

文章编号:1671-8879(2008)06-0021-04

横观各向同性的半刚性基层沥青路面结构

栗振锋^{1,2}, 徐格宁¹, 郭向云¹

(1. 太原科技大学 交通工程系, 山西 太原 030024; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了分析土基和沥青面层材料的横观各向同性特性对半刚性基层沥青路面结构的影响,基于建立的横观各向同性沥青路面设计理论,运用编制的基于该理论解的路面结构分析程序 ANISOLAYER,利用沥青面层及土基横观各向同性特性,对半刚性基层沥青路表(路表面)弯沉进行了研究。同时运用 ANISOLAYER 程序分析了在不同厚度沥青面层及不同半刚性基层弹性模量情况下,土基横观各向同性特性对路面结构关键性设计指标的影响(路表弯沉、半刚性基层底部拉应力及路基顶部压应变,沥青层底应变为压应变或较小的拉应变,故未考虑)。研究表明:无论是面层还是土基,其各向异性度(水平弹性模量与垂直弹性模量之比)对路表弯沉的影响曲线变化趋势是一致的;随着土基水平模量的增加,延长了路面的寿命;随着半刚性基层弹性模量的增大,土基水平模量的变化对路表弯沉及基层底部拉应力的敏感性将降低,对路基顶部压应变的敏感性更加显著,但其绝对值较小。

关键词:道路工程;半刚性基层;横观各向同性;关键性设计指标;土基;水平弹性模量
中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Asphalt pavement structure with semi-rigid base course based on cross-anisotropy

LI Zhen-feng^{1,2}, XU Ge-ning¹, GUO Xiang-yun¹

(1. Department of Transportation Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the effect of material cross-anisotropy of subgrade and AC on the asphalt pavement structure design for semi-rigid base course, based on the established cross-anisotropic asphalt pavement design theory, using the compiled analytical pavement structure program ANISOLAYER, through studying the asphalt pavement surface deflection for semi-rigid base course by the cross-anisotropy of AC and subgrade, whether AC or subgrade, the anisotropic parameters (ratio of horizontal elastic modulus to vertical elastic modulus) have the similar influencing trend on the pavement surface deflection, and the effect of subgrade cross-anisotropy to the critical pavement responses (pavement surface deflection, tensile stress at the bottom of semi-rigid base course and compressive strain at the top of subgrade, the tensile strain at the bottom of AC is not considered because it is a small tensile strain or compressive strain).

收稿日期:2007-12-05

基金项目:山西省自然科学基金项目(2007011059);山西省交通科研基金项目(03-09)

作者简介:栗振锋(1968-),男,山西阳城人,太原科技大学副教授,长安大学在读博士后,E-mail:lizhenfeng_68@sina.com.

The analysis shows that: with the increase of subgrade horizontal elastic modulus, almost all increase the life of pavement, with the increase of elastic modulus of semi-rigid base course, the sensitivity will decrease for subgrade horizontal elastic modulus to the tensile stress at the bottom of semi-rigid base course, and more obvious for the compressive strain at the top of subgrade, but the absolute values are very small. 4 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; semi-rigid base course; cross-anisotropy; critical pavement response; subgrade; horizontal elastic modulus

0 引言

对半刚性基层沥青路面结构的研究,中国一直处于国际先进行列。但近些年的研究资料表明,沥青面层和粒状类材料具有明显的横观各向同性特性,对于粘性土,其水平方向与垂直方向的弹性模量比值为 0.9~4.0;而对于砂和碎石类粒料^[1],其模量比值降到 0.2。美国伊利诺伊大学的研究也表明,传统柔性路面的碎石类材料的水平刚度普遍比垂直方向的要低^[2]。对于密级配粒料材料,试验表明,若假定材料为各向同性体,其泊松比常常大于 0.5。一些碎石类材料的试验也表明,随着主应力比的增加,材料的横观各向同性特性将更加明显^[3]。通过对不同类型粒料的研究分析^[4],基层碎石类材料的水平向弹性模量与垂直向的比值为 3%~21%,其剪切模量与垂直向的比值为 18%~35%。虽然路基路面材料的横观各向同性特性已被一些试验所证实,但中国现行的沥青路面结构分析方法还大多使用各向同性层状弹性体系理论^[5-7],材料的横观各向同性特性对路面结构关键性设计指标的影响,也正在国际上形成新的研究热点,而中国对此研究甚少。为此,本文研究了沥青面层及土基横观各向同性特性对半刚性基层沥青路面弯沉的影响,同时,分析了在不同厚度沥青面层及不同半刚性基层弹性模量情况下,土基横观各向同性特性对路面结构关键性设计指标的影响,并由此得出一些有益的结论。

1 基于横观各向同性沥青路面结构的求解以及路面结构的分析程序

通过对横观各向同性力学的平衡方程、几何方程和应力-应变方程联合求解,可得出下列关系式

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} u \\ w \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\frac{\partial}{\partial r} & 0 & c_1 \\ c_2(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r}) & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r}) \\ -c_4(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r\partial r} - \frac{1}{r^2}) & 0 & c_5 \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ w \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u, w 均为位移; σ_z, τ_{rz} 均为应力; c_{ij} 为刚度系数($i, j = 1, 2, 3, 4$); $c_1 = 1/c_{44}$; $c_2 = -c_{13}/c_{33}$; $c_3 = 1/c_{33}$; $c_4 = c_{11} - c_{13}^2/c_{33}$; $c_5 = c_{12} - c_{23}^2/c_{33}$ 。

对式(1)的柱坐标 r 轴进行 Hankel 积分变换,得

$$\frac{d\tilde{X}(\xi, z)}{dz} = A(\xi)\tilde{X}(\xi, z) \quad (2)$$

式中: $\tilde{X}(\xi, z)$ 为位移应力逆变换, $\tilde{X}(\xi, z) = [\tilde{u}, \tilde{w}, \tilde{\sigma}_z, \tilde{\tau}_{rz}]^T$; $A(\xi)$ 为系统矩阵,

$$A(\xi) = \begin{bmatrix} 0 & \xi & 0 & c_1 \\ c_2\xi & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\xi \\ c_4\xi^2 & 0 & -c_2\xi & 0 \end{bmatrix}; \tilde{u}, \tilde{w}, \tilde{\sigma}_z, \tilde{\tau}_{rz} \text{ 分别为}$$

$u, w, \sigma_z, \tau_{rz}$ 的 Hankel 变换。

式(2)的解为

$$\tilde{X}(\xi, z) = \exp[A(\xi)z]\tilde{X}(\xi, 0) \quad (3)$$

其中, $\exp[A(\xi)z]$ 为系统的状态转移矩阵,可根据 $A(\xi)$ 特征值的两种情况求得,记为 G_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, 4$)^[7], 则式(3)可写为

$$\tilde{X}_n(\xi, h_n) = G_n \cdots G_1 \tilde{X}(\xi, 0) = G_n(G_{n-1} \cdots G_1)\tilde{X}(\xi, 0) \quad (4)$$

式中: G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 层的状态转移矩阵,由该层的材料参数确定。

对横观各向同性多层体系的求解就变为对 $\tilde{X}(\xi, z)$ 的初始值 $\tilde{X}(\xi, 0)$ 的求解。在轴对称荷载作用下, $\tilde{\sigma}_z$ 的初始值 $\tilde{\sigma}_z(\xi, 0)$ 是已知的, $\tilde{\tau}_{rz}$ 的初始值 $\tilde{\tau}_{rz}(\xi, 0) = 0$, 所以问题就变成求 \tilde{u}, \tilde{w} 的初始值

$\bar{u}(\xi, 0)$ 、 $\bar{\omega}(\xi, 0)$,从而建立起基于横观各向同性的路面响应模型。

根据所建立的横观各向同性的路面计算理论,编制了可用于计算各层都为横观各向同性的路面力学计算程序 ANISOLAYER。该程序可计算路面结构内所有的力学量。

ANISOLAYER 程序主要由 4 部分组成:① 初始设计参数输入;② 各层矩阵的计算;③ 初始值解的计算;④ 所求力学量的计算。其中,矩阵计算将耗费计算时间的 2/3;无穷积分采用 Gauss 近似积分法,插值点数取较高精度的 32 点。经过较多的试算发现,第一积分区间将决定积分值的阶数,一般前 5 个区间就可满足工程精度计算要求,这与国内外学者采用的各向同性的计算程序结果相一致。

2 面层及土基材料横观各向同性特性对半刚性基层路表弯沉的影响

结合中国典型的半刚性路面结构,给出实例分析路面材料横观各向同性特性对路表(路表面)弯沉的影响,其中也对面层材料横观各向同性特性的影响进行了分析。

路面结构由 3 层组成,面层、基层和路基。沥青面层垂直弹性模量分别为 1 000、1 500、2 000 MPa,厚度为 12 cm,各向异性度(水平弹性模量与垂直弹性模量之比)分别为 0.2、0.3、0.4、0.5、1.0;半刚性基层弹性模量为 1 200 MPa,厚度为 50 cm;路基垂直模量分别为 50、70、90 MPa,各向异性度分别为 0.9、1.0、2.0、3.0、4.0。现分别研究面层及土基材料各向异性度的变化对路表弯沉的影响。

假定土基为各向同性体,弹性模量为 70 MPa,面层各向异性度对路表弯沉的影响如图 1 所示。

假定沥青层为各向同性体,弹性模量为 1 500 MPa,土基各向异性度对路表弯沉变化如图 2 所示。

以上分别分析了面层、土基的各向异性度对路表弯沉的变化。总体上讲,无论是面层还是土基,其

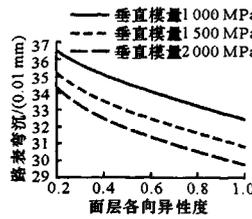


图 1 面层各向异性度与路表弯沉的关系

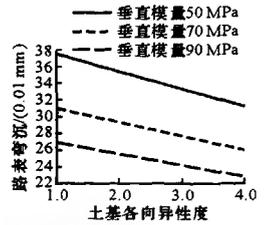


图 2 土基各向异性度与路表弯沉的关系

各向异性度对路表弯沉的影响变化趋势基本一致,其中土基各向异性度的变化对路表弯沉的影响具有较好的线性关系。

3 土基材料横观各向同性特性的半刚性基层沥青路面结构的分析

土基的横观各向同性特性已被国内外众多的试验证实,因此,本文只重点分析土基对路面结构的影响。沥青面层厚度分别取 9 cm 和 15 cm 两种情况,半刚性基层模量在较大范围内变化(以模拟半刚性基层的破坏过程),结合路面结构关键性设计指标,共分析了土基对路表面弯沉、半刚性基层层底拉应力及路基顶面垂直压应变等多项指标。由于传统的半刚性基层沥青路面在荷载作用下,经路面结构分析,其沥青层底应变基本为压应变或较小的拉应变,故本文对此项指标未做分析。

3.1 15 cm 厚度沥青面层的结构计算

假定沥青面层和半刚性基层为各向同性体,土基为横观各向同性体;面层弹性模量为 1 800 MPa,厚度为 15 cm,基层厚度为 55 cm,弹性模量 E_2 分别取 300、1 300、2 000、30 000 MPa,土基为横观各向同性体,垂直向模量为 50 MPa,水平向模量分别取 45、50、100、150、200 MPa(即各向异性度分别为 0.9、1.0、2.0、3.0、4.0)。

根据计算数值,绘制结构的影响如图 3 所示。

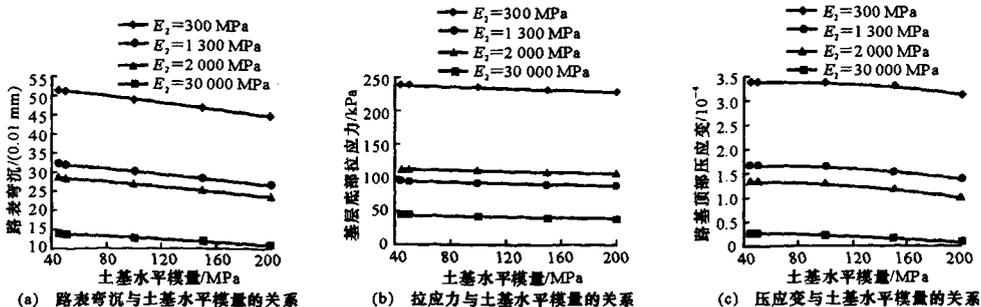


图 3 15 cm 厚度沥青面层结构的影响

3.2 9 cm 厚度沥青面层的结构计算

设定沥青面层的厚度为 9 cm,其他情况与 15

cm 厚度沥青面层相同,运用 ANISOLAYER 程序计算,根据计算数值,绘制结构的影响如图 4 所示。

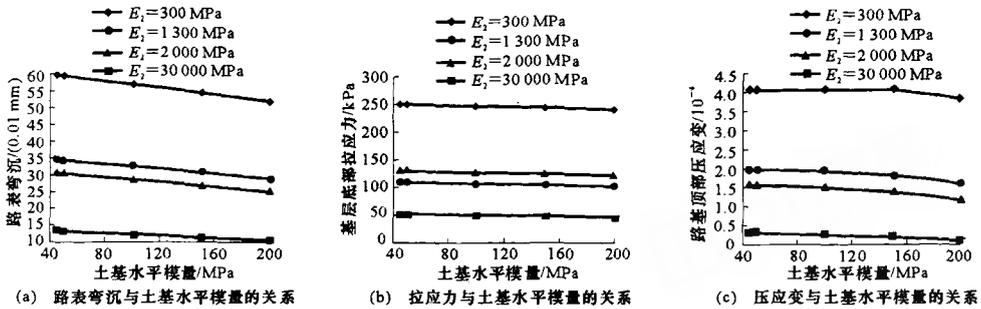


图 4 9 cm 厚度沥青面层结构的影响

4 结 语

(1)随着土基水平弹性模量的增大,从路表弯沉、半刚性基层底部拉应力以及路基顶部压应变来看,都延长了路面的使用寿命。

(2)土基水平模量的变化,使路表弯沉及半刚性基层底部拉应力呈现出较好的线性相关性,而路基顶部的压应变呈现出较好的二次曲线,这为预测和计算不同土基水平模量下的设计指标提供了较好的理论基础。

(3)随着半刚性基层弹性模量的增大,土基水平模量的变化对路表弯沉及基层底部拉应力的敏感性将降低,而对路基顶部压应变的敏感性则更加显著,但其绝对值却较低。

(4)无论是面层还是基层,其各向异性度对路表弯沉的影响曲线变化趋势是一致的。

参考文献:

References:

[1] Graham J, Houlsby G T. Anisotropic elasticity of a natural clay[J]. Geotechnique,1983,33(2):165-181.
 [2] Tutumluer E, Thompson M R. Anisotropic modeling of granular bases[R]. Chicago: University of Illinois,

1998.
 [3] Allen J. The effect of non-constant lateral pressures of the resilient response of granular material[D]. Chicago: University of Illinois,1973.
 [4] Tutumluer E. Anisotropic behavior of unbound aggregate [R]. Chicago: University of Illinois,1998.
 [5] 曾凡奇,黄晓明. 超载对沥青路面的影响[J]. 交通运输工程学报,2004,4(3):8-10.
 ZENG Fan-qi, HUANG Xiao-ming. Asphalt pavement stress under overloading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2004,4(3):8-10.
 [6] 刘 杰,张可能. 复合地基荷载传递规律及变形计算 [J]. 中国公路学报,2004,17(1):20-23.
 LIU Jie, ZHANG Ke-neng. Load transfer law and deformation calculating of the composite foundation [J]. China Journal of Highway and Transport,2004, 17(1):20-23.
 [7] 栗振锋,胡长顺. 轴对称横观各向同性半无限体表面位移的求解[J]. 长安大学学报:自然科学版,2002,22 (5):13-16.
 LI Zhen-feng, HU Chang-shun. Solution of semi-infinite surface dislocation of axissymmetrical transverse isotropy [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2002,22(5):13-16.

中国公路总里程达 358 万 km

从改革开放之初的 89 万 km 到 2007 年年底的 358 万 km,30 年间中国公路总里程翻了两番。在 2008 年 9 月 17 日上午举行的第十届中国科协年会上,中国公路学会副理事长、交通部原总工程师凤懋润在题为《架桥铺路、造福民生——中国公路桥梁自主创新之路》的报告中,回顾了 30 年来中国交通发展的历史轨迹。报告强调,中国高速公路在突破了中国要不要修高速公路的思想束缚之后,1988 年实现了零的突破,20 年后达到了 54 000 km。其中,在第一个 10 年里,中国高速公路建设以年均 858 km 速度向前延伸,而后 10 年年以 5 000 km 的速度增长。