

表面不平整对水泥路面及疲劳破坏的影响研究

吴国雄,王瑞燕,郑建明,韩春云
(重庆交通学院 道路工程系,重庆 400074)

摘要: 表面不平整对水泥混凝土路面使用性能的影响非常明显.从理论上建立了路面平整度、车速与板底响应指标即应变之间的关系,通过试验论证了这一关系的正确性.在此基础上,分析了路面不平整对路面疲劳破坏的影响.研究为路面设计理论和方法的完善提供了依据.

关键词: 水泥混凝土路面;平整度;道路工程;路面衰坏

中图分类号: U416.216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2004)01-0076-05

Research about the Influence of Surface's Roughness on Slab's Bottom Reaction and Fatigue Destruction of Cement Pavement

WU Guo-xiong, WANG Rui-yan, ZHENG Jian-ming, HAN Chun-yun
(Highway Engineering Department of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: It's apparent that the surface's roughness influences on the application of cement concrete. A relationship among pavement smoothness and velocity and the index of slab's bottom reaction (strain) in theory is established, and testified by experiments. On this basis, the influence of the pavement roughness on the fatigue destruction is analyzed. The study will provide some references to the development in theories and methods of pavement design.

Key words: cement concrete pavement; evenness; road engineering; pavement deterioration

0 引言

长期以来,运动荷载作用下路面结构的响应,一直是一个令人感兴趣的课题.采用动态分析模型或试验,用以进行水泥混凝土路面设计,或计算路面结构板底应力或应变,从而评估路面的使用寿命,比较具有意义.由于车辆荷载和温度应力各自独立地发挥作用,所以,暂不讨论热效应的影响.对水泥混凝土路面而言,研究表明^[2],由运动车辆施加在路面上的动压力,除与运行车辆特征和速度有关外,还与路面平整度有关.由此产生的动载率(RDF)对道路使用性能的影响非常明显,应作为路面设计的一个重要指标,同时也是引起路面破坏的主要原因.本文从理论上建立了路面平整度、车速与板底应变之间的关系,同时通过试验论证了这一关系的正确性.在此基础上,进一步分析了路面不平整对路面疲劳破坏的影响.研究为路面设计理论和方法的完善提供了依据.

1 平整度与动应变的关系分析

1.1 国际平整度及其数学求解

国际平整度(IRI)是一种标准化的平整度测量,采用1/4车辆模型,以80 km/h的速度在已知的路面上行驶时,计算一定行驶距离内悬挂系统的累积位移量.其计量单位为 m/km 或 mm/m.国际平整度

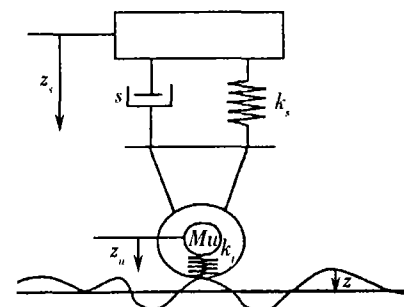


图1 具有双自由度的1/4车辆模型

收稿日期:2003-05-27.

第一作者简介:吴国雄(1966.10~),男,博士,教授.主要研究方向:道路工程.

(IRI)反映的是道路表面对于理想平面的偏差,体现了车辆动力性能、行驶质量和路面动力载荷三者的数值特征,包含了客观指标和主观指标两部分。

如图1所示,采用常用的1/4车辆模型^[1],计算模式如式(1):

$$\begin{aligned} M_s \ddot{z}_s + k_s(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) &= 0 \\ M_s \ddot{z}_s + M_u \ddot{z}_u &= k_t(z - z_u) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: M_s, M_u 分别为弹性体、非弹性的质量; C_s 为减振器的衰减常数; k_t, k_s 则分别为非弹性体 M_u 和线性化弹性体 M_s 的弹性常数。

讨论系统在一个正弦波式路面上的响应.对随机变量为 $z(x)$ 的路面,离散的数值模型采用傅立叶级数^[2],其近似随机解为:

$$z(x) = \sum_n A_n \exp(i\lambda_n x + i\varphi_n) \quad (2)$$

式中: A_λ 为正弦波的波幅; φ_q 为 $(-\pi, \pi)$ 内的随机相位角; λ 为波长或谱频率。

注意到 A_λ 在离散型的情况下, A_λ 取长度的量纲, $z(x)$ 是实数,故对角频率用线性离散公式: $\omega = \lambda v$,由欧拉公式,则路面可以写成:

$$z(x) = \operatorname{Re} \sum_n A_n \exp(i\omega_n t + i\varphi_n), \quad (3)$$

式中:Re表示取实部; v 为1/4车辆的速度。

假设路面为一个正弦分量的情况,即 $z = A_q \exp(i\omega t + i\varphi_q)$,相应地 z_s 和 z_u 的函数形式分别为 $z_s = A_s \exp(i\omega t + i\varphi_s)$, $z_u = A_u \exp(i\omega t + i\varphi_u)$,则式(1)可简化为:

$$\begin{aligned} (M_s \omega^2 - i\omega c_s - k_s)A_s + (i\omega c_s + k_s)A_u &= 0 \\ \omega^2 A_s + (k_t - M_u \omega^2)A_u &= k_t A_\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

求解式(4)可得到:

$$A_u = A_\lambda \frac{k_t(k_s - M_s \omega^2 + i\omega c_s)}{(k_t - M_u \omega^2)(i\omega c_s - M_s \omega^2 + k_s) - M_s \omega^2(k_s + i\omega c_s)} \quad (5)$$

式(5)又可以简化为下列复数形式:

$$A_u = A_q R_u(\omega) \exp(i\varphi_u(\omega)) \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} R_u &= \sqrt{c^2 + d^2} / \sqrt{a^2 + b^2} \\ \varphi_u &= \tan^{-1}(d/c) - \tan^{-1}(b/a) \\ a &= k_t k_s - [k_s(M_s + M_u) + k_t M_s] \omega^2 + M_u M_s \omega \\ b &= \omega c_s [k_t - (M_s + M_u) \omega^2] \\ c &= k_t (k_s - M_s \omega^2) \\ d(\omega) &= \omega c_s k_t \end{aligned}$$

重复上述计算步骤可得:

$$A_s = A_q R_s(\omega) \exp(i\varphi_s(\omega)) \quad (7)$$

式中: $R_s = [(c_1^2 + d^2)/(a^2 + b^2)]^{1/2}$; $\varphi_s = \tan^{-1}(d/c_1) - \tan^{-1}(b/a)$; $c_1 = k_t k_s$

把(6)式、(7)式两代入 z_s, z_u ,则表达式可写成下列形式:

$$z_s = \operatorname{Re} \{ A_\lambda R_s(\omega) \exp i[(\varphi_s(\omega) + \varphi_\lambda + \omega t)] \} \quad (8)$$

$$z_u = \operatorname{Re} \{ A_\lambda R_u(\omega) \exp i[(\varphi_u(\omega) + \varphi_\lambda + \omega t)] \} \quad (9)$$

对一角频率为 ω 的正弦波,模型上下起伏的绝对速度可由下列式决定:

$$j(\omega t) = z'_s - z'_u = -\omega A_\lambda R_0 \sin(\alpha_\omega + \omega t + \varphi_\lambda) \quad (10)$$

式中 z_s 以及 z_u 的上标表示变量的一次偏导数,且有: $R_0 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$, $\alpha_\omega = \tan^{-1}(R_1/R_2)$, $R_1 = R_u \sin \varphi_u - R_s \sin \varphi_s$, $R_2 = R_u \cos \varphi_u - R_s \cos \varphi_s$.

从式中可以看出,相位角 φ_u, φ_s 以及 φ_ω 是 ω 的奇函数.这就说明函数 $j_1(\omega t)$ 是 ω 的偶函数.注意到

(10) 式包含路面平整度函数 $A(\omega)$ 和车辆响应函数 R_0 . 其中 R_0 为:

$$R_0(\omega) = \alpha_0 \omega^2 / (1 + \alpha_1 \omega^2 + \alpha_2 \omega^4 + \alpha_3 \omega^6 + \alpha_4 \omega^8)^{1/2} \quad (11)$$

式中: $\alpha_0 = M_s/k_s$,

$$\alpha_1 = c_s^2/k_s^2 - 2[M_s/k_s + (M_s + M_u)/K_t]$$

$$\alpha_2 = [M_s/k_s + (M_s + M_u)/k_t]^2 + 2(M_s M_u k_s - c_s^2(M_s + M_u))/k_s^2 k_t$$

$$\alpha_3 = c_s^2(M_s + M_u)^2/k_s^2 k_t^2 - 2M_s M_u (k_s M_u + (k_s + k_t) M_s)/k_s^2 k_t^2$$

$$\alpha_4 = (M_s M_u / k_s k_t)^2$$

根据国际平整度的定义,对一给定谱频率 $q = \omega/v$, 长为 L 的路段,由(10)式可得 $J(\omega)$ 在整个路段上的绝对值的平均值为:

$$IRI = \frac{1}{L} \int |j(\omega t)| dt = \frac{1}{L} \int |z_s' - z_u'| dt = \frac{1}{vT} \int dt \left| \sum_k w_k A(\lambda_k) R_0(w_k) \sin(\alpha_{wk} + w_k t + \varphi_{\lambda_k}) \right| \quad (12)$$

式中: k 表示 k 重正弦波.

若取路面为一个正弦波波形,起初始相位角设为 0, 即有:

$$IRI = \frac{1}{vT} \int dt |w A_\lambda R_0 \sin(\alpha_w + wt)| = \frac{w A_\lambda R_0}{vT} \int dt |\sin(\alpha_w + wt)| \quad (13)$$

可以发现,国际平整度的数学解析式中包含了路面平整度、车辆性能及车速等指标.

1.2 IRI 与板底动应变关系

路表面的波谱简化为单一的正弦波. 则有^[2]:

$$W_{surf} = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m\pi y_0}{b}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) (w^2 A_\lambda R_0) Im \quad (14)$$

把(13)式代入(14)式,可得:

$$W_{surf} = C_0 \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m\pi y_0}{b}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \frac{w IRI v T}{\int_0^T |\sin(\alpha_w + wt)| dt} Im \quad (15)$$

$$\epsilon = h \frac{\partial^2 W_{surf}}{\partial x^2} \quad (16)$$

式中 h 为板厚的一半(cm); x 为车轮作用点沿路线方向的距离(m); C_0 为动载的参数.

从(16)式不难发现,动应变与车辆荷载的大小、路面平整度、车速以及行车荷载作用的时间有关,并随路面平整度的变坏和行车荷载的增大而增大.

2 试验研究与分析

2.1 试验概况

路面为采用水泥稳定碎石基层,厚为 18 cm,回弹模量 1200 MPa;水泥混凝土面层采用 C_{30} 混凝土的设计强度为 5.0 MPa, 28 d 龄期的抗拆强度为 6.0 MPa, 回弹模量为 $E = 30\,000$ MPa,泊松比为: $\mu = 0.167$,厚为 20 cm;土基:压实度为 98%,测得回弹模量为 60 MPa.

为了测量混凝土面板底动应变,将应变片埋在混凝土板内,并用 914 粘胶固定在 20 cm × 20 cm 的钢板上,钢板随同混凝土一起变形.用二芯屏蔽线连接,并考虑温度补偿.应变片位于混凝土面板两侧板边的中部且距板边 60 cm 处,如图 2 所示. Z 表示纵向应变片, H 表示横向应变片.

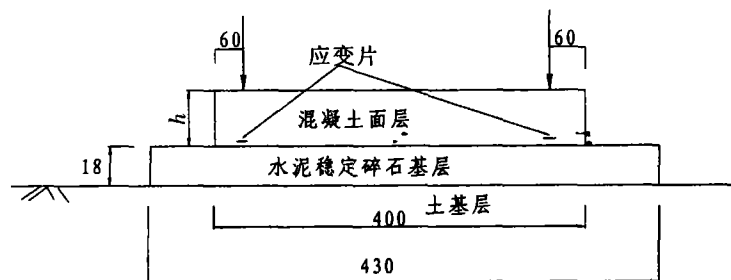


图 2 应变片布置剖面图(尺寸以 cm 计)

根据我国路面设计方法,选用双轮组单轴荷载为100 kN的标准轴载,为此,选用准载5 t的东风汽车,配重后其设计参数为:后轴重为5 t,轮胎接触路面的压强为0.7 MPa,接触面积的当量圆直径为21.3 cm.路面混凝土动应变测试采用了BQ120-80AA应变片、动态应变仪、接口箱及DASJ桥梁及结构动态检测微机系统,该系统功能强,速度快,精度高.另外在动态测试中,采用了抗混频波、自动调零技术,使动态信号的质量大为提高,确保了测试精度.

2.2 路面平整度测量方法

试验路段采用3 m直尺法测定其平整度.分别沿行车道两侧车轮轮迹带作为连续测定的标准位置.平整度的计算与表示方法:

$$L_s = \bar{x} + 1.65S \quad (17)$$

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n$$

$$S = [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2]/(n - 1) \quad (18)$$

式中: \bar{x} —3 m直尺测定的平均值; S —3 m直尺测定的标准差; L —3 m直尺测定值的单边上波动界限; x_1, x_2, \dots, x_n —分别为3 m直尺次测定值.

2.3 测试结果与分析

各种不同的平整度路段和车速条件下板底应变响应的实测值如表1、图3所示.

表1 水泥混凝土路面(板厚20 cm)平整度、车速与动应变实测值

路段序号	平整度/mm	动应变实测值/ $10^{-6} \mu\epsilon$			
		$V = 0 \text{ km/h}$	$V = 20 \text{ km/h}$	$V = 40 \text{ km/h}$	$V = 60 \text{ km/h}$
1	20.1	24.5	25	25	26
2	25.4	24.5	26	27	28
3	29.5	24.5	28	29	31
4	32.4	24.5	29	31	33
5	37.3	24.5	35	41	43

图3反映的是同一板厚(20 cm)的情况下,测试车分别以20 km/h、40 km/h、60 km/h的车速通过试验路段时,测出的速度、平整度与板底动应变的变化关系.通过分析不难得出以下结论:

第一,路面不平整时,同一速度条件下,动应变是随路面不平整度的增加而增大.当平整度较差,速度达到60 km/h时,动应变比静应变增加近80%,这是非常显著的.

第二,路面不平整时,同一平整度条件下,板底动应变随车速的增大而增加,其增幅随速度的增加而降低,如平整度较差时,车速从0 km/h增大到20 km/h时,则动应变增量达到40%;

当车速从20 km/h增大到40 km/h时,动应变增量达到24%;车速从40 km/h增大到60 km/h时,动应变增量仅为5%.这表明,路面不平整会导致路面板底动应变增加,同时,随着车速的增加,应变会因车辆对路面的作用时间缩短而减小^[3],两者相抵消后总的应变增量有降低的趋势.

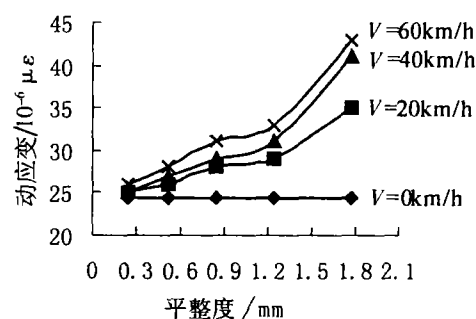


图3 平整度、车速与动应变之间的关系

3 表面不平整对路面疲劳寿命的影响分析

波特兰水泥协会推荐的疲劳方程^[4]为:

$$\log N_f = f_1 - f_2 \left(\frac{a}{f_{cm}} \right) \quad (19)$$

式中: N_f 为允许重复荷载作用次数; a 为板的弯拉应力,MPa; f_{cm} 为板的设计弯拉强度,MPa.

$$\text{当 } \frac{a}{f_{cm}} \geq 0.55 \text{ 时: } \log N_f = 11.737 - 12.077 \left(\frac{a}{f_{cm}} \right) \quad (20)$$

$$\text{当: } 0.45 < \frac{a}{f_{cm}} < 0.55 \text{ 时: } N_f = \left(\frac{4.2577}{\frac{a}{f_{cm}} - 0.4325} \right)^{3.268} \quad (21)$$

$$\text{当: } \frac{a}{f_{cm}} \leq 0.45 \text{ 时: } N_f \text{ 不限} \quad (22)$$

假定板为弹性体即 $a = E \cdot \epsilon$, 应力随应变线性增加. 暂不考虑温度应力的影响, 取不同的应力增量, 由(20)式、(21)式、(22)式得到不同的应力水平下路面的疲劳寿命如表2所示.

表2 板底应力增量与路面疲劳寿命

N_f	应力增量 / %					
	0	10	20	30	40	50
$\frac{a}{f_{cm}} = 0.6$	30 903	5 888	1 101	207	39	0
$\frac{a}{f_{cm}} = 0.5$	762 043	12 4451	30 903	7 709	1 919	477

由表2不难发现, 由于路面不平整而引起的板底应变增加10%时, 板的疲劳寿命将缩短5-6倍. 若考虑到路面板底固有微裂缝的存在^[5], 这种破坏作用将会更加显著.

4 结语

水泥混凝土路面的破坏是当今道路工程界十分关心的问题之一, 人们正从不同的角度去加以分析和探讨. 就开放交通后的影响因素而言, 路面不平整所引起的车板相互作用的破坏效果尤为显著. 本文从理论上建立了路面平整度、车速与板底响应指标即应变之间的关系, 通过试验论证了这一关系的正确性. 在此基础上, 分析了路面不平整对路面疲劳破坏的影响, 为路面设计理论和方法的完善提供了依据.

参考文献:

- [1] 徐建平, 尚刚, 等. 路面不平整引起的汽车动荷载计算分析[J]. 重庆交通学院学报, 2001, (1): 78~83.
- [2] Chiu Liu, Denos Gazis. Surface Roughness On Dynamic Response of Pavement[J]. Journal of Transportation Engineering/July/August 1999.
- [3] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 20~27.
- [4] [美]黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998. 158~159.
- [5] 易志坚, 周志祥, 吴国雄, 等. 基于断裂力学原理的水泥砼路面破坏过程分析及路面设计新构想[J]. 重庆交通学院学报, 2001, (1): 1~5.

(上接第75页)

3) 从软件专家化的要求, 在具有高配置的硬件设备条件下, 要选择适合企业自身特点的集成化较高的软件. 但管理软件也不是万能的, 需要软件使用者能从软件系统提供的统计数据、分析数据中提炼出有价值的信息供决策者使用. 并且, 还需要软件使用者充分注意信息的收集、整理、利用这些基础性工作, 才能很好地利用这一集成化软件辅助工程建设项目的管理.

参考文献:

- [1] 马智亮, 吴炜煜, 彭明. 实现建设领域信息化之路[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. 10~12.
- [2] 王守清. 计算机辅助建筑工程项目管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 13~16.
- [3] 候祥朝. 对提高建筑管理信息化水平的构想[J]. 建筑技术, 2002, (4): 45~46.
- [4] Zhiliang Ma and Jianfeng Wu. Development of management information systems for construction project based on Web. Proceeding of International conference on Engineering and Technological Sciences 2000, Civil Engineering in the 21st Century (edited by Jian Song and Ganshi Zhou)[J]. Science Press, 2000. 702~711.