

文章编号:1671-8879(2012)03-0024-06

基于 FWD 的沥青层反算模量修正系数

徐艳玲¹,唐伯明¹,谢国栋²,陈 森¹

(1. 重庆交通大学 山区道路结构与材料重庆市重点实验室,重庆 400074;

2. 天津市政工程设计研究院,天津 300051)

摘 要:针对室内沥青混合料试验动弹模量与无损检测反算模量存在一定的差异,通过试验路的铺装、落锤式弯沉仪(FWD)现场测试、试验路的钻芯取样、沥青混合料的旋转压实成型、室内动三轴试验、各沥青层模量的复合和试验路结构模量的反算,得到了沥青混凝土层室内试验动弹模量 E_s 与无损检测反算模量 E_b ,并对二者试验结果处理分析,得到了沥青层反算模量修正系数 K ,即 $K = E_c/E_b$ 。研究结果表明:根据 K 的取值可以确定现有路面实测状况下路面结构沥青层的动弹模量,更加方便路面承载能力的评定,同时也为路面加铺设计中相应的设计参数提供了依据。

关键词:道路工程;沥青混凝土;FWD;室内试验动弹模量;无损检测反算模量;模量修正系数 K ;路面结构承载能力

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Back calculated modulus correction coefficient for asphalt concrete layer based on FWD

XU Yan-ling¹, TANG Bo-ming¹, XIE Guo-dong², CHEN Sen¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Mountainous Road Structure and Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: Aiming at the differences between laboratory dynamic elastic modulus and back calculated modulus of asphalt concrete layer, through paving test section, conducting falling weight reflectometer(FWD) field testing, coning sample, modeling species with gyratory compaction method, doing dynamic triaxial test, calculating composite-laboratory modulus and back calculated modulus of asphalt layer, the relationship between the laboratory dynamic elastic modulus E_s and the back calculated modulus E_b of asphalt concrete layer was presented. The correction coefficient $K(K = E_c/E_b)$ of back calculated modulus was calculated. The results show that the resilient modulus of field asphalt concrete layer can be got according to K value, which is more convenient for evaluating the bearing capacity of existing road, and it can be taken as design parameters in the structural design method of overlay. 19 tabs, 4 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; asphalt concrete; fall weight rfectometer; laboratory dynamic elastic modulus; back calculated modulus; correction coefficient K ; bearing capacity of pavement

0 引 言

随着中国公路路面结构破坏日渐加重,越来越多的沥青路面出现不同程度的病害,路况迅速恶化,因此,原有路面迫切需要进行改造与修复。在旧路进行加铺设计之前,确定原有路面的承载能力是非常有必要的,而路面结构承载能力主要表征为路面结构弹性模量。目前,评定路面承载能力的主要方法通常为有损检测与无损检测 2 种。有损检测主要是对道路进行钻芯取样,之后对芯样进行分析,由此来评价道路的承载能力。然而,这种方法对道路自身的结构性能有很大的损害作用。在路面设计指南中,新的力学-经验法中第一设计水平是通过实验室测试和无损检测的方法来确定路面结构参数,这表明通过无损检测来评价道路的承载能力是具有可行性的^[1-2]。落锤式弯沉仪(Falling Weight Deflectometer, FWD)是无损检测常用的设备之一。将 FWD 测试得到的弯沉盆数据通过软件反算,可以得到路面各结构层的反算模量值。但由于反算程序所假设的条件与实际情况存在着差异,如路面系统的弹性层状体系、层间粘结等,所以道路材料结构层的反算模量值与实测模量值也存在一定的差异,因此,亟需建立反算模量值与实测路面结构模量值的关系。

目前,国内外有许多学者对沥青材料层的反算模量与实验室测试模量进行了比较研究。Von 等通过研究,发现二者存在良好的相关性,并得到了二者的比值^[3];Zhou 认为,二者关系的规律性较差^[4];Mahoney 等通过研究,得到了反算模量值含有温度 T 参数的修正因子^[5];Gedafa 等比较了 Superpave 路面的反

算模量与实验室测试模量,并总结得出了 40 ℃ 下二者的比值^[6];Derek 等通过研究,认为二者的比值在 1 附近^[7]。以上各位学者的研究结论存在较大差异,且国外诸多研究中路面结构类型以及试验方法的不同,得出的结论对中国沥青路面结构反算模量的修正并不一定适用。为此,本文以 FWD 测试和中国常见沥青路面结构类型为基础,对沥青混合料结构层的室内试验模量与反算模量的关系进行相关的研究。

1 试验步骤

将实验室测试得到的沥青混合料层的试验动弹模量与无损测试反算得到的模量值进行比较,得出二者的关系,即反算模量的修正系数 K 。根据 K 值可以通过无损检测得到沥青层的结构动弹模量,从而方便了路面结构承载能力的确定,并为加铺设计相应的设计参数提供依据。试验步骤为:

- (1)铺筑不同结构类型的路面;
- (2)测试各温度下的定点弯沉与厚度;
- (3)测试试验动弹模量;
- (4)反算各温度下沥青层各测试点的模量;
- (5)比较试验复合动弹模量与反算模量。

2 试验概况

2.1 试验路的铺筑

为了得到不同路面结构下的弯沉盆数据,本研究铺筑了 4 种典型结构的路面,其中第 1 号、2 号试验路段铺筑在室内,第 3 号、4 号试验路段铺筑在室外,各试验路结构见表 1。4 种结构的试验路都属新建路面,因此沥青面层处于无裂缝状态。

表 1 试验路结构

试验路段	路面结构	铺筑尺寸		测试点数/个	试验路段	路面结构	铺筑尺寸		测试点数/个
		长度/m	高度/m				长度/m	高度/m	
1 号	50 mm SMA-13	3	4	18	3 号	80 mm SMA-13	5	6	16
	100 mm AC-16					120 mm AC-16			
	200 mm AC-20					330 mm 级配碎石			
	200 mm 水泥稳定碎石					路基			
	1 450 mm 路基土								
	刚性下卧层								
2 号	50 mm SMA-13	3	4	18	4 号	40 mm SMA-13	5	6	20
	100 mm AC-16					120 mm AC-16			
	400 mm 水泥稳定碎石					150 mm AC-20			
	1 450 mm 路基土					150 mm 级配碎石			
	刚性下卧层					路基			

2.2 试验路段路面弯沉及厚度测试

本研究所用的弯沉测试仪器为 FWD,型号为

Dynatest 8000。每次弯沉测试,通过 9 个位移传感器的测试结果得到弯沉盆数据,其中 9 个传感器距

荷载中心点的距离分别为 0、200、300、450、600、900、1 200、1 500、1 800 mm,编号为 D₀~D₈。测试采用的荷载为 50 kN,每次弯沉测试时都记录了沥青层中点深度处的温度。为得到不同测试点各温度下的弯沉盆数据,本研究在 2009 年 11 月~2010 年 9 月,连续对试验路段的测试点进行弯沉测试,各测试点温度见表 2。

表 2 各试验路段 FWD 测试温度

试验路段	中点测试温度/℃								
	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
1 号	11.5	16.8	21.0	24.0	28.5				
2 号	11.5	16.8	21.7	24.0	29.4				
3 号	8.6	12.4	17.0	20.0	27.2	36.0	45.2	46.7	
4 号	8.6	11.0	16.4	20.1	24.0	27.0	35.1	41.2	45.0

在取得 FWD 测试数据之后,通过钻芯取样的方式进行厚度的测试,每种试验路段上所钻取的芯样数量为 3 个,钻芯的深度为路面结构的面层与基层的总厚度,各路面结构层的钻芯厚度见表 3。

表 3 各试验路路面结构层厚度

试验路段	路面结构	结构层厚度/mm			
		芯样 1	芯样 2	芯样 3	平均值
1 号	沥青混凝土	345	347	351	348
	水泥稳定碎石	197	201	202	200
2 号	沥青混凝土	146	149	148	148
	水泥稳定碎石	404	401	399	401
3 号	沥青混凝土	200	196	198	198
	级配碎石	325	331	329	328
4 号	沥青混凝土	312	310	311	311
	级配碎石	148	151	147	149

2.3 室内试验

由于试验路段上沥青层由多层不同材料的沥青亚层构成,所以沥青层整体的试验弹性模量是各亚层试验动弹模量经复合得到的。本文对 3 种沥青混合料在 5℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃ 6 个不同温度下进行了室内动弹模量的测试,其中动弹模量测试以 AASHTO TP62 为标准^[8]。AASHTO TP62 中规定,沥青混凝土试样的高度为 150 mm,则 AC-20 的动弹模量的测试试件可直接在试验路段上通过钻芯取得,而试验路段上 SMA-13、AC-16 结构层的厚度均小于 150 mm,无法直接通过钻芯取得试件,所以测试试件是通过旋转压实成型而得到,所有试件试验动弹模量的测试加载频率均为 10 Hz。

通过对试验路段的沥青层钻芯取样,然后对芯样进行空隙率测试,得到各试验路段沥青混合料空隙率测试结果见表 4。为了得到试验路段对应空隙率下试件的弹性模量值,需建立空隙率与模量值之间的关系,以试验路段沥青混凝土的空隙率为控制标准,

利用原铺筑试验路时保留下来的沥青混合料成型测试试件,每种沥青混合料成型 4 个不同空隙率的试件,然后对不同空隙率的试件进行测试,试件实测空隙率见表 5;不同温度下室内成型试件进行动三轴试验测试,得到动弹模量的测试结果见表 6。

表 4 SMA-13、AC-16 的空隙率

沥青混凝土	试验路段	空隙率 V/%
SMA-13	1 号,2 号	7.3
	3 号,4 号	8.1
AC-16	1 号,2 号	5.6
	3 号,4 号	6.7

表 5 测试试件的空隙率

沥青混凝土	不同试件的空隙率/%			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
SMA-13	10.1	8.5	6.9	5.7
AC-16	9.1	6.7	4.7	3.6

表 6 各温度下试件的试验动弹模量

沥青混凝土	试件编号	空隙率 V/%	不同温度(℃)的试验动弹模量 E _S /MPa					
			5	10	20	30	40	50
SMA-13	1 [#]	10.1	7 604	6 290	3 879	2 374	1 434	967
	2 [#]	8.5	9 858	8 095	4 679	3 681	1 982	1 175
	3 [#]	6.9	10 497	8 878	5 790	4 742	2 700	1 337
	4 [#]	5.7	11 017	9 525	6 138	5 103	3 233	1 602
AC-16	1 [#]	9.1	10 387	8 992	5 446	4 281	2 075	1 097
	2 [#]	6.7	11 397	9 532	6 326	4 982	2 104	1 264
	3 [#]	4.7	12 959	11 026	7 381	5 971	2 610	1 334
	4 [#]	3.6	14 159	12 146	8 253	6 510	3 020	1 434

3 室内试验结果分析

3.1 动弹模量值的计算

将各温度下试件的空隙率与动弹模量值进行回归,得到二者的函数关系,见表 7。由此函数求得试验路段对应空隙率下的动弹模量,计算结果见下页表 8^[9]。

表 7 试验动弹模量与空隙率之间的函数关系

沥青混凝土	温度/℃	E _S 回归方程	判定系数 R ²
SMA-13	5	E _S =18 470e ^{-0.083V}	0.928 4
	10	E _S =15 086e ^{-0.081V}	0.930 9
	20	E _S =10 920e ^{-0.1V}	0.977 4
	30	E _S =11 802e ^{-0.147 7V}	0.914 2
	40	E _S =7 898e ^{-0.164 4V}	0.975 6
	50	E _S =2 783e ^{-0.103 5V}	0.987 2
AC-16	5	E _S =17 007e ^{-0.055 9V}	0.976 7
	10	E _S =14 392e ^{-0.054 7V}	0.934 9
	20	E _S =10 612e ^{-0.074 6V}	0.990 9
	30	E _S =8 545e ^{-0.077 2V}	0.993 5
	40	E _S =3 663e ^{-0.068 7V}	0.843 9
	50	E _S =1 687e ^{-0.046 3V}	0.977 7

表 8 各温度下试验路段的动弹模量值

试验 路段	沥青 混凝土	不同温度(℃)的动弹模量 E_s					
		5	10	20	30	40	50
1 号, 2 号	SMA-13	12 471.3	10 620.5	7 044.6	5 571.4	2 501.9	1 305.2
	AC-16	11 466.3	9 744.9	6 245.6	4 931.5	2 245.9	1 215.8
	AC-20	17 339	14 270	7 844	5 568	3 255	1 616
3 号, 4 号	SMA-13	10 138.2	8 393.7	5 300.3	4 070.4	2 449.8	1 317.9
	AC-16	9 523.2	7 889.2	4 914.4	3 631.7	2 164.5	1 218.9
	AC-20	15 412	12 148	6 733	4 952	2 955	1 325

为了便于求取任何测试温度下沥青混凝土的动弹模量,利用表 8 中的数据进行动弹模量与温度的回归分析,即可得到各沥青混合料动弹模量随温度 T 变化而变化的曲线方程,回归曲线方程见表 9。

3.2 复合模量值的计算

将计算得到的各沥青混合料亚层的试验动弹模

表 9 各沥青混凝土动弹模量与温度曲线方程

试验路段	沥青混凝土	E_s 回归方程	判定系数 R^2
1 号,2 号	SMA-13	$E_s=13\ 154e^{-0.043\ 7T}$	0.986 4
	AC-16	$E_s=18\ 058e^{-0.049\ 2T}$	0.964 1
	AC-20	$E_s=23\ 353e^{-0.051\ 3T}$	0.991 3
3 号,4 号	SMA-13	$E_s=12\ 359e^{-0.044\ 6T}$	0.992 0
	AC-16	$E_s=16\ 346e^{-0.049\ 1T}$	0.971 0
	AC-20	$E_s=20\ 553e^{-0.051\ 8T}$	0.984 4

量以及路面结构厚度等其他参数代入到 BISAR 程序中,计算理论弯沉盆,计算结果见表 10。基于弯沉等效原则,将计算得到的理论弯沉盆数据以及路面结构参数输入到 SIMOD 反算软件,计算出沥青层整体试验模量,即复合模量 E_c 。计算结果见下页表 11~表 14。

表 10 BISAR 计算的理论弯沉盆数据

试验路段	温度/℃	不同测点的弯沉/0.001 mm								
		D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
1 号	11.5	58.8	46.5	43.1	39.8	30.8	25.1	19.9	15.4	15.6
	16.8	65.8	50.3	46.0	42.2	38.8	32.2	26.0	20.4	15.6
	21.7	72.4	53.6	48.6	44.3	40.6	33.4	26.7	20.8	15.7
	24.0	76.9	55.7	50.2	45.6	41.7	34.2	27.2	21.0	15.7
	29.4	86.1	60.0	53.4	48.2	43.9	35.6	28.0	21.3	15.7
2 号	11.5	75.9	63.9	60.5	57.1	53.7	46.8	40.0	33.3	27.2
	16.8	81.5	66.9	63.2	59.6	56.1	48.7	41.3	34.2	27.7
	21.7	87.3	69.8	65.7	61.9	58.1	50.3	42.5	35.0	28.2
	24.0	89.3	70.6	66.4	62.6	58.8	50.9	42.9	35.3	28.4
	29.4	96.6	73.5	68.8	64.9	60.9	52.5	44.1	36.1	28.8
3 号	8.6	441.3	386.1	345.0	288.8	242.2	175.0	132.5	104.9	86.2
	12.4	329.7	297.3	276.7	246.5	218.2	170.7	134.8	108.6	89.5
	17.0	348.7	310.6	286.9	253.0	222.2	171.6	134.6	108.0	88.9
	20.0	362.0	319.6	293.8	257.5	224.9	172.2	134.4	107.7	88.6
	27.2	397.2	342.0	310.4	267.6	230.5	173.2	133.9	106.9	87.9
	36.0	471.5	382.0	338.6	283.3	238.4	174.1	133.0	105.8	87.2
	45.2	508.8	399.2	348.9	287.9	240.2	174.0	132.7	105.7	87.1
	46.7	510.0	400.3	348.5	287.0	239.4	173.8	132.7	105.8	87.3
4 号	8.6	238.4	221.9	212.8	198.9	184.7	157.1	132.5	111.6	94.4
	11.0	227.8	209.7	201.2	189.0	176.4	151.6	129.2	109.7	93.4
	16.4	248.1	225.5	215.1	200.4	185.5	157.1	131.9	110.7	93.3
	20.1	257.4	232.6	221.3	205.4	189.5	159.3	132.9	110.9	93.1
	24.0	280.4	249.3	235.7	216.9	198.4	164.0	134.0	111.2	92.5
	27.0	296.8	260.9	245.2	224.1	203.7	166.7	135.7	111.1	91.9
	35.7	344.7	291.1	270.2	243.0	217.5	172.6	137.3	110.4	90.4
	41.2	393.8	319.8	292.2	258.3	227.5	175.9	137.2	109.1	88.9
	45.0	384.5	313.3	287.1	255.0	225.6	175.5	137.5	109.5	89.2

表 11 1 号试验路段沥青层的复合模量 E_C

温度/℃	11.5	16.8	21.0	24.0	28.5
复合模量 E_C /MPa	11 205.8	7 489.7	6 398.5	5 836.7	4 960.8

表 12 2 号试验路段沥青层的复合模量 E_C

温度/℃	11.5	16.8	21.7	24.0	29.4
复合模量 E_C /MPa	9 175.5	7 185.2	5 715.9	5 303.6	4 141.5

表 13 3 号试验路段沥青层的复合模量 E_C

温度/℃	8.6	12.4	17.0	20.0	27.2	36.0	45.2	46.7
复合模量 E_C /MPa	9 175.5	7 185.2	5 715.9	5 303.6	4 141.5	2 199.1	1 693.0	1 577.7

表 14 4 号试验路段沥青层的复合模量 E_C

温度/℃	8.6	11.0	16.4	20.1	24.0	27.0	35.7	41.2	45.0
复合模量 E_C /MPa	11 897.8	9 453.4	7 440.3	6 642.6	5 202.8	4 434.6	2 938.9	2 205.2	2 052.5

4 室外试验结果分析

反算模量值的计算中,利用 FWD 对试验路段进行弯沉测试,1 号、2 号试验路段弯沉测试的温度分布范围为 11℃~29℃;3 号、4 号试验路段弯沉测试的温度分布范围为 8℃~46℃。将各测试点的弯沉盆数据利用 SIDMOD 软件进行模量值的反算,得到不同温度下各试验路段的反算模量值,见表 15~表 18。

表 15 1 号试验路段沥青层的反算模量平均值

温度/℃	11.5	16.8	21.0	24.0	28.5
反算模量 E_B 的平均值/MPa	14 869.3	9 750.9	6 690.0	5 069.4	3 556.6

表 16 2 号试验路段沥青层的反算模量平均值

温度/℃	11.5	16.8	21.7	24.0	29.4
反算模量 E_B 的平均值/MPa	13 313.6	8 863.7	5 368.4	4 559.7	2 836.4

表 17 3 号试验路段沥青层的反算模量平均值

温度/℃	8.6	12.4	17.0	20.0	27.2	36.0	45.2	46.7
反算模量 E_B 的平均值/MPa	13 834.5	9 806.0	6 730.8	5 502.9	3 280.3	2 009.9	1 154.1	1 002.0

表 18 4 号试验路段沥青层的反算模量平均值

温度/℃	8.6	11.0	16.4	20.1	24.0	27.0	35.7	41.2	45.0
反算模量 E_B 的平均值/MPa	14 441.1	11 287.7	8 115.1	5 628.4	4 487.3	3 811.3	2 030.1	1 399.8	1 097.6

5 复合模量与反算模量的关系

通过各反算模量 E_B 与复合模量 E_C 的比较,得到反算模量修正系数 K ,即 $K=E_C/E_B$ 。然后将修正系数 K 与温度 T 进行回归分析,从而得到 K 的温度函数方程,各试验路段的回归结果如图 1~下页图 4 所示。

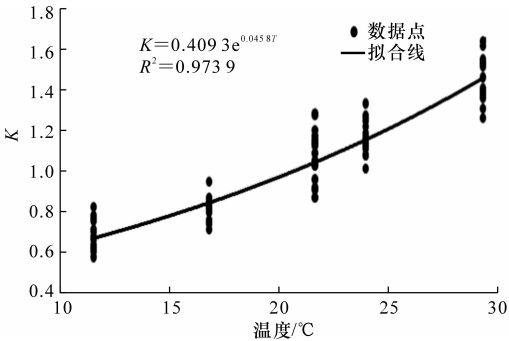


图 2 2 号试验路段反算模量值修正系数 K 的回归结果

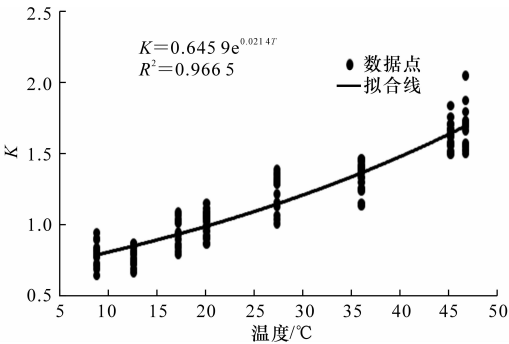


图 3 3 号试验路段反算模量值修正系数 K 的回归结果

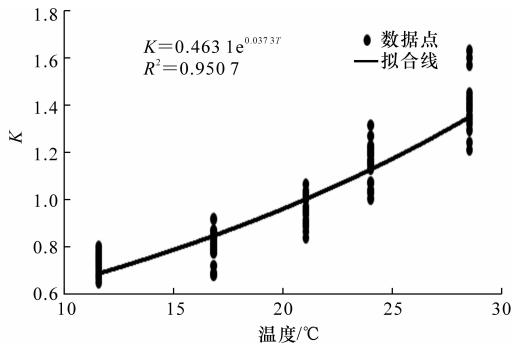


图 1 1 号试验路段反算模量值修正系数 K 的回归结果

按上述回归公式,对试验路段沥青层反算模量的修正系数进行计算,当 $K=1$ 时,即试验测试模量与反算模量相等时,对应温度分别为 20.9℃、

20.5℃、20.2℃、19.0℃。在试验测试各温度下,

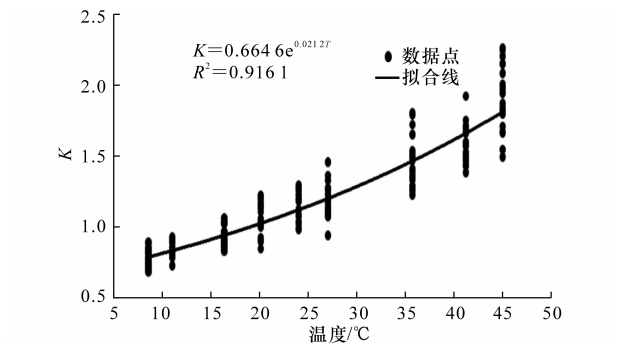


图 4 4 号试验路段反算模量值修正系数 K 的回归结果

各路面结构沥青层的无损检测反算修正系数范围见表 19。由表 19 数据可以得出,半刚性基层沥青路面的沥青层无损检测反算模量修正系数 K 的变化范围比柔性基层沥青路面大。

表 19 沥青层无损检测反算模量修正系数范围		
试验路段	测试温度/℃	K 的范围
1 号	11.5~28.5	0.71~1.35
2 号	11.5~29.4	0.68~1.47
3 号	8.6~30.0	0.79~1.21
4 号	8.6~27.0	0.79~2.12

6 结 语

- (1)沥青混合料的动弹模量测试值与试件的空隙率(压实度)存在密切的关系,随着空隙率的减小,动弹模量值有较大的提高。
- (2)试验路段沥青层无损检测反算模量修正系数 $K(K=E_C/E_B)$ 是温度 T 的增函数,在温度较低时,反算模量值比试验模量值大;温度较高时,反算模量值比试验模量值小。
- (3)半刚性基层沥青路面沥青层的反算模量修正系数 K 的变化幅度比其他结构类型沥青路面的 K 值大。
- (4)在确定 K 值之后,可以通过无损检测数据得到沥青层的结构动弹模量值,用无损检测代替了常规的有损检测,更加方便路面承载能力的确定,同时也为加铺设计中相应的设计参数提供了依据。

参考文献:

References:

[1] Project 1-37A, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures[S].

[2] Prozzi J A, Hong F. Traffic characterization for a mechanistic empirical pavement design[R]. Austin: Texas Department of Transportation, 2007.

[3] Von Quintus H, Killingsworth B. Analysis relating to pavement material characterizations and their effects of pavement performance[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1998.

[4] Zhou H. Comparison of backcalculated and laboratory measured moduli on AC and granular base layer materials[C]//Tayobji S D, Lukanen E O. Nondestructive testing on pavement and backcalculation of moduli: Third Volume. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2000: 161-172.

[5] Mahoney J P, Lee S W, Newcomb D E. Mechanistic-based overlay design procedure for Washington state flexible pavements[R]. Washington DC: Washington state Transportation Center, 1989.

[6] Gedafa D S, Hossain M, Romanoschi S A. Field verification of superpave dynamic modulus[C]//Transportation Research Board. Transportation Research Board 87th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2008: 2321-2340.

[7] Derek Y, Donath M. Comparison between laboratory investigation and non-destructive testing methods for mechanistic characterization of asphalt pavement [C]//Transportation Research Board. Transportation Research Board 87th Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2008: 2621-2634.

[8] AASHTO TP 62-03-2002, Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures[S].

[9] 谢国栋. 基于 FWD 的沥青路面反算模量修正系数研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.