力学响应分析,对比研究基于传统线弹性理论(采用压模量)以及基于双模量理论(采用拉、压模量)两种计算理论的力学响应之间的异同,以揭示材料拉压模量不同特性对典型沥青路面结构力学响应的影响规律;同时对不同路面结构之间的力学响应变化规律展开对比分析,探究双模量理论下不同路面结构受力性能的优劣,为基于双模量理论的沥青路面设计提供参考。

1 双模量理论数值计算方法

1.1 双模量理论的本构模型

双模量理论与经典线弹性理论的主要区别在于本构方程的不同,对于双模量材料通常采用简化后的双直线应力-应变关系(图1)。受压时材料的力学参数取压模量 E^- 和压泊松比 μ^- ,受拉时取拉模量 E^+ 及拉泊松比 μ^+ 。

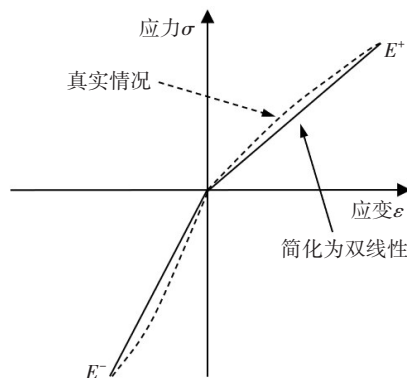


图1 双模量材料应力-应变特性

Fig. 1 Stress-strain characteristics of bi-modulus materials

据此,根据主应力拉压性质的不同建立三维本构方程^[22]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_\beta \\ \varepsilon_\gamma \end{Bmatrix} = A \begin{Bmatrix} \sigma_\alpha \\ \sigma_\beta \\ \sigma_\gamma \end{Bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1/E^\alpha & -\mu^\alpha/E^\beta & -\mu^\alpha/E^\gamma \\ -\mu^\alpha/E^\beta & 1/E^\beta & -\mu^\beta/E^\gamma \\ -\mu^\alpha/E^\gamma & -\mu^\beta/E^\gamma & 1/E^\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \varepsilon_\gamma$ 为主应变; $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma$ 为主应力; A 为柔度矩阵; $\mu^\alpha, \mu^\beta, \mu^\gamma$ 为主应力方向的泊松比; $E^\alpha, E^\beta, E^\gamma$ 为主应力方向的模量。

1.2 有限元计算

传统线弹性理论有限元计算的单元迭代格式为^[10-11]:

$$K^e U^e = F_f^e + F_s^e \quad (2)$$

式中: K^e 为单元刚度矩阵; U^e 为单元节点位移矩阵; F_f^e 为单元体力矩阵; F_s^e 为单元面力矩阵。

$$\bar{L}_e = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & m_1 n_1 & n_1 l_1 & l_1 m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & m_2 n_2 & n_2 l_2 & l_2 m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & m_3 n_3 & n_3 l_3 & l_3 m_3 \\ 2l_1 l_2 & 2m_1 m_2 & 2n_1 n_2 & m_1 n_2 + n_1 m_2 & n_1 l_2 + l_1 n_2 & l_1 m_2 + l_2 m_1 \\ 2l_2 l_3 & 2m_2 m_3 & 2n_2 n_3 & m_2 n_3 + n_2 m_3 & n_2 l_3 + l_2 n_3 & l_2 m_3 + l_3 m_2 \\ 2l_3 l_1 & 2m_3 m_1 & 2n_3 n_1 & m_3 n_1 + n_3 m_1 & n_3 l_1 + l_3 n_1 & l_3 m_1 + l_1 m_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: D_i 为主方向上的弹性矩阵; \bar{L}_e 为转换矩阵; $l_i, m_i, n_i (i=1, 2, 3)$ 为普通坐标系中 x, y, z 轴与主应力坐标系中 α, β, γ 三个主应力方向之间夹角的余弦。

在求解出双模量理论的弹性矩阵 D 之后,将其代入式(7)即可得到双模量理论的有限元整体刚度矩阵 K ,后续步骤与传统线弹性理论的有限元方法相同,这里不再赘述。

$$K = \int_V B^T D B dV \quad (7)$$

式中: B 为应变转换矩阵; V 为单元体的体积。

1.3 数值计算

本文通过有限元迭代算法对结构进行求解计算,迭代格式如下:

$$K_{i-1} u_i = F \quad (8)$$

然后对所有单元的刚度矩阵进行总装得到整体刚度矩阵 K :

$$Ku = F \quad (3)$$

式中: u 为结构所有节点的位移列阵; F 为结构所有节点的外荷载列阵。

传统线弹性理论与双模量理论的本质区别在于本构关系的不同(一个为线弹性,一个为非线性),而由本构关系可推导得到弹性矩阵。因此,双模量理论有限元法与弹性理论有限元法的主要区别在于弹性矩阵 D 的不同,而其他步骤均与传统线弹性理论有限元法相同。双模量理论的弹性矩阵 D 的求解式为:

$$D = \bar{L}_e^T D_i \bar{L}_e \quad (4)$$

其中,

$$D_i = A^{-1} \quad (5)$$

式中: K_{i-1} 为第 $i-1$ 次迭代步的整体刚度矩阵; u_i 为第 i 次迭代的结构节点位移列阵。双模量理论的有限元计算流程如图2所示。

2 路面结构力学分析

2.1 有限元计算模型

依据前文所述的双模量有限元计算方法,通过有限元二次开发平台UMAT编制了双模量本构模型的子程序,并使用ABAQUS软件分别建立了5种不同沥青路面结构的有限元模型。

各路面结构模型的尺寸为 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$,均布静载为 0.7 MPa ,单圆半径 δ 为 10.65 cm ,双圆的圆心间距为 31.95 cm 。所建路面有限元数值结构模型为

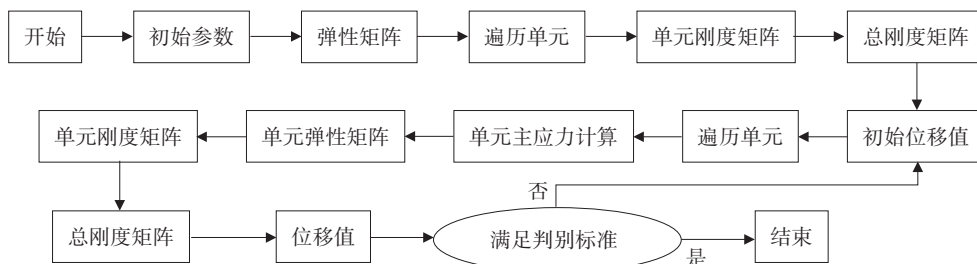


图2 双模量理论有限元计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of finite element method based on bi-modulus theory

弹性层状连续体系下的双圆垂直均布荷载模型,如图3所示。假设路面各结构层的层间是完全连续的,并且是各向同性的,设置模型的边界条件为四周法向位移为0,底部为固定约束。对于路面结构材料力学参数,则根据已有研究进行取值^[23-26]。为简化分析因素,各沥青路面结构的面层取相同的力学参数,见表1~2。在表1~2中,结构1、结构2、结构3、结构5的设计参数依据规范及工程实际选取;对于结构4,采取与半刚性基层相同的基层厚度,旨在研究结构的力学响应与基层刚度及厚度的关系。在基于传统线弹性理论进行计算时,各结构层取压模量和压泊松比;在基于双模量理论进行计算时,分别取拉压模量及拉压泊松比。

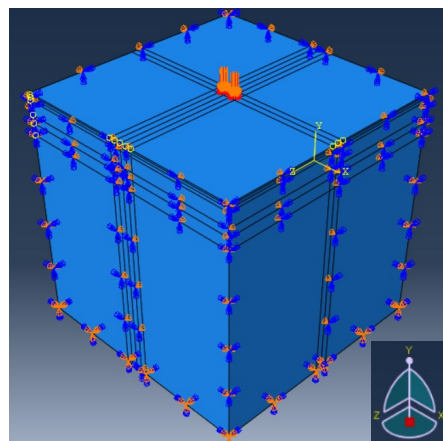


图3 沥青路面结构模型

Fig. 3 Asphalt pavement structure model

表1 沥青路面结构参数

Table 1 Asphalt pavement structure parameters

路面结构	半刚性基层沥青路面 (结构1)		倒装式沥青路面 (结构2)		柔性基层沥青路面 (结构3)		刚性基层沥青路面-1 (结构4)		刚性基层沥青路面-2 (结构5)	
	材料	厚度/cm	材料	厚度/cm	材料	厚度/cm	材料	厚度/cm	材料	厚度/cm
上面层	AC-13	4	AC-13	4	AC-13	4	AC-13	4	AC-13	4
中面层	AC-20	6	AC-20	6	AC-20	6	AC-20	6	AC-20	6
下面层	AC-25	8	AC-25	8	AC-25	8	AC-25	8	AC-25	8
基层	水稳碎石	36	级配碎石	20	ATB-30	20	贫混凝土	36	贫混凝土	20
底基层	级配碎石	20	水稳碎石	36	级配碎石	20	级配碎石	20	级配碎石	20
垫层	未筛分碎石	30	未筛分碎石	30	未筛分碎石	30	未筛分碎石	30	未筛分碎石	30
总厚度		104		104		88		104		88

表2 沥青路面材料力学参数

Table 2 Asphalt pavement material mechanical parameters

路面结构	刚性基层沥青路面				半刚性基层沥青路面			
	拉模量/MPa	拉泊松比	压模量/MPa	压泊松比	拉模量/MPa	拉泊松比	压模量/MPa	压泊松比
上面层	1 000	0.200	1 500	0.300	1 000	0.200	1 500	0.300
中面层	1 000	0.200	1 500	0.300	1 000	0.200	1 500	0.300
下面层	1 000	0.200	1 500	0.300	1 000	0.200	1 500	0.300
基层	16 000	0.120	24 000	0.180	10 000	0.150	15 000	0.225
底基层	40	0.035	400	0.350	40	0.035	400	0.350
垫层	20	0.035	200	0.350	20	0.035	200	0.350
土基	8	0.040	80	0.400	8	0.040	80	0.400

路面结构	倒装式沥青路面				柔性基层沥青路面			
	拉模量/MPa	拉泊松比	压模量/MPa	压泊松比	拉模量/MPa	拉泊松比	压模量/MPa	压泊松比
上面层	1 000	0.200	1 500	0.300	1 000	0.200	1 500	0.300
中面层	1 000	0.200	1 500	0.300	1 000	0.200	1 500	0.300
下面层	1 000	0.200	1 500	0.300	1 000	0.200	1 500	0.300
基层	40	0.035	400	0.350	1 000	0.200	1 500	0.300
底基层	10 000	0.150	15 000	0.225	40	0.035	400	0.350
垫层	20	0.035	200	0.350	20	0.035	200	0.350
土基	8	0.040	80	0.400	8	0.040	80	0.400

本文分析的关键点位如图4所示,图中A为轮载中心,B为轮载边缘点,D为轮隙中心,C为BD的中点,线OO'为过轮载中心和轮隙中心且垂直于行车方向的横向线。本文重点对特征点位的力学响应进行对比分析。

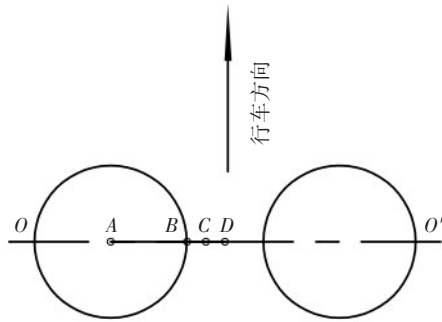


图4 特征点位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of characteristic points

2.2 基于两种理论的力学响应对比分析

1) 半刚性基层沥青路面。

已有研究表明,沥青路面的轮载中心与轮隙中心分别为其结构力学响应的最大值和最小值点位^[27]。因此,本文选择A点(轮载中心)与D点(轮隙中心)来分析力学响应随路面深度的变化规律。基于传统线弹性理论与双模量理论得到的半刚性基层沥青路面的路表横向应力与基层底纵向应力随路面深度的变化规律如表3及图5所示。

表3 半刚性基层沥青路面水平应力计算结果

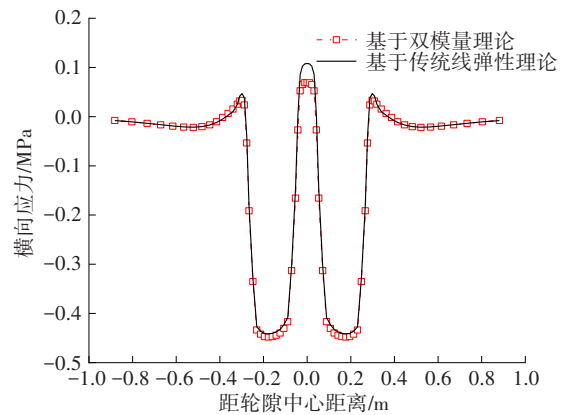
Table 3 Calculation results on horizontal stress of semi-rigid base asphalt pavement

点位及变量		横向应力/MPa		纵向应力/MPa	
		路表	基层底	路表	基层底
轮隙中心	S_{bi}	0.069	0.198	-0.112	0.224
	S_e	0.108	0.255	-0.096	0.281
轮载中心	S_{bi}	-0.441	0.180	-0.453	0.213
	S_e	-0.447	0.233	-0.446	0.263

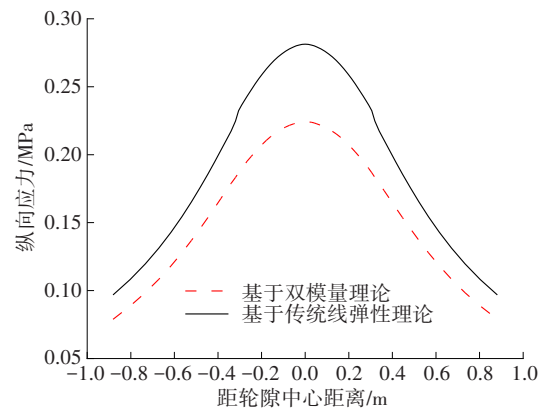
注: S_{bi} 为基于双模量理论的计算值; S_e 为基于传统线弹性理论的计算值;路表的深度为0.00 m;基层底的深度为0.54 m。

由图5(a)和表3可知,在路表轮隙中心,基于传统线弹性理论的横向应力计算值约为基于双模量理论计算值的1.5倍;由图5(b)可知,对于基层底纵向应力,基于传统线弹性理论的计算值约为基于双模量理论计算值的1.3倍。由此可见,基于传统线弹性理论计算得到的力学响应偏保守。由表3还可知,基层底的最大纵向应力大于其最大横向应力,

由此可知对于半刚性基层沥青路面,纵向应力为基层设计时需要考虑的关键力学响应。



(a) 路表横向应力



(b) 基层底纵向应力

图5 半刚性基层沥青路面水平应力

Fig. 5 Horizontal stress of semi-rigid base asphalt pavement

2) 倒装式沥青路面。

基于传统线弹性理论与双模量理论得到的倒装式沥青路面面层横向应力与基层底纵向应力随路面深度的变化规律如表4及图6所示。

由图6(a)和表4可知,对于倒装式沥青路面结构的横向应力,在面层底轮载中心处基于传统线弹性理论的计算值约为基于双模量理论计算值的1.5倍,所以基于传统线弹性理论计算得到的力学响应偏保守。此外,面层底轮载中心处存在较大的横向应力,易使面层底部开裂,应引起足够重视。

由图6(b)可知,对于基层底的纵向应力,基于传统线弹性理论的计算值约为基于双模量理论计算值的1.3倍。因此,基于传统线弹性理论计算得到的基层底纵向应力偏大,亦偏保守。由表4还可知,基层底的最大纵向应力大于其最大横向应力。因此,对于倒装式沥青路面,纵向应力为基层分析时需要考虑的关键力学响应。

表4 倒装式沥青路面水平应力计算结果

Table 4 Calculation results on horizontal stress of inverted asphalt pavement

点位及变量		横向应力/MPa		纵向应力/MPa	
		面层底	基层底	面层底	基层底
轮隙中心	S_{bi}	-0.040	0.166	0.121	0.176
	S_c	-0.018	0.214	0.163	0.225
轮载中心	S_{bi}	0.077	0.154	0.133	0.169
	S_c	0.119	0.198	0.189	0.217

注:面层底的深度为0.18 m;基层底的深度为0.74 m。

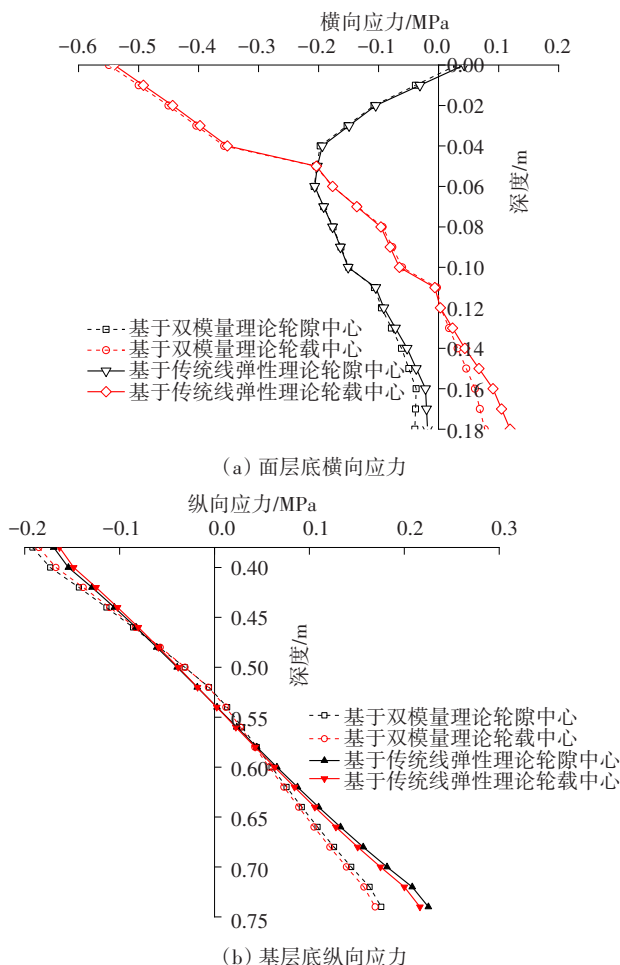


图6 倒装式沥青路面水平应力

Fig. 6 Horizontal stress of inverted asphalt pavement

3) 柔性基层沥青路面。

柔性基层沥青路面横向应变随路面深度变化规律的对比如图7(a)所示;选取图4中的 OO' 线作为路径,柔性基层沥青路面基层底纵向应变随路面深度变化规律的对比如图7(b)所示。基层底水平应力的计算结果见表5。

由图7(a)可知,柔性基层沥青路面的横向应变随深度由压变拉,其中,在中面层底及基层底相对

最大。因此,在路面设计时应应对这两处的应变进行验算。由图7(b)可知,基于双模量理论计算得到的基层底最大纵向应变约为基于传统线弹性理论计算值的1.3倍。由此可见,基于传统线弹性理论计算得到的基层底水平应变偏不安全。由表5及图7还可知,基层底纵向应变及应力分别大于其横向应变与应力,所以柔性基层沥青路面设计的关键响应为基层底纵向应变与纵向应力。

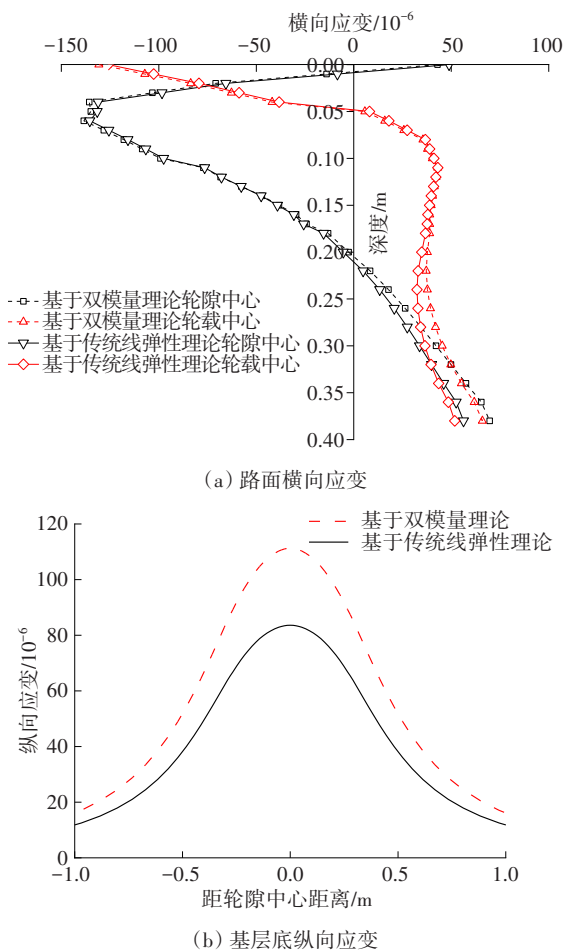


图7 柔性基层沥青路面水平应变

Fig. 7 Horizontal strain of flexible base asphalt pavement

表5 柔性基层沥青路面水平应力计算结果

Table 5 Calculation results on horizontal stress of flexible base asphalt pavement

点位及变量		横向应力/MPa	纵向应力/MPa
		基层底(0.38 m深度处)	基层底(0.38 m深度处)
轮隙中心	S_{bi}	0.081	0.115
	S_c	0.077	0.104
轮载中心	S_{bi}	0.076	0.107
	S_c	0.071	0.096

4) 刚性基层沥青路面。

选取图4中的 OO' 线作为路径,对比分析表1中

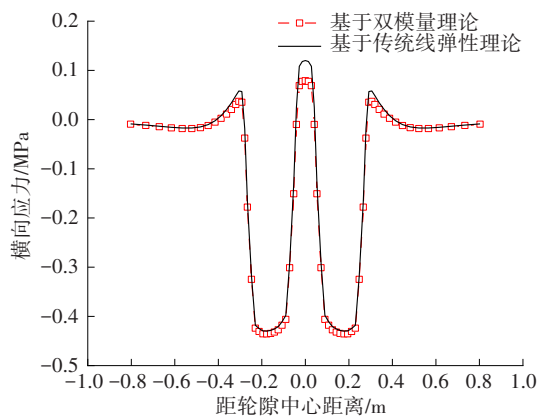
刚性基层沥青路面结构-1的路表横向应力及基层底纵向应力,结果如表6及图8所示。

表6 刚性基层沥青路面水平应力计算结果

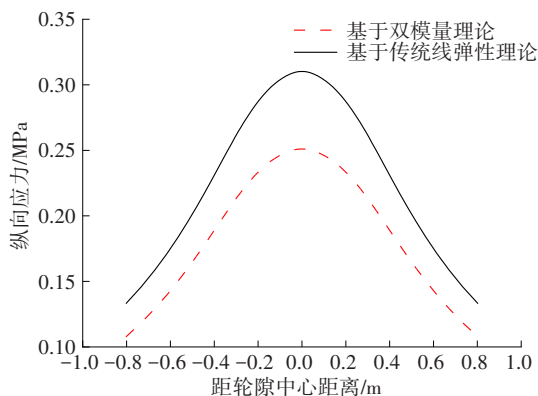
Table 6 Calculation results on horizontal stress of rigid base asphalt pavement

点位及变量		横向应力/MPa		纵向应力/MPa	
		路表	基层底	路表	基层底
轮隙中心	S_{hi}	0.079	0.222	-0.097	0.251
	S_c	0.120	0.280	-0.081	0.310
轮载中心	S_{hi}	-0.435	0.203	-0.438	0.239
	S_c	-0.429	0.257	-0.432	0.295

注:路表的深度为0.00 m;基层底的深度为0.54 m。



(a) 路表横向应力



(b) 基层底纵向应力

图8 刚性基层沥青路面水平应力

Fig. 8 Horizontal stress of rigid base asphalt pavement

由图8(a)可知,在轮隙中心,基于传统线弹性理论计算得到的路表横向应力约为基于双模量理论计算值的1.5倍;由图8(b)可知,对于基层底的纵向应力,基于传统线弹性理论的计算值约为基于双模量理论计算值的1.2倍。由此可见,基于传统线弹性理论计算得到的路表横向应力及基层底纵向

应力偏大,这会使路表与基层底的性能被低估。由表6还可知,刚性基层沥青路面基层底的关键力学响应亦为纵向应力。

基于上述分析可知,对于不同沥青路面结构,基于传统线弹性理论与双模量理论计算得到的力学响应均存在显著差异;基层底的纵向应力为各路面结构基层设计与分析的关键力学响应;对于柔性基层沥青路面,基层底的纵向应变同样为其关键力学响应。

2.3 不同沥青路面结构力学响应对比分析

对基于双模量理论计算得到的5种沥青路面结构的力学响应展开对比分析。选取图4中的A(轮载中心)、D(轮隙中心)两个点位来分析随路面深度变化的力学响应;选取图4中的 OO' 线作为路径进行路表与基层底力学响应的分析。

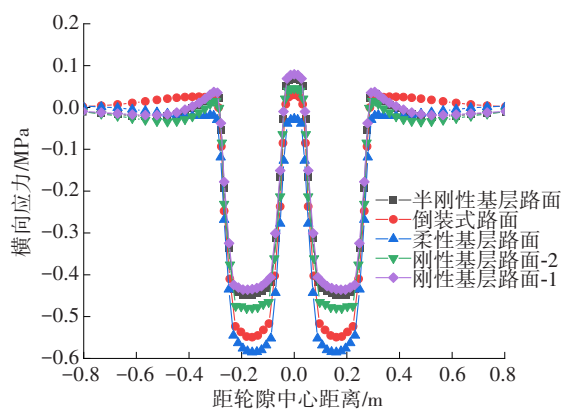
1) 水平应力。

5种沥青路面结构的路表横向应力与基层底纵向应力变化规律如图9所示。

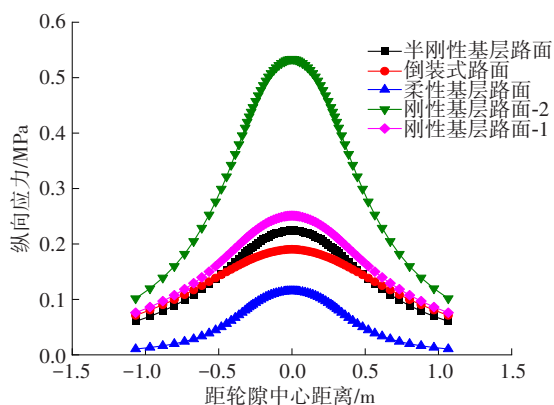
由图9可知,各路面结构路表横向应力及基层底纵向应力的变化规律基本一致,路表横向应力与基层底纵向应力的最大值均位于轮隙中心,基层底纵向应力的大小随着距轮隙中心距离的增加而减小。在关键点位不同沥青路面结构的水平应力值有较大差异。刚性基层沥青路面-1的路表应力最大值比半刚性基层沥青路面与倒装式沥青路面的分别大了15%与160%,柔性基层沥青路面面层基本为压应力;刚性基层沥青路面-1的基层底纵向应力最大值比半刚性基层沥青路面、倒装式沥青路面与柔性基层沥青路面的分别大了11%、30%、120%。对比表1中前4种沥青路面结构的力学响应后发现,路表与基层底的纵向拉应力随着基层刚度的减小而减小。由此可见,增强基层刚度并不能有效降低路面结构的水平应力响应,但减小基层刚度能有效降低路表横向拉应力与基层底的纵向拉应力。

对比刚性基层沥青路面-1与刚性基层沥青路面-2的应力响应后可知,刚性基层沥青路面-1的路表横向拉应力最大值约为刚性基层沥青路面-2路表的1.8倍,而其基层底纵向拉应力最大值约为刚性基层沥青路面-2基层底的50%。因此,减小基层厚度可以有效减小路表的横向拉应力,从而减少面层由横向拉应力过大导致的病害。但减小基层厚度会使基层纵向拉应力增大,相较于面层横向拉应

力,基层纵向拉应力随厚度变化而产生的影响更加显著。因此,在路面设计时,需要合理控制基层厚度以平衡或优化路面结构层的受力。



(a) 路表横向应力



(b) 基层底纵向应力

图9 不同沥青路面结构的水平应力对比

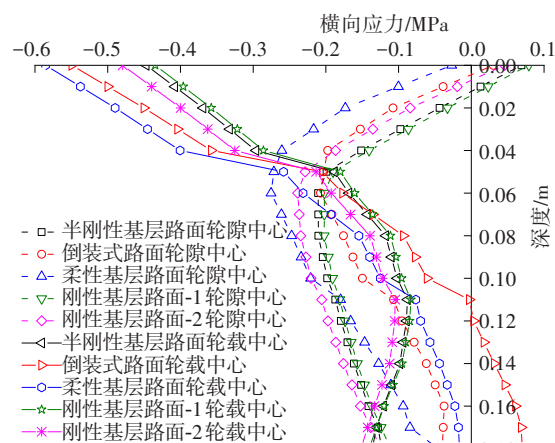
Fig. 9 Comparison of horizontal stress of different asphalt pavement structures

面层底横向应力随路面深度的变化规律的对比如图10(a)所示。由上述分析可知,水平纵向应力为基层设计的关键力学响应,因此,本节选取基层底的纵向应力进行对比,如图10(b)所示。

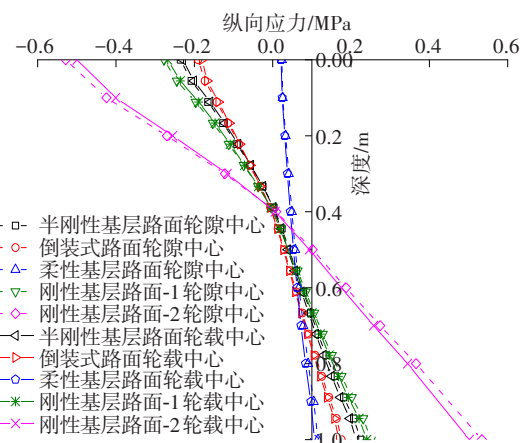
由图10(a)可知,柔性基层及倒装式沥青路面的面层底均受横向压应力;由图10(b)可知,柔性基层沥青路面基层底纵向拉应力最小;刚性基层沥青路面基层底纵向拉应力与压应力均比其他3种沥青路面结构的大,且基层底应力值随着基层刚度的减小而减小。因此,在实际工程中应严格控制沥青路面基层的刚度,在满足规范要求的基础上,可适当取偏低值,这样可有效改善路面的受力状况。

2) 横向应变。

由上述分析可知,各沥青路面结构的路表都存在较大的横向拉应变,故对5种沥青路面结构的横向应变开展进一步对比分析,如图11所示。



(a) 面层底横向应力



(b) 基层底纵向应力

图10 不同沥青路面结构沿深度方向应力对比

Fig. 10 Stress comparison of different asphalt pavement structures along depth direction

由图11(a)可知,刚性基层沥青路面-1路表轮隙区域横向拉应变比半刚性基层沥青路面、倒装式沥青路面及柔性基层沥青路面的分别大了6%、28%、150%。对比表1中前4种沥青路面结构可以看出,横向拉应变随基层刚度的减小而减小,柔性基层沥青路面路表的横向拉应变最小。刚性基层沥青路面-1的路表横向拉应变最大值约为刚性基层沥青路面-2的1.4倍,说明减小基层厚度能有效降低面层的横向拉应变。

由图11(b)可知,柔性基层沥青路面的面层所受横向拉应变最小;倒装式沥青路面横向拉应变的最不利位置为面层底部轮载中心,计算时应重点验算该点位的应变响应。此外,5种沥青路面结构的路表均存在较大的横向拉应变,且除倒装式沥青路面外,其他4种沥青路面结构横向拉应变的最不利位置均为路表轮隙中心。因此,建议在设计时重点对以上两处关键点位开展验算与分析。

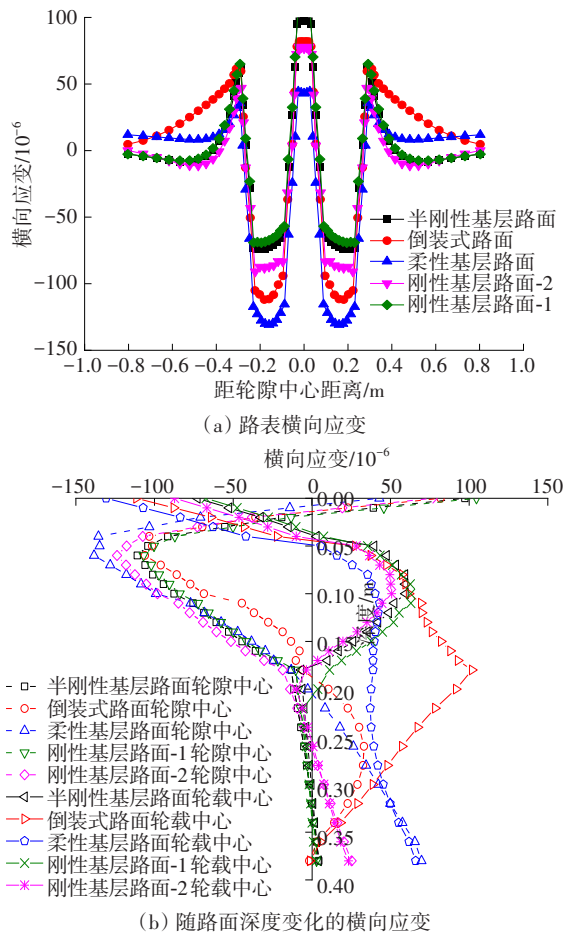


图11 不同沥青路面结构水平应变对比

Fig. 11 Comparison of horizontal strain of different asphalt pavement structures

3) 竖向应力。

5种沥青路面结构的竖向应力随深度的变化规律如图12所示。由图12可知,竖向应力在面层上部最大,并由上面层向下逐渐减小;倒装式沥青路

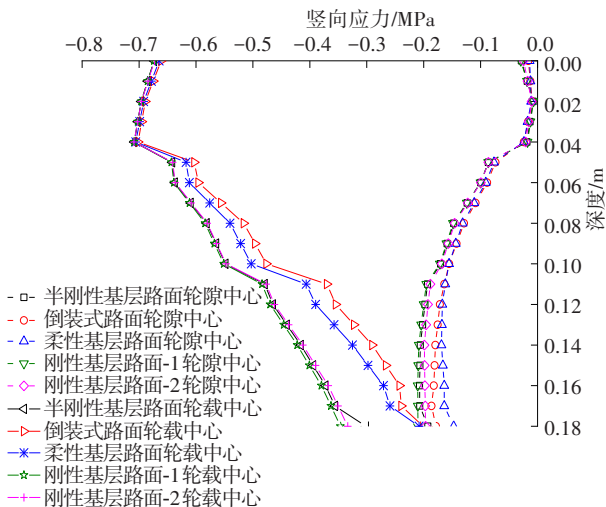


图12 不同沥青路面结构竖向应力对比

Fig. 12 Comparison of vertical stress on different asphalt pavement structures

面结构的竖向应力最小,其下面层层底的竖向应力约比半刚性基层路面的小50%。众所周知,竖向应力过大会使路面产生较大的永久变形。因此,从本文计算结果可知,在半刚性基层顶部加铺碎石层可有效降低面层的竖向应力,从而减小竖向变形以达到减少车辙等路面病害的目的。根据现行规范及实际工程,推荐碎石层厚度为20 cm。

3 结论

1) 基于双模量理论与传统线弹性理论计算得到的路面力学响应差距较大。用这两种方法计算得到的倒装式沥青路面结构、柔性基层沥青路面结构及刚性基层沥青路面结构关键点位力学响应的最大差距分别达55%、33%和50%。因此,以现行方法计算得到的路面结构力学响应与真实路面的受力偏差巨大。

2) 各典型沥青路面结构的路表均存在较大的横向拉应变,且除倒装式沥青路面结构外,其他4种沥青路面结构横向拉应变的最不利位置均为路表轮隙中心,建议将路表轮隙中心纳为结构设计时横向拉应变的验算点位。

3) 路表水平横向拉应力与拉应变、基层底部纵向拉应力均随基层刚度的增大而增大;路表横向拉应力及拉应变均随基层厚度的减小而减小;基层底部纵向拉应力随基层厚度的减小而增大。因此,在满足规范基本要求的基础上,合理减小基层厚度与刚度可有效优化面层受力。

4) 相较于半刚性基层沥青路面结构,倒装式沥青路面结构路表的横向拉应力小了约130%,面层底竖向应力小了约50%,基层底纵向拉应力小了约30%,表明在半刚性基层顶部加铺碎石层可有效改善半刚性基层沥青路面结构的受力状况。

本文未考虑沥青混合料的黏弹塑性,仅分析了静载下沥青混合料的弹性力学响应。此外,也未深入研究面层、基层、碎石层与土基的结构层厚度及力学参数变化对路面结构力学响应的影响规律,后续将对此展开研究。

参考文献(References):

- [1] VIJAYAKUMAR K, RAO K P. Stress-strain relations for composites with different stiffnesses in tension and compression [J]. Computational Mechanics, 1987, 2 (3): 167-175. DOI: 10.1007/BF00571022.

- [2] BERT C W. Models for fibrous composites with different properties in tension and compression [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(4): 344-349.
- [3] DU Z L, ZHANG Y P, ZHANG W S, et al. A new computational framework for materials with different mechanical responses in tension and compression and its applications [J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 100: 54-73.
- [4] DU Z L, GUO X. Variational principles and the related bounding theorems for bi-modulus materials [J]. Journal of Mechanics Physics of Solids, 2014, 73: 183-211. DOI: 10.1016/j.jmps.2014.08.006.
- [5] DU Z L, ZHANG W S, ZHANG Y P, et al. Structural topology optimization involving bi-modulus materials with asymmetric properties in tension and compression [J]. Computational Mechanics, 2019, 63(2): 335-363. DOI: 10.1007/s00466-018-1597-2.
- [6] 张良飞, 姚文娟. 拉压不同模量矩形板的双向弯曲问题 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 128-137. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2861.2015.02.003. ZHANG Liangfei, YAO Wenjuan. Biaxial bending of rectangular plates with different modulus [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2017, 23(1): 128-137. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2861.2015.02.003.
- [7] 何晓婷, 陈山林, 孙俊贻. 不同模量简支梁均布荷载下的弹性力学解 [J]. 工程力学, 2007, 24(10): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2007.10.010. HE Xiaoting, CHEN Shanlin, SUN Junyi. Elasticity solution of simple beams with different modulus under uniformly distributed load [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 51-56. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2007.10.010.
- [8] TIMOSHENKO S. Strength of materials, Part II: advanced theory and problems [M]. 2nd ed. Princeton: Van Nostrand, 1941: 396-405.
- [9] 阿姆巴尔楚米扬 S A. 不同模量弹性理论 [M]. 郭瑞锋, 张允真, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1986. Амбарцумян S A. Theory of elasticity with different moduli [M]. Translated by WU Ruifeng, ZHANG Yunzhen. Beijing: China Railway Publishing House, 1986.
- [10] 张允真, 王志锋. 不同拉、压模量弹性力学问题的有限元法 [J]. 计算结构力学及其应用, 1989, 6(1): 236-246. ZHANG Yunzhen, WANG Zhifeng. The finite element method for elasticity with different moduli in tension and compression [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1989, 6(1): 236-246.
- [11] 刘相斌, 张允真. 拉压不同模量有限元法剪切弹性模量及加速收敛 [J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(5): 526-530. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8608.2000.05.007. LIU Xiangbin, ZHANG Yunzhen. Modulus of elasticity in shear and accelerate convergence of different extension compression elastic modulus finite element method [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(5): 526-530. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8608.2000.05.007.
- [12] YE Z M, YU H R, YAO W J. A new elasticity and finite element formulation for different Young's modulus when tension and compression loadings [J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2001, 5(2): 89-92. DOI: 10.1007/s11741-001-0001-0.
- [13] 张洪武, 张亮, 高强. 拉压不同模量材料的参变量变分原理和有限元方法 [J]. 工程力学, 2012, 29(8): 22-27, 38. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.11.0833. ZHANG Hongwu, ZHANG Liang, GAO Qiang. The parametric variational principle and finite element method for material with different modulus in tension and compression [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 22-27, 38. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2010.11.0833.
- [14] 张宇鹏. 拉压不同模量材料的高性能算法开发及应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016. ZHANG Yupeng. High performance algorithm development for materials with different moduli in tension and compression and its applications [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [15] PAN Q X, ZHENG J L, WEN P H. Efficient algorithm for 3D bimodulus structures [J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(1): 143-159. DOI: 10.1007/s10409-019-00909-3.
- [16] YANG Y, ZHENG J L, LYU S T. Research on differences and correlation between tensile, compression and flexural moduli of cement stabilized macadam [J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2017, 11(41): 339-349.
- [17] 吕松涛, 李亦鹏, 刘超超, 等. 基于劈裂试验的沥青混合料拉压模量同步测试方法 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 1-7, 16. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.001. LYU Songtao, LI Yipeng, LIU Chaochao, et al. Synchronous testing method for tensile and compressive moduli of asphalt mixture based on splitting test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 1-7, 16. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.001.
- [18] LYU S T, LIU C C, YAO H, et al. Comparisons of synchronous measurement methods on various moduli of asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 1035-1045. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.193.
- [19] 郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 1-7. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.01.001. ZHENG Jianlong. New structure design of durable

- asphalt pavement based on life increment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 1-7. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2014.01.001.
- [20] 潘勤学, 郑健龙, 杨博, 等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面行车工况下力学响应研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 125-132. DOI: 10.15951/j. tmgcxb. 2017.04.015.
- PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, YANG Bo, et al. Mechanical response of asphalt pavement under driving conditions by fiber Bragg grating optical sensing technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 125-132. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.04.015.
- [21] 潘勤学, 郑健龙, 杨博, 等. 沥青路面蠕变响应现场预估方法与试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 10-17. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.09.002.
- PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, YANG Bo, et al. Field prediction method and experiment on creep response of asphalt pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 10-17. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.09.002.
- [22] 潘勤学, 郑健龙, 文丕华. 不同模量理论广义弹性定律的深入研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 93-100. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2019.01.010.
- PAN Qinxue, ZHENG Jianlong, WEN Pihua. Theoretical study on generalized elastic laws of elastic theory with different modulus [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(1): 93-100. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2019.01.010.
- [23] 侯曙光, 桑辰, 黄晓明. 多年冻土地区沥青路面结构响应分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2006, 28(6): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2006.06.011.
- HOU Shuguang, SANG Chen, HUANG Xiaoming. Analysis of asphalt pavement structure response in permafrost region [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2006, 28(6): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7627.2006.06.011.
- [24] 潘勤学, 查旭东, 杨博. 岩质路堑边坡柔性支护系统防护性能分析[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 19-22. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2014.05.081.
- PAN Qinxue, ZHA Xudong, YANG Bo. Protective performance analysis of flexible support system for rock cutting slope [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 19-22. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579. 2014.05.081.
- [25] 唐利民, 肖约, 谢佳伟. 沥青混合料抗压回弹模量测量不确定度的评定[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 7-14. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9331.2020.03.002.
- TANG Limin, XIAO Yue, XIE Jiawei. Evaluation and analysis of measurement uncertainty of compression rebound modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 7-14. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.03.002.
- [26] 王峰. 大厚度水泥稳定碎石基层施工技术研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(2): 20-24, 32. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.004.
- WANG Feng. Research on construction technology of large-thickness cement-stabilized macadam base [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(2): 20-24, 32. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.02.004.
- [27] PAN Q X, ZHENG C C, LYU S T, et al. Field measurement of strain response for typical asphalt pavement [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 618-632. DOI: 10.1007/s11771-021-4626-9.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:陈成)