

法国 BBSG 沥青混合料动态模量试验研究

李倩倩¹, 石志勇¹, 周兴业^{2*}, 王旭东²

(1. 重庆交通大学 材料科学与工程学院, 重庆市 400074; 2. 交通运输部公路科学研究院)

摘要:为了研究法国沥青混合料动态模量的影响因素及结构计算中的参数取值,针对非洲塞内加尔某高速公路中使用的法国 BBSG 沥青混合料开展相关试验,分析了动态模量的影响因素,给出了可供法标 Alize 计算软件使用的模量参数范围和模量取值方法。结果发现: BBSG 沥青混合料的动态模量具有显著的温度、频率和应变依赖特性;相同温度、相同应变水平下,低频时 BBSG 沥青混合料动态模量比高频时动态模量平均偏小 1 500~5 000 MPa,选择合适的试验频率直接决定着模量取值的合理性;相同温度、相同频率、不同应变水平下, BBSG 沥青混合料动态模量值较为接近,应变水平变化对模量取值的影响不大,为避免沥青混合料损伤,模量试验的应变水平建议不大于 100 $\mu\epsilon$;基于动态模量主曲线和主曲面均可确定 BBSG 沥青混合料的动态模量,数值较为合理,可供路面结构计算使用。

关键词: 道路工程; 动态模量; 沥青混合料; 主曲线; 主曲面

近年来,为了服务“一带一路”沿线国家公路交通建设,中国援建非洲地区的道路基础设施项目逐渐增多。但由于缺少基础性研究工作,目前非洲多数国家的公路建设并无本国标准,以塞内加尔为代表的非洲法语区国家不得不直接取用法国标准进行路面设计和施工。这些非洲法语区国家进行沥青路面结构设计时,通常参照法国标准,使用 Alize 软件进行结构计算,各结构层的材料参数直接取用软件中的推荐值。以沥青混合料为例,法国在结构计算中的模量参数取

用等效温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 、试验频率为 10 Hz 时的梯形梁动态模量,对于其他国家或地区,则根据当地实际的等效温度,通过动态模量主曲线外延计算得到。

然而,已有研究表明:通过这种外延方法计算得到的沥青混合料动态模量,结果不一定合理。通过前期试验发现:15 $^{\circ}\text{C}$ 、10 Hz 时法国 GB4-20 沥青混合料动态模量试验值会比外延值大 30% 以上,如果使用外延值进行沥青路面结构计算,所设计的结构厚度将明显偏厚。造成这种外延性较差现象的主要原因是,固

[3] Yuancheng Li, Xiaobo Min, Yong Ke, et al. Preparation of Red Mud-Based Geopolymer Materials from MSWI Fly Ash and Red Mud by Mechanical Activation[J]. Waste Management, 2019, 83: 202-208.

[4] Yang Zhenzhou, Tian Sicong, Liu Lili, et. al. Application of Washed MSWI Fly Ash in Cement Composites: Long-Term Environmental Impacts[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25 (12): 12 127-12 380.

[5] 许宁, 谢宇, 岳鹿, 等. 垃圾焚烧炉渣级配对垃圾焚烧炉渣基免烧砖性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2019(2).

[6] 胡明君, 李立寒, 崔华杰. 生活垃圾焚烧炉渣集料处治土性能与处治机理[J]. 建筑材料学报, 2019(2).

[7] 孙瑜, 李立寒. 垃圾焚烧炉渣粉替代矿粉对沥青混合料性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017(12).

[8] 刘栋, 尚小亮, 杨西海. 垃圾焚烧炉渣中可溶盐对水泥稳定材料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2018(9).

[9] 冯兴波, 徐永福. 城市垃圾炉渣试样的无侧限抗压强度试验研究[J]. 中外公路, 2017(3).

[10] 张军, 胡艳丽. 生活垃圾焚烧炉渣混凝土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019(7).

[11] 董云, 刘畅, 张国瀛, 等. 垃圾焚烧底渣粉磨工艺及再生微粉强度特征[J]. 水泥与混凝土制品, 2019(10).

[12] 董云, 张国瀛, 李伟华, 等. 城市垃圾焚烧底渣再生微粉强度特性的实验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2019(6).

收稿日期: 2020-12-27(修改稿)

作者简介: 李倩倩, 女, 硕士. E-mail: 2676578406@qq.com

* 通信作者: 周兴业, 男, 博士, 副研究员. E-mail: zhouxingye1982@163.com

化在 Alize 软件中的模量参数只是某一大类沥青混合料的统计结果,与实际工程中使用的该类材料在级配、油石比、原材料性质等方面存在较大区别,为了保证参数取值的合理性,应针对工程中实际使用的沥青混合料开展试验,并根据当地的等效温度来确定结构计算中的模量数值。

此外,沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,不同温度、不同荷载水平、不同试验频率下,动态模量数值差异较大,取用不同的数值对结构计算也会带来显著影响。

法语区国家沥青路面的表面层主要采用半粗式沥青混凝土 BBSG 铺筑,由于它采用连续式级配和悬浮密实结构,可在保证抗滑性能的前提下,兼顾优异的水稳定性和抗疲劳性能,是法国沥青路面设计体系中使用较为普遍的一种表面层混合料。为了研究法国沥青混合料动态模量的影响因素及结构计算中的参数取值,该文针对非洲塞内加尔某高速公路中使用的法国 BBSG 沥青混合料开展相关试验,分析动态模量的影响因素,并给出可供法标 Alize 计算软件使用的模量参数范围,使得路面结构设计更加合理。

1 试验设计

1.1 原材料

BBSG 沥青混合料选用非洲塞内加尔某高速公路使用的 ERES 品牌 35/50 号沥青,其性能试验结果见表 1。粗集料、细集料和矿粉选用塞内加尔产玄武岩,矿料规格分别为 16~25、8~16、3~8 和 0~3 mm,密

度和吸水率试验结果见表 2。

表 1 沥青试验结果

技术指标	单位	35/50 沥青	欧标 BSEN 12591—2009 的技术要求
针入度(25 °C, 5 s, 100 g)	0.1 mm	45	35~50
15 °C 延度	cm	26	—
10 °C 延度	cm	8	—
软化点(环球法)	°C	54.5	50~58
60 °C 动力黏度	Pa · s	434	≥225
质量变化	%	-0.052	±0.5
TFOT 残留针入度比	%	71	≥53
后 残留延度(10 °C)	cm	5	—
残留延度(15 °C)	cm	8	—

1.2 配合比设计

根据法标要求设计 BBSG 沥青混合料级配、确定最佳油石比,同时开展法国标准和中国标准的高温车辙试验,试验结果如表 3~5 所示。

表 2 矿料试验结果

矿料规格/ mm	表观相对 密度	毛体积相对 密度	吸水率/ %
16~25	2.989	2.969	0.22
8~16	2.984	2.942	0.48
3~8	2.966	2.883	0.98
0~3	2.982	2.792	2.28
矿粉	3.008	—	—

表 3 BBSG 沥青混合料级配组成

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%																
	20	16	14	12.5	10	8	6.3	5	4	2	1	0.5	0.32	0.25	0.13	0.08	0.063
BBSG 级配	100	96	92	87	78	69	58	50	45	34	23	16	13	12	9	7	6
设计级 配范围	—	90~100	—	—	—	—	50~65	—	—	28~38	—	—	—	10~25	—	—	5~8

表 4 BBSG 沥青混合料最佳油石比及体积参数

最佳油石 比/%	法标丰度 系数	体积空隙 率/%	毛体积空 隙率/%
5	3.46	7.11	5.86

从表 5 可以看出:该文所设计的 BBSG 沥青混合料能够满足相关设计要求。

表 5 BBSG 沥青混合料路用性能试验结果

项目	60 °C 国标车辙试验		60 °C 法标车辙试验
	动稳定度/ (次 · mm ⁻¹)	相对变 形/%	30 000 次往复试验 车辙相对变形/%
试验结果	3 773	2.38	4.01
技术要求	≥1 000	—	≤10

1.3 试验设计

沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,其性质受温度和荷载影响较大。为了研究 BBSG 沥青混合料动态模量影响因素,并为结构计算提供合理的参数取值,该文开展了不同试验温度、不同试验频率、不同应变水平下的 BBSG 沥青混合料法国梯形梁二点弯拉动态模量试验。其中,试验温度为 0~45 °C,加载频率为 10~40 Hz,应变水平为 30~150 $\mu\epsilon$ 。试验中,首先开展 0 °C、30 $\mu\epsilon$ 应变水平下的梯形梁动态模量试验,对梯形梁试件依次从 40~10 Hz 进行频率扫描,试验结束后,记录该条件下不同频率的沥青混合料动态参数。接着保持 0 °C 不变,依次从 30~150 $\mu\epsilon$ 变化应变水平,每个应变水平下都对梯形梁试件进行高频到低频的频率扫描。完成 0 °C 所有应变水平下的试验之后,接着从低到高进行下一温度水平下的试验,并重复上述步骤,直至完成所有温度水平下的梯形梁动态模量试验。需要说明的是,为了保证试件不受损伤,当温度较低时不开展高应变水平的试验。

2 试验结果与分析

2.1 温度与模量

图 1 为 BBSG 沥青混合料试验频率为 25 Hz 时动态模量随温度的变化结果。

从图 1 可以看出:随着试验温度的升高,各个应变水平下的动态模量变化整体趋势都是逐渐减小。从 0~45 °C,沥青材料逐渐由玻璃态向高弹态转变,沥青混合料逐渐由弹性向塑性转变,动态模量水平减小了一个数量级,说明温度对沥青混合料动态模量的影响显著;② 各个应变水平下的曲线斜率的整体趋势是随着温度的升高先增大后减小,一般在 10~15 °C 达到最大值,BBSG 沥青混合料动态模量在 10~15 °C 变化速率相比于其他温度区域更加敏感。

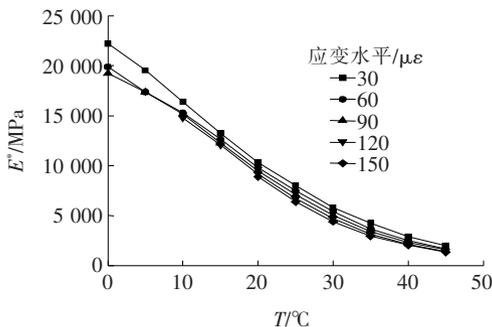


图 1 BBSG 沥青混合料动态模量随温度的变化曲线

2.2 频率与模量

图 2 为 BBSG 沥青混合料应变水平为 30 $\mu\epsilon$ 时动态模量随频率的变化曲线。

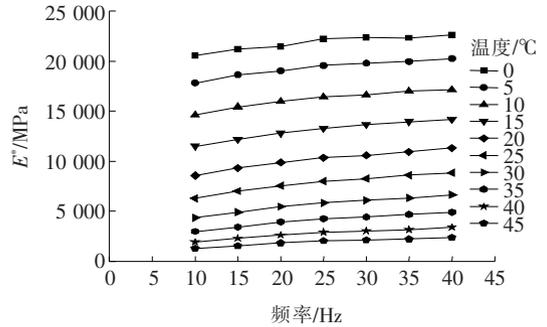


图 2 BBSG 沥青混合料动态模量随频率的变化

从图 2 可以看出:① 不同频率下,BBSG 沥青混合料动态模量水平的变化趋势基本一致。同一温度水平下,沥青混合料动态模量随试验频率的增加而逐渐增大,0 °C 下的动态模量值由 10 Hz 时的 20 549 MPa 增加到 45 Hz 的 22 602 MPa,增长约 10%,45 °C 的动态模量值由 10 Hz 时的 1 276 MPa 增加到 45 Hz 的 2 371 MPa,增长约 86%。根据时温等效原理,高温低频与低温高频下沥青混合料的力学性能是基本一致的,这验证了上述沥青混合料动态模量随温度增加而降低的规律;② 不同温度水平下,沥青混合料从高频到低频的变化速率,整体趋势是逐渐增大的,一般在 10~15 Hz 频率区间达到最大值,10 °C 的动态模量值变化速率最大为 164 MPa/Hz,扫描频率越小,对 BBSG 沥青混合料动态模量的影响作用越大。

2.3 应变与模量

图 3 为 BBSG 沥青混合料在试验频率为 25 Hz 时动态模量随应变水平的变化结果。

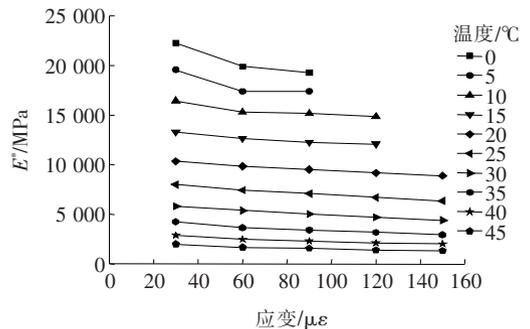


图 3 BBSG 沥青混合料动态模量随应变的变化曲线

从图 3 可以看出:同一温度水平下,随着应变水平的增大,BBSG 沥青混合料动态模量逐渐减小,各个温度水平下动态模量随应变的变化趋势是一致的,但温

度越低,这种趋势就更加显著。进一步分析发现,各个温度水平下,对试件施加的应变水平增大,其沥青混合料动态模量变化速率变小,最大值出现在 30~60 $\mu\epsilon$ 内。其主要原因是:动态模量的数学定义为最大压应力(应力曲线峰值)与最大可恢复轴向应变(可恢复应变曲线的峰值)的比值。在两点弯曲试验中,应变水平越大,沥青混合料的动态模量越小,且表现出更多的黏性性能,动态模量变化速率变小。

综上所述:BBSG 沥青混合料是一种典型的非线性材料,其动态模量具有显著的温度、频率和应变依赖特性,根据时温等效原理,随着温度的升高、频率的降低或者应变水平的增大,沥青混合料动态模量逐渐减小,在弯拉荷载模式下,高温、低频、高应变水平降低了 BBSG 沥青混合料的力学性能。从整体来看,BBSG 沥青混合料的力学性能在较低温度、高频、低应变水平下的衰减较快。前节所列 BBSG 沥青混合料的高温性能试验,60 $^{\circ}\text{C}$ 国标车辙试验的动稳定性和 60 $^{\circ}\text{C}$ 法标车辙试验的 30 000 次往复试验车辙相对变形(%)均满足相关技术要求,这表明在高温条件下,BBSG 沥青混合料具有较强的抵抗车辙变形能力,高温稳定性良好。结合非洲塞内加尔地区沥青路面常年处于高温环境、重载交通服役状态下,BBSG 沥青混合料的性能满足当地需求。

3 BBSG 沥青混合料动态模量取值方法

从前面的试验结果发现,温度、应变水平、试验频率对 BBSG 沥青混合料的动态模量均有较大影响,不同条件下的模量值差别较大,为了研究如何合理地进行模量取值,该文开展了基于动态模量主曲线和主曲面的模量取值方法研究。

3.1 基于动态模量主曲线的模量取值方法

由于沥青混合料是典型的黏弹性材料,其温度与

时间效应具有等效作用,这样可以根据时温等效原理得到宽温度域或宽频率域的沥青混合料的力学性能,弥补试验条件不具备的缺点。该文以 S 形曲线 Boltzmann 函数模型来绘制动态模量主曲线,其函数模型如式(1)所示:

$$\lg |E^*| = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(T-x_0)/dx}} \quad (1)$$

式中: E^* 为动态模量; A_1 、 A_2 为动态模量的最大值、最小值; T 为温度水平; x_0 、 dx 为与曲线形状有关的回归参数。

选取 10 Hz 为基准频率,首先绘制应变水平为 30 $\mu\epsilon$ 的动态模量主曲线,分别将 10、15、20、25、30、35、40 Hz 的动态模量平移至基准频率为 10 Hz 动态模量中,并计算每个频率水平下的移位因子,得到 30 $\mu\epsilon$ 应变水平下、基准频率为 10 Hz 的沥青混合料动态模量主曲线,对其进行非线性拟合后的主曲线表达式见式(2)。同理,可以得到其他应变水平下动态模量主曲线的移位因子和回归参数(表 6、7),并可以得到如图 4 所示的不同应变水平下的 BBSG 沥青混合料动态模量主曲线簇。

$$\lg |E^*| = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(T-x_0)/dx}} = 1.5297 + \frac{3.0717}{1 + e^{(T-46.6616)/21.2314}} \quad (2)$$

按照上述方法,可以得到以其他频率为基准频率的动态模量主曲线。这样,可以根据实际工程所在地的等效温度,通过动态模量主曲线计算得到该温度下的模量值,作为路面结构计算的模量参数来使用。因法国本土路面结构设计的等效温度为 15 $^{\circ}\text{C}$,而塞内加尔沥青路面结构设计的等效温度为 34 $^{\circ}\text{C}$,故该文分别计算这两种温度下,不同频率、不同应变水平时的 BBSG 动态模量值,结果如表 8 所示。

从表 8 可以看出:

(1) 当应变水平和等效温度相同时,不同频率下

表 6 以 10 Hz 为基准频率的移位因子

应变水平/ $\mu\epsilon$	不同加载频率(Hz)下(以 10 Hz 为基准频率)的移位因子						
	40	35	30	25	20	15	10
30	6.494	5.747	5.099	4.521	3.484	1.808	0
60	6.553	5.732	4.916	4.151	3.235	1.803	0
90	6.420	5.596	4.955	4.252	3.169	1.747	0
120	6.380	5.579	4.823	4.022	3.079	1.741	0
150	5.933	5.577	4.426	3.904	2.714	1.439	0

表 7 以 10 Hz 为基准频率不同应变水平下动态模量主曲线回归参数

应变水平/ $\mu\epsilon$	A_1	A_2	x_0	dx
30	4.601 42	1.529 69	46.661 55	21.231 40
60	4.454 10	1.897 58	41.596 22	16.885 53
90	4.455 47	1.880 98	41.844 29	16.957 12
120	4.522 76	1.710 39	41.331 16	18.140 58
150	4.874 23	1.288 36	41.846 96	24.080 07

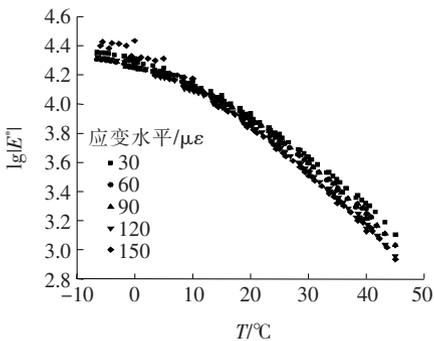


图 4 以 10 Hz 为基准频率动态模量主曲线族

BBSG 的模量值差别较大。15 °C、相同应变水平下, 10 Hz 时的动态模量比 40 Hz 的动态模量值平均偏小 5 000 MPa 左右; 而 34 °C 时, 偏小约 1 500 MPa。由此可见, 当应变水平和温度确定时, 由于不同频率下沥青混合料动态模量数值差别太大, 对路面结构计算结果会产生较大影响, 因此如何选择合适的试验频率直接决定着模量取值的合理性。一般而言, 法国、中国、美国 MEDPG 等路面设计方法均建议取用 10 Hz 下的沥青混合料动态模量作为结构计算参数。

表 8 15 °C 和 34 °C 时 BBSG 沥青混合料动态模量数值

加载频率/Hz	不同应变水平($\mu\epsilon$)下动态模量/MPa									
	30		60		90		120		150	
	15 °C	34 °C	15 °C	34 °C	15 °C	34 °C	15 °C	34 °C	15 °C	34 °C
40	14 099	4 871	13 683	4 744	13 427	4 585	13 097	4 076	13 919	3 825
35	14 162	4 919	13 200	4 433	13 318	4 502	12 760	3 864	13 436	3 639
30	13 780	4 705	12 774	4 165	12 859	4 187	12 462	3 735	12 876	3 407
25	13 355	4 465	12 464	3 970	12 410	3 943	11 924	3 458	12 323	3 229
20	12 834	4 194	12 032	3 727	11 972	3 696	11 421	3 218	11 941	3 126
15	11 900	3 714	11 319	3 341	11 242	3 294	10 812	2 958	10 757	2 677
10	10 890	3 239	10 368	2 875	10 396	2 889	9 751	2 494	9 743	2 349

(2) 当等效温度和频率相同时, 不同应变水平下的 BBSG 模量值变化数值较为接近。15 °C、相同频率下, 随着应变水平的增加模量值虽然有所减小, 但减小的幅度不大, 约为 1 000 MPa; 34 °C 时, 模量减小的幅度也约为 1 000 MPa。总体来看, 应变水平变化对模量取值的影响不大, 考虑到大应变对沥青混合料可能会造成损伤, 因此模量试验的应变水平以不大于 100 $\mu\epsilon$ 为宜, 通常取 30 $\mu\epsilon$ 下的相应数值。

(3) Alize 软件外延得到的等效温度为 34 °C 时 BBSG 沥青混合料的动态模量为 1 180 MPa, 而根据表 8 结果计算得到的 34 °C 时动态模量为 3 239 MPa, 二者数值相差近 2 000 MPa。如果根据外延得到的模量进行结构设计, 势必会造成路面结构厚度偏厚, 导致

工程投资增加。由此可见, Alize 软件的外延性较差, 为了准确确定设计参数, 应采用实际工程中使用的材料开展相关试验得到。为了给同类沥青混合料提供设计参数, 该文给出了 Alize 软件定义材料参数所需的数值, 如表 9 所示, 可供相关项目参考使用。

3.2 基于动态模量主曲面的模量取值方法

除采用上述主曲线确定沥青混合料的动态模量参数之外, 作者曾根据沥青混合料模量的影响因素建立了基于应变和温度参数的动态模量主曲面表达式, 当应变水平、试验温度、试验频率确定之后, 也可据此计算动态模量。针对该文所使用的 BBSG 沥青混合料, 利用文献[14]的方法可建立相应的动态模量主曲面表达式, 见式(3), 并可绘制如图 5 所示的主曲面。

表 9 BBSG 沥青混合料动态模量数值

应变水 平/ $\mu\epsilon$	不同试验温度($^{\circ}\text{C}$)下动态模量/MPa					
	-10	0	10	20	30	40
30	25 249	19 697	13 727	8 325	4 356	2 016
60	21 833	17 927	12 973	7 897	3 965	1 723
90	21 871	17 958	13 002	7 925	3 984	1 730
120	23 227	18 256	12 538	7 238	3 483	1 473
150	31 707	21 768	13 176	6 967	3 263	1 413

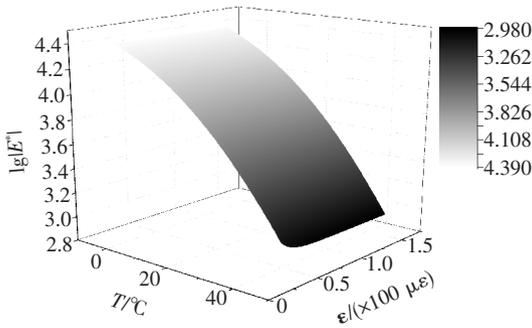


图 5 BBSG 沥青混合料动态模量主曲面

$$\lg |E^*| = f(\epsilon, T) = \frac{4.6755 \cdot e^{-9.2246 \cdot \epsilon} + 4.6755 \cdot e^{-0.0021 \cdot \epsilon} - 4.6755 \cdot e^{-9.2246 \cdot \epsilon}}{1 + e^{(T-59.2986)/24.7995}} \quad (3)$$

4 结论

(1) BBSG 沥青混合料的动态模量具有显著的温度、频率和应变依赖特性,根据时温等效原理,随着温度的升高、频率的降低或者应变水平的增大,沥青混合料动态模量逐渐减小,在弯拉荷载模式下,高温、低频、高应变水平降低了 BBSG 沥青混合料的力学性能。

(2) 15 $^{\circ}\text{C}$ 、相同应变水平下,10 Hz 时的 BBSG 沥青混合料动态模量比 40 Hz 的动态模量平均偏小 5 000 MPa 左右;34 $^{\circ}\text{C}$ 时,偏小约 1 500 MPa。由此可见:当应变水平和温度确定时,由于不同频率下沥青混合料动态模量数值差别太大,对路面结构计算结果会产生较大影响,因此如何选择合适的试验频率直接决定着模量取值的合理性。

(3) 当等效温度和频率相同时,不同应变水平下的 BBSG 模量值变化数值较为接近。总体来看,应变水平变化对模量取值的影响不大,考虑到大应变对沥青混合料可能会造成损伤,因此模量试验的应变水平以不大于 100 $\mu\epsilon$ 为宜。

(4) 基于动态模量主曲线和主曲面均可确定 BBSG 沥青混合料的动态模量,数值较为合理,可供路面结构计算使用。

参考文献:

- [1] 袁仁峰. 基于中、法规范的加蓬 PortGentil—Omboue 项目设计介绍[J]. 中外公路, 2017(3).
- [2] 宋金刚. 巴塔—涅方新老路基结合部土性能快速检测与数据分析方法[J]. 中外公路, 2012(5).
- [3] 李小平, 陈智俊, 高勇. 非洲地区公路项目设计模式研究[J]. 中外公路, 2010(6).
- [4] 李立, 张晟斌, 李小平, 等. 刚果(布)国家 1 号公路设计简介[J]. 中外公路, 2010(2).
- [5] 李浩天, 王庆凯, 马华宝. 河北省典型沥青混合料动态模量不同使用水平下的取值分析[J]. 中外公路, 2018(2).
- [6] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 孟会林. 20 号沥青高模量沥青混合料性能研究[J]. 中外公路, 2016(2).
- [8] 薛善光. 沥青混合料动态模量主曲线特征参数分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018(11).
- [9] 韦金城, 崔世萍, 胡家波, 等. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008(6).
- [10] 罗桑, 钱振东, HARVEY J. 环氧沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 中国公路学报, 2010(6).
- [11] 黄优, 王旭东, 刘朝晖, 等. SAC13 沥青混合料动态模量梯形梁试验研究[J]. 公路交通科技, 2017(6).
- [12] 王维平. 沥青混合料动态模量及其变化规律研究[J]. 中外公路, 2017(5).
- [13] 沈路. 半柔性复合混凝土动态模量主曲线研究[J]. 中外公路, 2019(5).
- [14] 周兴业, 蒋勇, 王旭东, 等. 基于温度与应变参数的沥青混合料动态模量依赖模型研究[J]. 公路交通科技, 2019(3).