

文章编号:1671-6833(2011)06-0013-05

基于层间功能层的水泥混凝土路面动态响应灰关联分析

廉向东^{1,2}, 付欣³, 熊锐¹, 关博文¹, 陈拴发⁴

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广西高速公路投资有限公司, 广西 南宁 530021; 3. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420; 4. 长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:通过动态分析有限元方法揭示了设置功能层的半刚性基层水泥混凝土路面结构在车辆动态荷载作用下各因素(面层厚度与模量、功能层厚度与模量、基层厚度与模量、地基模量以及行车速度)对力学响应的影响程度,采用灰色关联分析,对各因素的影响程度进行了定量分析,并通过回归分析得到了路面结构力学响应(面层弯沉差、面层底部拉应力、功能层顶部剪应力和基层底部拉应力)的计算公式,为设置功能层的水泥混凝土路面的结构设计和施工提供理论指导。

关键词:水泥混凝土路面;层间功能层;动态荷载;半刚性基层;灰关联分析

中图分类号: U414.75

文献标志码: A

0 引言

我国高等级公路路面主要采用沥青路面和水泥混凝土路面两种结构形式,和沥青路面相比,水泥混凝土路面具有强度高、稳定性好、耐久性好、有利于夜间行车、施工简便等优点。我国水泥混凝土路面普遍存在着使用寿命远低于设计使用年限的现象,通过对水泥混凝土路面的破坏调查发现,水泥混凝土路面的破坏大部分都与基层的不良支撑状况有关。半刚性基层水泥混凝土路面结构的破坏主要是由脱空引起的,同时与路基的稳定性及基层的稳定性有密切关系^[1-3]。

为了改善水泥混凝土面层和基层的接触状况,防止脱空的产生,可以在水泥混凝土面层和基层之间设置沥青混合料功能层,对于设置沥青功能层的水泥混凝土路面结构,国外的设计方法中并未将其视为结构层,而仅作为一种层间处治措施,而在我国水泥混凝土路面设计与施工中很少关注在基层和水泥混凝土面层之间设置功能层等相关问题,对于设置功能层的水泥混凝土路面进行车辆动态荷载分析更是少之又少,因此对设置功能层的水泥混凝土路面在车辆动态荷载作用下的力学状态进行分析具有重要的理论价值和工程意义^[4]。

1 研究理论

1.1 动态分析有限元方法

在动态荷载的施加过程中伴随着物理时间,因此在动态荷载分析的有限元法中,虽然以节点的位移为基本未知量,但此时节点位移既是坐标位置的函数,也是时间的函数,节点具有速度和加速度,荷载与时间具有相关性,因此需要考虑惯性力和阻尼作用^[5]。根据达朗贝尔原理,引入惯性力和阻尼作用之后路面结构仍然处于平衡状态,因此在动态荷载分析中,采用虚位移原理建立单元方程,整体结构的基本方程见式(1)。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; u 为节点位移矩阵; \dot{u} 为节点速度矩阵; \ddot{u} 为节点加速度矩阵; $F(t)$ 为随时间变化的荷载。

1.2 灰关联分析方法

灰色理论^[6]是邓聚龙教授提出的一种新型工程系统理论。该理论能在“小样本、贫信息”的条件下对系统进行分析,从而找出各种因素与系统发展态势之间的关系,分辨出主要因素和次要因素,对系统的发展做出积极有效的引导,因此具有很强的实用性。笔者采用具有较高可靠度的灰关联熵分析法来研究各影响因素的显著性^[7]。

收稿日期:2011-07-20;修订日期:2011-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978031);长安大学基础研究主持计划专项基金(CHD2010ZY014)

作者简介:廉向东(1971-),男,黑龙江鸡西人,高级工程师,主要从事路面结构与材料方面的研究, E-mail: 287218622@qq.com.

(1) 灰关联系数

灰关联系数为灰关联因子集, $x_0(x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ 为参考列, $x_i(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) (i=1, 2, \dots, m)$ 为比较列, 则比较列与参考列间的灰关联系数为:

$$\xi_i[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)} \quad (1)$$

($\min_{i=1, m} \min_{k=1, n} \Delta_i(k)$ 为两极最小差; $\max_{i=1, m} \max_{k=1, n} \Delta_i(k)$ 为两极最大差)

式中: ρ 为分辨系数, 一般取 0.5.

(2) 灰关联熵与灰熵关联度. X 为离散数列, $x_0 \in x$ 为参考列, $x_i \in x (i=1, 2, \dots, m)$ 为比较列, $R_i = \{\xi[x_0(k), x_i(k)], k=1, 2, \dots, n\}$, 则

$$P_h = \frac{\xi[x_0(h), x_i(h)]}{\sum_{k=1}^n \xi[x_0(h), x_i(h)]},$$
$$P_h \in P_i (h=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

称为分布的密度值.

X_i 的灰关联熵表示为

$$H(R_i) = - \sum_{k=1}^n P_h \ln P_h \quad (3)$$

序列 x_i 的灰熵关联度为

$$E(x_i) = H(R_i)/H_{\max} \quad (4)$$

式中: $H_{\max} = \ln n$, 代表由 n 个元素构成的差异信息列的最大值.

2 有限元模型

2.1 材料参数

依据相关参考文献, 计算时取路面结构材料参数如表 1 所示^[3]. 由于在本研究中考考虑到水泥混凝土路面了设置接缝和传力杆, 传力杆按照 JTG D40—2002《公路水泥混凝土路面设计规范》和 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》来设置直径、间距和长度, 传力杆参数如表 2 所示.

表 1 各结构层材料参数

Tab. 1 Material parameters of the layer				
结构层	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	阻尼系数
水泥混凝土面层	23 000 ~ 47 000	0.15	2 500	0.05
沥青功能层	600 ~ 1 800	0.25	2 500	0.05
半刚性基层	800 ~ 3 200	0.25	2 100	0.05
地基	50 ~ 600	0.30	1 800	0.05

表 2 传力杆参数

Tab. 2 Dowel bar parameters					
传力杆直径 d/mm	传力杆长度 L/mm	传力杆间距 s/mm	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
35	600	300	200 000	0.25	7 850

2.2 边界条件

对于模型边界条件的确定并没有统一的方法, 许多文献采用的边界条件也是不一致的. 边界条件的确定主要从两个方面考虑, 一是依据路面结构的实际情况; 二是有选择性地进行试算, 研究边界条件对计算结果的影响. 笔者经过分析, 边界条件采用:

- (1) 地基底部完全约束, 地基四周法向约束;
- (2) 基层和功能层四周法向约束;
- (3) 水泥混凝土面板四周自由;
- (4) 传力杆只能平动, 不能转动.

2.3 模型尺寸

模型几何尺寸如表 3 所示, 路面结构模型如图 1 所示.

表 3 模型尺寸

Tab. 3 Model size		
结构层	平面尺寸长 \times 宽/ $\text{m} \times \text{m}$	层厚 h/mm
水泥混凝土层	5 \times 4	28
沥青功能层	10.01 \times 4	4
半刚性基层	10.01 \times 6	20
地基	13.01 \times 7	800

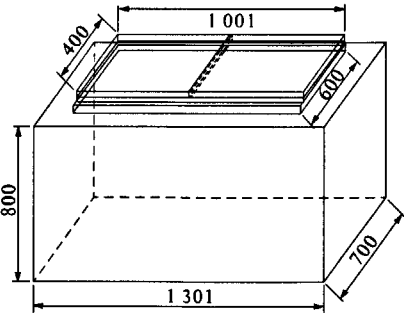


图 1 半刚性基层结构模型尺寸图(单位: mm)
Fig. 1 Model size of semi-rigid base

2.4 分析指标

在分析计算中, 应当首先明确路面结构在荷载作用下的力学响应指标, 这是力学分析的前提条件. 在设置层间功能层的水泥混凝土路面结构材料组成中, 水泥混凝土板为脆性材料, 在荷载作用下, 水泥混凝土板层底受到较大的弯拉应力, 故可以采用第一强度理论来考察其最大拉应力 σ_1 , 此外由于设置了功能层, 功能层的设置会增大面

层表面的弯沉,因此还要考虑水泥混凝土路面接缝两侧的弯沉及弯沉差.因此分析指标包括:面层接缝两端的弯沉和弯沉差;面层底部 σ_1 ;功能层顶部 τ_{xy} ;基层底部 σ_1 .

3 灰关联分析

为了定量分析各因素对路面结构响应的影

响,在灰关联分析中选择面层厚度与模量、功能层厚度与模量、半刚性基层厚度与模量、地基模量以及行车速度作为子序列,将面层表面弯沉及弯沉差、面层底部 σ_1 、基层底部 σ_1 作为母序列.计算安排与相关参数如表 4 所示,而计算结果如表 5 所示.

表 4 计算安排与相关参数
Tab. 4 Calculation arrangements and the relevant parameters

子序列	序号						
	1	2	3	4	5	6	7
面层厚度/cm	20	22	24	26	28	30	32
面层模量/MPa	23 000	27 000	31 000	35 000	39 000	43 000	47 000
功能层厚度/cm	1	2	3	4	5	6	7
功能层模量/MPa	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800
半刚性基层厚度/cm	14	16	18	20	22	24	26
半刚性基层模量/MPa	800	1 200	1 600	2 000	2 400	2 800	3 200
地基模量/MPa	50	100	200	300	400	500	600
行车速度/(km · h ⁻¹)	5	10	30	60	90	120	150

表 5 路面结构力学响应计算结果
Tab. 5 Calculation results of pavement structure mechanical response

母序列	序号						
	1	2	3	4	5	6	7
第一块板弯沉/0.01 mm	82.2	42.6	21.9	15.1	11.7	8.9	7.0
第二块板弯沉/0.01 mm	86.4	45.8	24.2	17.1	13.4	10.4	8.4
面层表面弯沉差/0.01 mm	4.2	3.2	2.5	2.0	1.7	1.5	1.3
面层底部 σ_1 /MPa	0.753 2	0.562 3	0.443 1	0.359	0.302 7	0.265 4	0.229 4
功能层 τ_{xy} 差值/MPa	0.318 2	0.365 3	0.361 2	0.338 9	0.315 5	0.295 2	0.274 7
基层底部 σ_1 /MPa	0.074 1	0.054 8	0.033 6	0.025 7	0.021 8	0.019 1	0.017 3

对表 4 和表 5 进行按照灰色关联分析步骤进行分析,计算各母序列与子序列的关联度,见表 6.
从表 6 可知,对于设置功能层的半刚性基层水泥混凝土路面结构在动态荷载下的力学响应,关联度的排序结果为 $\gamma_1 > \gamma_3 > \gamma_2 > \gamma_4 > \gamma_6 > \gamma_3 >$

$\gamma_7 > \gamma_8$,面层表面弯沉和弯沉差、面层底部拉应力、功能层顶部剪应力和基层底部拉应力受面层厚度的影响最大,其次分别是基层厚度、面层模量、功能层模量、基层模量、功能层厚度和地基模量,影响最小的是行车速度.由此可知在水泥混凝

表 6 半刚性基层灰关联度计算结果
Tab. 6 Grey entropy relation of semi-rigid base

子序列	母序列					
	第一块板弯沉	第二块板弯沉	面层表面弯沉差	面层底部 σ_1	功能层 τ_{xy} 差值	基层底部 σ_1
面层厚度 γ_1	0.939 9	0.940 6	0.953 4	0.952 8	0.980 5	0.948 3
面层模量 γ_2	0.927 6	0.928 2	0.940 6	0.940 0	0.967 4	0.935 7
功能层厚度 γ_3	0.815 4	0.815 9	0.824 4	0.824 0	0.841 9	0.821 1
功能层模量 γ_4	0.902 5	0.903 1	0.914 5	0.913 9	0.939 0	0.910 0
半刚性基层厚度 γ_5	0.932 7	0.933 3	0.945 9	0.945 3	0.973 1	0.940 9
半刚性基层模量 γ_6	0.878 2	0.878 8	0.889 4	0.888 8	0.911 8	0.885 2
地基模量 γ_7	0.749 2	0.749 5	0.756 3	0.755 9	0.769 4	0.753 7
行车速度 γ_8	0.623 6	0.623 8	0.628 1	0.627 8	0.635 3	0.626 7

土路面结构中,面层厚度和基层厚度对于路面结构受力状态的影响是最大的,在施工中,一定要严格控制路面厚度和基层厚度,因为对于一种确定的路面结构,面层厚度和基层厚度的控制要比模量的控制容易得多;在路面平整度较高的情况下,行车速度对于路面结构受力状态的影响比较小。

通过回归分析得出标准轴载下设置功能层的半刚性基层水泥混凝土路面结构力学响应的计算公式如式(1)~式(4)所示。

(1) 面层表面接缝两端弯沉差公式:

$$u_d = 5.657 7^{-4} h_1^2 + 9.632 2^{-10} E_1^2 - 4.986 1^{-3} h_2^2 + 1.393 4^{-7} E_2^2 + 6.930 1^{-5} h_3^2 + 2.513 2^{-8} E_3^2 + 9.309 3^{-7} E_4^2 - 4.655 7^{-5} V^2 + 0.052 5 h_1 h_3 - 1.581 8^{-5} h_1 E_1 + 1.585 0^{-3} h_1 E_2 - 1.257 2^{-3} h_1 E_3 - 2.498 8^{-6} h_3 E_1 - 8.698 8^{-3} h_3 E_2 + 4.516 0^{-3} h_3 E_3 + 3.728 2^{-6} E_1 E_2 - 2.043 3^{-6} E_1 E_3 - 6.675 8^{-6} E_2 E_3 + 0.058 7 h_2 - 1.228 6^{-3} E_4 + 9.039 6^{-3} V + 3.221 7 \quad (1)$$

回归公式的相关系数平方为0.999 5,均方差为0.008 7。

(2) 面层底部拉应力公式:

$$\sigma_{d1} = 7.375 9^{-4} h_1^2 - 7.626 1^{-11} E_1^2 - 2.263 4^{-3} h_2^2 + 5.589 1^{-8} E_2^2 + 1.543 1^{-4} h_3^2 + 1.626 5^{-8} E_3^2 + 4.713 6^{-7} E_4^2 - 2.442 4^{-5} V^2 - 1.910 6^{-2} h_1 h_3 - 6.594 4^{-6} h_1 E_1 + 6.812 1^{-4} h_1 E_2 - 3.492 5^{-4} h_1 E_3 + 1.301 5^{-5} h_3 E_1 + 4.964 4^{-4} h_3 E_2 - 2.390 3^{-4} h_3 E_3 - 1.040 6^{-6} E_1 E_2 + 4.072 4^{-7} E_1 E_3 + 1.507 4^{-6} E_2 E_3 + 3.271 8^{-2} h_2 - 4.219 5^{-4} E_4 + 3.092 2^{-3} V + 0.602 0 \quad (2)$$

回归公式的相关系数平方为0.998 5,均方差为0.003 3。

(3) 功能层顶部剪应力公式:

$$\tau_d = 2.211 7^{-4} h_1^2 + 4.673 7^{-11} E_1^2 - 6.415 6^{-3} h_2^2 - 5.063 3^{-8} E_2^2 + 2.096 7^{-5} h_3^2 + 5.626 2^{-9} E_3^2 + 1.569 3^{-7} E_4^2 + 1.035 8^{-5} V^2 - 1.418 6^{-3} h_1 h_3 + 9.391 0^{-7} h_1 E_1 + 2.856 6^{-4} h_1 E_2 - 1.827 2^{-4} h_1 E_3 - 3.918 2^{-6} h_3 E_1 - 5.794 9^{-4} h_3 E_2 + 4.268 4^{-4} h_3 E_3 + 1.747 7^{-7} E_1 E_2 - 8.233 0^{-8} E_1 E_3 - 7.617 7^{-7} E_2 E_3 + 6.277 9^{-2} h_2 - 1.884 8^{-4} E_4 - 2.119 6^{-3} V + 0.456 5 \quad (3)$$

回归公式的相关系数平方为0.992 9,均方差为0.003 3。

(4) 基层底部拉应力公式:

$$\sigma_{d2} = 2.196 7^{-5} h_1^2 + 4.059 5^{-12} E_1^2 + 9.957 0^{-5}$$

$$h_2^2 - 1.094 9^{-9} E_2^2 - 2.638 3^{-5} h_3^2 - 1.141 1^{-9} E_3^2 + 6.912 4^{-7} E_4^2 - 9.867 8^{-6} V^2 + 1.215 5^{-3} h_1 h_3 - 2.211 8^{-7} h_1 E_1 - 8.700 5^{-6} h_1 E_2 - 4.547 1^{-6} h_1 E_3 - 1.318 0^{-6} h_3 E_1 + 1.365 7^{-5} h_3 E_2 - 4.491 2^{-6} h_3 E_3 + 6.351 3^{-9} E_1 E_2 + 1.220 0^{-8} E_1 E_3 - 1.112 1^{-7} E_2 E_3 - 1.585 8^{-3} h_2 - 7.447 2^{-4} E_4 + 1.382 7^{-3} V + 0.139 6 \quad (4)$$

回归公式的相关系数平方为0.999 7,均方差为0.000 2。

公式(1)~(4)中: u_d 为面层表面接缝两端弯沉差; σ_{d1} 为面层底部拉应力; τ_d 为功能层顶部剪应力; σ_{d2} 为基层底部拉应力; h_1 为面层厚度; E_1 为面层模量; h_2 为功能层厚度; E_2 为功能层模量; h_3 为基层厚度; E_3 为基层模量; E_4 为地基模量; V 为行车速度。

4 结论

(1)通过灰关联分析,得出对路面结构力学响应的影响顺序依次为面层厚度>基层厚度>面层模量>功能层模量>基层模量>功能层厚度>地基模量>行车速度;

(2)在设置层间功能层的水泥混凝土路面结构中,面层厚度和基层厚度对于路面结构受力状态的影响是最大的,在施工中,一定要严格控制路面厚度和基层厚度;

(3)在路面平整度较高的情况下,行车速度对于路面结构受力状态的影响是比较小的;

(4)针对半刚性基层,通过回归分析得到了路面结构力学响应(面层弯沉差、面层底部拉应力、功能层顶部剪应力和基层底部拉应力)计算公式。

参考文献:

- [1] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 邓学钧, 孙璐. 车辆一路面相互作用产生的动力荷载[J]. 东南大学学报, 1996, 26(6): 142-145.
- [3] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 1998: 78-82.
- [4] 张慧昕. 沥青混合料室内外动态模量相关性研究[J]. 公路, 2009(7): 345-349.
- [5] 曾胜. 路面动态模量的特性分析[J]. 长沙交通学院学报, 2009, 20(2): 34-37.
- [6] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
- [7] 熊锐, 陈拴发, 关博文, 等. 乳化沥青混合料强度影

响因素的灰关联熵分析[J]. 郑州大学学报:工学

版,2010,31(6):60-64.

Grey Incidence Analysis of Dynamic Response of Cement Concrete Pavement with Function Layer

LIAN Xiang-dong^{1,2}, FU Xin³, XIONG Rui¹, GUAN Bo-wen¹, CHEN Shuan-fa⁴

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530021, China; 3. Guangdong Hualu Limited Company of Traffic Science and Technology, Guangzhou, 510420, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Through the finite element method, the effect of various factors (surface course thickness and modulus, functional course thickness and modulus, base thickness, soil modulus and running speed) of semi-rigid base cement concrete pavement structure with functional course under the vehicle dynamic load on the mechanical response was revealed. By using the grey relation analysis, the influence of various factors was given a quantitative analysis. Besides, the formula of the pavement structure mechanical response (surface deflection difference, tensile stress at the bottom of surface course, shear stress on the top of functional course and tensile stress at the bottom of base) were obtained by the regression analysis, which can provide theoretical direction for the structure design and construction of cement concrete with functional course.

Key words: cement concrete pavement; asphalt mixture function layer; dynamic vehicle load; semi-rigid base; grey incidence analysis

(上接第12页)

Study on Adsorption of Cr(VI) from Aqueous Solution Using Rice Husk by Hydrothermal Treatment

WANG Jian-she, JIANG Yan-wei, WANG Liu-cheng, SONG Cheng-ying, ZHAO Jian-hong

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The adsorption properties of Cr(VI) on hydrothermal treated rice husks were investigated and the adsorption capacities of rice husks with series treatment time were compared. The results showed that the rice husk with 4 hours treatment exhibited the best adsorption capacity, being four times that of raw rice husk. Thermogravimetric analysis and Fourier transform infrared spectroscopy of the series rice husks demonstrated that the active hydroxy group on rice husk dehydrated and condensed after the hydrothermal treatment. The effects of pH, contact time, initial concentration and temperature on the adsorption capacity were investigated, showing that the adsorption capacity increased with pH decreasing, temperature increasing, initial concentration increasing and contact time increasing, and the Freundlich adsorption isothermal model was well fitted.

Key words: rice husk; hydrothermal treatment; Cr(VI); adsorption