

沥青路面沥青层剪应力变化简化模型研究

许 严, 孙立军

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 根据层状弹性理论利用有限元软件 ANSYS 建立了计算多层沥青路面的有限元模型, 并利用其计算多层沥青路面结构的沥青层剪应力沿深度方向的分布规律, 通过计算大量结构分析总结出沥青层剪应力随着面层厚度、基层模量和基层厚度改变的变化规律; 在这些规律的基础上通过修改伽马分布的密度函数的公式试算得出了沥青面层沿深度方向剪应力规律曲线的数学方程. 结合此方程和本课题组研究的车辙预估方程编纂了计算剪应力分布和路面车辙预估的应用软件.

关键词: 沥青路面; 剪应力; ANSYS; 伽马分布; 车辙预估
中图分类号: U 416.221 **文献标识码:** A

Research on Simplified Model for Variation of Shear Stress of Asphalt Layers in Asphalt Pavements

XU Yan, SUN Lijun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The model of the multi-layer asphalt pavements is built with the finite element software ANSYS according to the elastic layer system theory. Based on the model, the shear stress distribution along the depth of the asphalt layer in asphalt pavements is calculated. The shear stress distribution changing rules of the asphalt layer as thickness of surface, modulus of base or thickness of base change are found by calculating lots of structural compositions. Based on these rules a shear stress curve functional equation along the depth of the asphalt layer is obtained by modifying the probability density function of the Gamma Distribution. Software used calculating shear stress and pavement rut is programmed according to the function above and the function of pavement rut evaluation.

Key words: asphalt pavement; shear stress; ANSYS; Gamma distribution; rut evaluation

随着我国经济的高速发展, 高等级公路的建设也蓬勃开展, 高等级公路总里程与日俱增. 但同时, 由于交通量和车辆荷载的激增, 新建高速出现了大量的早期损坏. 早期损坏与沥青层混合料的抗剪强度不足有关^[1], 而沥青层的最大剪应力的位置、大小和剪应力沿沥青层深度的变化与路面结构各层的厚度与模量组合有关^[2]. 目前, 多用 ANSYS 等有限元软件计算分析沥青路面的沥青层剪应力, 分析每一个结构都要进行有限元建模、软件计算、数据读出和分析数据四部分工作, 大量结构计算时费时费力. 因此, 本文的主要工作是利用 ANSYS 软件计算大量路面结构的剪应力, 总结沥青层剪应力的分布规律, 建立沥青层剪应力沿深度方向的分布规律的数学模拟方程, 为沥青路面沥青层剪应力计算和沥青路面车辙预估提供便利.

1 沥青层剪应力沿深度方向的分布规律

1.1 建立多层沥青路面的有限元模型

多层沥青路面有限元模型参考文献[2-3]建立, 采用 8 节点 6 面体单元. 边界条件假设为: 底面完全固定, 左右两侧面没有横向位移, 前后两侧面没有纵向位移, 层间接触状态均为完全连续. 计算荷载为经标准轴载转化而成的双矩形荷载; 标准荷载为轮胎接地压强为 0.7 MPa, 单轮传压面当量圆直径为 21.30 cm 的双圆均布荷载, 将单轮当量圆作用范围折算为等效轮压作用范围为 18.9×18.9 cm 的正方形, 双轮中心距为 32 cm, 两侧轮隙间距 182 cm. 有限元模型如图 1 所示.

收稿日期: 2010-11-21

基金项目: 江西省交通运输厅科技资助项目(2009C0001)

第一作者: 许 严(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为路面结构与材料. E-mail: xuyan719@yeah.net

通讯作者: 孙立军(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为道路与交通工程. E-mail: ljsun@tongji.edu.cn

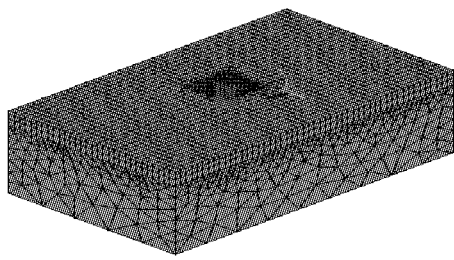


图 1 路面结构有限元模型

Fig.1 The finite element model of pavement structure

1.2 典型结构的选取及计算

1.2.1 计算的基本假定

影响路面结构剪应力的结构本身因素有各个面层的厚度及模量、基层厚度及模量、底基层厚度及模量、土基模量和各层的泊松比. 本文的核心内容是建立剪应力沿深度变化规律的数学模拟方程, 如果将如此多的结构因素都考虑到, 变量将会超过十几个, 势必会给剪应力规律曲线的函数拟合带来巨大的困难. 因此, 参考规范 JTG D50—2006^[4] 在本文的计算中, 面层统一模量 1 500 MPa, 底基层为级配碎石 20 cm、350 MPa, 土基固定 40 MPa, 各层泊松比分别为 0.35(面层统一)、0.2(基层)、0.35(底基层)和 0.4(土基). 而变化的因素定为三个, 即面层的总厚度、

基层的厚度和基层的模量, 如图 2 所示.

面层 1 500 MPa, $\lambda=0.35$ 、厚度?
基层模量? $\lambda=0.35$ 、厚度?
底基层模量 350 MPa, $\lambda=0.35$ 、厚度 20 cm
土基模量 40 MPa, $\lambda=0.40$

图 2 路面结构

Fig.2 Pavement structure

1.2.2 结构的选取及计算

结合实际路面结构的应用情况, 按照以下三种情形计算分析多层路面结构的剪应力变化规律.

(1) 面层 1 500 MPa 全厚, 基层 40 cm 不变, 变化面层厚度 (10, 15, 18, 20, 25 cm) 和基层模量 (3 000, 5 000, 10 000, 15 000, 20 000 MPa).

由图 3 可见, 对于同一个基层模量和厚度, 面层从 10 cm 到 25 cm, 最大剪应力沿深度方向的位置出现 4.5, 5.5, 3.5 cm(左右) 的变化趋势; 最大剪应力大小逐渐减小, 但减小值较小. 对于同一个面层厚度, 随着基层模量增加各个深度处剪应力逐渐增加, 但是最大剪应力出现的深度位置不变. 随着面层厚度的增加, 基层模量的变化对沥青层剪应力的影响逐渐减小. 面层厚度为 18 cm 和 20 cm 的剪应力分布也有相似的图像.

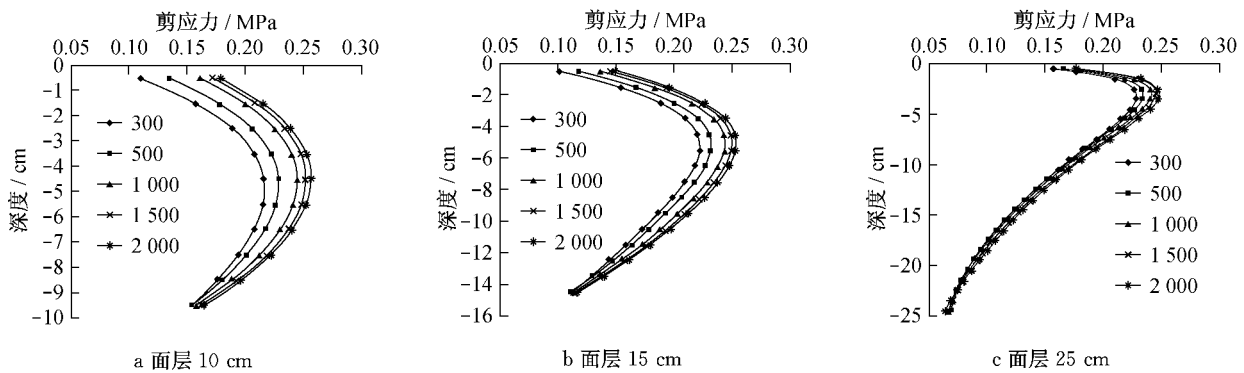


图 3 同一基层厚度不同基层模量时的剪应力分布

Fig.3 Shear stress of different base modulus with the same base thickness

(2) 面层 1 500 MPa 全厚, 面层 15 cm 厚度不变, 变化基层模量 (3000/5000/10000/15000/20000 MPa) 和基层厚度 (60/50/40/30/20 cm).

由图 4 中 a、b、c 可见: 对于同一基层厚度, 基层模量从 3000 到 20000 MPa, 面层各个深度处剪应力均逐渐增加(基层 20 cm 除外), 最大剪应力的深度基本不变在 5 cm 左右; 对于同一基层模量, 基层厚度从 60 到 20 cm, 面层各个深度处的剪应力逐渐减小, 最大剪应力的深度基本不变在 5 cm 左右; 当基层厚度为 20 cm 且模量 $\geq 10\,000$ MPa 时, 沥青层各深度处的剪应力减小明显. 基层模量为 5000 和

15000 MPa 时剪应力分布也有相似的图像.

(3) 面层 1 500 MPa 全厚, 基层模量 5 000 MPa 不变, 变化面层厚度 (10, 15, 18, 20, 25 cm) 和基层厚度 (60, 50, 40, 30, 20 cm).

由图 5 可见, 对于同一个面层厚度, 随着基层厚度减小, 沥青层各个深度处剪应力逐渐减小. 对于同一个基层厚度, 随着面层厚度增加, 最大剪应力略有增大可以认为保持不变, 最大剪应力深度呈现 4.5–5.5–3.5 cm(左右) 的变化趋势. 当面层 10 cm, 基层 20 cm 时, 剪应力出现了明显的减小. 面层厚度为 18 和 20 cm 时, 剪应力分布也有相似的图像.

通过对 75 种典型路面结构的计算发现:随着基层厚度和模量的增加沥青层的剪应力有增大的趋势,但最大剪应力出现的深度位置基本不变;当面层和基层的厚度同时很小时,沥青层剪应力明显减小,此时结构层的最大剪应力不在沥青层,此厚度的结

构一般不适于承受标准荷载 100 kN;固定一个基层和模量时,随着面层厚度的改变,从 10 cm 到 25 cm,最大剪应力位置出现 4.5,5.5,3.5 cm(左右)的变化趋势,且面层厚度的增加会减小沥青层各个深度处的剪应力。

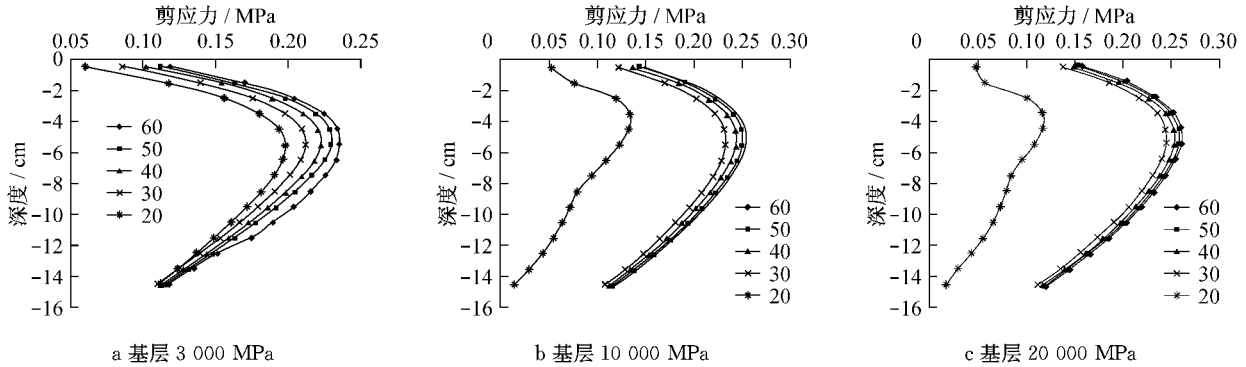


图 4 同一面层厚度不同基层厚度时的剪应力分布

Fig.4 Shear stress of different base thickness with the same surface thickness

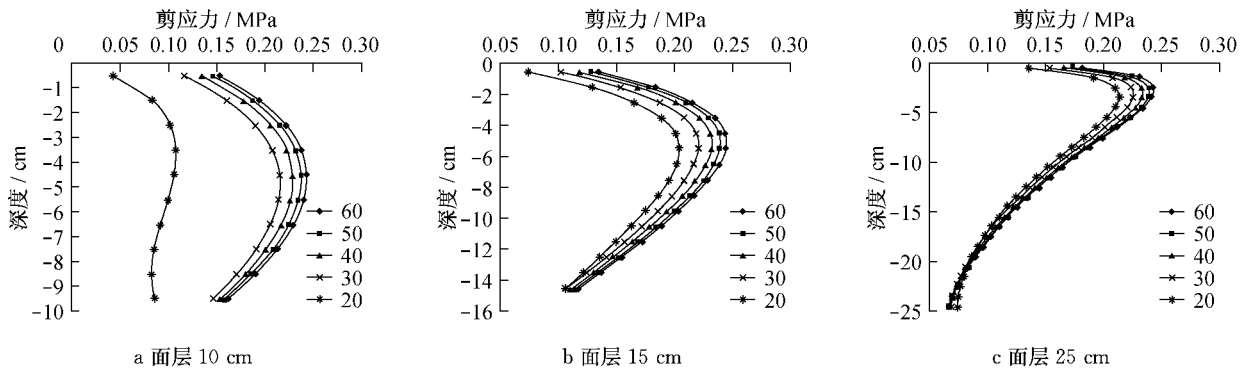


图 5 同一基层模量不同基层厚度时的剪应力分布

Fig.5 Shear stress of different base thickness with the same base thickness

2 剪应力沿深度方向变化规律的数学模拟

通过大量计算发现沥青层剪应力沿深度方分布的曲线形状变化很稳定,呈左右不对称的正态分布曲线形状,经过对各种统计分布的研究发现,伽马分布的密度函数随着参数的变化,其曲线形状能很好的反应剪应力沿深度的变化,所以通过试算的方式,修改此已知函数曲线的方程来拟合较复杂的剪应力变化的曲线。

2.1 伽马分布的密度函数介绍

参考文献[5-6]连续型随机变量 x 如果概率密度分布函数 $f(x)$ 符合 $f(x) = \frac{x^{a-1}e^{-x/b}}{b^a\Gamma(a)}$, 其中, $x \geq 0, a > 0, b > 0, \Gamma(a) = \int_0^\infty x^{a-1}e^{-x}dx$, 这个概率密度函

数称为伽马分布,即皮尔逊Ⅲ型分布。它的曲线有一个峰,但左右不对称。如果变量的下限不是 0,而是另外一个有限值 λ ,那么它仅影响分布函数在 x 坐标中的位置而不影响函数的形状。式中, a 为形状参数,不同的值可以产生不同形状的曲线, b 为单元的尺度, [4-5] 如图 6 所示。

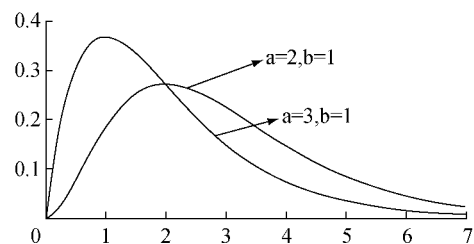


图 6 伽马分布概率密度函数

Fig.6 Probability density function of the Gamma distribution

2.2 利用伽马分布的概率密度函数试算典型结构的曲线的函数方程

通过计算发现,基层厚度和模量的变化对剪应力的大小影响很有规律且对最大剪应力的深度没有影响,而面层厚度的变化对最大剪应力的深度有较大的影响,所以,在选取试算的典型结构时,首先固定了一个基层厚度(40 cm)和模量(5 000 MPa),然后变化面层厚度(10,15,18,20,25 cm).分别对这 5 个典型结构进行试算拟合,如图 7 所示.

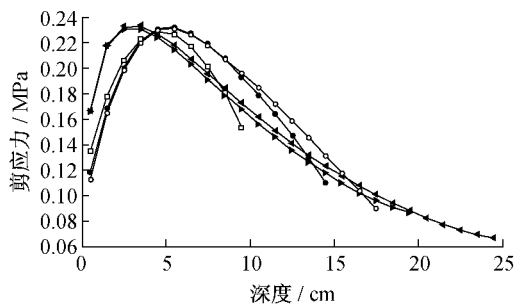


图 7 五种典型结构

Fig.7 5 typical structures

利用 Matlab 软件进行试算,取深度 x (单位: cm)除以 3 代入式 $f(x)=\frac{(x/3-\lambda)^{a-1}e^{-(x/3-\lambda)/b}}{b^a\Gamma(a)}+k$ 中使剪应力曲线和密度函数曲线的横坐标相近便于试算.式中共有 a,b,λ,k 等 4 个未知参数,通过试算可得到 5 个结构的 4 个参数见表 1.

表 1 5 个结构的参数表

Tab.1 Parameters of 5 typical structures

面层厚度/cm	a	b	λ	k
10	4.10	0.92	-1.31	-0.010
15	3.80	1.10	-1.25	0.021
18	2.50	1.50	-0.45	0.026
20	1.60	2.30	-0.27	0.034
25	1.50	2.48	-0.15	0.037

图 8 是 4 个参数分别对应 5 个结构的大致变化规律.

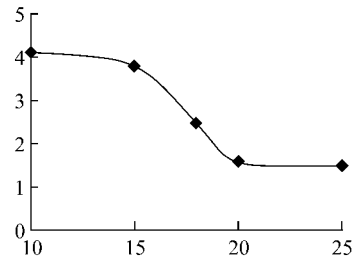
由图 8 可见,4 个参数随着面层厚度的变化呈现出明确的大小变化趋势,但是变化趋势太过复杂无法得出各自的简化规律,为了能够继续使用这些结果,只能退而求其次,以表 1 作为不同面层厚度方程的参数取值表,其余厚度均内插或外延取值.

即,对于固定的基层厚度(40 cm)和模量(5 000 MPa),不同厚度不同深度的剪应力公式为

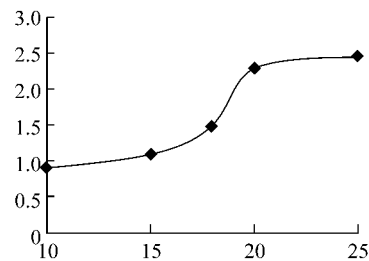
$$y=\frac{(x/3-\lambda)^{a-1}e^{-(x/3-\lambda)/b}}{b^a\Gamma(a)}+k \quad (1)$$

式中: x 为深度,以 cm 为单位的数值代入; y 为剪应力,单位为 MPa;其余 4 个参数按照表 1 要求取

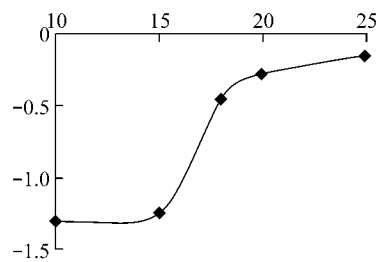
值.备注:小于 10 cm 按照 10 cm 和 15 cm 的取值外延取值,大于 25 cm 按照 20 cm 和 25 cm 的取值外延取值,其余厚度皆根据表中已知数值内插取值.



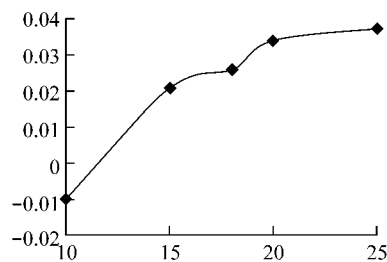
a 参数 a



b 参数 b



c 参数 λ



d 参数 k

图 8 参数规律表

Fig.8 Parameter rules

另取一些面层厚度,按照上述规律验证,见表 2.

表 2 验证表

Fig.2 Verification of parameters

面层厚度/cm	a	b	λ	k	效果
12.0	4.10	0.92	-1.31	-0.010	好
16.5	3.80	1.10	-1.25	0.021	较好
22.0	2.50	1.50	-0.45	0.026	好
30.0	1.60	2.30	-0.27	0.034	好

图 9 两个厚度的验证图,图中点线为验证结构

的应力连线图,非点线为拟合公式绘出的图像,由图像可见,两条线重合度非常高,即考虑面层厚度的4个参数的内插取值是可取的。

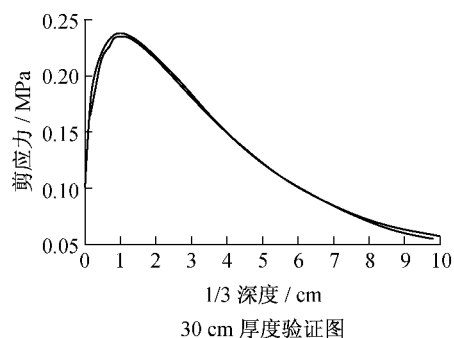
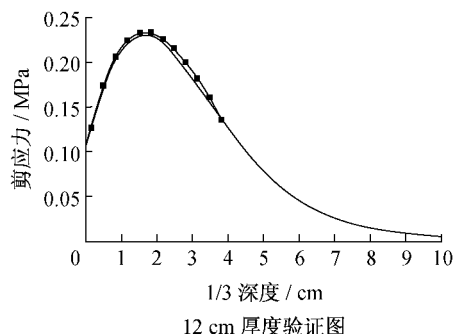


图9 两种厚度的验证

Fig.9 2 kinds of thickness

2.3 考虑基层模量和厚度变化的剪应力函数公式

根据计算结果可知,沥青层的剪应力随着基层厚度和模量的增大而增大,且由图像可见,基层厚度和模量的变化得到了一簇近似曲线,所以根据此函数方程的特点,通过改变 b 和 λ 的值来反应基层厚度和模量的变化。

通过试算,引入一个参数 $r=0.12\sqrt{\frac{5000}{m}}(1-\frac{h}{40})$,即为模量和厚度影响参数,其中, m 为待算结构的基层模量; h 为待算结构的基层厚度.则剪应力的公式修改为

$$y = \frac{(x/3 - \lambda + r)^{a-1} e^{-(x/3 - \lambda + r)/(b+r)}}{(b+r)^a \Gamma(a)} + k \quad (2)$$

式中:在确定面层厚度后, a, b, λ, k 的值可在表2中查得,只需输入基层的模量和厚度算的 r 值,然后即可求得沥青层任一深度处的剪应力,也可根据函数式绘出一个确定面层厚度、基层模量和厚度的剪应力沿深度方向的曲线图像。

2.4 公式的验证

(1) 仍沿用建模时的基本假定,即面层统一模量 1 500 MPa,底基层为级配碎石 20 cm、350 MPa,

土基固定 40 MPa,各层泊松比分别为 0.35(面层统一)、0.20(基层)、0.35(底基层)和 0.40(土基).验证以下两个结构,一个是面层厚 10 cm,基层厚 30 cm、模量 5 000 MPa;另一个是面层厚 25 cm,基层厚 40 cm、模量 10 000 MPa.图中的点线为 ANSYS 软件计算的剪应力连线,非点线是根据推导的公式画出的图线。

由图 10 可见,10 cm 厚度图像非常接近真值图像,而 25 cm 厚度图像也只是在剪应力最大点处略低于真值图像 0.01 MPa 左右.可知在面层厚度统一 1 500 MPa 的条件下,此公式有较高的准确性。

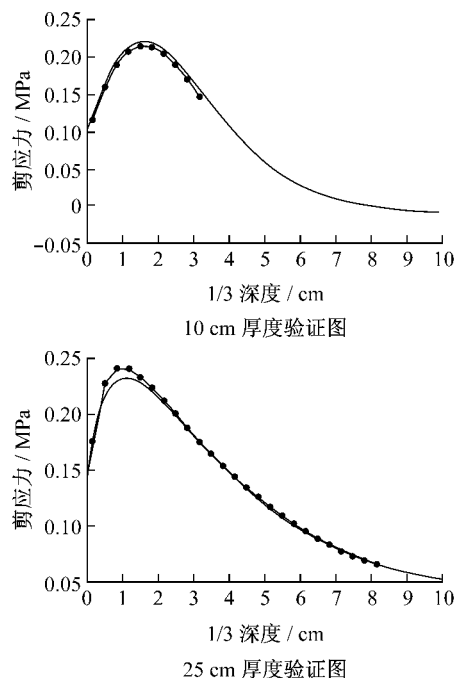


图10 两种结构的验证

Fig.10 2 kinds of structures

(2) 验算某个实际结构的剪应力分布.此结构的计算参数见表3.计算所绘图像见图11.图中的点线为 ANSYS 软件计算的剪应力连线,非点线是根据推导的公式画出的图线。

表3 验证结构三

Fig.3 Checked structure 3

结构层	厚度/mm	回弹模量/MPa	泊松比
沥青上面层	40	2 000	0.35
沥青中面层	60	1 800	0.35
沥青下面层	200	1 200	0.35
半刚性基层	350	5 000	0.20
碎砾石底基层	200	300	0.35
土基	—	40	0.40

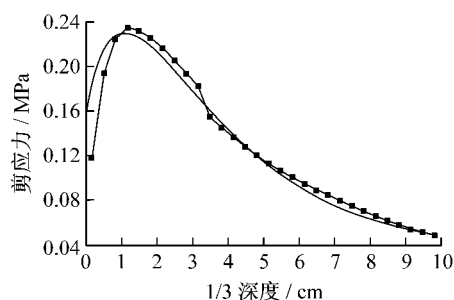


图 11 结构三

Fig. 11 Structure 3

由图可见,整体上两条图线有较好的重合度,最大偏差出现在深度较小处,仅到 0.04 MPa,且偏差出现的深度范围很小.所以公式在这个实际结构上仍保持了高的精确度,可以作为沥青路面剪应力计算的近似公式使用.

3 简化模型的应用

在压实度和路基强度足够的情况下,路面车辙的产生主要是路面在车轮的反复碾压下沥青混合料由于抗剪强度不足发生了横向的剪切性流动^[1],经过多年研究提出了车辙的预估模型^[2,7]为

$$R_D = K(1 + L_p) \sum_{i=1}^n 10^{-7.927} \cdot T_i^{3.6834} \cdot (V^{-0.8538} \cdot N)^{0.7863} \cdot \left(\frac{\tau_i}{[\tau]_i}\right)^{0.6842} \quad (3)$$

式中: R_D 为预估车辙深度; K 为工况系数,试验室测试的抗剪强度 K 取 0.610,现场取芯测试的抗剪强度 K 取 0.863; L_p 为隆起系数,与基层性质有关; T 为车辙等效温度,利用 SHRP 指南中的车辙等效温度来计算; V 为车速; N 为交通量; τ_i 为每一亚层的平均剪应力,1 cm 为一个计算亚层,平均剪应力近似为 0.5 cm 深度处的剪应力; $[\tau]_i$ 为沥青层每层的抗剪强度.

由公式可见,车辙深度由每一亚层车辙变形累加所得,每一亚层平均剪应力的计算成为了车辙预估的关键,利用剪应力计算简化模型,可以方便的计算出每一个亚层的平均剪应力,进而预估沥青面层的车辙深度.结合简化模型和车辙预估模型,编写了计算沥青路面沥青层剪应力和车辙预估的软件,以便于日常应用.

4 结语

通过大量计算得出沥青层各深度处的剪应力随

着基层模量和厚度的增加而增大;随着面层的厚度的变化(10,15,18,20,25 cm)出现了 4.5—5.5—3.5 cm(左右)的变化规律;当面层和基层的厚度同时很小时,沥青层剪应力明显减小.

在所得规律的基础上,通过修改伽马分布的概率密度函数的函数公式建立了沥青路面沥青层剪应力沿深度方向的分布规律的数学模拟方程,利用此方程可以方便的求出沥青层任一深度处的剪应力,从验证的情况看,本公式有较高的精确度.

结合剪应力计算简化模型和车辙预估模型,编写了计算沥青路面沥青层剪应力和车辙预估的软件,以便于日常应用.

参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
SUN Lijun. Structural behavior study for asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 苏凯. 沥青路面车辙产生机理及预估方法研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2007.
SU Kai. Research on mechanism and prediction method of rutting for asphalt pavements[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [3] 龚曙光. ANSYS 应用及范例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
GONG Shuguang. ANSYS application and sample analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
Ministry of Transport of P R China. JTG D50—2006 Specifications for design of highway asphalt pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [5] 郝媛. 交通流随机性特征及 breakdown 概率模型研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2009.
HAO Yuan. Research on stochastic nature of traffic flow and probability model of traffic breakdown[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2009.
- [6] 李明,陆化普,聂聪. 基于多元伽马分布的通行能力算法研究[J]. 公路工程,2009(4):137.
LI Ming, LU Huapu, NIE Cong. Urban road capacity algorithm based on multi-variant Gamma distribution [J]. Highway Engineering, 2009(4):137.
- [7] 朱琨琨. 车辙预估模型的改进及沥青混合料抗剪强度标准初探[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2010.
ZHU Kunkun. Improvement on permanent deformation evaluation model and primary investigation on criterion of shear strength for asphalt mixture[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2010.