

# 重载作用下大碎石柔性基层的抗车辙性能

李丽民<sup>1,2</sup>, 何兆益<sup>3</sup>, 银力<sup>4</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南益阳 413000;  
3. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074; 4. 邵阳学院 城建系, 湖南邵阳 422000)

**摘要:**基于重载,通过室内试验,采用考虑运动车辆与不平整路面相互耦合作用的更加符合实际的汽车动载模型而建立起来的具有较高精度的车辆动力作用下沥青路面车辙计算与预估的方法,对大碎石柔性基层的抗车辙性能进行研究;并通过试验路的跟踪观测对试验成果和三维动载数值计算结果进行了验证。结果表明,重载作用下车辙主要是由横向剪切引起的,采用低标号沥青、压碎值小的优质集料和合理级配的大碎石柔性基层路面的抗车辙能力并不比传统的半刚性基层沥青路面差。

**关键词:**大碎石柔性基层;车辙;重载;数值计算;动载;试验路

**中图分类号:**U416.03 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0083-06

## Rut-resistance Properties of a Large-stone Flexible Base under Heavy Loads

LI Li-min<sup>1,2</sup>, HE Zhao-yi<sup>3</sup>, YIN Li<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, P. R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 4. Urban Construction Department, Shaoyang University, Shaoyang 413000, P. R. China)

**Abstract:** The rut-resistance properties of large-stone flexible bases are studied, taking into consideration heavy loads and using computer simulation and numerous indoor tests. In computer simulations of large-stone flexible bases, a calculation method was formulated for predicting asphalt pavement rut under dynamic loads. The method was based on the coupling of vehicle dynamic loads and pavement surface unevenness. The results of indoor testing and three-dimensional numeric calculation under dynamic loads are confirmed by tracking observation results of a test road. We conclude that the rut-resistance properties of large-stone flexible base asphalt pavement built using low-grade asphalt and low crush value high performance aggregate with reasonable gradation is no worse than that of the semirigid base asphalt pavement, and that ruts mainly are caused by the lateral shear.

**Key words:** large-stone flexible base; rut; heavy loads; computer simulation; dynamic loads; test road

随着国民经济快速、协调发展,道路交通量日益增大,车辆迅速大型化且严重超载,使我国广泛采用的半刚基层沥青路面面临严峻的考验,车辙、开裂等

早期破坏日益突出。大碎石柔性基层具有半刚性基层不曾有的优点和良好使用性能,可为我国半刚性基层路面的早期破坏问题提供一条新的解决思路。

收稿日期:2008-06-25

基金项目:湖南省教育厅资助科研项目(08C193)

作者简介:李丽民(1974-),男,中南大学博士研究生,主要从事道路工程研究,(E-mail)li-li-min@126.com。

然而,人们对于大碎石柔性基层沥青路面的抗车辙性能存在疑惑,尤其是重载作用下。因此,针对重载作用,对大碎石柔性基层的车辙性能展开研究,具有重要的理论和实用价值。

## 1 大碎石柔性基层材料抗车辙性能的试验研究

沥青采用中海 AH-70 和大港 AH-50 两种重交通道路石油沥青,中海 AH-70 沥青 PG 分级为 PG64-22,大港 AH-50 沥青 PG 分级为 PG70-16,其它指标见表 1。集料采用石灰石岩,指标见表 2。填充料为石灰石矿粉,密度  $2.715 \text{ g/cm}^3$ ,亲水系数 0.85。采用级配见表 3,级配骨架结构试验结果见表 4。对选用级配,通过大量室内各种路用性能试验,最后选用 3# 级配作为依托工程郧长高速公路大碎石柔性基层试验段的目标级配。不同沥青、级配、荷载的车辙试验结果见图 1~图 3。

表 1 沥青各项指标

沥青	试验项目					
	25 °C 针入度/ 0.1 mm	15 °C 延度/ cm	软化 点/°C	针入 度指 数 PI	含蜡 量/%	
中海 AH-70 沥青	68	>100	50.0	-0.9	2.3	1.014
大港 AH-50 沥青	56	>80	59.3	0.81	2.7	1.004

表 2 集料各项指标

技术指标	粗集料	细集料	指标要求
视密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.724	2.718	$\geq 2.50$
坚固性(细集料 为 $>0.3 \text{ mm}$ 部分)/%	4.3	6.3	$\leq 12$
含泥量/%	0.6	0.7	$\leq 3$
吸水率/%	0.32	0.58	$\leq 2$
针片状颗粒含量/%	9.4	/	$\leq 15$
洛杉矶磨耗损失/%	21.5	/	$\leq 28$
沥青的粘附性/级	5	/	$\geq 4$
压碎值/%	16.4	/	$\leq 26$

表 3 级配

级配	通过下列筛孔(方孔筛/mm)的质量百分率/%													
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16	19	26.5	31.5	37.5
1#	2	3	5	8	10	15	20	32	42	48	60	90	100	100
2#	4	5	7	12	14.5	23	29	46	59	65	73	92	100	100
3#	4.5	6	8.5	13	17	23.5	30	41	51	57.5	66	95	100	100
4#	6	10	14	18	25	32	40	52	62	68	80	100	100	100
5#	2	3	5	8	10	15	20	31	39	44	53	70	90	100
6#	3	5	7	10	14	21	29	43	53	61	67	84	93	100
7#	4	6.5	9.5	13	17.5	23.5	30	41	49.5	55	62.5	80	95	100
8#	6	10	14	18	25	32	40	51	60	66	72	90	100	100

表 4 骨架结构各参数

级配	$\rho_{ca}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{mb}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$P_{CA}/\%$	$VCA_{DRC}/\%$	$VCA_{mix}/\%$	是否形成嵌挤结构
1#	2.697	1.540	2.452	80	42.90	27.27	是
2#	2.697	1.585	2.474	70.5	41.23	35.33	是
3#	2.702	1.543	2.492	70	42.91	35.44	是
4#	2.706	1.565	2.490	60	42.17	44.79	不是
5#	2.685	1.590	2.459	80	40.78	26.73	是
6#	2.695	1.585	2.470	71	41.49	34.93	是
7#	2.688	1.570	2.493	70	41.59	35.08	是
8#	2.693	1.550	2.495	60	42.44	44.41	不是

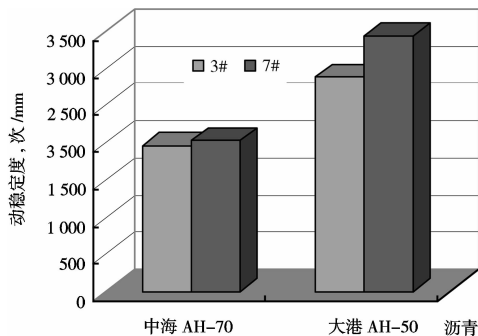


图 1 沥青与动稳定度变化柱状图

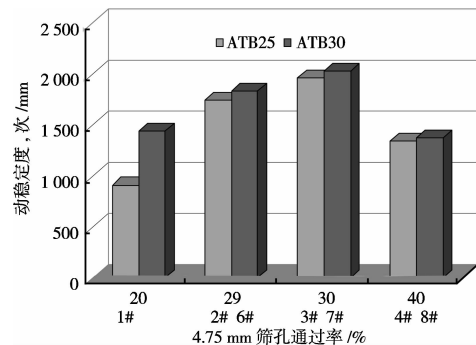


图 2 级配与动稳定度变化柱状图

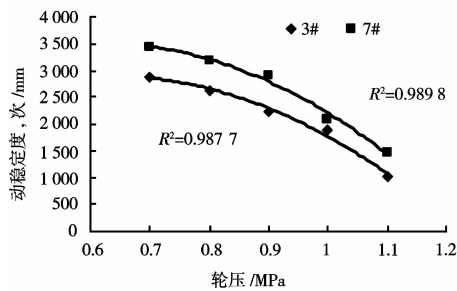


图 3 轮压与动稳定度关系曲线

试验研究发现,采用 PG 分级等级高、针入度小、软化点高的硬质沥青,保证级配形成骨架结构能明显提高混和料的抗车辙能力,但大于 4.75 mm 的粗集料宜保持在 70% 左右;不同荷载作用下,大碎石混和料的抗车辙能力并不是直线变化,在 0.9 MPa 后,动稳定度显著下降;大碎石混和料的车辙变形主要是压密变形和大集料被压碎导致的垂直变形和横向流动变形所致,重载下横向流动变形显著。

### 3 大碎石柔性基层路面抗车辙性能数值计算

#### 3.1 计算模型的建立

采用动力有限元法,利用大型有限元分析软件 ANSYS,对路面三维实体模型动态加载,建立基于车辆与路面耦合作用的车辙顶估计算方法,其流程图见图 5。充分考虑车辆动力和沥青材料粘弹性特征,采用能较真实地反映沥青材料的高温粘弹性流变性质的 Burgers 模型本构理论,其力学模型如图 4 所示,其本构方程为  $\sigma + p_1\dot{\sigma} + p_2\ddot{\sigma} = q_1\dot{\epsilon} + q_2\ddot{\epsilon}$ ,  $p_1 =$

$\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2}$ ;  $q_1 = \eta_1$ ;  $q_2 = \frac{\eta_1\eta_2}{E_2}$ 。三维计算模型中,计算单元沥青层采用 SOLID186,基层及土基则采用 SOLID45;沥青层材料采用 Burgers 模型在 ANSYS 中使用的 Prony 级数形式,半刚性基层和垫层看作完全弹性体系,材料模型采用广义虎克定律,路基填料模型采用 Drucker-Prager 准则;网格划分由荷载处沿路基路面的 X、Y、Z 方向按由密到疏原则进行自由网格划分,在荷载处再进行局部单元细化,各层用 merge 方法连接,以满足层间连续接触条件;对垂直于路线方向两侧取自由表面,不进行约束,对沿路线方向两侧 Y 方向(沿路线方向)进行约束,路面底部完全约束。有限元求解时,对实体模型进行双圆动态函数加载,对 ANSYS 进行二次开发,利用 APDL 的函数编辑器进行汽车动载模型加载函数的编辑;考虑车辆荷载作用瞬时性,采用 ANSYS 程序求解器中的瞬态分析模块,用 full 法进行模态分析,确定模型的固有频率和阻尼矩阵;动力方程求解采用 Newmark- $\beta$  时间积分法,每次求解前,程序选择 Newton-Raphson 方法估计荷载残差是否满足力的收敛条件,如果不满足,重新估计荷载残差量,修改刚度矩阵,获得新解,直到收敛为止;最后解出所有节点的位移,叠加后便可得到路面的累积变形值。

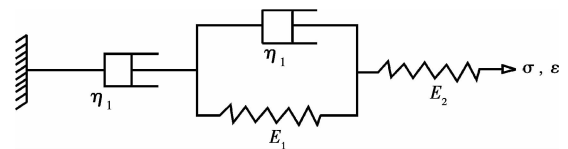


图 4 Burgers 模型示意图

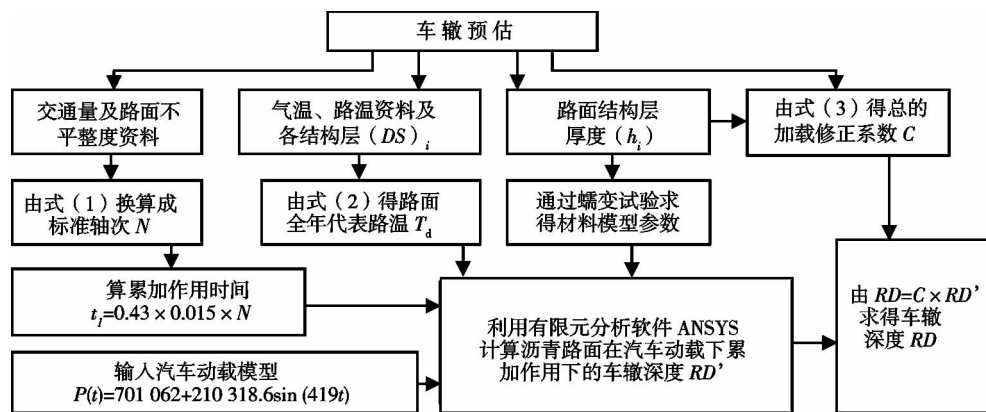


图 5 车辙计算与预估方法流程

注:式(1)是以车辙等效为原则的轴载换算公式:  $N = \sum_{i=1}^K C_1 C_2 m_i \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^4$ ,  $P_0$  为标准轴载 100 kN;  $P_i$ 、 $N_i$  分别为某一轴载和作用次数,次/日;  $C_1$ 、 $C_2$  为轴数系数与轮组系数。式(2)  $T_d = \frac{\sum_{i=1}^K \bar{T}_i}{(DS)_i} / \sum_{i=1}^K \frac{1}{(DS)_i} \bar{T}_i$  为沥青路面各月平均温度  $^{\circ}C$ ,  $(DS)_i$  为各月路面平均温度下面层动稳定度值,次/mm。式(3)  $C = \sum_{i=1}^n C' h_i / \sum_{i=1}^n h_i$ ,  $C'$  为沥青面层各结构层以最大粒径进行区分的加载修正系数;  $h_i$  为面层各结构层厚度,m。

### 3.2 数值计算结果

对试验路半刚性基层路面结构 A、大碎石柔性基层路面结构 B(见表 5)进行车辙预估,车辙深度理论预估值及实测值如图 6 所示,计算辙与实测的车辙变形的形状基本相同,预估车辙值略小于实测车

辙值,误差仅为 8.5%~9.5%,对复杂的车辙预估问题来说具有较高精度,表明预估方法是合理的。结构 A、B 的车辙变形辙变形计算结果见图 7,结构 B 的轮压与车辙关系曲线见图 8。

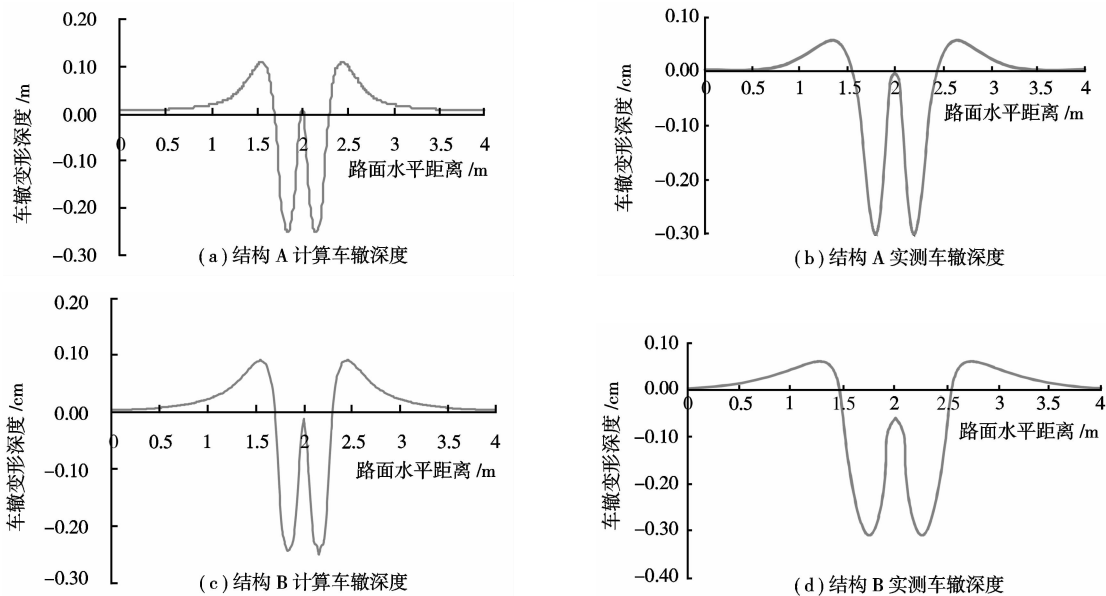


图 6 车辙深度计算值与实测值

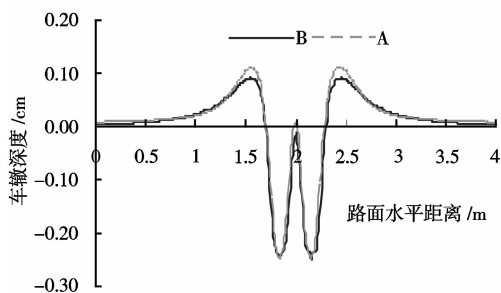


图 7 结构 A、B 车辙变形曲线

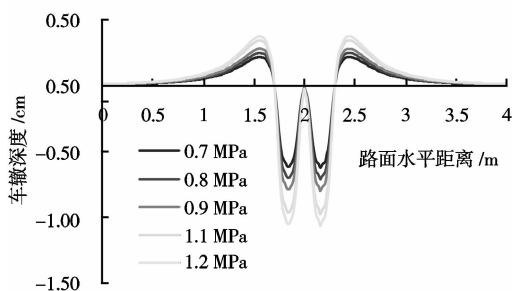


图 8 结构 B 轮压与车辙曲线

结果表明,大碎石柔性基层 B 与半刚性基层 A 路面的绝对车辙相差不多,半刚性基层路面的侧向隆起高度大于大碎石柔性基层路面,中间拥包高度也比柔性基层沥青路面略陡,大碎石柔性基层沥青

路面的抗车辙能力并不比半刚性基层差;轮压大于 0.9 MPa 时,路面车辙变形量显著增加,路面上方的隆起车辙加剧,重载作用下车辙主要是由横向剪切引起的。

### 3 大碎石柔性基层抗车辙性能的试验路验证

邯鄲~长治高速公路是河北省国道 309 主干线的一部分,也是晋煤外运的重要通道之一。大碎石柔性基层试验路段位于邯长高速公路一期上,路面结构见表 5,主要行驶车辆为晋煤外运,交通量大,单轴轴载大,属于典型的重载交通高速公路。经调查统计分析,交通量换算为标准轴载后重车累计当量轴次 11 775 万次,轻车方向 3 686 万次。正式通车后实际调查发现重车方向的货车几乎全超载,有些车辆载重达百吨以上。通车 2 年后的进行车辙测试,结果见图 9,半刚性结构 A 平均车辙深度为 3.3 mm,大碎石柔性基层 B 结构平均车辙深度为 4.6 mm,比半刚性基层 A 路面车辙略大,但 B 结构路面部分车辙是由初期压密变形产生的,表明重载下结构 A、B 路面的抗车辙性能相差不多;通车两年多来,跟踪观测发现大碎石柔性基层沥青面在重载

作用下未产生波浪、拥包等高温稳定性破坏,也未出现任何裂缝、松散、坑槽、沉陷、泛油等破损现象,表明大碎石柔性基层具有良好的抗车辙能力,能够承担重交通作用。

表 5 郜长路重车方向路面结构

常规结构 A	试验路结构 B
4 cm AC-13C	4 cm AK-13A
—	SBS 改性沥青粘层
5 cm AC-20C	8 cm AC-25 I
6 cm AC-25C	8 cm ATB-25
19 cm 水稳碎石	10 cm ATB-25
19 cm 二灰碎石	10 cm ATB-25
20 cm 石灰土	2 mm 改性沥青下封层
—	透层
—	20 cm 二灰碎石
—	20 cm 石灰土

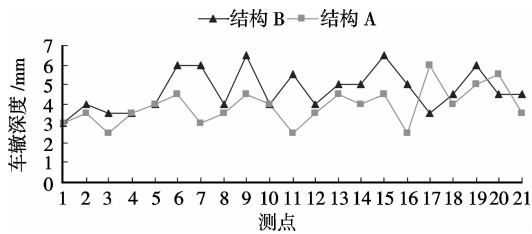


图 9 结构 A、B 车辙测试结果

### 4 结 论

采用能较真实地反映沥青材料的高温粘弹性流变性质的 Burgers 模型本构理论,利用 ANSYS 有限元计算程序,基于更加符合实际情况的汽车荷载模型,对路面三维实体模型动态加载,建立了具有较高的计算与预估精度的基于车辆动力作用的沥青路面车辙计算与顶估方法,结合室内试验和试验路,对重载下大碎石柔性基层的车辙性能进行了研究,发现大碎石柔性基层路面的抵抗车辙变形的能力不比半刚性基层沥青路面差,重载作用下车辙主要是由横向剪切引起的,采用低标号沥青、压碎值小的优质集料和合理的级配的大碎石柔性基层具有良好的抗车辙能力,能够承担重载交通作用。

### 参考文献:

[1] KETTLIL P, L ENHOF B, RUNESSON K, et al. Simulation of inelastic deformation in road structures due to cyclic mechanical and thermal loads [J]. Computers & Structures, 2007, 85(1/2):59-70.

[2] FANG HONGBING, HADDOCK JOHN E, W HITE THOMA S D, et al. On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 41(1): 49-73.

[3] YAVUZTURK C, KSAIBATI K, CHIASSON A NDREW D. Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional transient finite-difference approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(4):465-475

[4] PÉREZ I, M EDINA L, ROM ANAM G. Permanent deformation models for a granular material used in road pavements [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9):790-800.

[5] JONES R, HORNE R D, SULLIVAN P, et al. A methodology for quantitatively assessing vehicular rutting on terrains [J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42: 245-257.

[6] MARATEANU MIAI O, CLYNE TIMOTHY, MCGRAW JIM, et al. High-temperature rheological properties of asphalt binders [J]. Transportation Research Record, 2005, 1901: 52-59.

[7] TAREFDER R A, ZAMAN M, HOBASON K. A laboratory and statistical evaluation of factors affecting rutting [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2003, 4(1):59-68.

[8] 苏凯,孙立军,沥青混凝土永久变形预估方法研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(5):510-513. SU KAI, SUN LI-JUN. A new method for predicting deformation of asphalt concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007,10 (5):510-513.

[9] 刘红瑛,戴经梁.不同级配对沥青混合料车辙性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):11-15. LIU HONG-YING, DAI JING-LIANG. Effect of different gradations on asphalt mixture resistance to rut [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(5): 11-15.

[10] 谢水友,郑传超.轮胎接触压力对沥青路面结构的影响 [J].长安大学学报:自然科学版,2004,24 (1):12-16. XIE SHUI-YOU, ZHENG CHUAN-CHAO. Effects of tirecontact pressure on asphalt pavement structure [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2004,24 (1):12-16.

[11] 张争奇,王永财.沥青胶浆对沥青混合料高低温性能的

- 影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(2): 123-125.
- ZHANG ZHENG-QI, WANG YONG-CAI. Influence of asphalt mortar on hot mix asphalt performance at high and low temperature [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(2): 125.
- [12] TAREFDER R A, ZAMAN M, HOBASON K. A laboratory and statistical evaluation of factors affecting rutting [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2003, 4(1): 59-68.
- [13] 刘丽, 郝培文, 肖庆一. 沥青胶浆高温性能及评价方法 [J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(5): 30-34.
- LIU LI, HAO PEI-WEN, XIAO QING-YI. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2007, 27(5): 30-34.
- [14] 王鹏, 曾凡奇, 黄晓明. 沥青高温性能指标的灰色关联度分析 [J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 32-36.
- WANG PENG, ZENG FAN-QI, HUANG XIAO-MING. Grey relation degree analysis of high-temperature performance indexes of asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 32-36.
- [15] COLLOP A C, CEBON D, HARDY M S A. Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements [J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(1): 82-93.
- [16] 郭大智, 任瑞波. 层状黏弹性体系力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

(编辑 王秀玲)

(上接第76页)

- [7] SAYERS M W, GILLESPIE T D, QUEIROZ C A V. The international road roughness experiment. Establishing correlation and calibration standard for measurements [R]. Washington D C: WorBank Technical Paper, 1986.
- [8] YANG Y B, LIN C W. Vehicle bridge interaction dynamics and potential applications. Journal of Sound and Vibration [J], 2005, 282(1-2): 205-226.
- [9] YANG Y B, LIN C W, YAU J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3): 471-493.
- [10] YANG Y B, LIN C W. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification [J]. Engineering Structures, 2005, 27(13): 1865-1878.
- [11] BIGGS J M. Introduction to Structural Dynamics [M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [12] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamic of structures [M]. 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1993.
- [13] MICHALTSOS G T. Dynamic behaviour of a single-span beam subjected to loads moving with variable speeds [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258(2): 359-372.
- [14] LI W M, ZHU H P, XIA Y. Vehicle velocity effect on dynamic effect factor to a vehicle bridge system [C] // 2nd International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement, 19-21 November 2007, Changsha, China.

(编辑 胡玲)