

材料正交各向异性与横观各向同性对路面力学性能影响对比分析

林森^{1,2}, 关宏信², 胡昌斌¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:为比较分析材料正交各向异性和横观各向同性对沥青路面性能的影响,基于各向异性理论和考虑材料参数的联动,定义了路面材料参数各向异性度;接着采用实测材料参数,设计9种工况进行有限元计算,提取路表最大弯沉、层底最大拉应力和面层内部剪应力3个力学指标进行分析。计算结果表明:材料正交各向异性对路面各力学指标影响普遍大于材料横观各向同性;路表最大弯沉受路基材料正交各向异性影响最为显著;基层底拉应力受基层材料正交各向异性影响最大;面层内部剪应力基本只受面层材料各向异性影响,且材料正交各向异性对其影响最为显著。在路面结构设计分析过程中,应考虑材料正交各向异性对沥青路面性能的影响。

关键词:道路工程; 沥青路面; 有限元; 正交各向异性; 横观各向同性; 力学性能

沥青路面在服役期间出现的早期病害问题,学者们从路面结构、材料、施工和养护等方面做了大量研究,但此方面问题未能得到很好解决。沥青路面各结构层在施工过程中,由于其施工工艺特性,使得路面各个结构层材料具有各向异性。而目前沥青路面结构设计方法将材料当成各向同性来处理,没有考虑材料各向异性,使得计算结果与路面实际受力情况不符,忽略材料各向异性可能会导致路面实际使用寿命低于设计使用寿命,是导致路面出现早期病害而被忽略的重要原因。

目前,国内外学者在进行路面材料各向异性研究时,大多数将其当作横观各向同性来处理,考虑路面材料类型组合主要有:①全部材料横观各向同性;②面层为黏弹性材料,基层和路基为横观各向同性材料;③分别把面层、基层和路基看作横观各向同性材料;④将路面材料处理为非线性横观各向同性。以上研究均未考虑路面材料平面两个方向间的力学性质差异,如弹性模量、剪切模量和泊松比等。近年来,有学者将地基视作正交各向异性,来研究正交各向异性性质对土体变形的影响规律,但没有考虑面层和基层材料的正交各向异性特性。

基于此,该文从各向异性理论出发,考虑材料参数

的联动,定义了路面材料参数各向异性度,并利用实测路面材料参数,建立沥青路面有限元模型,比较分析沥青路面各层材料横观各向同性和正交各向异性对沥青路面性能的影响,以期得到更加接近真实情况的结论,为完善沥青路面设计提供理论支持。

1 计算理论

该文考虑的各向异性材料类型有横观各向同性和正交各向异性两种。横观各向同性弹性体的材料本构方程为:

$$\left\{\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) - \frac{\mu'}{E}\sigma_z \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}(-\mu\sigma_x + \sigma_y) - \frac{\mu'}{E}\sigma_z \\ \epsilon_z &= -\frac{\mu'}{E}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{E}\sigma_z \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}, \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}\end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 。横观各向同性体由 E 、 μ 和 E' 、 μ' 、 G' 这5个独立参数组成。

收稿日期:2020-05-10(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51038002)

作者简介:林森,男,博士研究生。E-mail: linmiaofzu@qq.com

正交各向异性弹性体的材料本构方程为：

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \sigma_z \\ \epsilon_y &= -\frac{\mu_{xy}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\mu_{zy}}{E_z} \sigma_z \\ \epsilon_z &= -\frac{\mu_{xz}}{E_x} \sigma_x - \frac{\mu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{1}{G_{zx}} \tau_{zx}, \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中： $\mu_{yx}/E_y = \mu_{xy}/E_x, \mu_{zx}/E_z = \mu_{xz}/E_x, \mu_{zy}/E_z = \mu_{yz}/E_y$ 。对于正交各向异性体，独立的参数有 $E_x、E_y、E_z$ 和 $\mu_{xy}、\mu_{xz}、\mu_{yz}$ 以及 $G_{yz}、G_{zx}、G_{xy}$ 共 9 个。

各向异性度是对材料各向异性程度的量化，该文定义了 2 个材料各向异性度：将 k_1 定义为路面平面纵向与路面深度方向的各向异性度， k_2 定义为路面平面横向与路面平面纵向的各向异性度。同时，将沥青路面材料弹性模量 E 、剪切模量 G 、泊松比 μ 的各向异性度分别记为 $k_E、k_G、k_\mu$ 。那么 k_{E1} 为以弹性模量定义的沥青路面平面纵向与深度方向的各向异性度。结合以上叙述，并假设 $k_E、k_G、k_\mu$ 3 种各向异性度相等且同步变化，则各向异性度具体定义如下：

$$\left\{ \begin{aligned} k_{E1} &= E_y/E_z, k_{E2} = E_x/E_y \\ k_{\mu1} &= \mu_{zx}/\mu_{yx}, k_{\mu2} = \mu_{yz}/\mu_{xz} \\ k_{G1} &= G_{yx}/G_{zx}, k_{G2} = G_{xz}/G_{yz} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

联立式(2)、(3)，可推导得到如下参数计算公式：

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{xy} &= \mu_{yz}/(k_1^2 \cdot k_2), \mu_{xz} = \mu_{yz}/k_2 \\ G_{xz} &= k_2 G_{yz}, G_{xy} = k_1 k_2 G_{yz} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

对式(3)、(4)分析可以得到：材料正交各向异性参数由原先 9 个独立参数减少为 5 个独立参数，即 $E_x、E_y、E_z、\mu_{yz}、G_{yz}$ ，进行参数测定时只需测出以上 5 个独立参数，根据式(4)便能得到其余路面材料计算参数。当 $k_2=1$ 时，式(4)就对应横观各向同性材料参数计算关系式，即：

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{xz} &= \mu_{yz} = \mu', \mu_{xy} = \mu' / k_1^2 \\ G_{xz} &= G_{yz} = G', G_{xy} = k_1 \cdot G' \end{aligned} \right. \quad (5)$$

基于以上计算参数确定方法，开展了材料参数测试试验。混合料弹性模量测试属于常规试验，其测试过程及参数设置参考 JTG E20—2011《公路沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料单轴压缩试验(棱柱体法)。

对于材料泊松比的测试，按照泊松比定义，有主泊松比和次泊松比之分，分别记为 PR 和 NU 。如 PR_{zx} 为在 z 向加载时， x 向应变与 z 向应变的比值； NU_{zx} 为在 x 向加载时， z 向应变与 x 向应变的比值。该文采用的是主泊松比，采用 MTS 测试正交各向异性材料泊松比，示意图如图 1 所示。测试时，将棱柱体试件放置在 MTS 加载台(图 1 中圆盘状构件)上，竖向变形通过顶在加载板(图 1 中薄板构件)上的 4 个千分表测试；4 cm×4 cm 断面两个方向的变形测试则通过在棱柱体试件 4 cm 高度处 4 个面中心处的千分表来完成，对向两个千分表的数据之和反映的就是该向的变形量。取变形量与该断面厚度尺寸的比值作为应变，再根据应变可计算出泊松比。

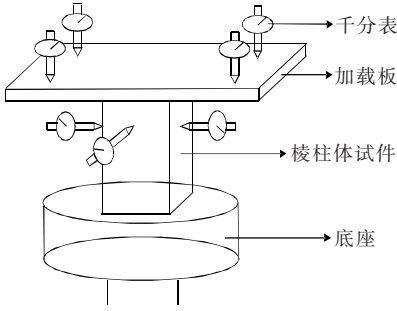


图 1 正交各向异性材料泊松比测试示意图

限于试验条件，各层材料剪切模量先假设 G_{yz} 值，其余剪切模量参数根据式(4)计算得到。关于路基参数，由于土质和粒径等对参数的影响很大，即使实测某种土路基的参数，也不会有多大的代表性，故路基材料参数采用典型值。测试得到的路面材料正交各向异性参数如表 1 所示。

表 1 路面材料正交各向异性计算参数

路面结构	$E_x /$ MPa	$E_y /$ MPa	$E_z /$ MPa	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	$G_{xy} /$ MPa	$G_{yz} /$ MPa	$G_{xz} /$ MPa
面层	1 267	1 408	1 668	0.28	0.18	0.20	477	628	565
基层	2 592	2 880	3 200	0.25	0.18	0.20	1 037	1 280	1 152
路基	49	54	60	0.35	0.26	0.28	18	22	20

2 正交各向异性路面有限元模型建立

利用 Ansys 软件进行有限元计算时,将模型建立、网格划分、加载求解等一系列计算过程编制成程序,便于不同路面材料特性的应力场计算。

路面结构采用中国典型的半刚性基层沥青路面,即三层连续弹性体系,具体结构形式为 18 cm 沥青面层+54 cm 半刚性基层+填方路基。有限元模型坐标原点为两轮轮隙中心处,尺寸为道路深度方向 16 m(z 向),道路纵断面方向 10 m(y 向),道路横断面方向 10 m(x 向)。计算单元采用等参 10 节点单元,能较好地反映材料的各向异性特性。假设沥青路面各结构层间接触条件为完全连续。采用第 1 节推导的各向异性材料本构关系作为输入参数的依据,然后对三维几何模型进行网格划分,在荷载加载区域及面层、基层进行加密处理(图 2)。对有限元模型施加位移边界条件:在 x 方向两个断面上,对 x 方向进行约束;在 y 方向两个断面上,对 y 方向进行约束;对模型底面采用固定约束。

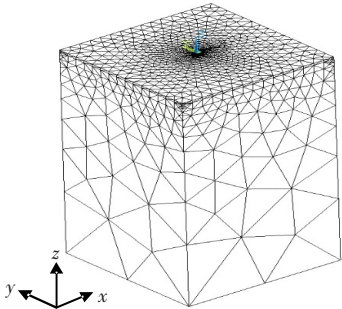


图 2 沥青路面有限元模型

轮胎对路面的作用主要关注轮胎的接地形状及荷载分布问题。根据文献[13]的货车胎压实测结果,选取的最大胎压为 1.217 MPa,取荷载作用形式为凹形非均布荷载,再结合文献[14],取如图 3 所示的轮胎接地形状和荷载作用形式。

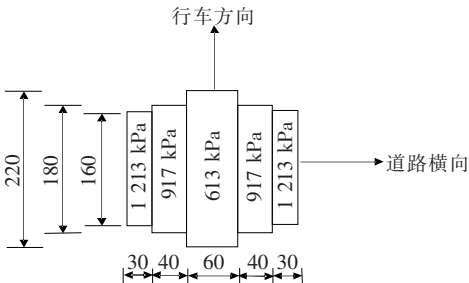


图 3 轮胎接地形状及非均布荷载简化图(单位:mm)

3 结果分析

利用建立的路面有限元模型,对表 2 所示的 9 种组合进行有限元计算。计算工况分为 2 大类:① 路面各结构层的材料特性都相同;② 某结构层为各向异性材料,其余结构层为各向同性材料。在此基础上,提取相关力学指标计算结果,比较分析横观各向同性材料与正交各向异性材料对沥青路面力学性能的影响。

表 2 路基路面各层材料特性组合

组合序号	面层	半刚性基层	路基
1	A	A	A
2	B	B	B
3	C	C	C
4	B	A	A
5	A	B	A
6	A	A	B
7	C	A	A
8	A	C	A
9	A	A	C

注:表中 A 代表各向同性材料;B 代表横观各向同性材料;C 代表正交各向异性材料。下同。

3.1 材料全部各向异性计算结果分析

利用 Ansys 对表 2 中的组合序号 1~3 进行有限元计算,提取的力学指标包括表征路面结构承载力的路表弯沉,表征路面疲劳开裂的基层底拉应力和普遍认为沥青路面出现车辙病害的面层内部剪应力。为方便进行直观比较,定义如下路面力学指标变化率:

$$\Delta m = (\delta_i - \delta_o) / \delta_o \times 100\%$$

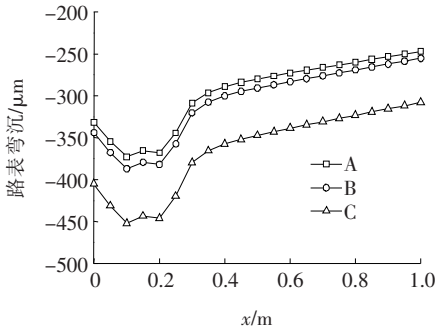
(6)

式中: Δm 为路面某力学指标变化率; δ_o 为材料各向同性对应的路面力学指标计算值; δ_i 为材料各向异性对应的路面力学指标计算值。

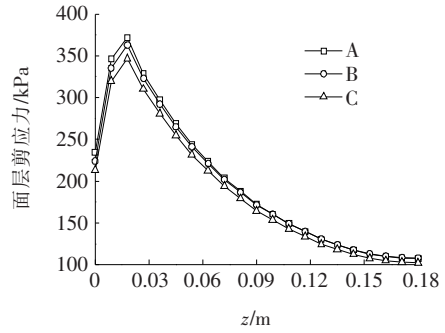
利用式(6)计算沥青路面各力学指标变化率,计算结果见表 3。根据有限元计算结果,绘制材料全部各向异性对路面各力学指标影响曲线图,如图 4 所示。

表 3 全部材料各向异性对应路面力学指标变化率

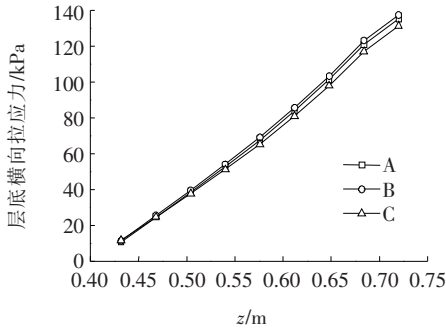
路面力学指标	横观各向同性 变化率/%	正交各向异性 变化率/%
路表最大弯沉	3.82	21.28
基层底最大拉应力 σ_{xm}	1.76	2.93
基层底最大拉应力 σ_{ym}	3.04	4.61
面层最大剪应力	-2.56	-6.82



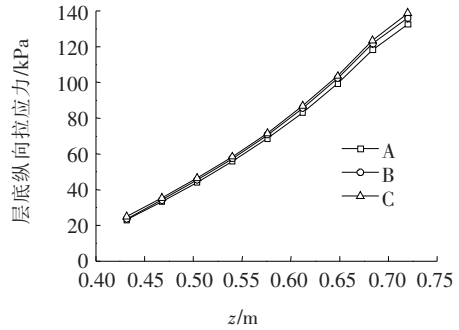
(a) 路表弯沉沿轮迹中心连线方向变化



(b) 面层剪应力随路面深度变化



(c) 层底横向拉应力随路面深度变化



(d) 层底纵向拉应力随路面深度变化

图 4 全部材料各向异性对路面各力学性能影响变化

分析表 3、图 4 可知：

(1) 分别考虑材料正交各向异性、横观各向同性和各向同性 3 种情况下，路面路表最大弯沉均出现在荷载作用中心连线上且与轮隙中心即坐标原点距离 0.15 m。路面材料为正交各向异性和横观各向同性时，与材料各向同性相比，都使路表最大弯沉值增大，前者增加幅度达到了 21.28%，而后者为 3.82%，说明材料正交各向异性对路表最大弯沉的影响大于材料横观各向同性。

(2) 正交各向异性材料对路面基层底纵向最大拉应力影响较大，而对横向最大拉应力影响很小。在基层底 $z=0.72$ m 处，路面材料正交各向异性对应的最大拉应力 σ_{ym} 比路面材料各向同性增加 4.61%，路面材料横观各向同性最大拉应力 σ_{ym} 增加 3.04%。说明材料各向异性会使基层底拉应力增大，对沥青路面抗疲劳开裂性能不利。

(3) 面层最大剪应力值随路面深度的增加呈现先增大后减小规律，最大值出现在距离路表深度 0.018 m 处。路面材料正交各向异性下，沥青路面面层最大剪应力变化幅度较大，比各向同性材料沥青路面面层最大剪应力小 6.82%，而材料横观各向同性变化率不到 3%，这说明仅考虑沥青路面材料横观各向同性对

沥青路面力学行为影响尚不够全面。

3.2 路面各层材料各向异性计算结果分析

3.1 节中分析了路面结构各层材料特性都相同对沥青路面力学性能影响，未具体考虑哪一路面结构层材料各向异性对路面力学性能的影响程度。为此，这里假定路面某一结构层材料为各向异性（横观各向同性或正交各向异性），其余各路面结构层为各向同性材料，对比分析正交各向异性材料与横观各向同性材料对路面性能的影响。利用 Ansys 对表 2 中的组合序号 4~9 进行有限元计算，由于上一节中层底横向拉应力变化率较小，则层底拉应力只提取纵向拉应力。计算结果见图 5~7（图中：a 为面层材料；b 为基层材料；c 为路基材料）。

由图 5 可知：

(1) 在荷载作用中心 $x=0.15$ m 处，正交各向异性材料下路表弯沉最大变化率为 14.79%，横观各向同性材料下路表弯沉最大变化率仅为 1.41%，正交各向异性材料对路面结构承载力影响比横观各向同性材料对其影响显著。

(2) 对于面层材料，各向异性都使得路表最大弯沉变大，对路面结构承载力不利。正交各向异性材料对应路表弯沉最大变化率为 4.21%；横观各向同性材

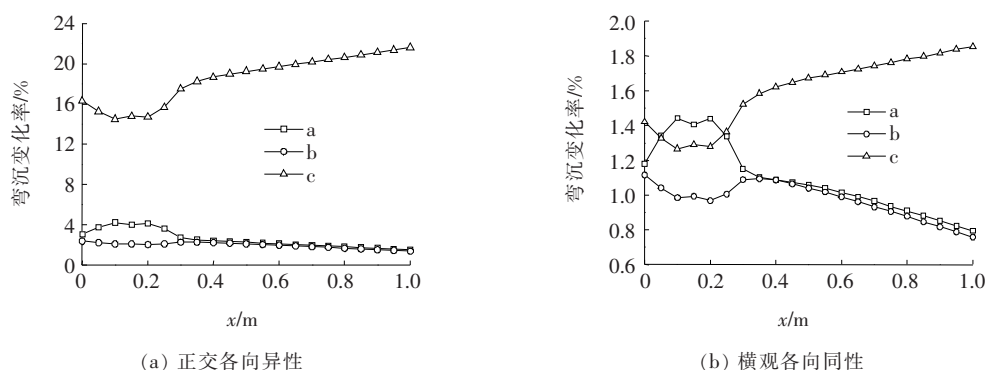


图5 各层材料各向异性对路表弯沉影响变化率

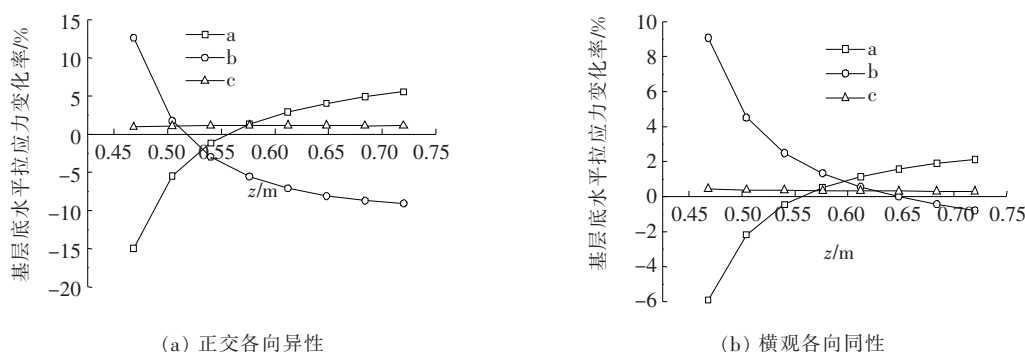


图6 各层材料各向异性对基层底水平拉应力影响变化率

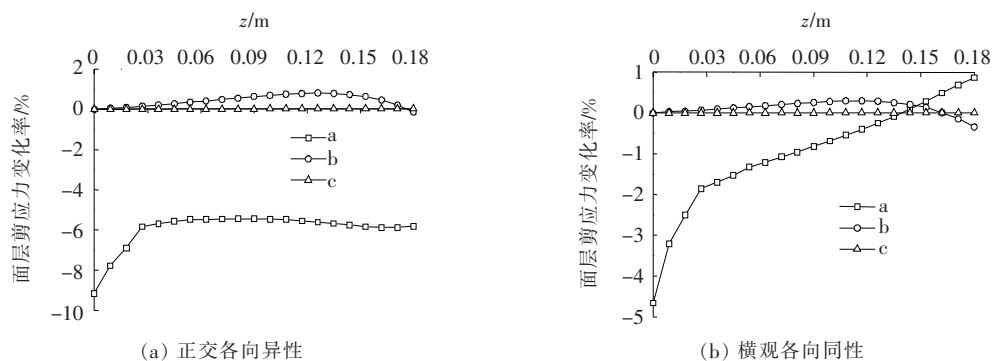


图7 各层材料各向异性对面层剪应力影响变化率

料对应路表最大弯沉变化率为1.44%。说明面层材料各向异性对路表弯沉有一定影响,但影响幅度不大。

(3) 对于基层材料,各向异性使路表弯沉增大,但增大幅度很小,最大为材料正交各向异性下的路表弯沉变化率,仅为2.31%。

(4) 对于路基材料,相比面层和基层材料,各向异性对路表弯沉的增大幅度最大;材料正交各向异性和横观各向同性均使路表弯沉增大,路基材料正交各向异性增幅最大,为14.79%。

由图6可知:

(1) 对于同一路面结构层,材料正交各向异性和横观各向同性对层底拉应力沿深度变化规律一致。在路面深度 $z=0.72$ m处,材料正交各向异性对层底拉应力最大影响幅度达到-9.06%,材料横观各向同性对层底拉应力最大影响幅度为2.13%。材料正交各向异性比横观各向同性对层底拉应力影响幅度更大。

(2) 面层材料正交各向异性对基层水平拉应力影响幅度为-15.12%~5.31%,变化临界位置为 $z=0.54\sim0.576$ m;面层材料横观各向同性对基层水平拉应力影响幅度为-5.98%~2.53%,变化临界位置

为 $z=0.54\sim 0.576$ m。基层底面 $z=0.72$ m 处,面层材料正交各向异性对基层底水平拉应力最大影响幅度为 5.31%。

(3) 基层材料正交各向异性使层底拉应力增加幅度不断减小,从原先 12.63%变化到-9.06%,而基层横观各向同性变化率从 9.07%变化到-0.79%。在基层底 $z=0.72$ m 处,基层正交各向异性对基层底水平拉应力最大影响幅度为-9.06%。

(4) 路基材料各向异性对层底最大拉应力变化率接近于 0,可以忽略不计。

由图 7 可知:

(1) 对于面层材料,各向异性使面层剪应力减小。在面层内部剪应力最大处即 $z=0.018$ m,材料各向异性对面层内部最大剪应力最大影响幅度达到-6.90%,与材料全部各向异性下面层内部剪应力最大影响幅度-6.82%十分接近。

(2) 对于基层和路基材料,无论考虑材料正交各向异性还是横观各向同性,其变化率都很小,可以忽略不计。

(3) 材料正交各向异性对面层内部最大剪应力最大影响幅度为-6.90%,材料横观各向同性对面层内部最大剪应力影响幅度为 2.51%。正交各向异性对面层剪应力的影响较横观各向同性对其影响大,在面层剪应力最大处即 $z=0.018$ m,横观各向同性变化率甚至由负转正。

综合图 4~7,可以发现:

(1) 面层内部剪应力基本只受面层各向异性影响,材料各向异性使其减小,且面层材料正交各向异性对其影响最大。

(2) 路表弯沉受路基材料各向异性影响幅度最大,各向异性使其增大,且路基材料正交各向异性对路面结构承载力影响最不利。

(3) 基层底最大拉应力受基层材料各向异性影响最大,各向异性使其减小,且基层材料正交各向异性对其影响最大。

4 讨论

学者们对路面各结构层材料横观各向同性的有限元计算结果表明:随着各向异性度的增大,路表弯沉、层底拉应力和拉应变均增大,最大变化率可以达到 20%以上。有限元计算及前人研究的计算结果显示,某一力学指标计算结果最大变化率与各向异性度取值

范围有关,范围越大,计算结果的影响幅度越大。

从以上材料参数试验结果看,面层、基层材料各向异性度最小分别达到 0.76、0.81,均不小于 0.7。而以往学者们所采用的材料参数大多数是基于假设值,各向异性度可以为 0.17、0.21、0.3、0.5、0.7~1。前面有限元计算结果显示:材料横观各向同性下的路表最大弯沉最大变化率为 3.82%;基层底最大拉应力最大变化率为 3.04%;面层内部最大剪应力最大变化率为-2.56%,这 3 个力学指标最大变化率绝对值都不超过 4%。鉴于此,造成上述各力学指标变化率偏小的原因是有限元计算时实测材料参数各向异性度范围偏小。

此外,横观各向同性材料与正交各向异性材料对沥青路面力学性能的影响规律基本一致。通过比较两种各向异性材料对各力学指标最大变化率的差值,可以深入了解二者在对沥青路面性能影响方面的差异。二者差值越大,越能反映这两种材料特性差异对沥青路面力学性能影响的敏感程度。在路表最大弯沉、层底最大拉应力和面层内部最大剪应力 3 个路面力学指标中,路表最大弯沉变化率差值最大,为 17.46%,表明横观各向同性与正交各向异性材料特性差异对路面承载力的影响最为敏感;层底拉应力变化率差值次之,为 11.19%,表明横观各向同性与正交各向异性材料特性差异对基层底最大拉应力影响的敏感程度较大;面层内部最大剪应力变化率差值最小,为 4.39%,表明这两种材料特性差异对面层内部最大剪应力影响的敏感程度较低。比较结果表明:只考虑材料横观各向同性尚且不够,可能会低估材料各向异性对路面力学性能的影响,进一步考虑材料正交各向异性是必要的。

5 结论

基于各向异性和有限元理论,建立三维沥青路面有限元模型,考虑路面材料正交各向异性、横观各向同性以及各向同性 3 种材料特性,设计 9 种不同计算工况,并以材料各向同性为基准,比较材料正交各向异性和横观各向同性下路面各力学指标间的差异性,得出以下结论:

(1) 材料正交各向异性对路面结构各力学指标影响比材料横观各向同性对路面各力学指标影响更加显著。正交各向异性材料对路表最大弯沉影响幅度最大,对层底最大拉应力和面层最大剪应力均有一定影响,而横观各向同性材料对以上这 3 种路面力学指标

影响幅度均较小。

(2) 面层材料各向异性对路表最大弯沉和基层底最大拉应力影响均较显著,且材料各向异性都使其增大,这与材料全部各向异性对以上两个路面力学指标影响规律一致。在路面结构设计中,应考虑面层材料正交各向异性特性。

(3) 基层材料各向异性对基层底最大拉应力影响最大,且材料各向异性使其减小。但在路面材料全部各向异性下,材料各向异性使其增大,说明材料各向异性对基层底最大拉应力的影响比较复杂,基层材料各向异性不是影响其大小的主要材料特性组合。

(4) 路基材料正交各向异性对路表弯沉的影响幅度最大,对路面结构承载力最为不利。因此,在进行路面结构设计时,应考虑路基材料正交各向异性特性。

参考文献:

- [1] 韩泽军,林皋,周小文,等.横观各向同性层状地基动应力响应的求解与分析[J].岩土力学,2018(6).
- [2] LB Wang, HOYOS L. R., WANG J.. Anisotropic Properties of Asphalt Concrete: Characterization and Implications for Pavement Design and Analysis[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2005, 17(5): 535—543.
- [3] CHEN J., PAN T. Y., HUANG X. M.. Numerical Investigation into the Stiffness Anisotropy of Asphalt Concrete from a Microstructural Perspective[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7): 3 059—3 065.
- [4] JEONG H. O., LYTTON R. L., FEMANDO E. G.. Modeling of Pavement Response Using Nonlinear Cross—Anisotropy Approach[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(6): 458—468.
- [5] MASED E, TASHMAN L, SOMEDAVAN N. Micromechanics—Based Analysis of Stiffness Anisotropy in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2002, 14(5): 374—383.
- [6] 鲁巍巍,郑健龙.横观各向同性黏弹性沥青路面的动力响应[J].中南大学学报(自然科学版),2018(4).
- [7] BOULBIBANE M., COLLINS I. F., WEICHERT D., et al. Shakedown Analysis of Anisotropic Asphalt Concrete Pavements with Clay Subgrade[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(4): 882—889.
- [8] CAI Y. C., SANGGHALEH A., PAN E.. Effect of Anisotropic Base/Interlayer on the Mechanistic Responses of Layered Pavements [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 4(1): 250—257.
- [9] Kim S. H., LITTLE D. N., MASAD E., et al. Estimation of Level of Anisotropy in Unbound Granular Layers Considering Aggregate Physical Properties [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(4): 217—227.
- [10] ISLAM M. R., AHMED M. U., TAREFDER R. A. Measuring the Cross—Anisotropy of Hot—Mix Asphalt [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(3): 265—274.
- [11] 张春丽,王博,祝彦知.移动荷载作用下层状正交各向异性地基平面应变问题动力响应[J].岩土工程学报,2018(12).
- [12] 丁皓江.横观各向同性弹性力学[M].1版.杭州:浙江大学出版社,1997.
- [13] 胡小弟,孙立军.重型货车轮胎接地压力分布实测[J].同济大学学报(自然科学版),2005(11).
- [14] Ahmed M U, Rahman A, Islam M R. Combined Effect of Asphalt Concrete Cross—Anisotropy and Temperature Variation on Pavement Stress—Strain under Dynamic Loading [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 685—694.
- [15] 杨涛,郑健龙,关宏信,等.考虑材料正交各向异性时的沥青路面结构力学性能[J].中南大学学报(自然科学版),2016(12).
- [16] 刘能源,颜可珍,胡迎斌,等.基于横观各向同性的沥青路面加铺层力学分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017(5).
- [17] 蒋鑫,冯文青,吴朝阳,等.沥青路面结构力学分析四款典型专业软件评析[J].中外公路,2019(4).
- [18] 刘妍,陶敬林,黄建华,等.渠化交通对沥青路面力学性能的影响[J].中外公路,2019(6).