

文章编号:1671-8879(2005)05-0006-05

## 移动荷载作用下柔性路面的动力响应

张洪亮<sup>1</sup>, 胡长顺<sup>1</sup>, 许伟清<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 无锡市安阳市政建设工程有限公司, 江苏 无锡 214183)

**摘 要:**将车辆荷载的接地形状简化为矩形, 将柔性路面视作多层粘弹性半空间体, 并考虑路基材料对应变幅的依赖性, 采用修正的平面应变模型, 用传递矩阵配拉氏变换和傅立叶变换法, 对移动的平稳荷载作用下柔性路面的动力响应进行了分析, 得到了柔性路面任意深度处的应力和位移, 并将理论计算结果用模型试验进行了验证。结果表明, 移动荷载作用下柔性路面的动力响应分析方法结果正确, 计算简单, 便于应用。

**关键词:**道路工程; 柔性路面; 动力响应; 移动荷载; 多层粘弹体系; 传递矩阵; 拉氏变换; 傅立叶变换  
**中图分类号:**U416.221 **文献标识码:**A

### Dynamic response of flexible pavement under moving load

ZHANG Hong-liang<sup>1</sup>, HU Chang-shun<sup>1</sup>, XU Wei-qing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Anyang Municipal Construction Engineering Limited Company of Wuxi City, Wuxi 214183, China)

**Abstract:** Simplifying the contract shape between tire and pavement as a rectangle, considering the flexible pavement as multilayered viscoelastic half space, taking into account the strong dependency on strain of the properties of soil, based on a modified plane-strain model, this paper derived the explicit solution for the dynamic response in the flexible pavement under moving load. The combination of transfer matrix, Laplace transform and Fourier transform approach were used in the dynamic response analysis. The predictive capability of the model are verified by the laboratory model. The results show that the method to analyze the dynamic response in the flexible pavement under moving load presented in this paper is correct, simple and convenient for application. 1 tab, 5 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; flexible pavement; dynamic response; moving load; multilayered viscoelastic body; transfer matrix; Laplace transform; Fourier transform

## 0 引 言

对柔性路面进行荷载应力分析时, 传统上将车辆荷载均视作静载, 但实际上汽车以一定的速度行

驶, 路面受到的是位置变化的移动荷载。

移动车辆荷载或 FWD 荷载作用下柔性路面动力响应分析问题, 因车轮宽度并不是很大, 因此并不是平面应变问题, 需考虑三维的影响。但绝大多数

收稿日期: 2004-11-12

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2001 318 000 18)

作者简介: 张洪亮(1974-), 男, 山东山亭人, 长安大学讲师, 博士。



学者将其作为平面问题进行研究<sup>[1]</sup>,部分学者用有限元法采用三维模型进行求解<sup>[2]</sup>。用有限元求解计算量大,人为设定边界条件又会带来较大误差。Zaffir等<sup>[4]</sup>采用 Hwang 和 Lysmer 所提出的修正的平面应变模型和 Siddharthan 等所提出的有限层法,对移动车辆荷载作用下柔性路面进行了动力响应分析。该平面应变模型和三维的模型计算结果相近,但速度要快得多。但 Zaffir 等<sup>[4]</sup>的方法需联立方程组。任瑞波等<sup>[3]</sup>在分析 FWD 动荷载作用下沥青路面力学响应时采用了传递矩阵法。该方法计算简单,不需联立方程组。

本文将柔性路面视作多层粘弹性半空间体,并考虑了路基材料对应变幅的依赖性,采用 Hwang 和 Lysmer 所提出的修正的平面应变模型,用传递矩阵配拉氏变换和傅立叶变换法,对移动的平稳荷载作用下柔性路面的动力响应进行了分析,并运用文献[5]中的模型试验对理论计算结果进行了验证。

## 1 荷载分析

### 1.1 单轮荷载分析

据文献[4],将轮胎的压力简化成均布荷载  $p$ ,将轮胎的接地面简化为矩形,宽  $B = 0.6a$ ,长  $l = (0.4 + 0.3\pi)a$ ,其中: $a = \sqrt{A/0.5227}$ ,  $A$  为轮胎的接地面积。汽车荷载的纵向分布如图 1 所示。图中: $x$  表示路面纵向; $z$  表示深度方向。实际上,若单考虑 1 个荷载作用下路面的响应,汽车荷载的两侧无穷远处均应没有荷载,但为计算方便,将纵向的汽车荷载视作周期荷载,其长度为  $L$ ,在距荷载的起点  $l \sim L$  范围内荷载为 0。为与实际荷载分布相一致, $L$  需充分大。

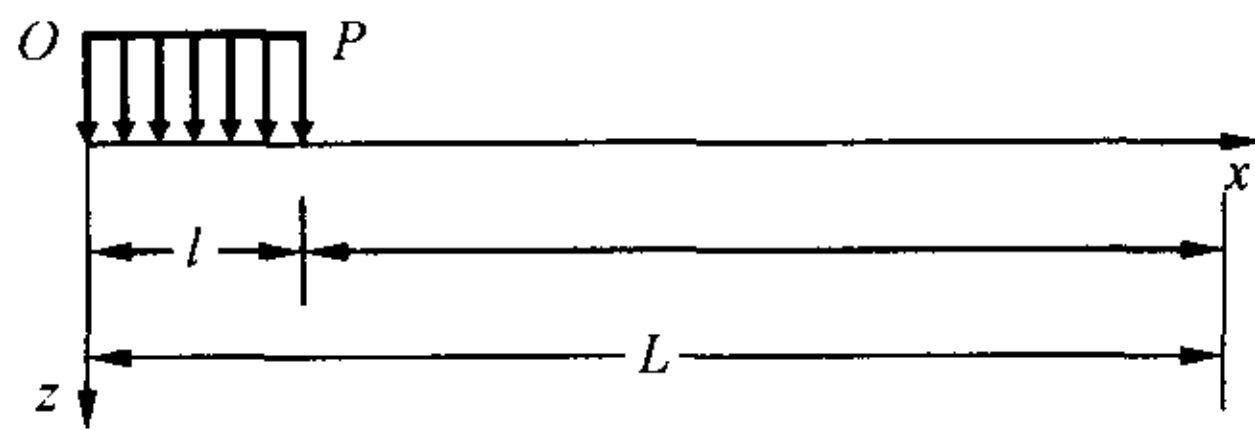


图1 单轮荷载纵向分布图

将荷载用傅里叶级数展开得

$$P_t = a_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n\omega_2(x - vt) + b_n \sin n\omega_2(x - vt)] \quad (1)$$

其中, $\omega_2 = 2\pi/L$ 。

可以求得

$$a_0 = 2P \frac{l}{L} \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2P}{Ln\omega_2} \sin n\omega_2 l = \frac{P}{\pi n} \sin 2\pi n \frac{l}{L}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$b_n = \frac{-2P}{Ln\omega_2} (\cos n\omega_2 l - 1) = \frac{P}{\pi n} \left(1 - \cos 2\pi n \frac{l}{L}\right), n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

函数  $f(t)$  的拉氏变换和傅立叶变换可分别定义为

$$\int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \text{ 和 } \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

可求得  $a_0/2$  经拉氏变换和傅立叶变换后成为

$$\left(\frac{\hat{a}_0}{2}\right) = \frac{a_0}{2} \frac{2\pi}{s} \delta(\lambda) = \frac{a_0\pi}{s} \delta(\lambda) \quad (5)$$

式中: $\delta$  为狄拉克函数;变量顶面的“—”和“^”分别为拉氏变换和傅立叶变换。

对式(1)进行拉氏变换和傅立叶变换,可求得荷载经拉氏变换和傅立叶变换后的表达式。傅立叶变换采用 256 点,式(1)求和项取 100 项,则有。当  $\lambda_n = 0$  时

$$\hat{P} = \frac{a_0\pi}{s} \quad (6)$$

当  $\lambda_n = n\omega_2 (n = 1, 2, \dots, 100)$  时

$$\hat{P} = a_n \frac{\pi(s - n\omega_2 v i)}{s^2 + n^2 \omega_2^2 v^2} + b_n \frac{-\pi(s i + n\omega_2 v)}{s^2 + n^2 \omega_2^2 v^2} \quad (7)$$

当  $\lambda_n = n\omega_2 (n = 255, 254, \dots, 156)$  时,可取  $\lambda_m = -m\omega_2 (m = 1, 2, \dots, 100)$ ,则

$$\hat{P} = a_n \frac{\pi(s + n\omega_2 v i)}{s^2 + m^2 \omega_2^2 v^2} + b_n \frac{\pi(s i - m\omega_2 v)}{s^2 + m^2 \omega_2^2 v^2} \quad (8)$$

当  $\lambda_n = n\omega_2 (n = 101, 102, \dots, 155)$  时

$$\hat{P} = 0 \quad (9)$$

### 1.2 多轮荷载分析

由于车轮对对向轮迹的影响可以忽略不计<sup>[4]</sup>,因此可以取半幅车辆进行研究。但同一侧的 2 个车轮需视作 1 个整体考虑。将 2 个单轮的等效矩形以两轮轮隙的中心为中心合并成 1 个矩形,它和单轮的等效矩形长度相同,宽度增加了一倍。多轮荷载在纵向的分布见图 2,靠近的 2 个车轮表示同一辆车的前后轮,两辆车之间的间距可根据公路上实际的车辆分布而定。当然,图 2 仅对应两辆车比较靠近的情况,对于多辆车靠近的情况可以类比得到。在计算由多轮荷载引起的柔性路面动力响应时,对

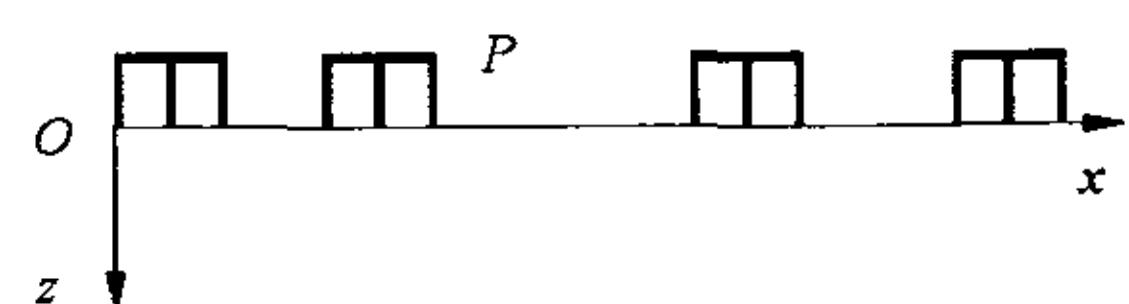


图2 多轮荷载纵向分布图



选定的计算点,分别计算各荷载在该点的响应,然后按相同的时刻将各响应相加。

## 2 传递矩阵的推导

将路基路面材料均视作一般线粘弹性体,其本构方程为

$$\left. \begin{aligned} a_1(D)S_{ij} &= b_1(D)e_{ij} \\ a_2(D)\sigma_{kk} &= b_2(D)\varepsilon_{hh} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中, $S_{ij}$ 、 $e_{ij}$ 、 $\sigma_{kk}$  和  $\varepsilon_{hh}$  分别为应力偏量、应变偏量、体积应力和体积应变,各系数为

$$\left. \begin{aligned} a_1(D) &= \sum_{k=0}^m a'_{1k} D^k, \quad b_1(D) = \sum_{k=0}^n b'_{1k} D^k \\ a_2(D) &= \sum_{k=0}^m a'_{2k} D^k, \quad b_2(D) = \sum_{k=0}^n b'_{2k} D^k \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $D^k = \frac{\partial^k}{\partial t^k}$ 。

在零初始条件下对式(10)作拉氏变换,并令

$$G(s) = \frac{b_1(s)}{2a_1(s)}, K(s) = \frac{b_2(s)}{3a_2(s)}, \text{并分别简记为 } G \text{ 和 } K,$$

则拉氏变换象空间中的本构关系为

$$\left. \begin{aligned} \hat{S}_{ij} &= 2G\hat{e}_{ij} \\ \hat{\sigma}_{kk} &= 3K\hat{\varepsilon}_{hh} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(12)代入应力偏量、应变偏量的定义式得

$$\hat{\sigma}_{ij}(s) = 2G\hat{\varepsilon}_{ij}(s) + \delta_{ij} \left( K - \frac{2}{3}G \right) \hat{\varepsilon}_{hh}(s) \quad (13)$$

将移动荷载作用在层状体系表面问题视作改进的平面应变问题,通过在二维的平面应变模型中加入特殊的粘性边界条件来考虑三维的影响,平衡方程为<sup>[4]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} - \frac{2\rho V_s}{B} \frac{\partial u}{\partial t} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{2\rho V_s}{B} \frac{\partial w}{\partial t} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: $V_s$  为剪切波波速,  $V_s = \sqrt{(G/\rho)}$ 。

在零初始条件下对式(14)进行拉氏变换,将拉氏变换象空间中线弹性力学的几何方程代入式(13),经复杂推导可得

$$\frac{\partial \hat{w}}{\partial z} = \frac{1}{K + \frac{4}{3}G} \left[ \hat{\sigma}_z - \left( K - \frac{2}{3}G \right) \right] \frac{\partial \hat{u}}{\partial x} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial z} = \frac{1}{G} \hat{\tau}_{xz} - \frac{\partial \hat{w}}{\partial x} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \hat{\sigma}_z}{\partial z} = \rho \left( s^2 + \frac{2sV_s}{B} \right) \hat{w} - \frac{\partial \hat{\tau}_{xz}}{\partial x} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \hat{\tau}_{xz}}{\partial z} = \rho \left( s^2 + \frac{2sV_s}{B} \right) \hat{u} - \frac{4G \left( K + \frac{1}{3}G \right)}{K + \frac{4}{3}G} \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2}$$

$$\frac{\left( K - \frac{2}{3}G \right) \frac{\partial \hat{\sigma}_z}{\partial x}}{K + \frac{4}{3}G} \quad (18)$$

式(15)~式(18)包括了位移 $\hat{u}$ 、 $\hat{w}$ 和应力 $\hat{\sigma}_z$ 、 $\hat{\tau}_{xz}$ ,组成方程组。对该方程组中的 $x$ 变量作傅立叶变换,并令

$$\left. \begin{aligned} U_1(z, \lambda, s) &= \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u}(z, x, s) e^{-\lambda x} dx \\ U_2(z, \lambda, s) &= \int_{-\infty}^{\infty} \hat{w}(z, x, s) e^{-\lambda x} dx \\ T_1(z, \lambda, s) &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\sigma}_z(z, x, s) e^{-\lambda x} dx \\ T_2(z, \lambda, s) &= \frac{1}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\tau}_{xz}(z, x, s) e^{-\lambda x} dx \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

则得线性微分方程组

$$\frac{\partial \hat{X}(z, \lambda, s)}{\partial z} = A \hat{X}(z, \lambda, s) \quad (20)$$

式中: $\hat{X}(z, \lambda, s) = \{U_1 \ T_1 \ U_2 \ T_2\}^T$ ,为深度 $z$ 处的状态向量; $A$ 为系数矩阵,其中半数元素为0。

据现代控制理论,式(20)的解为

$$\hat{X}(z, \lambda, s) = e^{zA} \hat{X}(0, \lambda, s) \quad (21)$$

式中: $e^{zA}$ 为单层层顶和层底之间状态向量的传递矩阵,记为 $\Gamma$ ; $\hat{X}(0, \lambda, s)$ 为多层体系表面处的状态向量。

由 $|qE - A| = 0$ ,可以求得矩阵 $A$ 的特征值分别为

$$\begin{aligned} q_{1,2} &= \pm \sqrt{\lambda^2 + \frac{\left(s^2 + \frac{2sV_s}{B}\right)}{V_s^2}} \\ q_{3,4} &= \pm \sqrt{\lambda^2 + \frac{\left(s^2 + \frac{2sV_s}{B}\right)}{V_p^2}} \end{aligned}$$

式中: $q$ 为 $A$ 的特征值的统称; $E$ 为单位矩阵; $V_s = \sqrt{G/\rho}$ ,  $V_p = \sqrt{\left(K + \frac{4}{3}G\right)/\rho}$ 。

由于矩阵 $A$ 有4个互异的特征值,所以 $A$ 与三角矩阵 $\Lambda$ 相似,即存在1个非奇异矩阵 $M$ ,使得 $A = M\Lambda M^{-1}$ , $M$ 为 $A$ 的特征值对应的特征向量组成的矩阵,将特征值代入特征方程 $qX - AX = 0$ 即可求得

$$M = \begin{bmatrix} -\frac{1}{G}(\lambda^2 + \bar{\lambda}^2) & -\frac{1}{G}(\lambda^2 + \bar{\lambda}^2) & -\frac{1}{G}\lambda^2 & -\frac{1}{G}\lambda^2 \\ 2i(\lambda^2 + \bar{\lambda}^2) & 2i(\lambda^2 + \bar{\lambda}^2) & i(2\lambda^2 + \bar{\lambda}^2) & i(2\lambda^2 + \bar{\lambda}^2) \\ i\frac{1}{G}\lambda q_1 & -i\frac{1}{G}\lambda q_1 & i\frac{1}{G}\lambda q_2 & -i\frac{1}{G}\lambda q_2 \\ -q_1\left(2\lambda + \frac{\bar{\lambda}^2}{\lambda}\right) & q_1\left(2\lambda + \frac{\bar{\lambda}^2}{\lambda}\right) & -2\lambda q_2 & 2\lambda q_2 \end{bmatrix}$$



$$\text{式中: } \bar{\lambda} = \frac{\left(s^2 + \frac{2sV_s}{B}\right)^{1/2}}{V_2}。$$

根据矩阵理论,传递矩阵

$$\Gamma = \mathbf{M}e^{z\mathbf{A}}\mathbf{M}^{-1} = \mathbf{M}\text{diag}(e^{-q_1 z}, e^{q_1 z}, e^{q_2 z}, e^{-q_2 z})\mathbf{M}^{-1} \quad (22)$$

### 3 传递矩阵在多层粘弹性体系中的应用

对于多层体系,假设层间连续,即第  $m$  层  $z'_m$  (局部坐标) 为  $h_m$  (为第  $m$  层的层厚) 处的状态向量和第  $m+1$  层  $z'_{m+1}$  (局部坐标) 为 0 处的状态向量相等,用公式表示为

$$\hat{\mathbf{X}}_{h_m}^m = \hat{\mathbf{X}}_0^{m+1} \quad (23)$$

对多层体系,按层间连续条件逐层传递就可得到整个多层体系的传递关系

$$\hat{\mathbf{X}}(z, \lambda, s) = \prod_{m=1}^N \Gamma_m \hat{\mathbf{X}}(0, \lambda, s) \quad (24)$$

式中:  $N$  表示多层体系的总层数。

在多层体系表面处,即  $z=0$  处

$$\hat{\sigma}_2 = \hat{P}, \hat{\tau}_{xz} = 0, \text{即 } T_1 = \hat{P}/\lambda, T_2 = 0 \quad (25)$$

在多层体系底面处,即  $z \rightarrow \infty$  处

$$U_1 = 0, U_2 = 0 \quad (26)$$

初始状态向量中的 2 个分量由边界条件给出,由式(24)可知,由于引入了传递矩阵,层间的接触条件可以自动满足,中间状态向量不出现,所以求解  $N$  层体系问题只求解二元一次方程组。这样,利用层底和层顶的边界条件即可求出多层体系表面处的状态向量,再利用式(24)即可求出任意深度处的状态向量。对该状态向量中的位移向量直接进行拉氏和傅氏逆变换,对应力向量乘以频率  $\lambda$  后再进行拉氏和傅氏逆变换即可得到时域内的解析解。

由于函数比较复杂,拉氏和傅氏逆变换均采用数值算法,其中拉氏逆变换采用 Crump 法<sup>[6]</sup>,傅氏逆变换采用 FFT 法。

### 4 材料特性分析

对于沥青混合料,采用 BURGERS 模型(图 3),其本构方程为

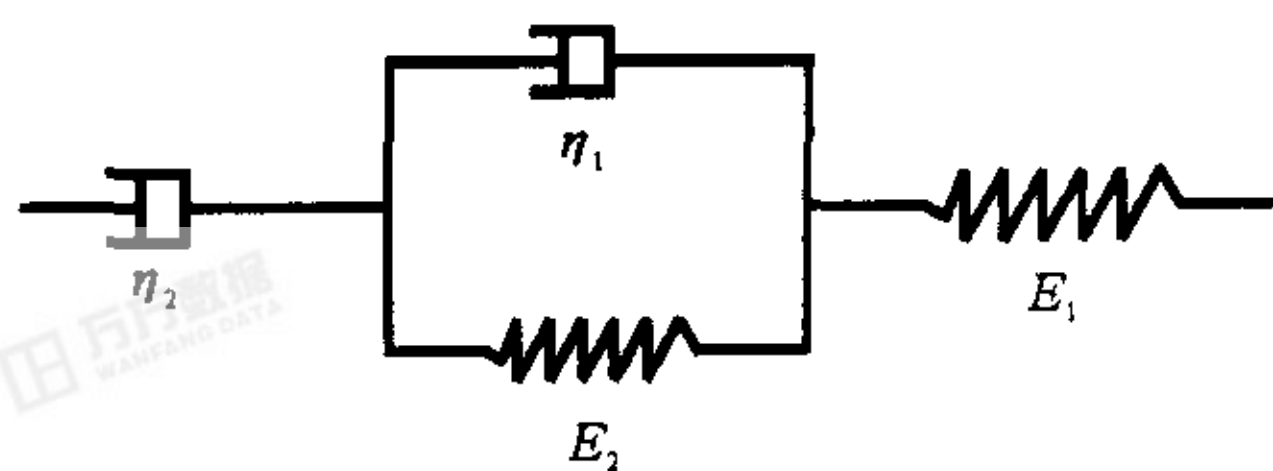


图 3 BURGERS 模型

$$\sigma(t) + \left(\frac{\eta_2}{E_2} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_1}\right)\dot{\sigma}(t) + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}\ddot{\sigma}(t) = \eta_2 \dot{\epsilon}(t) + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1}\ddot{\epsilon}(t) \quad (27)$$

对式(27)两边在零初始条件下进行拉氏变换,可以求得等效粘弹性算子为

$$E(s) = \frac{E_1 E_2 \eta_2 s + \eta_1 \eta_2 E_2 s^2}{E_1 E_2 + E_1 \eta_2 s + E_2 \eta_1 s + E_2 \eta_2 s + \eta_1 \eta_2 s^2} \quad (28)$$

对于路面基层、垫层材料和路基土,很多学者建议采用线性复阻尼模型,即认为弹性模量和阻尼比与频率和应变幅均无关。而对于路基土而言,在有工程意义的频率范围(0.1~10 Hz)内,频率对路基土剪切模量和阻尼比的影响不大,可以忽略不计,但剪切模量和阻尼比与应变幅明显相关。可用迭代法考虑土体非线性。常用的线性复阻尼模型有以下公式

$$G^* = G(1 + 2i\beta) \quad (29)$$

$$\text{和} \quad \eta = \frac{2G}{\lambda}\beta \quad (30)$$

式中:  $G^*$  为复模量,即傅氏象空间内的应力与应变的比值;  $G$  为时域内的剪切模量;  $i$  为虚数单位;  $\beta$  为阻尼比;  $\lambda$  为荷载频率。

本文推导公式采用的是用剪切模量和体积模量表征的一般粘弹性模型,故路基路面各结构层的模型需向该模型转化。

经推导可以得到如下转化公式

$$G(s) = G\left(1 + \frac{2\beta_s}{\lambda}\right) \quad (31)$$

$$K(s) = G\left(1 + \frac{2\beta_s}{\lambda}\right)\left(\frac{2}{3} + \frac{2\mu}{1-2\mu}\right) \quad (32)$$

利用式(31)、式(32)就可将复阻尼模型转换为一般的粘弹性体模型。

### 5 模型试验验证

将上述算法用 MATLAB 语言编程进行计算,并借用文献[5]的模型试验结果进行验证。该试验采用 3 层泡沫橡胶修筑路面的面层、基层以及路基,各层厚度和性质见表 1。各层之间用专用的橡胶粘结剂紧密联结在一起。模型宽 2 m,长 2.5 m,放置在水泥混凝土地面上,如图 4 所示。测点  $A_1$  位于移动荷载轮迹中心线的正下方,垂直向距顶面 5 cm,水平向位于模型的中间。在  $A_1$  处嵌入发光的二极管检测位移,用空的圆柱状钢筒驶过模型表面来施加移动荷载。均布接触压力为  $14.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ ,速度约为  $41.7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



表 1 模型材料参数

层位	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切模量/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比	阻尼 比/%	层厚/m	
					模型 1	模型 2
表层	31.4	449.2	0.2	5.0	4.0	6.5
中层	25.1	122.5	0.2	5.0	10.2	10.2
底层	17.3	49.0	0.2	5.0	51.0	101.0

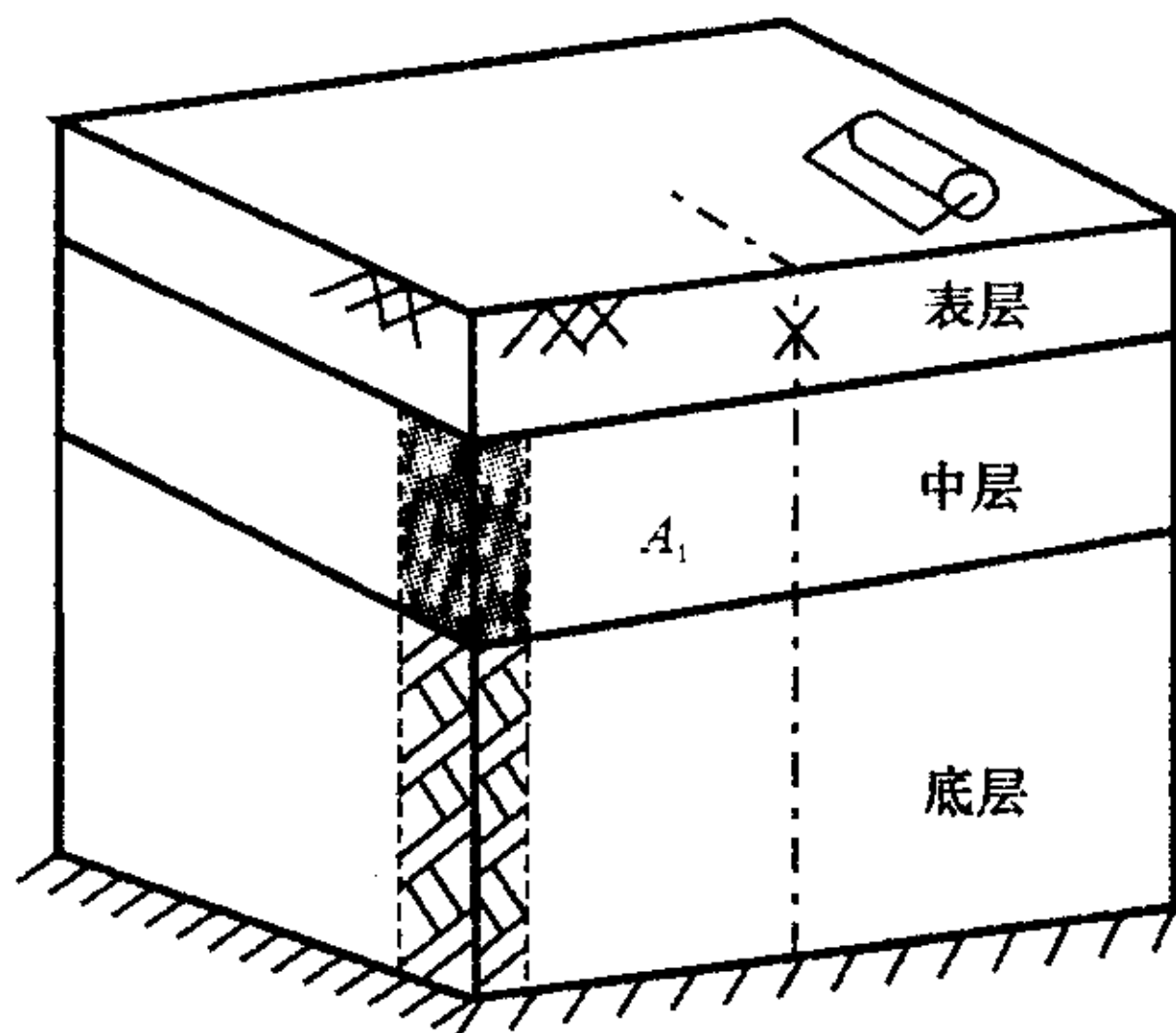


图 4 模型试验布置图

由于模型底部是水泥混凝土地面,故模型底部的位移为 0。模型各层之间由于有强的粘结剂粘结,可视为连续接触。计算和实测的测点  $A_1$  的垂直位移随时间的变化曲线见图 5。由图 5 可见,除计算值的峰值较大外,计算值和实测值基本吻合,其中模型 2 比模型 1 吻合得更好一些,这证明本文提出的计算方法是正确的。

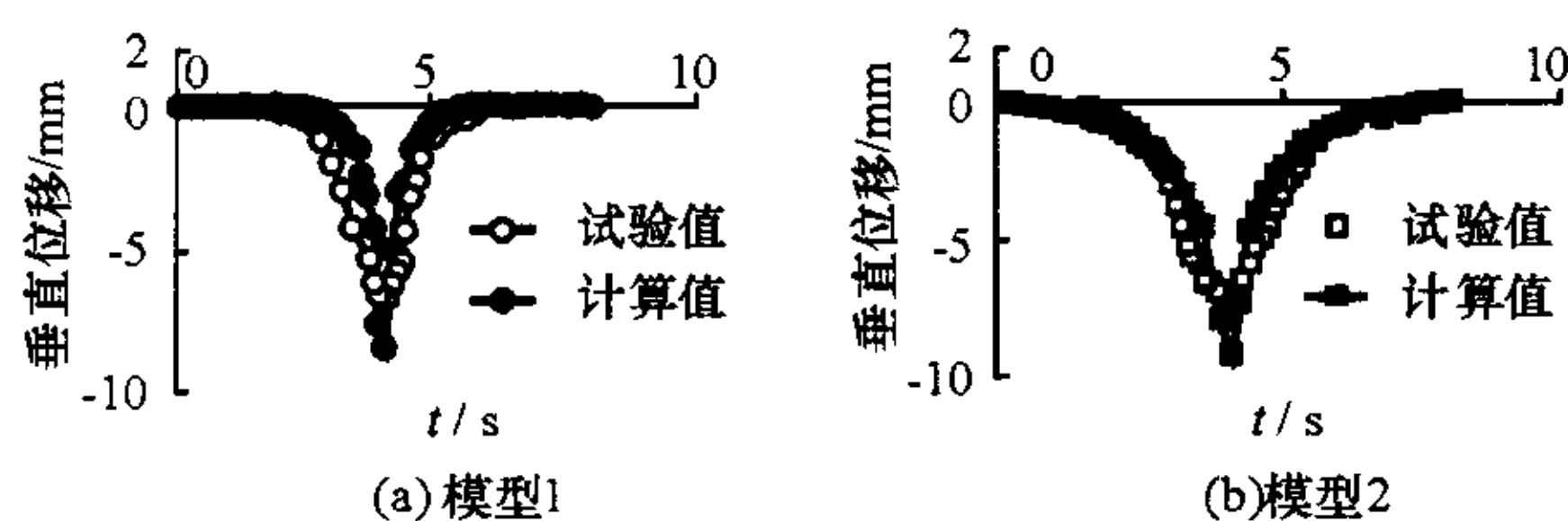


图 5 模型测点与垂直位移比较图

## 6 结 语

(1)采用修正的平面应变模型进行移动荷载作用下柔性路面动力响应分析,不仅考虑了三维的影响,而且使计算过程大大简化。

(2)用传递矩阵法求解移动荷载作用下多层粘弹性体系问题,无论层次多少,最后都归结为求解二元一次代数方程组,因而使问题大大简化。

(3)用 Crump 法进行拉普拉斯数值逆变换,用 FFT 法进行傅里叶数值逆变换,计算结果准确。

### 参考文献:

### References:

- [1] 沙爱民,江晓霞.路面动态特性分析[J].交通运输工程学报,2001,1(2):63—67.  
SHA Ai-min, JIANG Xiao-xia. Pavement dynamic characteristics analysis [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 63—67.
- [2] 郝大力,王秉纲.路面结构动力响应分析[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(3):9—12.  
HAO Da-li, WANG Bing-gang. Dynamic response of pavement structure[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(3): 9—12.
- [3] 任瑞波,谭忆秋,张肖宁.FWD动荷载作用下沥青路面层状粘弹体路表弯沉的求解[J].中国公路学报,2001,14(2):10—12.  
REN Ri-bo, TAN Yi-qiu, ZHANG Xiao-ning. Solution for solving asphalt pavement multilayered viscoelastic body surface deflection in the FWD dynamic case [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 10—12.
- [4] Zafir Z, Siddharthan R, Sebaaly P E. Dynamic pavement-strain histories from moving traffic load [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1994, 120(5): 821—842.
- [5] Siddharthan R, Zafir Z, Norris G M. Moving load response of layered soil II: Verification and application [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1993, 119(11): 2072—2089.
- [6] Crump K S. Numerical inversion of Laplace transforms using a Fourier series approximation[J]. Journal of ACM, 1976, 123(1): 89—96.

## 新型隧道防火涂料问世

一种名为 h1-3 混凝土隧道防火涂料日前在上海研制成功,经国家防火建筑材料质量监督检验中心检测,各项指标符合 q/iama86-2004《h1-3 隧道防火涂料》标准,可以满足国家现行防火规范的要求。该产品是以无机绝热材料与轻质隔热材料为主要成份的防火涂料,产品无毒、无燃、不含石棉成份,涂层能经受烃类调温火焰的长时间冲击,具有质量轻、隔声、耐潮、耐火性能优良等特点。

h1-3 混凝土隧道防火涂料适用于公路、铁路等隧道混凝土的防火被覆,也可用作民用建筑和工业厂房的预应力混凝土的防火被覆。