

基于路表应变和基频的基顶当量回弹模量研究*

张献民^{1,2}, 刘小兰³

(1.南京航空航天大学民航学院 南京,210016) (2.中国民航大学机场学院 天津,300300)

(3.天津城建大学土木工程学院 天津,300384)

摘要 基于全车模型与弹性层状体系道路模型的动态响应,首先,确定了道路动态检测区域为距离轮胎-路面接触点 0.4~0.8 m 处;其次,分析该测试区域内面层模量、面层厚度和基顶当量回弹模量对路表应变和基频的影响规律,发现路表应变随着面层模量、面层厚度和基顶当量回弹模量的增加而减小,但基频随面层厚度的增加而降低,随面层模量和基顶当量回弹模量的增加而增长;然后,借助大量的数值模型建立了距离车轮不同位置处的路表应变拟合公式、道路基频拟合公式、基顶当量回弹模量拟合公式;最后,借助现场测试结果验证了本研究方法的适用性和可靠性,为道路工程的检测维护提供依据与参考。

关键词 路表应变;基频;面层模量;面层厚度;基顶当量回弹模量

中图分类号 U416.2

引言

公路作为交通运输中最重要的基础设施,其健康状况直接影响车辆的正常通行^[1-2]。目前,主要是利用贝克曼梁、自动弯沉仪和落锤式弯沉仪(falling weight deflectometer,简称 FWD)^[3-4]对路面承载力进行检测。贝克曼梁测得的是路面静态弯沉,不能反映路面结构真实的工作状态,而且测试效率低下^[5];自动弯沉仪设备昂贵,且测试结果的准确性还有待商榷^[6-7];FWD 是通过对路面施加动载来模拟行车单轮荷载,采用模拟加载的方式对路面承载力进行检测,不能够代表真实的行车荷载,而且是停车采样,在测试过程中存在一定的安全隐患^[8-9]。因此,科学有效地进行路面承载力检测,一直是公路管理部门急待解决的技术难题。

笔者提出在车辆正常通行状态下基于路表应变和基频的道路承载能力评估新方法。首先,通过将智能传感器布置在既不影响车辆正常通行,又能有效反映道路振动特征的位置采集数据;其次,借助车路动态响应的数值模型分析面层模量、面层厚度和基顶当量回弹模量对路表应变和基频的影响规律,建立距车轮不同位置处路表应变拟合公式、道路基频拟合公式及基顶当量回弹模量拟合公式;然后,对

加速度信号进行傅里叶变换得到道路基频,借助道路基频反演基顶当量回弹模量求解路表应变;最后,通过国道 107 线南三环至高邑大市场路段的现场试验,验证了本研究方法的有效性。

1 车路动态响应模型及验证

1.1 车路动态响应模型

实际作用于道路结构的车辆荷载为动荷载,受路面不平整度的影响^[10],因此借助有限元软件建立考虑路面平整度的全车模型^[11],用 MPC184 单元模拟车身,用 Mass21 单元模拟车辆悬架和非悬架质量、俯仰和倾斜转动惯量,用 Combine14 单元模拟车辆的弹簧和阻尼单元,用结构瞬态分析中的完全法求解车辆动荷载。

综合考虑车辆荷载影响范围及计算精度和效率,并结合文献[12-13]建立长为 23 m(x 方向)、宽为 16 m(z 方向)、深为 9 m(y 方向)的道路模型(不包括面层厚度),道路结构层参数见表 1。道路模型底部为完全固定约束, x 和 z 方向仅约束该方向位移,最后质量为 30 t 全车模型以 20 m/s(72 km/h)沿路表中线行驶于平整度等级为 A 级的道路。

* 国家自然科学基金资助项目(52108333)

收稿日期:2019-05-07;修回日期:2019-08-28

表 1 结构层参数

Tab.1 Structure layer parameters

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
面层	0.14~0.30	500~6 000	0.25	2 400
面层下	9	110~5 500	0.30	1 850

1.2 车路动态响应模型验证

为了验证数值模型的可靠性,笔者将现场实测的弯沉与数值模拟的弯沉进行了对比,如图 1 所示。其中,现场实测沥青道路的结构层参数是通过 FWD 试验反演得到的(见表 2^[14]),加载车辆的前轴为单轴单轮,后轴为单轴双轮,胎压为 800 kPa,车速为 20 m/s,现场实测的弯沉数据是通过在面层轮迹中心位置埋置传感器直接测量得到^[14]。

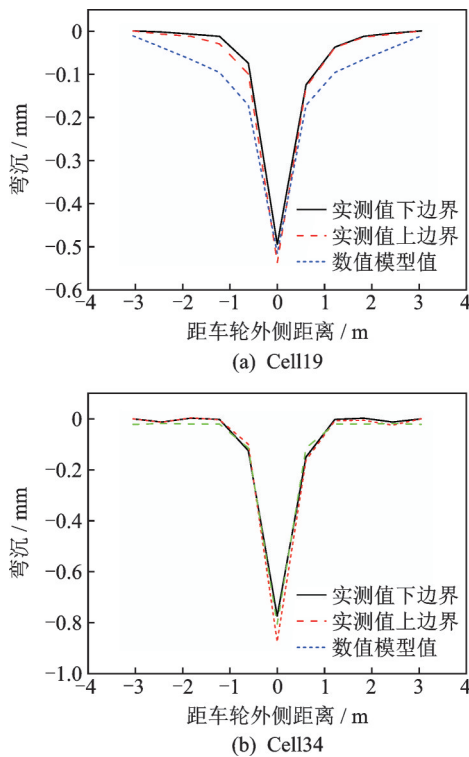


图 1 弯沉实测值与模型值对比
Fig.1 Deflection of measured and model values

表 2 现场实测沥青路面结构层参数

Tab.2 Structure layer parameters of asphalt pavement in field test

道路编号	参数	面层	基层	土基
cell19	模量/MPa	2 073.89	320.48	42.029
	厚度/m	0.13	0.79	4.60
cell34	模量/MPa	2 060.11	108.173	58.565
	厚度/m	0.11	0.31	1.18

图 1(a)中,cell19 数值模型弯沉值与现场实测弯沉值的最大差值为 0.040 6 mm,误差为 7.55%;图 1(b)中,cell34 数值模型弯沉值与现场实测弯沉值的最大差值为 0.106 mm,误差为 12.11%。实测弯沉值与模型弯沉值的误差均不超过 13%,说明该模型能较好地反映道路结构动态响应。

1.3 道路动态检测区域的确定

在现有的多数道路测试中,通常为了保证测试精度与测试车辆和传感器的安全,选取距离行驶车辆一定距离的安全范围内布置传感器,即道路动态检测区域。因此,选取面层模量为 2 000 MPa、面层厚度为 0.14 m、基顶当量回弹模量为 500 MPa 时,基于全宽度路面范围内的车-路动态响应的车辆荷载和应变场如图 2 所示,研究路表压应变的变化规律并确定道路动态检测区域。

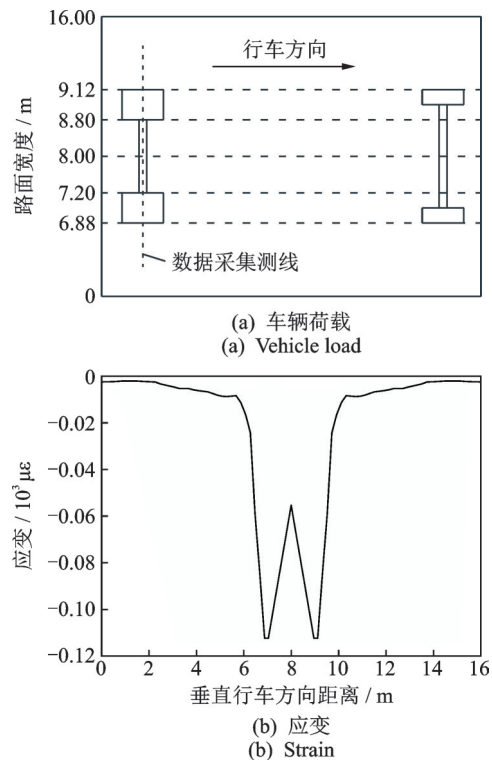


图 2 动态检测区域
Fig.2 Dynamic test area

由图 2 可知,车辆荷载的轮胎作用位置处路表压应变最大,随着检测位置远离车辆轮胎,路表压应变逐渐减小。当检测位置距离轮胎-路面接触点超过 0.8 m(即图 2 中垂直行车方向的距离低于 6.08 m 或高于 9.92 m)时,路表压应变低于 $-0.015 \times 10^{-3} \mu\epsilon$ 。为了提高信噪比并保证测试精度,选取布置传感器的最远位置为距离轮胎-路面接触点

0.8 m。与此同时,考虑到车辆正常行驶过程中横向偏移对测试传感器安全性的影响,选取布置传感器的最近位置为距离轮胎-路面接触点0.4 m。最终选取道路动态检测区域为距离轮胎-路面接触点0.4~0.8 m处,因为该区域不仅能够保证道路动态检测的精度和信噪比,而且能够确保车辆行驶和布置传感器的安全。

2 数值结果分析

为了方便,采用 E_c 和 E_t 分别表示面层回弹模量和基顶当量回弹模量; h_c 表示面层厚度; ϵ 表示路表压应变; f 表示基频。

2.1 应变与基顶当量回弹模量关系

以基顶当量回弹模量为1 500 MPa时距离轮胎-路面接触点0.4 m为例(见图3),将图3中的曲线拟合公式整理于表3,并将表3公式中的拟合系数回归于图4。

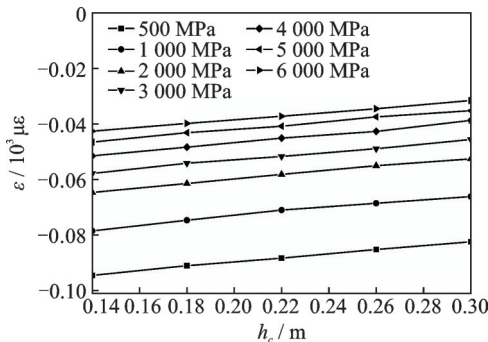


图3 应变与面层参数关系图

Fig.3 Relationship between strain and surface parameters

表3 应变回归公式表 ($E_t=1\ 500\ \text{MPa}$)

Tab.3 Regression formula of strain ($E_t=1\ 500\ \text{MPa}$)				
E_c/MPa	$\epsilon = kh_c + m$	相关系数	k	m
500	$0.0427h_c - 0.0992$	0.9509	0.0427	-0.0992
1000	$0.0526h_c - 0.0857$	0.9751	0.0526	-0.0857
2000	$0.0610h_c - 0.0725$	0.9984	0.0610	-0.0725
3000	$0.0636h_c - 0.0655$	0.9974	0.0636	-0.0655
4000	$0.0634h_c - 0.0605$	0.9948	0.0634	-0.0605
5000	$0.0635h_c - 0.0569$	0.9939	0.0635	-0.0569
6000	$0.0638h_c - 0.0542$	0.9941	0.0638	-0.0542

k 和 m 为系数

由图3知,当面层厚度一定时,路表压应变随着面层模量的增加而减小;当面层模量一定时,路表压应变随着面层厚度的增加而减小。当面层模量从500 MPa增加到4 000 MPa,路表压应变增长显著;

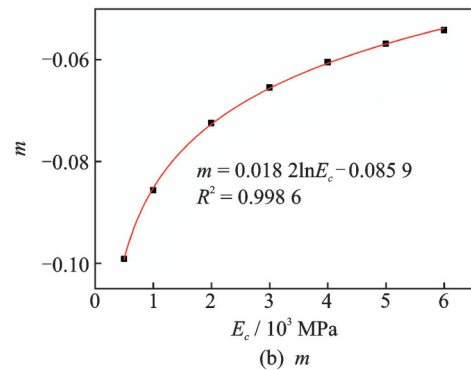
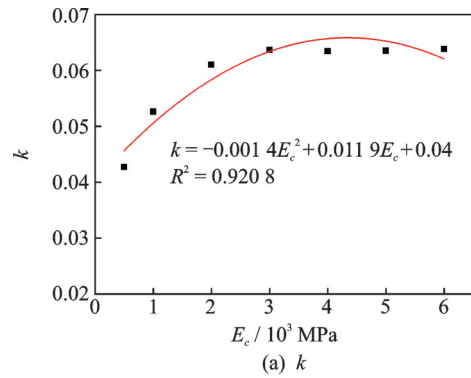


图4 k 和 m 回归系数图

Fig.4 Regression coefficient of k and m

当面层模量从4 000 MPa增加到6 000 MPa,路表压应变增长缓慢。因此,对于面层模量高于4 000 MPa的道路结构,不能通过提高面层模量来显著降低路表压应变。

同理,可得不同 E_t 下的回归系数公式如表4所示。对表4公式中的拟合进行回归,如图5所示。

表4 应变系数回归公式表

Tab.4 Regression formula of strain coefficient

E_t/MPa	$k = aE_c^2 + bE_c + c$	$m = d\ln E_c + e$
110	$-0.0185E_c^2 + 0.1010E_c + 0.4713$ $R^2=9\ 008$	$0.1473\ln E_c - 0.5589$ $R^2=9\ 841$
500	$-0.0064E_c^2 + 0.0346E_c + 0.1912$ $R^2=9\ 149$	$0.0493\ln E_c - 0.2047$ $R^2=9\ 916$
1500	$-0.0014E_c^2 + 0.0119E_c + 0.0400$ $R^2=9\ 208$	$0.0182\ln E_c - 0.0859$ $R^2=9\ 986$
2500	$-0.0003E_c^2 + 0.0019E_c + 0.0330$ $R^2=9\ 025$	$0.0112\ln E_c - 0.0563$ $R^2=9\ 998$
3500	$-0.0005E_c^2 + 0.0046E_c + 0.0153$ $R^2=9\ 717$	$0.0055\ln E_c - 0.0394$ $R^2=9\ 687$
4500	$-0.0002E_c^2 + 0.0026E_c + 0.0113$ $R^2=9\ 459$	$0.0041\ln E_c - 0.0317$ $R^2=9\ 773$
5500	$0.0009E_c^2 + 0.0012E_c + 0.0115$ $R^2=9\ 876$	$0.0033\ln E_c - 0.0268$ $R^2=9\ 510$

a, b, c, d 和 e 为系数

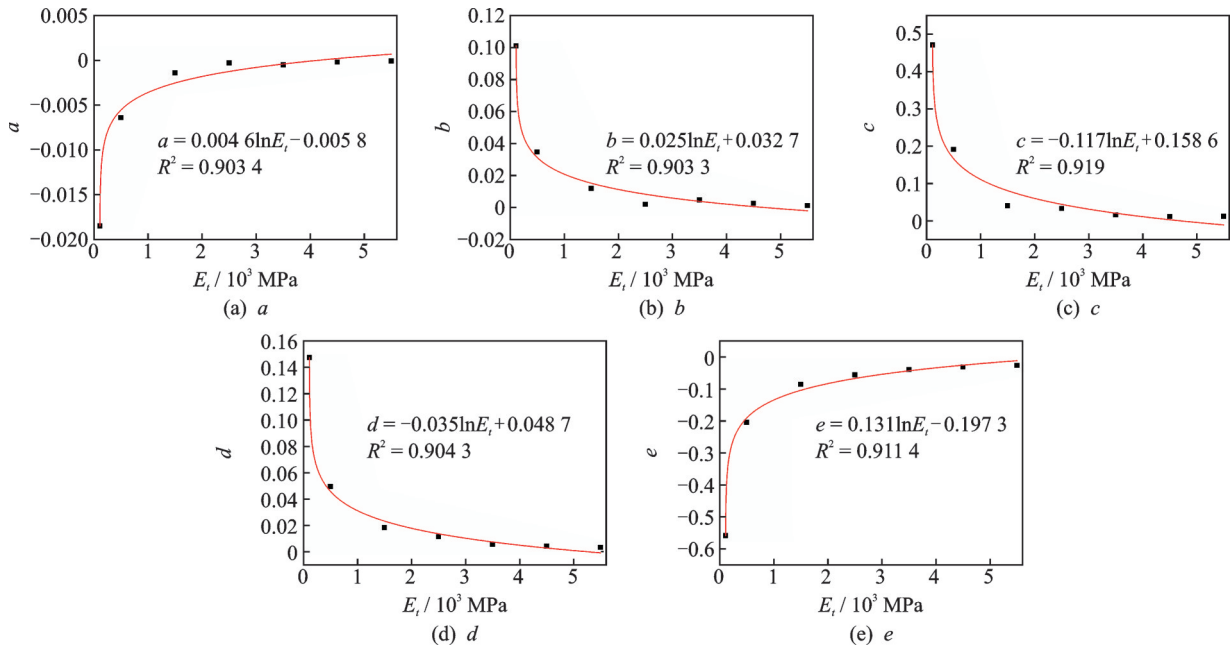


图 5 a, b, c, d 和 e 回归系数图
Fig.5 Regression coefficient of a, b, c, d and e

综上所述,基顶当量回弹模量为 110~5 500 MPa 时的路表压应变计算公式如式(1)所示

$$\begin{cases} \epsilon = kh_c + m \\ k = (0.0046 \ln E_t - 0.0058) E_c^2 + (-0.025 \ln E_t + 0.0327) E_c + (-0.117 \ln E_t + 0.1586) \\ m = (-0.035 \ln E_t + 0.0487) E_c + 0.131 \ln E_t - 0.1973 \end{cases} \quad (1)$$

对于弹性多层体系可按厚度等效公式转换为 4 层体系,再按文献[15]求解基顶当量回弹模量,最后代入式(1)求解路表压应变。

同理,可以得到距离轮胎-路面接触点 0.6 和 0.8 m 处的路表压应变计算公式如式(2)、式(3)所示

$$\begin{cases} \epsilon = k_1 h_c + m_1 \\ k_1 = (-0.004 \ln E_t + 0.0021) E_c^2 + (0.0114 \ln E_t - 0.0181) E_c + (-0.03 \ln E_t + 0.0529) \\ m_1 = (-0.014 \ln E_t + 0.0211) E_c + 0.0465 \ln E_t - 0.073 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \epsilon = k_2 h_c + m_2 \\ k_2 = (-0.002 \ln E_t + 0.004) E_c^2 + (0.0143 \ln E_t - 0.0353) E_c + (-0.067 \ln E_t + 0.1199) \\ m_2 = (-0.008 \ln E_t + 0.016) E_c + 0.0248 \ln E_t - 0.0461 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 基频与基顶当量回弹模量关系

以基顶当量回弹模量 1 500 MPa 为例(见图 6),将图 6 中的曲线拟合公式整理于表 5,并将表 5 公式中的拟合系数回归于图 7。

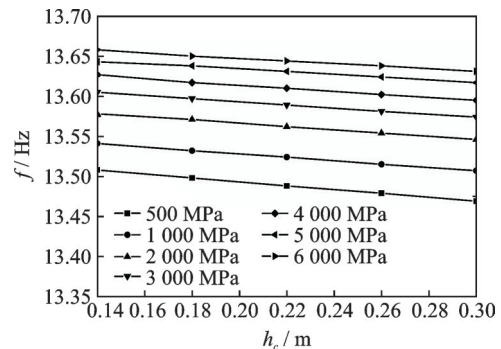


图 6 基频与面层参数关系图
Fig.6 Relationship between fundamental frequency and surface parameters

由图 6 知,当面层厚度一定时,道路基频随着面层模量的增加而增加;而且随着面层模量的增加,道路基频的增长幅度逐渐降低。当面层模量一定时,道路基频随着面层厚度的增加而减少。因此,道路基频同时受面层厚度和模量的影响。

同理,可得不同 E_t 下的回归系数公式如表 6 所示,再对表 6 公式中的拟合进行回归,如图 8 所示。

综上所述,基顶当量回弹模量为 110~5 500 MPa 时的基频计算公式如式(4)所示

表 5 频率回归公式表 ($E_t=1\ 500\ \text{MPa}$)

Tab.5 Regression formula of frequency ($E_t=1\ 500\ \text{MPa}$)

E_c/MPa	$f=ph_c+q$	相关系数	p	q
500	$-0.245\ 5h_c+13.542$	0.999 7	-0.245 5	13.542
1 000	$-0.213\ 7h_c+13.571$	0.999 9	-0.213 7	13.571
2 000	$-0.205\ 3h_c+13.607$	0.999 8	-0.205 3	13.607
3 000	$-0.193\ 7h_c+13.632$	0.999 7	-0.193 7	13.632
4 000	$-0.192\ 4h_c+13.653$	0.998 7	-0.192 4	13.653
5 000	$-0.166\ 3h_c+13.667$	0.999 6	-0.166 3	13.667
6 000	$-0.161\ 7h_c+13.680$	0.999 5	-0.161 7	13.680

p 和 q 为系数

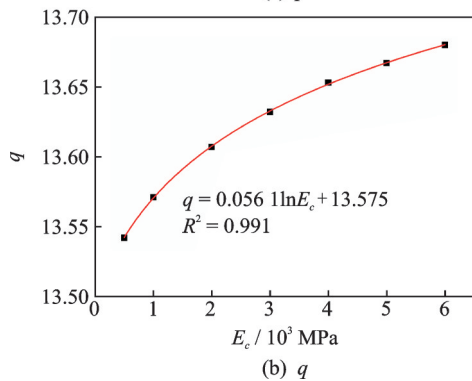
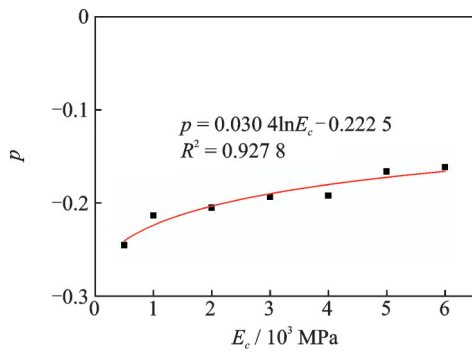


图 7 p 和 q 回归系数图

Fig.7 Regression coefficient of p and q

$$\begin{cases} f = ph_c + q \\ p = (0.002\ 7E_t^2 - 0.021E_t + 0.049\ 4)\ln E_c - \\ \quad 0.006\ 3E_t^2 + 0.055E_t - 0.263\ 3 \\ q = (-0.002\ 4E_t + 0.059\ 4)\ln E_c + \\ \quad 2.252\ 1\ln E_t + 12.117 \end{cases} \quad (4)$$

通过沥青路面的道路基频计算公式(4),反算得到沥青路面的基顶当量回弹模量计算公式,如表 7 所示。

3 工程应用

3.1 道路结构概况

国道 107 线南三环至高邑大市场段,起点位于

表 6 频率系数回归公式表

Tab.6 Regression formula of frequency coefficient

E_t/MPa	$p=A\ln E_c+B$	$q=C\ln E_c+D$
110	$0.046\ 0E_c-0.248\ 2$ $R^2=0.930\ 9$	$0.059\ 8\ln E_c+7.289\ 4$ $R^2=0.998\ 5$
500	$0.039\ 0\ln E_c-0.236\ 1$ $R^2=0.910\ 0$	$0.057\ 1\ln E_c+9.989\ 7$ $R^2=0.989\ 3$
1 500	$0.030\ 4\ln E_c-0.222\ 5$ $R^2=0.927\ 8$	$0.056\ 1\ln E_c+13.575$ $R^2=0.991\ 0$
2 500	$0.006\ 9\ln E_c-0.153\ 7$ $R^2=0.952\ 5$	$0.053\ 0\ln E_c+14.337$ $R^2=0.984\ 4$
3 500	$0.009\ 7\ln E_c-0.1381$ $R^2=0.918\ 8$	$0.052\ 6\ln E_c+14.919$ $R^2=0.977\ 9$
4 500	$0.012\ 1\ln E_c-0.142\ 1$ $R^2=0.909\ 9$	$0.047\ 6\ln E_c+15.366$ $R^2=0.969\ 3$
5 500	$0.014\ 9\ln E_c-0.155\ 5$ $R^2=0.942\ 8$	$0.046\ 6\ln E_c+15.834$ $R^2=0.989\ 1$

A, B, C 和 D 为系数

表 7 基于基频的基顶当量回弹模量反演公式

Tab.7 Inversion formula of equivalent modulus of elasticity based on fundamental frequency

面层厚度/m	基顶当量回弹模量求解公式
0.14	$E'_t = (0.003\ 5E_c^{0.084\ 1})e^{(-0.008\ 1\ln E_c + 0.472)\ f}$
0.15	$E'_t = (0.003\ 5E_c^{0.084\ 1})e^{(-0.007\ln E_c + 0.471\ 8)\ f}$
0.16	$E'_t = (0.003\ 5E_c^{0.084\ 1})e^{(-0.007\ln E_c + 0.471\ 5)\ f}$
0.17	$E'_t = (0.003\ 6E_c^{0.074\ 3})e^{(-0.007\ln E_c + 0.471\ 3)\ f}$
0.18	$E'_t = (0.003\ 6E_c^{0.069\ 5})e^{(-0.006\ln E_c + 0.471\ 1)\ f}$
0.19	$E'_t = (0.003\ 6E_c^{0.069\ 5})e^{(-0.006\ln E_c + 0.470\ 8)\ f}$
0.20	$E'_t = (0.003\ 6E_c^{0.056\ 9})e^{(-0.006\ln E_c + 0.470\ 7)\ f}$
0.21	$E'_t = (0.003\ 6E_c^{0.052\ 3})e^{(-0.006\ln E_c + 0.470\ 5)\ f}$
0.22	$E'_t = (0.003\ 7E_c^{0.046\ 8})e^{(-0.006\ln E_c + 0.470\ 3)\ f}$
0.23	$E'_t = (0.003\ 7E_c^{0.048\ 1})e^{(-0.005\ln E_c + 0.470\ 1)\ f}$
0.24	$E'_t = (0.003\ 7E_c^{0.039\ 6})e^{(-0.005\ln E_c + 0.47)\ f}$
0.25	$E'_t = (0.003\ 7E_c^{0.042\ 4})e^{(-0.005\ln E_c + 0.469\ 8)\ f}$
0.26	$E'_t = (0.003\ 7E_c^{0.042\ 4})e^{(-0.005\ln E_c + 0.469\ 7)\ f}$
0.27	$E'_t = (0.003\ 8E_c^{0.037\ 9})e^{(-0.005\ln E_c + 0.469\ 5)\ f}$
0.28	$E'_t = (0.003\ 8E_c^{-0.029\ 6})e^{(-0.005\ln E_c + 0.469\ 4)\ f}$
0.29	$E'_t = (0.003\ 8E_c^{0.028\ 8})e^{(-0.004\ln E_c + 0.469\ 2)\ f}$
0.30	$E'_t = (0.003\ 8E_c^{0.028\ 8})e^{(-0.004\ln E_c + 0.469\ 2)\ f}$

国道 107 与南三环立体交叉处桩号为 K301+900, 终点位于高邑大市场桩号为 K340+129, 全长为

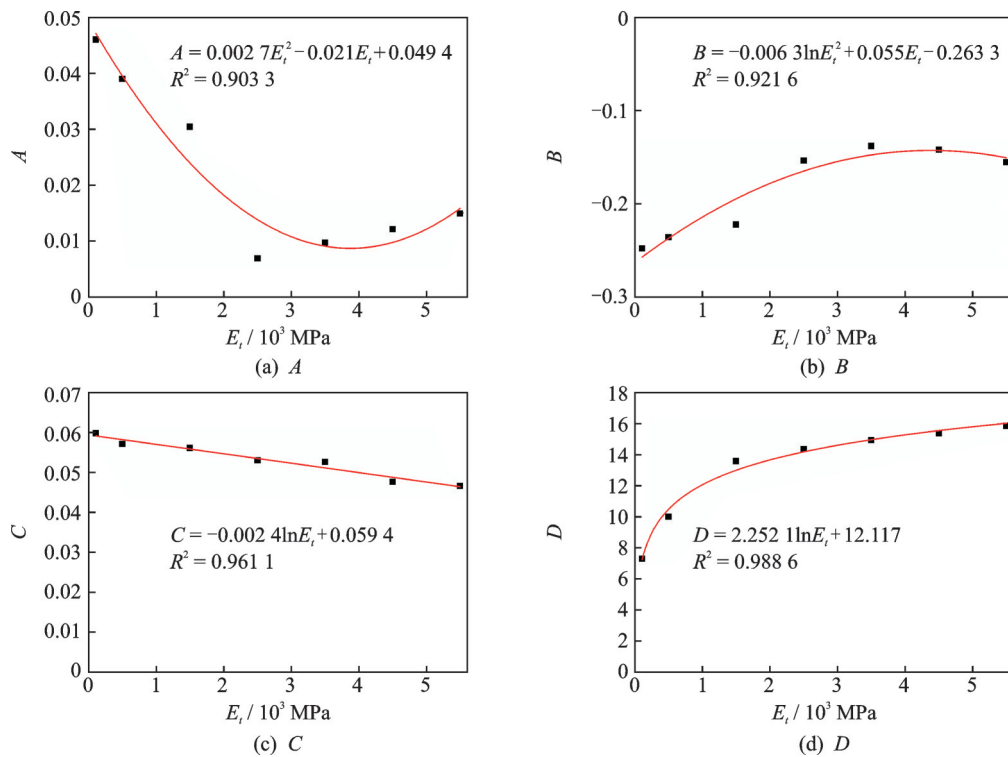


图 8 A, B, C 和 D 回归系数图
Fig.8 Regression coefficient of A, B, C and D

38.229 km。公路等级为一级公路,双向四车道,路面宽为 18.4~53 m。笔者选取桩号 K308+500 至桩号 K309+500 的右半幅路段进行试验,该路段路面宽为 9.9 m,旧路面结构为 8 cm 沥青混凝土、15 cm 二灰碎石和 26 cm 石灰土。此次维修挖除原有的沥青面层,加铺 20 cm 水稳碎石基层、8 cm 粗粒式沥青混凝土 AC-25C(掺加坑车辙剂)和 6 cm 经济型沥青玛蹄脂 ESMA-13。具体道路结构层参数如表 8 所示,其中挖除原有沥青面层后的旧路基层顶面回弹模量是通过 FWD 试验反演得到的,面层和基层模量通过室内试验测得,泊松比和密度参照结构层材料的试验结果及规范推荐值选取,基顶当量回弹模量依据水稳碎石基层和旧路顶部参数、按规范要求换算得到的数值为 4 242 MPa^[16],路面平整度等级依据连续式平整度仪测试结果评定为 A 级,30T 测试车辆以 72 km/h(20 m/s)左右的速度沿路表中线行驶。

表 8 现场试验道路结构层参数
Tab.8 Structure layer parameters in field test

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
沥青面层	0.14	4 000	0.25	2 400
水稳碎石基层	0.20	3 000	0.25	2 200
旧路顶部	—	366	0.30	1 850

3.2 试验仪器设备

试验过程中主要的检测仪器有:美国 BDI-STS -WIFI STRUCTURAL TESTING SYSTEM 测试系统、加速度传感器、应变传感器、磁性支座、无线数据传输节点及无线数据传输基站。加速度传感器主要用于采集道路结构振动加速度信号,对加速度信号进行快速傅里叶变换可得到道路基频;应变传感器主要用于采集路表应变信号。

3.3 试验方案与数据处理

距离轮胎-路面接触点 0.4, 0.6, 0.8 m 分别布置 3 条测线,每条测线上间隔 30 m 分别布置 2 组传感器,每组传感器由 1 个加速度传感器、1 个横向应变传感器及 1 个纵向应变传感器组成,共计 6 个加速度传感器、6 个横向应变传感器和 6 个纵向应变传感器,具体布置如图 9 所示。

加载车辆的前轴为单轴单轮,后轴为单轴双轮,总质量和胎压分别为 3×10⁴ kg 和 0.7 MPa。当该车辆以 70 km/h 左右的速度通过测试路段时,采集到的加速度信号和应变信号如图 10 所示。由于不同位置处的加速度信号相差甚微,仅给出 A1062 加速度传感器的信号,如图 10(a)所示;同时给出不同位

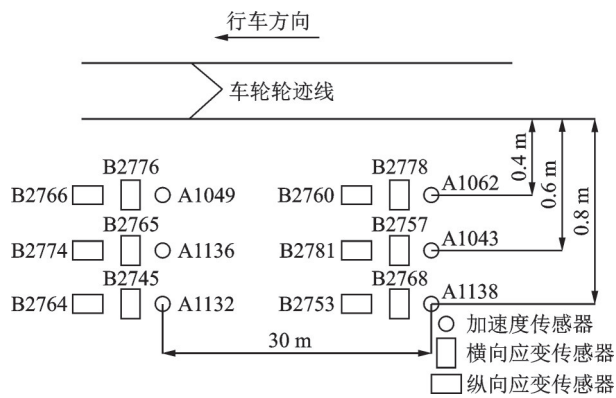
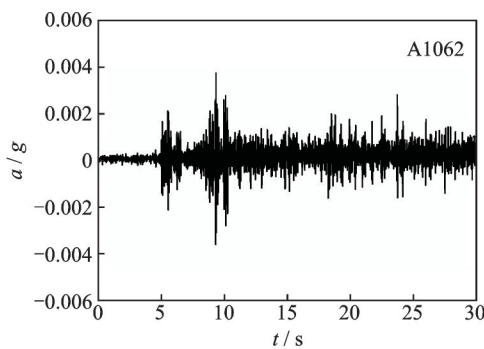
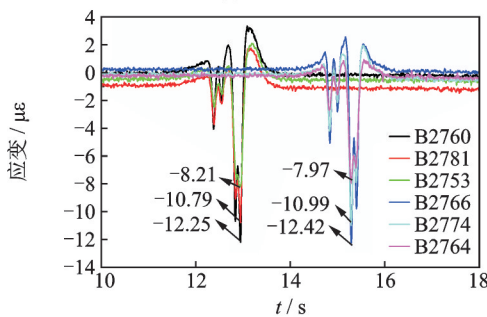


图9 传感器布置图

Fig.9 Sensor arrangement



(a) 加速度
(a) Acceleration



(b) 应变
(b) Strain

图10 数据信号

Fig.10 Data signal

置处应变传感器的信号,如图10(b)所示。对加速度信号进行快速傅里叶变换得到道路基频,如图11所示;对同一测线上2个应变传感器的应变取算术平均值,如表9所示。

将路表应变和道路基频的实测值与本研究公式(1)~(4)计算值对比,并将由表7反演的基顶当量回弹模量与实测值求得的基顶当量回弹模量对比,如表9所示。

由表9可知,距车轮0.4和0.6 m处路表应变的实测值和计算值误差不超过10%,距车轮0.8 m处的误差不超过20%。本研究公式(4)求解的基频计

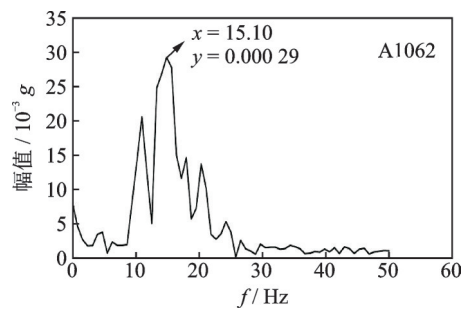


图11 基频

Fig.11 Fundamental frequency

表9 实测值与计算值对比

Tab.9 Correlation between measured and calculated values

测试参数	距车轮距离/m	实测值	计算值	误差/%
路表应变/ $\mu\epsilon$	0.4	-12.08	12.34	2.06
	0.6	-10.15	10.89	6.82
	0.8	-6.59	8.09	18.59
基频/Hz		15.10	15.42	2.13
基顶当量回弹模量/MPa		4 242	4 134	2.56

算值与现场试验实测值误差为2.13%,表7反演的基顶当量回弹模量计算值与现场试验实测值误差为2.56%,两者的误差均在3%以内。因此,本研究方法能够满足道路工程设计施工和检测维护的精度要求。

4 结论

1) 路表应变随着面层模量、面层厚度和基顶当量回弹模量的增加而减小;但当面层模量超过4 000 MPa时,路表应变随面层模量的增长变化缓慢。

2) 道路基频随着面层模量和基顶当量回弹模量的增加而增加,但随着面层厚度的增加而减小;当面层模量超过4 000 MPa时,道路基频随面层模量的增长变化不显著。

3) 基于大量数值模型建立了距离车辆不同位置处路表应变的求解方法、道路基频的求解方法以及基顶当量回弹模量的反演方法,并借助现场试验验证了本研究方法的可靠性,为道路工程的设计施工和检测维护提供依据。

参 考 文 献

[1] 徐立新.公路路面性能检测和评估方法的研究与实践

- [D].南京:南京理工大学,2008.
- [2] 徐开华.路基承载力的现场检测技术研究[D].青岛:山东科技大学,2013.
- [3] 郑木莲,王选仓,王崇涛.路基弯沉检测标准[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(5):5-9.
ZHENG Mulian, WANG Xuancang, WANG Chongtao. Test standard of sub-grade deflection[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(5): 5-9. (in Chinese)
- [4] 刘钰.基于线阵CCD的路面弯沉盆检测方法研究[D].西安:长安大学,2012.
- [5] 邓翠翠.路基路面回弹弯沉检测和评定结果分析[J].交通标准化,2012(18):153-156.
DENG Cuicui. Analysis of detection and evaluation results of rebound deflection on sub-grade and pavement [J]. Transportation Standardization, 2012 (18): 153-156. (in Chinese)
- [6] 李刚.自动弯沉仪检测路面弯沉影响因素分析[J].公路交通科技,2004,21(10):48-50.
LI Gang. Influencing factor on automatic deflection-meter in examining road surface [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(10): 48-50. (in Chinese)
- [7] 董元帅,唐伯明,刘清泉,等.沥青路面动态弯沉综合修正系数研究[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(5):1081-1085.
DONG Yuanshuai, TANG Boming, LIU Qingquan, et al. Dynamic synthetic deflection correction factor of asphalt pavement based on deflection basin parameters [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(5): 1081-1085. (in Chinese)
- [8] WONKI B, YONGSOO K, JEDOL D, et al. Scaling the operating deflection shapes obtained from scanning laser doppler vibrometer [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2011, 30(2): 91-98.
- [9] ARRAIGADA M, PARTL M N, ANGELONE S. Determination of road deflections from traffic induced accelerations [J]. Road Materials and Pavement Design, 2007, 8(3): 399-421.
- [10] 偶昌宝.沥青路面结构动力响应分析[D].杭州:浙江大学,2005.
- [11] 王亚东.基于标准能量冲击荷载下的桥梁结构力学性能研究[D].天津:中国民航大学,2014.
- [12] 梁洪涛.移动荷载作用下层状沥青路面结构时程响应分析[D].长沙:中南大学,2013.
- [13] 黄琴龙,凌建明.路基工作区的确定方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(4):551-555.
HUANG Qinlong, LING Jianming. Methodology study on defining subgrade's working area [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(4): 551-555. (in Chinese)
- [14] GONZALO R, SOHEIL N. Pavement structural evaluation at the network level: final report [R]. U.S., Virginia: Department of Transportation Federal Highway Administration, 2016.
- [15] JTG D40—2006 公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [16] 李皓玉.车辆与路面相互作用下路面结构动力学研究[D].北京:北京交通大学,2011.



第一作者简介:张献民,男,1959年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为路基路面检测评估。

E-mail:cauczxm@126.com

通信作者简介:刘小兰,女,1989年10月生,讲师。主要研究方向为路基路面检测评估。

E-mail:1066323835@qq.com