

考虑拉压模量不同的沥青路面力学计算方法与分析

潘勤学^{1,2} 郑健龙^{1,2}

(1. 长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙), 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南长沙 410004)

摘要: 现行沥青路面设计理论为传统的线弹性理论, 设计时采用抗压回弹模量作为材料刚度参数, 并未充分考虑道路材料拉压模量具有显著差异的特点。为此, 文章将双模量理论(即拉压模量不同弹性理论)引入到路面力学分析中, 基于迭代思想建立考虑材料拉压模量不同的沥青路面结构数值计算方法, 且利用 ABAQUS 二次开发平台 UMAT 编制计算子程序, 对典型沥青路面结构进行力学分析。结果表明: 路面关键点位的力学响应, 基于双模量理论与传统线弹性理论的计算结果之间的偏差高达 30%~50%, 应引起高度重视; 沥青路面表面存在着较大的拉应力和拉应变, 应为沥青路面破坏源之一, 建议将沥青面层的设计点位从层底移至路表轮隙区; 应用双模量理论对路面结构进行力学分析可有效地解决道路材料弹性模量的不唯一性问题。

关键词: 道路工程; 路面力学计算方法; 双模量理论; 有限元方法; 二次开发

中图分类号: U416.217 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)01-0110-08

Mechanical calculation method and analysis of asphalt pavement considering different modulus in tension and compression

Pan Qinxue^{1,2} Zheng Jianlong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of the Ministry of Transport (Changsha), Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The current design theory of asphalt pavement is the traditional linear elastic theory, in which the compressive resilient modulus is used as the stiffness parameter of materials in the design without considering the different characteristics of road materials in tension and compression. Therefore, the bimodulus theory (i. e. the elastic theory with different modulus in tension and compression) was introduced into pavement mechanical analysis in this study. Based on the idea of iteration, the numerical calculation method of asphalt pavement structure with different modulus in tension and compression is established, and the subroutine was compiled by using secondary development platform UMAT of ABAQUS. Mechanical analysis of typical asphalt pavement structure was carried out, and the results show that the deviations in the calculation results of the mechanical response of critical points based on bimodulus theory and the traditional linear elastic theory are as high as 30%~50%, which deserves great attention. There are large tensile stress and tensile strain on the surface of asphalt pavement, which could be one of the causes of asphalt pavement damage. It is suggested to shift the design point of asphalt surface course from its bottom to the wheel gap region of pavement surface. The non-uniqueness of elastic modulus of road material can be effectively solved by applying bimodulus theory to the pavement structural analysis.

Keywords: road engineering; pavement mechanical calculation method; bimodulus theory; finite element method; secondary development;

E-mail: pqx123456789pqx@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51908071, 51708071)、湖南省教育厅科学研究项目(18C0194)和道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙)开放基金(kj190301)

作者简介: 潘勤学, 博士, 讲师

收稿日期: 2018-11-27

引 言

大量研究^[1-5]表明许多材料的模量呈现拉伸模量与压缩模量不等的性质, 导致其工程结构的力学响应亦存在明显的拉压不同特性^[6-9], 这些材料统称为

双模量材料。Ambartsumyan 较为系统地研究了此类材料的二维及三维受力问题，并于 1982 年编著了第一部关于双模量材料分析的著作，由此奠定了双模量理论研究的基础^[10-11]。就道路工程而言，几乎绝大部分的路用材料也具有类似的性质，几种典型的路用材料拉压模量如表 1 所示^[12-14]。

表 1 典型路用混合料拉压模量
Table 1 Tensile and compressive modulus of typical road mixture

试件编号	(MPa)			
	水泥稳定碎石 (4.5%水泥的悬浮密实型)		沥青混合料 (AC-13)	
	抗拉模量	抗压模量	抗拉模量	抗压模量
1	8521	13061	1175	2538
2	8071	16991	1260	2485
3	7255	14272	1505	2798
4	7941	13942	1210	2319
5	8033	14834	1223	2705
平均值	7964	14620	1275	2569

由表 1 可知，沥青混合料和水泥稳定碎石的拉压模量相差较大，压缩模量约为拉伸模量的 1.5~2 倍，尤其是道路结构下部的垫层和路基，一般是由松散的不同粒径大小的碎石混合料及土铺筑压实而成，其抗拉能力几乎可以忽略，即表现出抗压模量远大于抗拉模量的情形。究其原因，道路材料的抗拉与抗压特性具有明显的差异性，是由道路材料的混合料特征和压力成形特征决定的，因此路用材料拉压模量的不同具有必然性；这将导致进行路面力学分析时，选择的弹性模量不唯一的问题，从而使力学响应的计算结果亦不唯一；因此无论选用拉伸模量还是压缩模量作为材料刚度参数，都将给路面结构力学响应分析结果带来较大的偏差，而应用双模量理论进行路面结构力学响应分析符合材料的真实力学性质，可有效地解决道路材料弹性模量的不唯一性问题。

同时，就路面力学计算方法而言，现行路面结构设计理论为弹性层状体系理论，并未充分考虑路用材料的拉压模量不同特性，仍采用较大的压模量作为计算参数来进行路面力学分析，导致其计算结果存在较大误差或高估设计路面的性能^[15-17]，使沥青路面设计理论设定的路面破坏模式与实际路面破坏特征不一致，从而导致路面设计中的设计标准难以起到控制作用。

因此，本文将双模量理论引入至沥青路面力学计算中，根据路面结构中各点受力拉压的不同赋予

相应的拉伸模量或压缩模量，建立符合路用材料拉压不同特性及实际路面受力性质的力学计算方法，将有利于获得路面的真实应力应变状态，提高计算的精准度；同时对路面基于两种弹性理论的力学响应计算结果进行对比分析，以研究材料的拉压模量不同特性给路面结构力学响应带来的影响。

1 双模量理论的基本特征

1.1 双模量理论的基本假定

双模量理论的研究对象是固体和连续体，Ambartsumyan 指出：对于不同弹性模量的大部分材料，应力与应变的关系曲线可用两条直线来表示，用这种分段直线函数来表示的简化本构关系(如图 1 所示)，具有足够的精度，完全满足工程应用的要求。

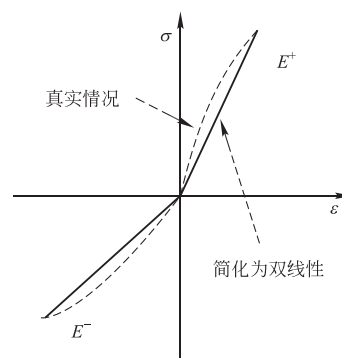


图 1 双模量材料应力应变特性

Fig. 1 Stress-strain characteristics of bimodulus materials

双模量理论基本假设：

(1) 连续匀质各向同性假设。其中各向同性是指材料在各方向弹性性质相同，但是根据所受主应力符号的不同而表现不同的弹性性质。

(2) 小变形假设；只考虑结构变形的线性部分。

(3) 各点的计算弹性参数根据主应力符号的不同，分别赋予不同的弹性模量与泊松比。

(4) 柔度对称性假设： $\mu^+/E^+ = \mu^-/E^-$ 。

1.2 双模量理论的本构模型

在双直线模型中，材料的本构关系分为受拉与受压两种情况：受拉时弹性参数取拉伸模量 E^+ 及拉泊松比 μ^+ ，受压时取压缩模量 E^- 和压泊松比 μ^- ，以此建立了基于主应力方向的三维本构方程如下：

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

式中： ε_α 、 ε_β 、 ε_γ 为主应变； σ_α 、 σ_β 、 σ_γ 为主应力； \mathbf{A} 为柔度矩阵；模量 E 和泊松比 μ 由各自对应相乘的主应力正负性质确定，如 $\sigma_\alpha > 0$ ，则模量 E^α 和泊松比 μ^α 取拉伸模量 E^+ 及拉泊松比 μ^+ ，反之取压缩模量 E^- 及压泊松比 μ^- 。由式(1)可知，基于假设 $\mu^+/E^+ = \mu^-/E^-$ ，无论主应力正负如何组合， \mathbf{A} 均为对称矩阵。

2 双模量理论的数值计算方法

由于双模量理论的复杂性，其三维解析解很难求出，为此，本文将基于有限元法来建立其数值计算方法。

2.1 有限元格式

经典线弹性理论的有限元法是在差分法和变分法的基础上发展而来的一种数值方法，其基本思想可归结为两个方面：一是离散，二是分片插值。其有限元计算的单元迭代格式为：

$$\mathbf{K}^e \mathbf{u}^e = \mathbf{F}_f^e + \mathbf{F}_s^e \quad (2)$$

式中： \mathbf{K}^e 为单元刚度矩阵； \mathbf{F}_f^e 为单元体力； \mathbf{F}_s^e 为单元面力； \mathbf{u}^e 为单元节点位移列阵。

然后对所有单元计算单元刚度矩阵并进行总装得整体刚度矩阵 \mathbf{K} 。

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3)$$

式中： \mathbf{u} 为结构所有节点的位移列阵； \mathbf{F} 为结构所有节点的外荷载列阵。双模量理论与经典线弹性同模量理论的区别在于本构关系的不同，它们的有限元方法的差异也在于此。因此，基于双模量的有限元方法与同模量有限元方法大部分步骤均相同，其不同点在于弹性矩阵 \mathbf{D} 的不同。因此只要求出基于不同模量理论的弹性矩阵 \mathbf{D} ，然后由式(4)即可得刚度矩阵 \mathbf{K} 。其他步骤均按经典线弹性理论有限元计算流程进行。

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv \quad (4)$$

式中： \mathbf{B} 为应变矩阵。

2.2 弹性矩阵 \mathbf{D} 的求解

首先按主应力正负性质，即可写出柔度矩阵 \mathbf{A} ，再利用等式 $\mathbf{D}_1 = \mathbf{A}^{-1}$ ，即可求出主方向上的弹性矩阵 \mathbf{D}_1 ，然后按下式可得任意方向的弹性矩阵 \mathbf{D} 。

$$\mathbf{D} = \bar{\mathbf{L}}_e^T \mathbf{D}_1 \bar{\mathbf{L}}_e \quad (5)$$

式中： $\bar{\mathbf{L}}_e$ 为转换矩阵，见下式。然后将求得的 \mathbf{D} 代入式(4)即可得到不同模量理论的有限元刚度矩阵，后续步骤均与经典线弹性理论的有限元方法相同。

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

2.3 数值计算思想

双模量理论在对材料本构关系进行双线性简化后，属于特殊的非线性问题，其结构的弹性参数与单元的应力状态相关，因此，适合采用迭代技术求解。即利用前一次计算的结果，对单元的主应力状态进行判断，得到相应的弹性矩阵，然后进行下一次迭代，其迭代格式如下：

$$\mathbf{K}_{i-1} \mathbf{u}_i = \mathbf{F} \quad (6)$$

式中： \mathbf{K}_{i-1} 为第 $i-1$ 迭代步的整体刚度矩阵； \mathbf{u}_i 为第 i 此迭代的结构节点位移列阵。具体计算步骤如下：

(1) 假设结构为同模量，如按全拉或全压状态赋予结构初始弹性参数，得到初始弹性矩阵 \mathbf{D}^+ 或 \mathbf{D}^- ，并计算得到每个单元的应力应变。

(2) 计算每个单元高斯积分点的主应力和主应力方向，并对其主应力正负进行判断，由此得到每个积分点主应力方向下的柔度矩阵 \mathbf{A} ，然后应用式(5)得到相应双模量的弹性矩阵 \mathbf{D} ，再由式(4)得到双模量理论的刚度矩阵以及最后总装为整体刚度矩阵。

(3) 按新的整体刚度矩阵计算各单元的应力应变。

(4) 判别。计算第 i 次和第 $i-1$ 次的各节点的位移差或单元积分点的应力差，若满足控制标准要求则计算完成停机，若不满足转到步骤2，开始下一次迭代计算。

其计算流程如图2所示。

其中判别标准可以前后两次位移之差或前后两次应力之差等模式，研究表明^[2,4]，采用ABAQUS默认综合收敛准则计算，收敛时一般最后两次位移的差均小于 10^{-8} ，完全满足精度要求，因此，本文后续基于ABAQUS的有限元分析采用软件的默认收敛准则及收敛标准。

3 典型沥青路面结构力学分析

3.1 有限元计算模型

基于上述计算方法，利用ABAQUS的二次开发平台UMAT编制了双模量本构模型的计算子程序。

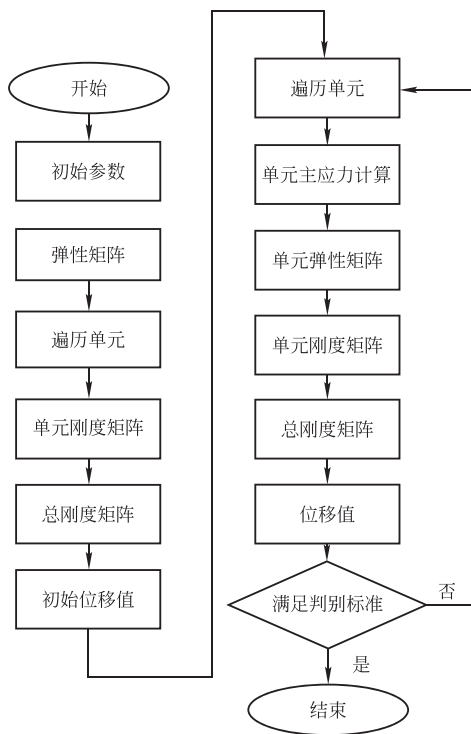


图 2 双模量理论有限元计算流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of finite element method based on bimodulus theory

并基于《沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定,建立了半刚性基层沥青路面在标准荷载作用下的有限元模型如图 3 所示。

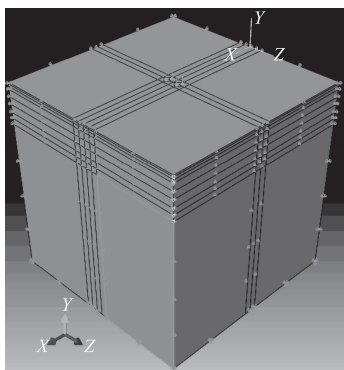


图 3 路面结构三维数值模型

Fig. 3 3-D numerical model of pavement structure

数值模型采用弹性层状连续体系下的双圆垂直均布荷载模型,单圆半径 δ 为 10.65cm,双圆圆心间距 31.95cm。图中 x 、 y 、 z 三个方向分别代表路面横向、竖向(即路面深度方向)及纵向(即行车方向)。整个结构均采用三维六面体八节点线性完全积分单元(C3D8),其中路面各层及路基均视为弹性体。假设路面各结构层层间完全连续及满足各向同性性质,模型尺寸为 5m(横向即 x 方向) \times 5m(纵向即 z

方法) \times 5m(竖向即 y 方向),荷载为双圆均布静载 0.7MPa,即标准轴载 100kN。模型边界条件为:模型四周设置法向位移为 0,底部设置 x 、 y 、 z 方向的位移为 0。

为简化分析因素,将沥青面层上中下三层取相同拉压模量参数,考虑碎石层及土基属于松散材料,抗拉能力非常弱,取拉压模量比为 1/10。基于作者研究团队对常用路用材料拉压模量特性的测试结果^[18-19],取路面计算参数如表 2 所示。其中分析时,基于双模量理论计算时各结构层分别取拉压模量及拉压泊松比,基于经典线弹性理论计算时仅取压模量和压泊松比。

表 2 路面结构计算参数

Table 2 Calculation parameters of pavement structure

结构层	厚度 (cm)	拉模量 (MPa)	拉泊松比	压模量 (MPa)	压泊松比
沥青上面层	4	1000	0.2	1500	0.3
沥青中面层	6	1000	0.2	1500	0.3
沥青下面层	8	1000	0.2	1500	0.3
水稳碎石基层	36	10000	0.15	15000	0.225
级配碎石底基层	20	40	0.035	400	0.35
未筛分碎石垫层	30	20	0.035	200	0.35
路基	—	8	0.04	80	0.4

为方便分析,标识力学响应分析的几个特征点如图 4 所示。其中 A 点为轮载中心, C 点为轮隙中心, B 和 B' 为轮载横向边缘点, E 和 E' 为轮载纵向边缘点, D 点为 B 点与 C 点的中点(称为轮隙 $r/4$ 处), G_1 、 G_1' 、 G_2 及 G_2' 分别为圆弧 BE 、 $B'E'$ 、 $B'E$ 、 $B'E'$ 中点附近轮载边缘外侧点位; 线 oo' 为过轮载中心和轮隙中心的横向线。

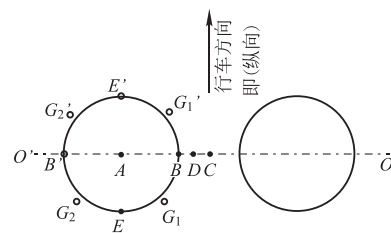


图 4 特征点位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of characteristics points

3.2 力学响应对比分析

从位移场、应力场及应变场的云图对比研究发现,基于双模量理论与基于压模量计算的路面结构

位移场、应力场及应变场规律相近，但响应值的大小有较大差别，因此，本文将着重分析特征点响应力值的变化规律。

(1) 弯沉比较

路面分析中，一般以路表弯沉表征路面的整体刚度，因此选取图 4 中 oo' 线作为特征路径，其弯沉计算结果对比如图 5 所示。

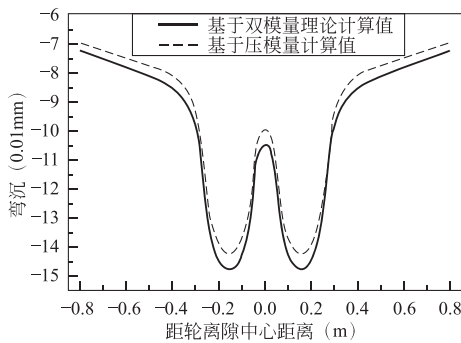


图 5 路表弯沉计算结果对比
Fig. 5 Comparison of deflection calculation results of pavement surface

由图 5 可知，基于双模量理论计算的弯沉与按压模量计算的弯沉随距离的变化规律相似，由轮载中心向两边逐渐减小，最大弯沉发生在轮载中心，轮载中心处弯沉约为轮隙中心弯沉的 1.4 倍。其中，基于双模量理论计算值大于基于压模量的计算值(轮隙中心处约大 4%，轮载中心处约大 6%)。由此可见，按压模量计算的弯沉偏小，是不安全的。

(2) 横向拉应力比较

选取图 4 的 A(轮载中心)、B(轮载边缘)、C(轮隙中心)及 D(轮隙 $r/4$ 处)为分析的 4 个特征点位，其沿路面深度的横向正应力计算结果如图 6 及表 3 所示。

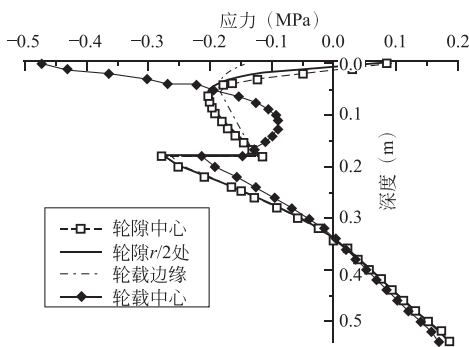


图 6 基于双模量理论的横向应力计算结果
Fig. 6 Calculation results of transverse stress based on bimodulus theory

表 3 横向应力对比
Table 3 Comparison of transverse stress

深度/m	轮隙中心		轮隙 $r/4$ 处		轮载边缘		轮载中心	
	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c
0(路表)	0.086	0.13	0.094	0.14	-0.14	-0.12	-0.47	-0.47
0.54 (基层底)	0.19	0.24	0.19	0.24	0.19	0.24	0.17	0.22

注： E_{bi} 示基于双模量计算值； E_c 表示采用压模量计算值。

由图 6 可知，轮隙中心(C 点)及轮载中心(A 点)的应力值分别为其最大或最小值，B 和 C 的应力值在前两点应力值范围内；从横向拉应力角度而言，轮隙中心应力值基本处于最大值情况，其中拉应力最大值位于基层底，从横向压应力角度而言，路面的受压区主要位于面层及基层上部，压应力最大值位于路表轮载中心处。由表 3 可知，采用压模量计算得到的路表及基层底的最大横向拉应力大于基于双模量理论的计算结果，分别约为其 1.5 倍和 1.3 倍。由此可见，基于压模量的计算结果进行路面设计是偏保守的。

同时由图 6 可知，路表亦存在较大的拉应力，由此取图 4 中 oo' 线作为研究特征路径，其路表横向应力计算结果如图 7 所示。

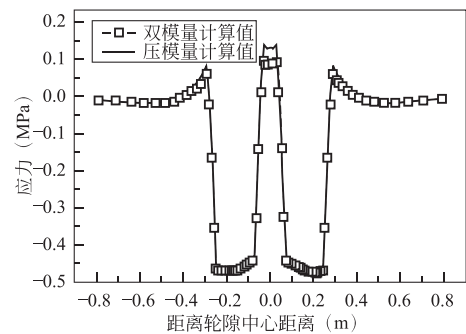


图 7 路表横向应力变化规律
Fig. 7 Change law of transverse stress on pavement surface

由图 7 可知，在轮载边缘附近出现了较大的拉应力，最大横向拉应力发生在距轮隙中心 $r/4$ 处(D)，沥青面层顶部承受拉应力，底部承受压应力，这与文献[15]的理论推导结论吻合。其中路表轮隙处的拉应力应引起足够重视，由于路表受阳光、大气、水、车载等外部因素的直接作用，路表材料性能衰减较快，路表较大拉应力的存在易引发路表开裂。

(3) 纵向拉应力比较

选取图 4 的 A(轮载中心)、B(轮载边缘)、C(轮隙中心)及 D(轮隙 $r/4$ 处)为分析的 4 个特征点位，其沿路面深度的纵向应力计算结果如图 8 及表 4 所示。

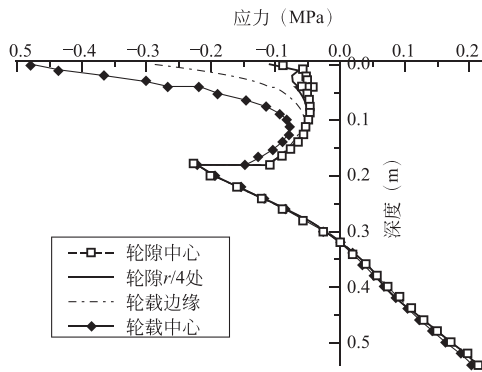


图 8 基于双模量理论的纵向应力计算结果
Fig. 8 Calculation results of longitudinal stress based on bimodulus theory

表 4 纵向应力对比

Table 4 Comparison of longitudinal stress (MPa)

深度 (m)	轮隙中心		轮隙 $r/4$ 处		轮载边缘		轮载中心	
	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c
0.54 (基层底)	0.21	0.27	0.21	0.27	0.21	0.27	0.20	0.25

由图 8 可知，面层及基层上部受压，基层下部受拉，轮隙中心(C 点)及轮载中心(A 点)的应力值亦分别为其最大或最小值，B 和 C 的应力值在前两点应力值范围内，其中面层轮载中心处纵向应力最大，基层及以下层位轮隙中心处纵向应力最大，其中整个路面纵向拉应力最大值位于基层底，纵向压应力最大值位于路表轮载中心处。

由表 4 可知，采用压模量计算的基层底面纵向拉应力约为基于双模量理论计算结果的 1.3 倍。结合表 2 可知，基层底的最大纵向拉应力要大于横向最大拉应力。因此就水平应力而言，基层层底的轮隙中心为最不利荷载位置，关键力学响应为纵向拉应力。

(4) 横向拉应变比较

选取图 4 的 A(轮载中心)、B(轮载边缘)、C(轮隙中心)及 D(轮隙 $r/4$ 处)为分析的 4 个特征点位，其沿路面深度的横向应变计算结果如图 9 及表 5 所示，同时由应变场图可知路表的轮隙处、轮载横向边缘及附近存在较大拉应变，因此也取图 4 中 oo' 线作为研究特征路径，其横向应变计算结果如图 10 所示。

由图 9 可知，轮隙中心(C 点)及轮载中心(A 点)的应变值基本分别为其最大或最小值，B 和 D 的应变值在前两点应变值范围内，轮隙区路表为拉应变，沿深度逐渐变为压应变，轮载直接作用区域路

表为压应变，沿深度逐渐变为拉应变；基层下部为拉应变，但应变较小。

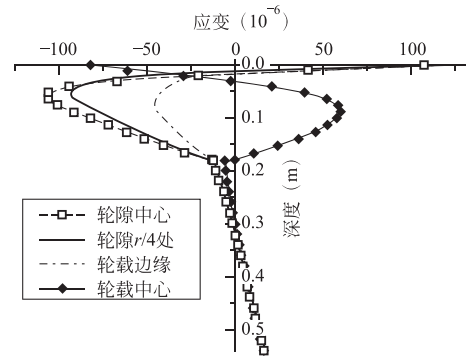


图 9 基于双模量理论的横向应变计算结果
Fig. 9 Calculation results of transverse strain based on bimodulus theory

表 5 横向应变对比

Table 5 Comparison of transverse strain (10^{-6})

深度 (m)	轮隙中心		轮隙 $r/4$ 处		轮载边缘		轮载中心	
	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c
0	107	104	120	114.5	35.3	41.5	-82.2	-79.0
0.04	-93.8	-92.1	-89.9	-88.3	-38.3	-36.7	20.2	22.7
0.1	-82.7	-80.7	-71.4	-69.5	-41.4	-39.7	57.5	58.9
0.18	-12.7	-11.5	-12.1	-10.9	-10.4	-9.3	-3.2	-2.1

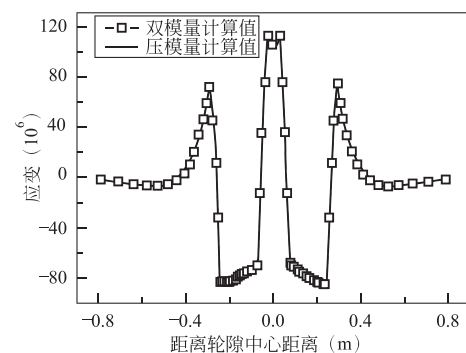


图 10 路表横向应变变化规律

Fig. 10 Change law of transverse strain of pavement surface

由图 10 可知，路表轮载周边存在较大拉应变，其中 D 点(轮隙 $r/4$ 处)为路表横向拉应变最大点位，由表 5 可知，其拉应变约为面层内部最大拉应变的 1.5 倍；按双模量理论计算的路表最大拉应变比压模量计算结果大约 5%。

由于一般水平拉应变对路面尤其是沥青面层影响较大，因此由以上分析可得，横向拉应变的最不

利荷载位置为路表轮隙区，其次为面层中部轮载中心处，基层底部拉应变较小。因此，应将最大拉应变的设计点位从沥青层层底移至路表。

(5) 剪应力比较

由剪应力场云图得到，剪应力的最大值在轮载边缘处，其中剪应力 S_{xy} 的最大值在图 4 中的 B 点及 B' 点， S_{xz} 的最大值点在 G_1 、 G_2 、 G'_1 及 G'_2 点， S_{yz} 的最大值点在 E、E' 点，因此分别选取这些极值点位分析沿路面深度的应力变化规律，如图 11 所示和表 6 所示。

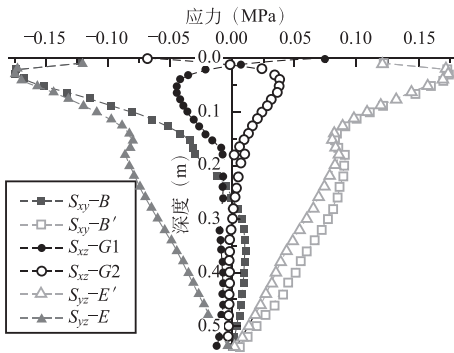


图 11 基于双模量理论的剪应力计算结果
Fig. 11 Calculation results of shear stress based on bimodulus theory

表 6 剪应力对比

Table 6 Comparision of shear stress (MPa)

深度 (m)	$S_{xy}-B'$		$S_{yz}-E'$	
	E_{bi}	E_c	E_{bi}	E_c
0	0.122	0.121	0.122	0.121
0.01	0.121	0.122	0.121	0.122
0.02	0.173	0.174	0.173	0.173
0.03	0.176	0.176	0.175	0.175
0.04	0.171	0.171	0.170	0.170

由图 11 及表 6 可知，基于双模量理论和基于压模量的计算结果十分接近，其偏差可忽略不计，其中，剪应力 S_{xy} 最大，且最大剪应力发生在路表以下 3cm 附近。

4 结 论

(1) 由于道路材料的混合料特征及压力成形特点，导致了道路材料拉、压模量的差异性，从而引起了力学响应分析时选择弹性模量的不唯一性，给路面结构力学响应分析结果带来较大的偏差，而应

用双模量理论进行路面结构力学响应分析可有效的解决道路材料弹性模量的不唯一性问题，同时也更符合材料的真实力学性质。

(2) 基于双模量理论与基于传统线弹性理论的路面结构力学响应计算结果之间的偏差高达 50%，应引起高度重视，需加强双模量理论的研究以形成新的路面结构设计理论与方法。

(3) 沥青路面表面存在着较大的拉应力和拉应变，尤其是路表轮隙区的拉应变为整个路面的最大拉应变，建议将沥青面层的设计点位从沥青层层底移至路表轮隙区。

本文采用的双模量理论及有限元方法仍为弹性理论方法，并未考虑沥青混合料的黏弹特性，且仅考虑静载作用，后续需对其进一步发展；同时本文只分析了典型半刚性基层沥青路面结构，有待对其他类型路面结构的力学响应进行分析研究。

参 考 文 献

- [1] Vijayakumar K, Rao K P. Stress-strain relation for composites with different stiffnesses in tension and compression [J]. International Journal of Computational Mechanics, 1987, 2(3): 167-175
- [2] He X T, Zheng Z L, Sun J V, et al. Convergence analysis of a finite element method based on different moduli in tension and compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(20): 3734-3740
- [3] 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
- [4] 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, 100/101: 54-73
- [5] Du Z L, Guo X. Variational principles and the related bounding theorems for bi-modulus materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 73: 183-211
- [6] 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): 236-245 (Zhang Yunzhen, Wang Zhifeng. The finite element method for elasticity with different moduli in tension and compression[J]. Computational Structural Mechanics and Applications, 1989, 6(1): 236-245 (in Chinese))
- [7] 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 (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 (in Chinese))
- [8] 何晓婷, 陈山林, 孙俊怡. 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 (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 (in Chinese))
- [9] 吴晓, 杨立军, 黄翀, 等. 双模量矩形板的大挠度弯曲计算分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 17-22 (Wu Xiao, Yang Lijun, Huang Chong, et al. Large deflection bending calculation and analysis of bimodulus rectangular plate [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 17-22 (in Chinese))
- [10] 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*, 2018, 63(2): 335-363
- [11] 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
- [12] 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 (Lv 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 (in Chinese))
- [13] Lv 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
- [14] 吕松涛, 陈杰东, 张晖. 水泥稳定碎石拉压弯静态模量与动态模量比较分析[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(10): 39-43, 59 (Lv Songtao, Chen Jiedong, Zhang Hui. Comparative analysis of tensile compression flexural static modulus and dynamic modulus of cement-stabilized macadam [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(10): 39-43, 59 (in Chinese))
- [15] 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 (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 (in Chinese))
- [16] 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 (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 (in Chinese))
- [17] 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 (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 (in Chinese))
- [18] 吕松涛, 郑健龙, 仲文亮. 养生期水泥稳定碎石强度、模量及疲劳损伤特性[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(9): 9-15, 45 (Lv Songtao, Zheng Jianlong, Zhong Wenliang. Characteristics of strength, modulus and fatigue damage for cement stabilized macadam in curing period [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(9): 9-15, 45 (in Chinese))
- [19] Lv S T, Liu C C, Chen D, et al. Normalization of fatigue characteristics for asphalt mixtures under different stress states [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 177: 33-42

潘勤学(1986—),男,博士,讲师。主要从事路面结构计算与测试方面研究。

郑健龙(1954—),男,博士,教授,中国工程院院士。主要从事道路工程方面研究。