

沥青路面结构层弯拉应力与应变的近似计算

吁新华^{1,2}, 谈至明¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司, 江西 南昌 330025)

摘要: 研究了各种条件下沥青路面结构弯拉应力和应变规律, 引入曲面系数修正竖向压应力和剪应力的影响, 引入面层弯曲中性轴下移量参数修正层间光滑与连续之间的差异, 引入面层与基层弯矩分配系数反映面层、基层弯曲曲率不同的影响; 对于模量不均匀面层, 提出了弯曲刚度等效原则换算式; 最后, 讨论了各种条件下的沥青面层底弯拉应变、半刚性或刚性基层底弯拉应力的计算精度, 其误差均不超过 5%。

关键词: 路面工程; 沥青路面; 结构疲劳; 弯拉应力和应变

中图分类号: U416

文献标识码: A

Approximate Calculation of Flexural Stresses and Tensile Strains in Asphalt Pavements

YU Xinhua^{1,2}, TAN Zhiming¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiangxi Ganyue Expressway Co., Ltd., Nanchang 330025, China)

Abstract: The flexural stresses and tensile strains in asphalt pavement layers were studied. The hood face coefficient was proposed to characterize the influences of vertical compression stresses and shear stresses on the flexural stresses and tensile strains; the neutral axis moving coefficient was introduced to describe the differences between smooth contact and full friction contact in layers; the flexure torque distribution coefficient was put forward to show the influences of different bend curvature on asphalt layer and base. As to asphalt pavement with nonuniform modulus, the surface equivalent modulus was deduced by bending rigidity equivalent principle, and then the errors of the approximate calculation methods for the tensile strains at the bottom of surface and the flexural stresses at the bottom of base in asphalt pavement with nonuniform modulus were discussed. Usually, the approximate calculation errors are less than 5%.

Key words: pavement engineering; asphalt pavement;

structure fatigue; flexural stresses and tensile strains

疲劳开裂是沥青路面最主要的破坏形式之一, 准确预估重复荷载作用下沥青路面的疲劳寿命对控制沥青路面疲劳开裂具有非常重要的意义^[1]. 许多国家和机构都对沥青路面疲劳寿命预估进行了大量的研究, 并建立了相应的疲劳寿命预估方程, 在这些研究中, 沥青面层材料的疲劳寿命预估方程大都根据弯拉应变建立, 如 Shell 设计方法、美国沥青协会设计法^[2-3]; 而半刚性基层以及刚性基层材料的疲劳寿命预估方程则是根据弯拉应力建立, 如我国沥青路面设计方法、美国波特兰水泥协会设计方法^[4-5].

车辆荷载作用下路面结构的变形微小, 可将其视为线弹性体. 因此, 沥青面层的弯拉应变和基层的弯拉应力, 可运用弹性层状体系计算软件 BISAR 或其他相关软件计算得到^[6]. 然而, 沥青材料是感温材料, 其模量是温度函数, 而沥青面层厚度方向上的温度分布是不均匀且随时间变化的, 此时, 采用上述软件分层(分层数一般小于 10)计算路面结构在使用寿命期内的弯拉应变、应力, 一方面分层数较少会带来较大的计算误差, 另外也显得较为繁琐、费时. 因此, 研究车辆荷载作用下沥青路面结构内的面层底弯拉应变和半刚性或刚性基层底弯拉应力规律, 提出相应的简便计算方法, 对沥青路面结构分析及其疲劳寿命预估具有实用价值和理论意义.

1 双层结构的面层弯拉应力、应变

先研究面层模量均匀、层间光滑的双层路面结构, 在双圆均布荷载作用下的面层弯拉应变. 路面结构及双圆荷载的示意图见图 1. 图 1 中, q 为均布荷载, δ 为荷载圆半径, E_1, E_0 分别为面层和地基模量,

收稿日期: 2011-05-04

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200831800099)

第一作者: 吁新华(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为道路工程. Email: shike914@163.com

μ_1, μ_0 分别为面层和地基泊松比, h_1 为面层厚度, z 为面层厚度坐标, 原点设于面层层底. 按现行沥青路面设计规范^[4]的规定, 比较圆形中心($x=1.5\delta$)和双圆间隙中心($x=0$)层底弯拉应变的大小, 大者作为面层结构疲劳临界点. 大量计算发现, 绝大多数情况下, 双圆间隙中心的层底弯拉应变较大; 仅当沥青面层厚度较薄且基层为柔性材料时, 圆形荷载中心的层底弯拉应变才有可能超过双圆间隙中心的层底弯拉应变, 但这种路面结构只适用于低等级公路. 因此, 本文仅讨论双圆间隙中心处的弯拉应力与应变问题. 双圆间隙中心 ($x=0$) 处面层主弯拉应变(平行于 x 轴)沿层厚方向的分布情况如图 2 所示. 图 2 中, ϵ_z/ϵ_1 为深度 z 处弯拉应变 ϵ_z 与层底弯拉应变 ϵ_1 的比, 参数 λ 为上下层的模量比 (E_1/E_0), 双圆间隙中心处垂直 x 轴的面层次弯拉应变沿层厚方向的分布情况与图 1 相似, 次弯拉应变与主弯拉应变的比记作 θ .

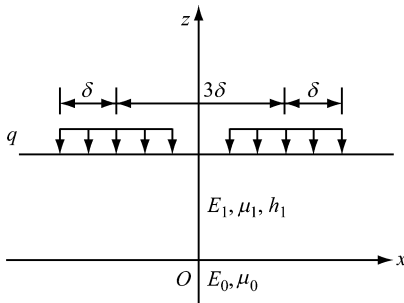


图 1 双层路面结构及外荷载示意图

Fig. 1 Two-layer pavement structure and loads

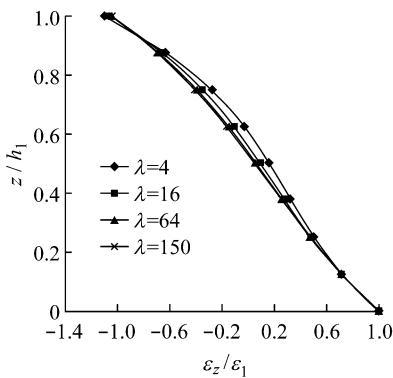


图 2 面层内弯拉应变分布图 ($h/\delta=2$)

Fig. 2 The tensile strain in asphalt pavement layer

由图 2 可知, 当模量比 λ 很大时, 面层截面变形为近似平面, 与弹性地基上薄板相似, 也就是说, 面层结构以弯曲变形为主导, 竖向压缩与剪切变形很小, 可忽略; 随着 λ 变小, 竖向压缩与剪切效应逐渐呈现, 截面弯拉应变分布由平面变为微曲面, 但弯曲变形仍为主导.

截面的弯拉应变沿层厚分布可用幂函数近似表示为

$$\epsilon = a \left(\frac{z}{h_1} \right)^{b+1} - c \quad (1)$$

式中: a 为面层弯曲曲率参数; b 为考虑竖向压缩与剪切效应的曲面系数; c 为与 a, b 相关的常数.

在不计压应变影响的条件下, 主应变方向的面层截面弯拉应力可表示为

$$\sigma = \hat{E}_1 \epsilon (1 + \theta \mu_1) \quad (2)$$

$$\hat{E}_1 = \frac{E_1}{1 - \mu_1^2}$$

式中: \hat{E}_1 可称之为面层“广义”弹性模量. 由面层与地基层间光滑条件可知, 面层截面无轴向力, 即弯拉应力合力为零, 因此式(1)改写为

$$\epsilon = \frac{\rho h_1}{2} \left[(b+2) \left(\frac{z}{h_1} \right)^{b+1} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: ρ 为面层弯曲曲率平均值.

根据式(2)和(3)可得面层截面弯矩 M 为

$$M = \int_0^{h_1} \sigma z dz = \rho \tilde{D} (1 + \theta \mu_1)$$

$$\tilde{D} = 3 \frac{b+1}{b+3} D = \frac{b+1}{4(b+3)} \hat{E}_1 h_1^3 \quad (4)$$

式中: \tilde{D} 为弯拉应变面为幂函数微曲面的截面抗弯刚度; D 为弯拉应变面为平面的截面抗弯刚度.

面层层底的弯拉应变 ϵ_1 和层底弯拉应力 σ_1 的计算式则为

$$\epsilon_1 = 2 \frac{b+3}{b+1} \frac{M}{(1 + \theta \mu_1) \hat{E}_1 h_1^2}$$

$$\sigma_1 = 2 \frac{b+3}{b+1} \frac{M}{h_1^2} \quad (5)$$

参照弹性地基薄板截面弯矩解的形式, 双圆荷载间隙中心点面层截面弯矩回归式为

$$M = \frac{q \delta^2 (1 + \theta \mu_1)}{2} \left(A + B \left(\frac{\delta}{l} \right)^2 + C \ln \left(\frac{l}{\delta} \right) \right) \quad (6)$$

$$l = \sqrt[3]{2 \tilde{D} (1 - \mu_0^2) / E_0}$$

式中: A, B, C 为回归系数, 当 $\lambda = 5 \sim 150, h_1/\delta = 0.5 \sim 4.0$ 时, $A=0.188, B=0.19, C=0.974$; l 为面层相对刚度半径.

竖向压缩与剪切效应的曲面系数 b , 随着上下层的“广义”模量比 $\hat{\lambda} (\hat{E}_1/\hat{E}_0)$ 增大而减小, 随着面层厚度增加而加大; 面层层底次、主弯拉应变比 θ 随面层相对刚度半径 l 的增大而增大. 在 $\lambda = 5 \sim 150, h_1/\delta = 0.5 \sim 4.0$ 范围内, b 值与 θ 值的回归式分别为

$$b = \frac{0.08}{\sqrt{\hat{\lambda}}} \left(\frac{h_1}{\delta} \right)^{1.8} \quad (7)$$

$$\theta = 0.85 - 1.03 \left(\frac{\delta}{l} \right) \quad (8)$$

当面层与土基层间连续时,可引入一面层弯曲中性轴下移量参数 β 来考虑层间连续与层间光滑之间的差异,此时面层层底弯拉应变 ε_{bl} 和层底弯拉应力 σ_{bl} 可表示为

$$\varepsilon_{bl} = \beta \varepsilon_1 \quad \sigma_{bl} = \beta \sigma_1 \quad (9)$$

在 $\lambda=5\sim 150, h_1/\delta=0.5\sim 4.0$ 范围内,中性轴下移量参数 β 回归式为

$$\beta = 1 - \frac{1.09}{\sqrt{\lambda}} \left(\frac{h_1}{\delta} \right)^{-0.28} \quad (10)$$

2 多层结构的弯拉应力与应变

路面结构的基层采用刚性或半刚性材料时,路面结构的应力、应变宜采用面层、基层和地基的3层结构体系模型计算,半刚性基层和地基之间可视为光滑接触。

面层和基层的总弯矩可借用上节中弯矩计算式,但截面的弯曲刚度 \tilde{D} 需改成面层和基层的合成弯曲刚度 \tilde{D}_g ,然后将求得的面层和基层的总弯曲刚度半径 l_g 代入式(6)得到面层和基层的总弯矩。

平面变形时的面层和基层的总弯曲刚度 D_g 为

$$D_g \approx \frac{\hat{E}_1 h_1^3}{12} + \frac{\hat{E}_2 h_2^3}{12} + \frac{e(h_1 + h_2)^2}{4} k_u \quad (11)$$

$$e^{-1} = \frac{1}{\hat{E}_1 h_1} + \frac{1}{\hat{E}_2 h_2}$$

式中: k_u 为面层与基层的层间接触系数,层间光滑时, $k_u=0$;层间连续时, $k_u=1$ 。

面层与基层层间光滑时,面层和基层均无轴向力,但由竖向压应力和剪切应力引起的截面曲面变形将导致面层与基层的弯曲曲率不同,需引入面层与基层弯矩分配系数 φ 来考虑其影响;面层和基层的总弯曲刚度 \tilde{D}_g 可通过系数 φ 对 D_g 修正得到

$$M_1 = \frac{\varphi D_1}{\varphi D_1 + D_2} M \quad M_2 = \frac{D_2}{\varphi D_1 + D_2} M \quad (12a)$$

$$\tilde{D}_g = \frac{\varphi \hat{E}_1 h_1 + \hat{E}_2 h_2}{\hat{E}_1 h_1 + \hat{E}_2 h_2} D_g \quad (12b)$$

式中: M_1, M_2 分别为面层与基层所承担的弯矩。

在 $\lambda=5\sim 150, h_1/\delta=0.5\sim 4.0, h_1/h_2=0.2\sim 2.0$ 时,面层与基层弯矩分配系数 φ 的回归式为

$$\varphi = 13.37 \left[\ln \left[\frac{\hat{E}_1}{\hat{E}_2} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^3 \left(\frac{\delta}{h_2} \right)^3 \right] + 10 \right]^{-1.12} \quad (13)$$

面层、基层层底弯拉应变和应力按式(5)计算,

其中考虑竖向压缩与剪切效应的曲面系数 b 按式(7)计算,只需将 $M_i, h_i, \hat{E}_i (i=1,2)$ 代替式(5)中的 M, h_1, \hat{E}_1 即可。

面层和基层层间连续时,面层和基层拥有同一弯曲中性轴,弯曲中性轴至基层层底的距离 h_z 可按平面变形条件得到

$$h_z = \frac{h_2}{2} + \frac{e(h_1 + h_2)}{2 \hat{E}_2 h_2} \quad (14)$$

此时,面层层底的弯拉应变很小,其疲劳效应可不予考虑。计算基层层底弯拉应力时,面层和基层合并成一层进行等效计算,等效层厚度 h_g 可取2倍中性轴至基层层底的距离,等效广义模量 \hat{E}_g 按刚度等效原则得到

$$h_g = 2h_z \quad \hat{E}_g = 12D_g/h_g \quad (15)$$

求出等效层厚度 h_g 、等效广义模量 \hat{E}_g 之后,可应用式(5)得到等效层层底弯拉应力 σ_{gl} ,则基层层底弯拉应力 σ_{21} 为

$$\sigma_{21} = \frac{\hat{E}_2}{\hat{E}_g} \sigma_{gl} \quad (16)$$

若基层和底基层均为半刚性、半刚性材料,或基层为二层或二层以上结构时,则可按弯曲刚度等效原则将多层结构合并成一层结构^[7],然后根据上述方法计算得到面层层底弯拉应变或基层层底弯拉应力。

3 面层模量不均匀的处理

当面层模量因温度分布等原因而造成不均匀时,可先根据弯曲刚度相等的原则,将模量不均匀的面层换算为层厚相同的等效均匀层,然后按上述方法计算等效后的面层层底弯拉应变 $\tilde{\varepsilon}_1$ 和基层层底弯拉应力 $\tilde{\sigma}_{21}$,其等效模量 \tilde{E}_1 按式(17)计算。

$$\tilde{E}_1 = \frac{12}{h_1^3} \int_0^{h_1} E_1(z) (z - z_0) z dz \quad (17)$$

式中: z_0 为不均匀模量面层中性轴坐标。

$$z_0 = \frac{\int_0^{h_1} E_1(z) z dz}{\int_0^{h_1} E_1(z) dz} \quad (18)$$

当面层与下卧层层间光滑时,面层层底弯拉应变 ε_1 需利用式(19)来修正中性轴位置的影响,而对于基层层底弯拉应力 σ_{21} 来说,面层的等效转换的影响可忽略,即 $\sigma_{21} = \tilde{\sigma}_{21}$ 。

$$\epsilon_1 = \frac{2z_0}{h_1} \tilde{\epsilon}_1 \quad (19)$$

4 沥青路面结构层弯拉应变与应力计算

下面通过几个面层温度线性分布导致其模量不均匀情况下的算例,考察上述近似计算方法的精度.表 1~4 列出了不同条件下由上述近似计算方法得到的面层层底弯拉应变和基层层底弯拉应力,与由弹性层状体系计算软件BISAR得到结果相比的偏

表 1 双层结构、层间光滑时面层层底弯拉应变误差

Tab.1 The errors of the tensile strain at the bottom of pavement of the two-layer structure (smooth contact)

h ₁ /m	T _g /(°C · m ⁻¹)	弯拉应变误差/%		
		5*	40*	150*
0.08	-80	0.45	0.71	0.63
	160	-1.60	-1.78	-1.57
0.16	-65	1.68	1.62	1.32
	130	-3.07	-2.74	-2.41
0.24	-55	2.64	2.32	1.97
	110	-4.26	-3.53	-3.09

注: * 为 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_0 的值.

表 2 三层结构、面层与基层层间光滑时面层层底弯拉应变误差

Tab.2 The errors of the tensile strain at the bottom of pavement of the three-layer structure (smooth contact)

h ₁ /m	h ₂ /m	T _g /(°C · m ⁻¹)	弯拉应变误差/%		
			5/0.5*	40/5*	150/10*
0.08	0.15	-80	-1.08	0.50	0.50
		160	0.81	-1.59	-1.48
	0.20	-80	-1.44	0.41	0.46
		160	1.53	-1.53	-1.51
0.25	-80	-1.69	0.49	0.48	
	160	1.98	-1.56	-1.57	
0.16	0.15	-65	-0.34	1.44	1.31
		130	-0.54	-2.72	-2.38
	0.20	-65	-1.09	1.40	1.31
		130	0.65	-2.70	-2.39
0.25	-65	-1.58	1.39	1.29	
	130	1.50	-2.69	-2.47	
0.24	0.15	-55	1.26	2.26	1.95
		110	-2.86	-3.57	-3.12
	0.20	-55	0.53	2.21	1.94
		110	-1.86	-3.59	-3.12
0.25	-55	-0.02	2.18	1.91	
	110	-1.01	-3.59	-3.14	

注: * 为 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_0 与 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_2 的比值.

表 3 三层结构、面层与基层层间光滑时基层层底弯拉应力误差

Tab.3 The errors of the tensile stress at the bottom of base of the three-layer structure (smooth contact)

h ₁ /m	h ₂ /m	T _g /(°C · m ⁻¹)	弯拉应力误差/%		
			5/0.5*	40/5*	150/10*
0.08	0.15	-80	-0.17	-0.05	-0.02
		160	0.58	0.52	0.38
	0.20	-80	-0.16	-0.09	-0.06
		160	0.51	0.47	0.35
0.25	-80	-0.15	-0.09	-0.06	
	160	0.44	0.42	0.32	
0.16	0.15	-65	1.01	0.43	0.34
		130	0.01	1.20	1.04
	0.20	-65	0.76	0.36	0.31
		130	0.02	0.98	0.87
0.25	-65	0.55	0.25	0.15	
	130	0.08	0.84	0.70	
0.24	0.15	-55	2.42	0.91	0.66
		110	-0.77	1.94	1.82
	0.20	-55	2.07	0.81	0.56
		110	-0.89	1.47	1.50
0.25	-55	1.71	0.70	0.47	
	110	-0.79	1.25	1.26	

注: * 为 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_0 与 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_2 的比值.

表 4 三层结构、面层与基层层间连续时基层层底弯拉应力误差

Tab.4 The errors of the tensile stress at the bottom of base of the three-layer structure (full friction contact)

h ₁ /m	h ₂ /m	T _g /(°C · m ⁻¹)	弯拉应力误差/%		
			5/0.5*	40/5*	150/10*
0.08	0.15	-80	1.59	2.40	2.21
		160	-2.11	-4.35	-3.94
0.20	0.20	-80	1.47	2.61	2.59
		160	-1.51	-4.64	-4.60
0.25	0.25	-80	1.35	2.65	2.72
		160	-1.12	-4.52	-4.71
0.16	0.15	-65	2.44	1.49	0.43
		130	-3.83	-1.52	0.59
	0.20	-65	2.26	2.34	1.58
		130	-3.28	-3.50	-2.05
0.25	-65	2.14	2.79	2.25	
	130	-2.84	-4.49	-3.51	
0.24	0.15	-55	3.35	0.40	-1.17
		110	-4.82	2.14	5.20
	0.20	-55	3.09	1.50	0.15
		110	-4.45	-0.64	1.69
0.25	-55	2.89	2.18	1.18	
	110	-4.04	-2.59	-0.58	

注: * 为 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_0 与 \hat{E}_{1m}/\hat{E}_2 的比值.

差.其中,表1为双层结构、层间光滑时的结果;表2和表3分别为三层结构、面层与基层间光滑的结果;表4为三层结构、面层与基层间连续的结果.沥青面层沿层厚的广义模量表示为

$$\hat{E}_1(z) = \hat{E}_{1m} \times 10^{\alpha T_g} \left(\frac{h_1}{2} - z\right) \quad (20)$$

式中: \hat{E}_1 为面层中点广义模量,MPa; T_g 为面层的温度梯度, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$; α 为沥青混合料的热敏系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$,其值在 $0.01 \sim 0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 之间^[8],算例中取其上限 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

由表1~4可知,本文提出的沥青面层层底弯拉应变 ϵ_1 和半刚性或刚性基层层底弯拉应力 σ_{21} 的近似计算方法,具有良好精度,可满足工程要求,其中,2层结构、层间光滑时的 ϵ_1 计算误差不超过5%;3层结构、面层与基层间光滑时, ϵ_1 的误差不超过4%, σ_{21} 的误差不超过3%;3层结构、面层与基层间连续时, σ_{21} 的误差不超过5%.

5 结论

(1) 车辆荷载作用下的双层结构的沥青路面,当面层与地基层间光滑时,面层变形近似于平面,面层的截面弯矩可借用弹性地基上薄板解形式拟合,但需引入曲面系数 b 来修正竖向压应力和剪应力的影响;层间连续时,引入一个面层弯曲中性轴下移量参数 β 修正与层间光滑之间的差异,进而给出了面层层底弯拉应变和应力的计算式,以及相应系数的回归式.

(2) 对于三层结构的沥青路面,当面、基层间光滑时,通过引入弯矩分配系数 φ 来反映由竖向压应力和剪切应力引起的对面、基层的总弯曲刚度,以及面、基层所承担的弯矩量的影响;面、基层间连续时,基层层底弯拉应力可通过面、基层的综合等效

层的方法加以计算.

(3) 沥青面层材料沿厚度因温度不同而模量不均匀时,可通过弯曲刚度等效原则等效成一均匀的当量弯曲模量,从而解决了各种条件下的沥青面层层底弯拉应变、半刚性或刚性基层层底弯拉应力的计算问题,其误差不超过5%.

参考文献:

- [1] 姚祖康. 公路设计手册——路面 [M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
YAO Zhukang. Highway design manual—pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [2] Shell International Ltd. Shell pavement design manual: asphalt pavements and overlays for road traffic [R]. London: Shell International Ltd, 1981.
- [3] Asphalt Institute. Thickness design—asphalt pavements for highways and streets (MS-1) [R]. College Park: Asphalt Institute, 1981.
- [4] 中交公路规划设计院. GB/JTJ D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.
China Communications Construction Company Highway Consultants Co. Ltd., GB/JTJ D50—2006 Specifications for design of highway asphalt pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [5] The Portland Cement Association. Thickness design for concrete highway and street pavements [R]. Skokie: The Portland Cement Association, 1984.
- [6] Shell International Ltd. . BISAR 3.0 user manual[R]. London: Shell International Ltd. , 1998.
- [7] 谈至明,姚祖康. 层状结构顶面当量模量的近似计算[J]. 公路, 2003(8):5.
TAN Zhiming, YAO Zhukang. Approximate calculation of equivalent modulus of end face of layered structures [J]. Highway, 2003(8):5.
- [8] Lukanen, Erland O. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2000.