

文章编号:1672-9331(2020)02-0018-08

基于 SPT 试验的 RIOHTrack 上面层 沥青混合料高温性能评价

查旭东¹, 罗 涛¹, 刘安辉¹, 王旭东²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要: 为了应用 SPT(Simple Performance Test)试验合理评价沥青混合料的高温性能, 分别采用 SPT 的复模量和重复荷载 2 种试验方法对交通运输部公路科学研究院足尺试验环道(RIOHTrack)所用 7 种上面层沥青混合料进行了高温性能测试, 分析了 SPT 复模量试验得到的动态模量 $|E^*|$ 和抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$, 以及 SPT 重复荷载试验得到的流变次数 F_N 、永久应变和流变次数之比 ϵ_p/F_N 与永久应变斜率 c 等 5 个试验指标的评价结果, 并与我国车辙试验进行了对比。研究表明: 相同 SPT 试验方法评价指标之间的相关性显著, 且评价结果基本一致, 而不同试验方法评价指标之间的相关性较差, 由此可优选出动态模量 $|E^*|$ 和流变次数 F_N 分别作为 SPT 复模量和重复荷载试验评价上面层沥青混合料高温性能的适宜指标; 同时不同试验方法评价沥青胶结料对混合料高温性能影响的敏感性存在一定的差异, 且 SMA 混合料的高温性能不宜采用无侧限条件下的 SPT 试验来评价。

关键词: 沥青混合料; 高温性能; 简单性能试验(SPT); 动态模量; 抗车辙因子; 流变次数; 永久应变

中图分类号: U414

文献标识码: A

Evaluation of high temperature performance for upper surface layer asphalt mixture in RIOHTrack based on SPT

ZHA Xu-dong¹, LUO Tao¹, LIU An-hui¹, WANG Xu-dong²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to use the Simple Performance Test (SPT) to reasonably evaluate the high temperature performance of asphalt mixture, the high temperature performance of seven kinds of upper surface layer asphalt mixture used in the full-scale test circular track (RIOHTrack) in Research Institute of Highway, Ministry of Transport was tested by two kinds of SPT method including complex modulus and repeated load respectively. The evaluation results of five test indexes were analyzed and compared with the wheel tracking test in China, including dynamic modulus $|E^*|$ and anti-rutting factor $|E^*|/\sin\varphi$ obtained by the SPT complex modulus test, as well as flow number F_N , ratio of permanent strain to flow number ϵ_p/F_N and permanent strain slope c obtained by the SPT repeated load test. The re-

收稿日期: 2019-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878077); 安徽省交通运输科技进步计划项目(201720); 佛山市建盈发展有限公司科技项目(FS-XTNH-G-[2018]011)

通讯作者: 查旭东(1970—), 男, 安徽岳西人, 长沙理工大学教授, 主要从事道路工程等方面的研究。

E-mail: 1756023135@qq.com

sults show that the correlations are obvious among the evaluation indexes obtained by the same SPT method, and the evaluation results are basically consistent, while the correlations are poor among the evaluation indexes for different test methods. Then the dynamic modulus $|E^*|$ and the flow number F_N can be optimized and selected as the suitable indexes for the SPT complex modulus test and the SPT repeated load test respectively to evaluate the high temperature performance for upper surface layer asphalt mixture. Meanwhile, there are some differences when the influence sensitivity of asphalt binders to high temperature performance of mixture is evaluated by different test methods. The unconfined SPT is not appropriate to evaluate the high temperature performance of SMA mixture.

Key words: asphalt mixture; high temperature performance; Simple Performance Test (SPT); dynamic modulus; anti-rutting factor; flow number; permanent strain

合理评价沥青混合料的高温性能对提高沥青路面的抗车辙能力具有十分重要的意义,也一直是沥青路面材料设计的研究热点之一。国内外学者对此开展了大量的研究,目前常用的室内评价方法主要有车辙^[1]、动态蠕变^[2]和 SPT^[3]等试验。近年来,方昊等^[4]、李强等^[5]及郭瑞等^[6]采用车辙试验研究了动稳定度评价指标的合理性;杨戈等^[7]通过分析橡胶沥青混合料的动稳定度与其胶结料软化点之间的相关性,得到沥青的软化点也可以作为混合料高温性能的评价指标;Apeagyei^[8]、李强等^[9]及顾兴宇等^[10]通过重复蠕变试验分析了流变次数 F_N 、斜率 c 及组合参数—永久应变和流变次数之比 ϵ_p/F_N 与车辙试验之间的相关性,认为 F_N 和 ϵ_p/F_N 可用来评价沥青混合料的高温性能;杨洋等^[11]、王昊鹏等^[12]、黄优等^[13]及 Jaskula 等^[14]分析了 SPT 复模量试验的动态模量 $|E^*|$ 及抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$ 两个评价指标的合理性;Al-Khateeb 等^[15]及刘安辉^[16]研究了 SPT 重复荷载试验指标与车辙试验指标之间的相关性,显示流变次数 F_N 、斜率 c 及组合参数 ϵ_p/F_N 作为评价指标更优。

由于各种试验方法的条件和指标不同,所得评价结果也各不相同,且部分试验结果与实际的沥青路面抗车辙能力存在较大的差异。相比而言,SPT 试验结果与工程实际更为接近,可以更好地评价沥青混合料的高温性能,但是 SPT 主要包括复模量和重复荷载 2 种试验方法,所得指标和结果也存在一定的差异,如何选择合适的评价指标有待进一步验证。为此,本研究通过对交通运输部公路科学研究院足尺试验环道(RIOHTrack)

所选用的 7 种上面层沥青混合料开展 SPT 复模量及重复荷载试验研究,并与我国车辙试验进行比较,从而根据不同评价指标对比分析各沥青混合料的高温性能,以期确定为合理的 SPT 试验评价指标提供参考。

1 配合比设计

1.1 原材料性能检验

RIOHTrack 上面层 7 种改性沥青混合料所用的沥青主要有秦皇岛 I-D (SBS1)、I-DS10 (SBS2)和 I-DHV4[#] (SBS3)3 种 SBS 改性沥青,以及 22% 胶粉掺量的橡胶沥青 (AR22%)。所用的矿料分别为玄武岩粗集料、石灰岩细集料及石灰岩矿粉。经检验,沥青和矿料的各项性能指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)的技术要求,其中沥青的三大指标检验结果如表 1 所示。

表 1 沥青主要性能检验结果

Table 1 Test results of main performances of asphalt

改性沥青 种类	25 °C 针入度/ (0.1 mm)	软化点/ °C	5 °C 延度/ mm
SBS1	63.4	72.7	285
SBS2	62.6	75.5	294
SBS3	52.3	77.6	163
AR22%	37.8	70.0	67

1.2 配合比设计结果

上面层沥青混合料的级配类型包括 2 种常用的 AC-13 和 SMA-13,其中 AC-13 采用 4.75 mm

以上颗粒含量分别为 65%, 70% 和 80% 共 3 种合成级配, “AC-13-70%-SBS1-抗” 中掺加了矿料质量 0.8% 的 RA 抗车辙剂; SMA-13 采用 4.75 mm

以上颗粒含量为 75% 的 1 种合成级配。根据马尔试验结果, 得到相应的 4 种合成级配及 7 种最佳油石比, 如表 2 所示。

表 2 沥青混合料合成级配和最佳油石比

Table 2 Composite gradations and optimal asphalt contents of asphalt mixture

沥青混合料类型	最佳油石比	筛孔(mm)通过率/%									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13-65%-SBS1	5.05	100.0	98.0	60.6	34.8	25.4	17.7	13.4	9.9	8.8	7.1
AC-13-70%-SBS1	5.16	100.0	97.9	58.1	30.3	21.2	15.3	12.0	9.4	8.5	7.0
AC-13-70%-SBS2	5.05	100.0	97.9	58.1	30.3	21.2	15.3	12.0	9.4	8.5	7.0
AC-13-70%-AR22%	6.22	100.0	97.9	58.1	30.3	21.2	15.3	12.0	9.4	8.5	7.0
AC-13-70%-SBS1-抗	5.40	100.0	97.9	58.1	30.3	21.2	15.3	12.0	9.4	8.5	7.0
AC-13-80%-SBS3	4.54	100.0	97.5	51.4	19.4	10.4	7.0	5.2	3.8	3.3	2.7
SMA-13-75%-SBS1	5.82	100.0	97.7	54.7	24.9	16.7	13.9	12.5	11.4	11.0	9.7

2 SPT 复模量试验

2.1 试验原理和方案

采用旋转压实仪成型 $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱体试件, 每组试验 3 个平行试件, 选取温度、荷载频率和应变水平 3 个试验参数, 进行不同温度 (5, 15, 20, 30, 40, 50 $^{\circ}\text{C}$)、荷载频率 (25, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.01 Hz) 及应变水平 (70, 100 $\mu\epsilon$) 下 SPT 复模量试验。根据试验结果, 以荷载频率 5 Hz 和应变水平 90~110 $\mu\epsilon$ 的复模量曲线为基准, 对不同试验参数组合情况下绘制的复模量曲线进行平移, 得到 7 种沥青混合料的复模量主曲线参数, 从而构造出主曲线, 得出 60 $^{\circ}\text{C}$ 温度下的动态模量 $|E^*|$ 和抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$, 并作为

高温性能的评价指标。

动态模量主曲线用 Boltzmann 模型拟合, 即:

$$\lg |E^*| = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(T-T_0)/T_x}} + A_2. \quad (1)$$

式中: $|E^*|$ 为动态模量, MPa; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; A_1 、 A_2 、 T_0 和 T_x 为回归系数。

相位角主曲线拟合公式为:

$$\varphi = \varphi_0 + A e^{-(T-T_c)^2/(2w^2)}. \quad (2)$$

式中: φ 为相位角, $^{\circ}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; φ_0 、 A 、 T_c 和 w 为回归系数。

2.2 试验结果分析

根据每组 3 个平行试验结果, 分析了 7 种上面层沥青混合料在基准频率 5 Hz 下的动态模量主曲线参数, 如表 3 所示。

动态模量及相位角与温度变化的主曲线见图 1, 2。

表 3 基准频率 5 Hz 下沥青混合料各主曲线参数

Table 3 Master curve parameters of asphalt mixture at reference frequency 5 Hz

沥青混合料类型	动态模量 $ E^* $ 主曲线参数				相位角 φ 主曲线参数			
	A_1	A_2	T_0	T_x	φ_0	A	T_c	w
AC-13-65%-SBS1	4.444	2.319	35.107	14.322	6.124	24.375	39.194	22.582
AC-13-70%-SBS1	4.447	2.058	38.920	15.821	3.583	26.542	41.730	26.173
AC-13-70%-SBS2	4.503	2.175	38.294	16.345	3.582	25.836	40.513	25.786
AC-13-70%-AR22%	4.427	1.830	49.063	17.325	3.944	24.843	49.146	25.627
AC-13-70%-SBS1-抗	4.439	1.954	42.981	17.650	3.532	25.838	46.247	27.487
AC-13-80%-SBS3	4.336	1.574	45.676	18.380	3.685	25.461	46.174	28.025
SMA-13-75%-SBS1	4.420	1.772	41.941	17.825	1.776	28.931	43.190	29.114

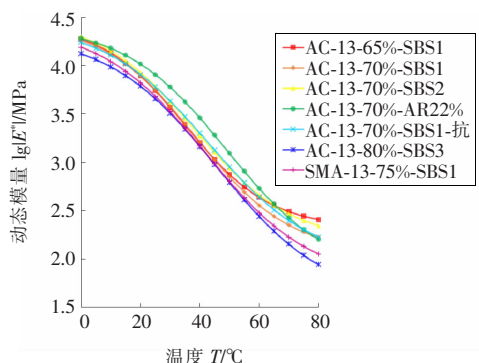


图 1 基准频率 5 Hz 下沥青混合料动态模量主曲线

Fig. 1 Dynamic modulus master curves of asphalt mixture at reference frequency 5 Hz

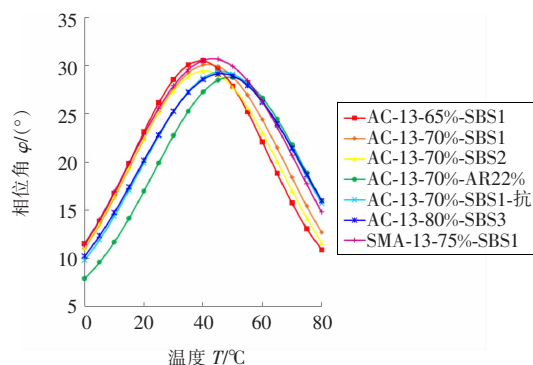


图 2 基准频率 5 Hz 下沥青混合料相位角主曲线

Fig. 2 Phase angle master curves of asphalt mixture at reference frequency 5 Hz

根据主曲线可得到 60 °C 下的动态模量和相位角,如表 4 所示。同时,按动态模量 $|E^*|$ 及抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$ 的大小,对 7 种沥青混合料的高温性能进行优劣排序。

表 4 沥青混合料 SPT 复模量试验分析结果

Table 4 Analysis results of SPT complex modulus test of asphalt mixture

沥青混合料类型	$ E^* $		φ	$ E^* /\sin\varphi$	
	结果/MPa	排序		结果/MPa	排序
AC-13-65%-SBS1	433	4	22.1	1 153	3
AC-13-70%-SBS1	360	5	24.4	872	5
AC-13-70%-SBS2	460	2	23.0	1 177	2
AC-13-70%-AR22%	539	1	26.7	1 202	1
AC-13-70%-SBS1-抗	437	3	26.3	985	4
AC-13-80%-SBS3	277	7	26.2	627	7
SMA-13-75%-SBS1	300	6	26.3	677	6

从表 3,4 和图 1,2 可以看出:

1) 除 AC-13 的 65%-SBS1 和 70%-SBS1-抗的顺序发生交换外,采用动态模量 $|E^*|$ 和抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$ 对 7 种上面层沥青混合料进行高温性能优劣排序结果基本一致,说明二者作为 SPT 复模量试验的高温性能评价指标是合适的。

2) 对于级配相同而沥青不同的 AC-13-70%,与采用 SBS1 改性沥青的混合料相比,采用 SBS2、AR22% 和 SBS1-抗改性沥青混合料的 $|E^*|$ 值分别提高了 27.8%、49.7% 和 21.4%,而 $|E^*|/\sin\varphi$ 值分别提高了 35.0%、37.8% 和 13.0%。表明橡胶沥青改善混合料高温性能的效果最佳,其次为软化点较高的 SBS 改性沥青,掺加抗车辙剂也可起到良好效果。

3) 对于沥青相同而级配不同的 AC-13-SBS1,与 4.75 mm 以上颗粒含量 65% 的混合料相比,70% 和 70%-抗的混合料的 $|E^*|$ 值分别减小了 16.9% 和 -0.9%,而 $|E^*|/\sin\varphi$ 值分别减小了 24.4% 和 14.6%。表明密级配 AC 型混合料的粗集料不宜过多,否则易造成粗、细集料之间难以很好地形成悬浮密实结构,即使掺加抗车辙剂,也会因空隙率增大而导致高温性能降低。

4) AC-13-80%-SBS3 的高温性能最差,主要是因其为 1 种多孔隙排水混合料。进一步表明 AC 型混合料的高温性能不仅仅取决于沥青胶结料的高温性能,同样依赖于集料之间的密实结构。

5) SMA-13-75%-SBS1 的高温性能较低,主要是因为 SPT 复模量试验未对试件施加侧向约束作用,导致 SMA 混合料的骨架嵌挤作用未能得到充分发挥,造成高温条件下抗蠕变性能不佳。因此,不宜采用无侧限条件下的 SPT 复模量试验来评价 SMA 混合料的高温性能。

3 SPT 重复荷载试验

3.1 试验原理与方案

采用与 SPT 复模量试验相同的试件,每组 3 个平行试件。考虑温度、偏应力及围压对试验的影响,确定在温度 60 °C,偏应力 600 kPa,接触应力 30 kPa 及无围压的条件下进行 SPT 重复荷载试验。在加载之前,应施加 1 个 30 kPa 的接触应力进行预加载 30 s,使压头与试件表面紧密接触。

通常沥青混合料在重复荷载作用下的永久变形随荷载作用次数变化曲线可分为迁移期、稳定期和破坏期3个阶段。对于SPT重复荷载试验,评价混合料高温性能的试验指标主要有流变次数 F_N (稳定期和破坏期分界点所对应的荷载作用次数)、相应的永久变形 ϵ_p (混合料开始发生破坏时的永久应变)及二者组合参数 ϵ_p/F_N 。同时,稳定期的永久变形曲线近似为直线,通过相关分析可得到相应的永久应变斜率 c ,也可用来评价混合料

的高温性能。为此,采用SPT重复荷载试验的这4个评价指标来分析RIOHTrack上面层7种沥青混合料的高温性能。

3.2 试验结果分析

根据各组3个平行试件的SPT重复荷载试验结果,可得到上面层沥青混合料的高温性能评价指标 F_N 、 ϵ_p 、 ϵ_p/F_N 和 c 的分析结果及优劣排序,如表5所示。

表5 沥青混合料SPT重复荷载试验分析结果

Table 5 Analysis results of SPT repeated load test of asphalt mixture

沥青混合料类型	F_N		ϵ_p		ϵ_p/F_N		c	
	结果/ 次	排序	结果/ %	排序	结果/ (%·次 ⁻¹)	排序	结果/ (%·次 ⁻¹)	排序
AC-13-65%-SBS1	2 393	2	1.505	2	6.876	2	1.900	2
AC-13-70%-SBS1	1 120	4	1.522	4	13.580	4	4.612	4
AC-13-70%-SBS2	1 361	3	1.736	7	12.921	3	4.529	3
AC-13-70%-AR22%	548	6	1.623	6	30.998	6	13.167	6
AC-13-70%-SBS1-抗	5 173	1	1.519	3	3.004	1	0.839	1
AC-13-80%-SBS3	283	7	1.561	5	55.375	7	25.900	7
SMA-13-75%-SBS1	727	5	1.485	1	20.499	5	7.176	5

从表5可以看出:

1) 流变次数 F_N 、组合参数 ϵ_p/F_N 和斜率 c 3个评价指标得到的7种上面层沥青混合料高温性能优劣排序结果完全一致,说明三者作为SPT重复荷载试验的高温性能评价指标是合适的。然而,永久应变 ϵ_p 的高温性能评价结果与其它3个指标的相差较大,同时各混合料的 ϵ_p 值总体相差不大,主要是因为 ϵ_p 中包含前期累积的虚假应变,造成其结果不敏感且不稳定,故不建议直接采用 ϵ_p 来评价混合料的高温性能。

2) 对于级配相同而沥青不同的AC-13-70%,与采用SBS1改性沥青混合料相比,采用SBS2、AR22%和SBS1-抗改性沥青混合料的 F_N 值分别提高了21.5%、-51.1%和361.9%,而 ϵ_p/F_N 值分别降低了4.9%、-128.3%和77.9%, c 值分别降低了1.8%、-185.5%和81.8%。说明抗车辙剂对提高混合料的高温性能效果显著,其次为较高软化点的SBS改性沥青,而掺加AR22%的橡胶沥青混合料因油石比偏高而造成其抗重复荷载

变形的能力变差。该评价结果与复模量试验的评价结果相反,表明这2种试验方法反映的沥青胶结料对混合料高温性能影响的敏感性存在一定的差异。

3) 对于沥青相同而级配不同的AC-13-SBS1改性混合料,其评价结果与复模量试验结果一致。AC-13-65%的3个指标均优于AC-13-70%,其中 F_N 值提高了113.7%, ϵ_p/F_N 值和 c 值分别降低了49.4%和58.8%,说明AC型级配密实结构有利于提高高温性能。

4) AC-13-80%-SBS3的3个评价指标值均显示其高温性能最差,与复模量试验结果一致,主要是因其为结构不密实的多孔隙排水沥青混合料而致。

5) 与复模量试验类似,SMA-13-75%-SBS1混合料的试验结果不理想,主要因无侧限的试验条件不利于其骨架嵌挤能力的发挥,但其永久应变 ϵ_p 最小,在一定程度上反映了其具有良好的高温性能,故也不宜采用无侧限条件下的SPT重复荷载试验来评价SMA混合料的高温性能。

4 SPT 试验方法对比分析

前述分析表明,SPT 复模量和重复荷载 2 种试验方法评价的 RIOHTrack 上面层 7 种沥青混合料的高温性能优劣总体上基本一致。为了进行对比,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011),表 6 给出了我国车辙试验在温度 70 ℃ 和轮压 1.0 MPa 条件下的动稳定度 DS 和相对变形 δ 的试验结果。

比较表 4~6 可以看出,车辙试验 2 个指标的评价结果完全一致,但与 SPT 试验的评价结果存在一定差异。其中,由于车辙试件四周有约束作用,SMA-13 能充分发挥骨架嵌挤结构的特点,其动稳定度和相对变形仅次于 AC-13-70%-SBS1-抗和 AC-13-70%-AR22%,反映了其具有优良的高温稳定性。在级配相同而沥青不同的情况下,3 种试验方法的评价结果差异较大,反映了不同试验

条件下混合料中沥青胶结料对高温性能的影响程度存在差异,而其余混合料的评价结果基本一致。为此,采用幂函数关系分析 SPT 试验 5 个评价指标及其与车辙试验指标之间的相关性,由此得到各评价指标间的相关性判定系数,如表 7 所示。其中 R^2 均值按 3 种试验方法不同指标的加权平均求得。

表 6 沥青混合料车辙试验分析结果

Table 6 Analysis results of wheel tracking test of asphalt mixture

沥青混合料类型	$DS/(\text{次} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\delta/\%$	排序
AC-13-65%-SBS1	3 646	3.31	5
AC-13-70%-SBS1	2 494	4.17	6
AC-13-70%-SBS2	3 898	2.82	4
AC-13-70%-AR22%	9 723	2.00	2
AC-13-70%-SBS1-抗	17 342	1.45	1
AC-13-80%-SBS3	1 143	7.81	7
SMA-13-75%-SBS1	4 081	2.49	3

表 7 各评价指标之间的相关性判定系数 R^2

Table 7 Correlation determination coefficients R^2 between various evaluation indexes

评价指标	$ E^* $	$ E^* /\sin\varphi$	F_N	ϵ_p/F_N	c	DS	δ	权重
$ E^* $	1.000 0	0.933 5	0.211 2	0.170 9	0.157 5	0.494 7	0.437 9	1/6
$ E^* /\sin\varphi$	0.933 5	1.000 0	0.263 1	0.215 1	0.208 5	0.319 6	0.300 8	1/6
F_N	0.211 2	0.263 1	1.000 0	0.996 0	0.991 5	0.405 5	0.406 9	1/9
ϵ_p/F_N	0.170 9	0.215 1	0.996 0	1.000 0	0.997 1	0.392 4	0.395 0	1/9
c	0.157 5	0.208 5	0.991 5	0.997 1	1.000 0	0.364 8	0.377 5	1/9
DS	0.494 7	0.319 6	0.405 5	0.392 4	0.364 8	1.000 0	0.939 4	1/6
δ	0.437 9	0.300 8	0.406 9	0.395 0	0.377 5	0.939 4	1.000 0	1/6
R^2 加权均值	0.537 6	0.502 0	0.546 4	0.528 1	0.516 8	0.588 1	0.577 4	—

由表 7 可以看出,相同试验方法得到的不同评价指标之间的相关性显著。其中,SPT 复模量试验的 $|E^*|$ 和 $|E^*|/\sin\varphi$ 及车辙试验的 DS 和 δ 之间的 R^2 均超过 0.90,SPT 重复荷载试验 3 个评价指标之间的 R^2 均超过 0.99。然而,2 种 SPT 试验方法评价指标之间的相关性较差, R^2 一般在 0.15~0.30 之间,而与车辙试验评价指标之间的 R^2 有所提高,一般在 0.30~0.50 之间。表明不同试验方法和加载条件对沥青混合料高温性能评价结果影响显著。

为了优选 SPT 2 种试验方法的适宜评价指

标,通过比较 7 个评价指标之间 R^2 的加权均值可以得到,SPT 复模量试验宜采用动态模量 $|E^*|$ 作为上面层沥青混合料高温性能评价指标,而 SPT 重复荷载试验宜采用流变次数 F_N 作为评价指标,且 2 个指标的 R^2 加权均值接近,表明 2 种试验方法均适用于评价沥青混合料的高温性能。

5 结论

根据交通运输部公路科学研究院足尺试验环道(RIOHTrack)所用 7 种上面层沥青混合料,分

别采用 SPT 的复模量和重复荷载试验评价了其高温性能,并与我国车辙试验结果进行了对比。发现矿料合成级配、沥青胶结料和抗车辙剂等对沥青混合料高温性能的影响各不相同,且不同指标评价结果之间也存在一定的差异。

1) 根据上面层沥青混合料高温性能试验结果的优劣排序, SPT 复模量试验的动态模量 $|E^*|$ 和抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$ 的评价结果基本一致。SPT 重复荷载试验的流变次数 F_N 、永久应变与流变次数之比 ϵ_p/F_N 及永久应变斜率 c 的评价结果完全一致。表明这 5 个指标均可作为高温性能评价指标,但不宜直接采用 ϵ_p 来评价。

2) 相同试验方法不同评价指标之间的相关性显著,而不同试验方法评价指标之间的相关性较差。由此确定 SPT 复模量和重复荷载试验评价上面层沥青混合料高温性能的适宜指标分别为动态模量 $|E^*|$ 和流变次数 F_N 。

3) SPT 复模量和重复荷载试验得到的高温性能最佳混合料分别为 AC-13-70%-AR22% 橡胶沥青混合料和掺抗车辙剂的 AC-13-70%-SBS1-抗 SBS 改性沥青混合料,且级配相同而沥青不同情况下的评价结果相差较大,说明不同试验方法评价沥青胶结料对混合料高温性能影响的敏感性存在一定的差异。

4) SMA-13-75%-SBS1 的 SPT 高温性能试验结果均不理想,而车辙试验结果优良。主要因 SPT 试验条件未施加侧向约束造成其骨架嵌挤结构作用不能充分发挥,故采用 SPT 试验评价 SMA 混合料的高温性能时宜考虑一定的侧限约束作用,有待后续进一步研究验证。

〔参考文献〕

- [1] 陈忠达,袁万杰,薛航,等. 沥青混合料高温性能评价指标[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):1-4.
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, XUE Hang, et al. High temperature stability index of hot mixed asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 1-4.
- [2] 张争奇,罗要飞,栗培龙,等. 基于重复加载蠕变试验的沥青混合料高温性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4): 58-64.
- [3] 向晋源,孙杰,朱湘. 沥青混合料 SPT 重复荷载试验评价指标研究[J]. 公路交通技术, 2009(4): 52-55.
XIANG Jin-yuan, SUN Jie, ZHU Xiang. Study on evaluation indices of asphalt mixture SPT repeated on-load test[J]. Technology of Highway and Transport, 2009(4): 52-55.
- [4] 方昊, Javilla B, 磨炼同. 基于车辙试验的沥青混合料车辙评价指标分析[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2018, 42(1): 17-20.
FANG Hao, Javilla B, MO Lian-tong. Rutting evaluation index analysis of asphalt mixture based on rutting test[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2018, 42(1): 17-20.
- [5] 李强,倪富健. 沥青混合料抗车辙性能试验对比分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(6): 1 266-1 270.
LI Qiang, NI Fu-jian. Comparison of anti-rutting performance tests for asphalt mixtures[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(6): 1 266-1 270.
- [6] 郭瑞,洪刚,李萍,等. AC-16 沥青混合料高温稳定性试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 10-15.
GUO Rui, HONG Gang, LI Ping, et al. Experiment on high-temperature stability of AC-16 asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 10-15.
- [7] 杨戈,黄卫东,李彦伟,等. 橡胶沥青混合料高温性能评价指标的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(6): 753-758.
YANG Ge, HUANG Wei-dong, LI Yan-wei, et al. Laboratory study on asphalt rubber mixture evaluation index for high temperature performance[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(6): 753-758.
- [8] Apeagyei A K. Flow number predictive models from volumetric and binder properties[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 240-245.
- [9] 李强,高磊,王宏畅,等. 重复荷载作用下沥青混合料流变次数试验[J]. 公路交通科技, 2013, 30(12): 1-6, 14.

- LI Qiang,GAO Lei,WANG Hong-chang,et al. Experiment on flow number of asphalt mixture under repeated load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2013,30(12):1-6,14.
- [10] 顾兴宇,吕俊秀,张小元,等. 沥青混合料高温蠕变失稳点预测模型及参数影响[J]. 东南大学学报:自然科学版,2017,47(5):1 013-1 019.
- GU Xing-yu, LV Jun-xiu, ZHANG Xiao-yuan, et al. Prediction models of creep instability points for asphalt mixtures at high temperature and parameters effects on model[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2017,47(5):1 013-1 019.
- [11] 杨洋,李玉鑫,张争奇,等. 沥青混合料 SPT 简单性能试验及参数评价[J]. 中外公路,2013,33(1):262-268.
- YANG Yang, LI Yu-xin, ZHANG Zheng-qi, et al. Simple performance test and parameter evaluation of SPT for asphalt mixture[J]. Journal of China and Foreign Highway,2013,33(1):262-268.
- [12] 王昊鹏,杨军,施晓强,等. 高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 公路交通科技,2015,32(8):12-17.
- WANG Hao-peng, YANG Jun, SHI Xiao-qiang, et al. Research on dynamic modulus and master curve of high modulus asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(8):12-17.
- [13] 黄优,刘朝晖,王旭东,等. 沥青混合料动态模量梯形梁与 SPT 试验比较研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2017,48(11):3 092-3 099.
- HUANG You, LIU Zhao-hui, WANG Xu-dong, et al. Comparison of HMA dynamic modulus between trapezoid beam test and SPT[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2017,48(11):3 092-3 099.
- [14] Jaskula P, Stienss M, Szydlowski C. Effect of polymer fibres reinforcement on selected properties of asphalt mixtures[J]. Procedia Engineering, 2017, 172:441-448.
- [15] Al-Khateeb G G, Al-Suleiman Obaidat T I, Khedaywi T S, et al. Studying rutting performance of superpave asphalt mixtures using unconfined dynamic creep and simple performance tests[J]. Road Materials and Pavement Design,2018,19(2):315-333.
- [16] 刘安辉. 基于 SPT 试验的 RIOHTrack 沥青混合料高温性能评价研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
- LIU An-hui. Evaluation research on high temperature performance for asphalt mixture of RIOHTrack based on SPT[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2018.