

文章编号:1007-9629(2021)04-0828-05

沥青混合料流动次数计算方法

张 超¹, 谭忆秋^{1,2}, 韩美钊¹, 邹晶晶¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为准确计算沥青混合料在 SPT 永久变形试验下的流动次数, 分析了现有计算方法的不足之处, 提出了基于 Francken 模型和应变曲线的局部拟合法, 并提出了基于最小应变率的区间系数(K)最优值的确定方法. 结果表明: 直接实验值法的计算结果误差较大, 移动平均值法的计算结果受步长的影响明显, 函数拟合法的计算结果受拟合范围起始条件和终止条件的影响, 其中终止条件的影响更为显著; 随着 K 值的减小, 应变率曲线的右侧逐渐向上移动而左侧向下移动, 流动次数逐渐变小; 当 $K < 1.5$ 时, 2 种混合料的应变率曲线和流动次数计算结果均保持不变, 最优局部区间的 K 值为 1.5.

关键词: 沥青混合料; 永久变形; 应变曲线; 流动次数; 局部拟合法; 流变次数

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.021

Calculation Method of Flow number of Asphalt Mixture

ZHANG Chao¹, TAN Yiqiu^{1,2}, HAN Meizhao¹, ZOU Jingjing¹

(1. School of Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to accurately calculate the flow number of asphalt mixture under SPT permanent deformation test, the shortcomings of existing calculation methods were analyzed. A local fitting method based on Francken model was proposed, and the optimal interval coefficient was determined. The results show that the error of the direct experimental value method is large, while the moving average value method is obviously affected by the step size. The calculation results of flow number are affected by the starting and termination conditions of the strain fitting curve, and the effect of the termination condition is more significant. With the decrease of the interval coefficient K , the right side of the strain rate curve gradually moves up and the left side moves down, and the flow number gradually decreases. When $K < 1.5$, the calculated results of strain rate curves and flow number of the two mixtures almost remain unchanged, and the interval coefficient K of the optimal local interval in this experiment is 1.5.

Key words: asphalt mixture; permanent deformation; strain curve; flow number; local fitting method; flow point

车辙是沥青路面在高温重载条件下极易产生的病害形式^[1-4]. 沥青混合料 SPT (simple performance test) 永久变形试验由于试验设备简单通用、与实际车辙对应性良好, 得到了研究者的广泛应用^[5-7]. 沥

青混合料在 SPT 永久变形试验下的永久变形过程一般分为压密阶段、稳定阶段和破坏阶段. 从稳定阶段进入破坏阶段时的荷载次数被称为“Flow number”, 可以表征沥青混合料的抗车辙性能.

收稿日期: 2019-02-19; 修订日期: 2020-04-16

基金项目: 战略性国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0202400)

第一作者: 张 超 (1991—), 男, 河南驻马店人, 哈尔滨工业大学博士生. E-mail: zhangchaonature@163.com

通讯作者: 谭忆秋 (1968—), 女, 吉林德惠人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: yiqiutan@163.com

目前,国内多数研究者把“Flow number”翻译为流变次数^[5-6],也有部分学者翻译为流动次数^[7-8]。“Flow number”的物理意义为沥青混合料剪切流动变形开始时的荷载次数,并不属于流变学研究范畴,因此,把“Flow number”翻译为流动次数更加合理。

一般通过求解应变拟合曲线的拐点来计算流动次数。研究发现,目前函数拟合法的计算结果严重依赖于所选择的拟合范围,不同拟合范围得到的流动次数可能存在较大差异,主要原因在于:流动次数的计算结果主要由应变曲线拐点附近的局部区域决定,但是函数拟合法一般选用整条曲线,根据整体最优原则进行拟合,这种做法不能保证应变曲线拐点附近区域的拟合效果也是最优结果;当选择不同的

拟合区间时,拟合曲线微小的差异可能导致流动次数发生较大的变化。为解决该问题,本文提出了基于 Francken 模型和应变曲线的局部拟合法,并提出了基于最小应变率的最优区间系数(K)的确定方法。

1 SPT 永久变形试验

1.1 试验材料和试件制备

本试验采用 RIOHTRACK 足尺路面试验环道实际采用的 2 种 AC13 沥青混合料 AC-1 和 AC-2,级配如表 1 所示,采用 2 种改性沥青 SBS1 和 SBS2^[9],油石比(质量比)分别为 5.05% 和 5.16%。试件采用旋转压实仪成型,原始试件尺寸为 $\phi 150 \times 170$ mm;然后通过钻芯、切割得到尺寸为 $\phi 100 \times 150$ mm 的最终试件。

表 1 沥青混合料设计级配
Table 1 Gradation of asphalt mixture

Sieve size/mm		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio	AC-1	98.0	60.6	34.8	25.4	17.7	13.4	9.9	8.8	7.1
(by mass)/%	AC-2	97.9	58.1	30.3	21.2	15.3	12.0	9.4	8.5	7.0

1.2 试验条件和试验过程

本试验采用的荷载形式为 SPT 永久变形试验常用的间歇半正弦波,加载时间为 0.1 s,荷载间歇时间为 0.9 s。设定试验温度为 50 °C,应力峰值为 1 100 kPa。为了得到完整的 3 阶段变形曲线,当试件明显进入破坏阶段时终止试验。采用的仪器为 UTM-100 型万能试验机,试件置于 2 个压盘之间,整个试验在控温箱中进行。该试验可以得到不同加载次数时沥青混合料的累计永久变形(应变),进而计算得到每次加载作用产生的永久变形(应变率)。

2 流动次数计算方法

2.1 实验值法

实验值法包括直接实验值法和移动平均值法。直接实验值法以相邻 2 次荷载(第 $n-1$ 次和 n 次)对应应变的差值作为第 n 次荷载时的应变率,然后确定最小应变率对应的荷载次数。这种方法操作简单,但是容易受到试验过程中数据抖动的影响,难以准确定位应变率曲线上真正的最低点。移动平均值法是对相邻数次荷载(第 $n-a$ 至 $n+a$)的应变率求平均值,作为第 n 次荷载对应的应变率,其中 $2a+1$ 称为步长。

采用上述 2 种方法计算 2 种沥青混合料的流动次数,结果如表 2 所示。由表 2 可见:对于 AC-1,步

长为 3、5 时移动平均值法得到的流动次数接近,比直接实验值法高了 44.8%;对于 AC-2,移动平均值法得到的流动次数均明显大于直接实验值法,并且步长为 5 时流动次数比步长为 3 时高了 42.3%;直接实验值法计算结果误差较大,而移动平均值法计算结果受步长的影响明显。

表 2 步长对流动次数的影响

Table 2 Flow numbers of different step sizes			cycles
Sample	Direct experimental value method	Moving average value method	
		Step size= 3	Step size=5
AC-1	491	712	711
AC-2	473	523	744

2.2 拟合区间的影响

函数拟合法首先采用函数拟合应变曲线,然后求解拟合曲线的拐点。流动次数的计算结果主要由应变曲线拐点附近的局部区域决定,但是函数拟合法一般选用整条曲线,根据整体最优原则进行拟合,这种做法不能保证应变曲线拐点附近区域的拟合效果也是最优结果,拐点附近应变曲线接近于直线,拟合曲线微小的变化可能导致流动次数发生较大的变化。SPT 永久变形试验一般设置的初始终止条件为 50 000 个微应变(5% 变形)或者 10 000 次加载,达到任一条件时,试验将自动停止。在实际试验中,为了得到完整的 3 阶段永久变形曲线,可以根据实际情况对终止条件进行调整。如果采用整条应变曲线

进行拟合,终止条件将会严重影响流动次数的计算结果。

选择常用的 Francken 模型拟合应变曲线^[6],具体公式如下:

$$\epsilon_p = AB^N + C(e^{DN} - 1) \quad (1)$$

式中: ϵ_p 为应变, $\mu\text{m}/\text{m}$; N 为加载次数; A 、 B 、 C 、 D 为拟合参数。

当终止条件分别设置为 40 000~80 000 个微应变时,2 种沥青混合料流动次数的计算结果如表 3 所示。由表 3 可见:对于 AC-1,终止条件为 60 000 个微应变时的流动次数比 40 000 个微应变时高了 24%;对于 AC-2,终止条件为 80 000 个微应变时的流动次数比 40 000 个微应变时高了 20%。

表 3 终止条件对流动次数的影响
Table 3 Flow numbers of different termination conditions cycles

Sample	Strain/ $(\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$			
	80 000	60 000	50 000	40 000
AC-1		797	791	643
AC-2	897	777	753	750

同理,拟合曲线的起始条件也会对流动次数产生影响。将起始拟合次数分别设置为 50~300 进行验证,计算结果如表 4。由表 4 可见:对于 AC-1,起始拟合条件为 300 次荷载时的流动次数比 50 次时高了 3%;对于 AC-2,起始拟合条件为 300 次荷载时的流动次数比 50 次时高了 8%。由此可见,采用函数拟合法时,拟合范围的起始条件和终止条件都会对流动次数的计算结果产生影响,其中终止条件的影响更显著。

表 4 起始条件对流动次数的影响
Table 4 Flow numbers of different starting conditions cycles

Sample	Number of loading cycle/times			
	50	100	200	300
AC-1	785	784	793	810
AC-2	901	952	942	974

2.3 局部拟合法

由于拟合曲线的起始条件和终止条件都会对流动次数的计算结果产生影响,因此本文提出了局部拟合法,舍弃应变曲线中的起始和最终快速变形阶段,只选择应变曲线中变形较为平稳的阶段,并提出了选择合适的局部拟合范围的方法。局部拟合法步骤如下(图 1):

(1)确定初始最小应变率 采用 Francken 模型拟合实测应变曲线,求该拟合曲线的二次导数,令其为零,得到初始流动次数,其对应的应变率记为 E_0 ,

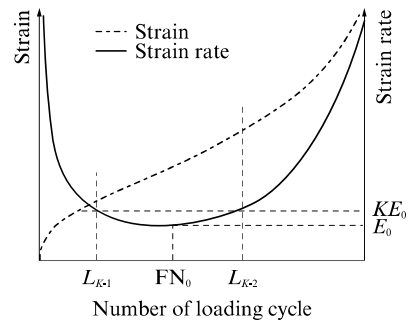


图 1 局部拟合法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of local fitting method

荷载次数为 FN_0 。

(2)确定局部拟合范围 求水平线 $y=KE_0$ 与该应变拟合曲线交点 L_{K-1} 和 L_{K-2} (K 为区间系数,且 $K>1$),2 个交点之间的区间即为与 K 值对应的局部拟合范围。

(3)确定最优拟合范围 选择不同的 K 值,分别采用 Francken 应变模型,拟合对应局部区间内的实测应变,求得到相应的流动次数;根据拟合曲线和流动次数的变化规律,确定最优拟合范围;以最优拟合范围对应的流动次数作为最终流动次数。

确定最优拟合范围是确定最终流动次数的关键。区间系数 K 值越小,其对应的拟合范围就越小。图 2、3 分别为 AC-1 不同 K 值的应变拟合曲线和应变率曲线。图 4、5 分别为 AC-2 不同 K 值的应变拟合曲线和应变率曲线。表 5 为根据局部拟合法计算的与 K 值对应的流动次数。从整体上看(图 2、4),Francken 模型能较好地拟合各个 K 值范围内的实测应变,拟合曲线几乎与实测应变曲线重合。为了凸显各拟合结果的差异,分别计算了每条应变拟合曲线对应的应变率曲线,并对最低点附近区域的局部进行了放大(图 3、5)。由图 3、5 可见:随着 K 值的减小,应变率曲线的右侧逐渐向上移动而左侧向下移

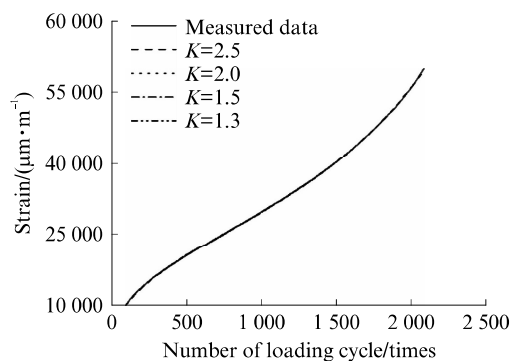


图 2 AC-1 不同 K 值的应变拟合曲线

Fig. 2 Strain fitting curves of different K value of AC-1

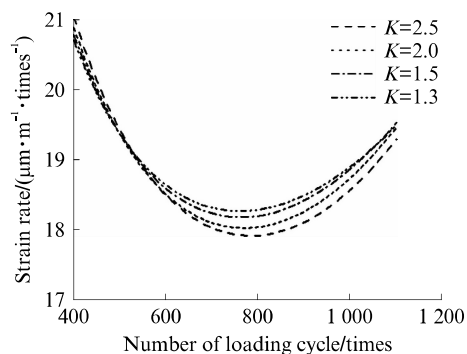


图3 AC-1不同应变拟合曲线对应的应变率曲线
Fig. 3 Strain rate curves of different strain fitting curves

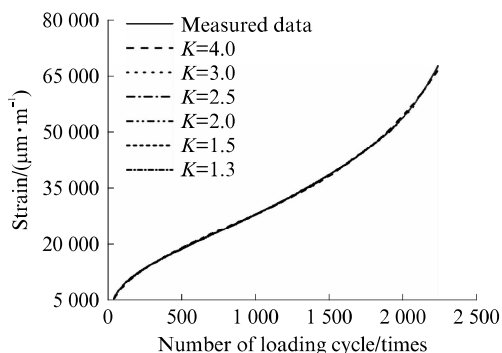


图4 AC-2不同K值的应变拟合曲线
Fig. 4 Strain fitting curves of different K value of AC-2

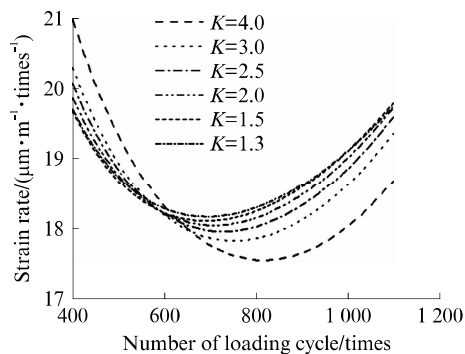


图5 AC-2不同应变拟合曲线对应的应变率曲线
Fig. 5 Strain rate curves of different strain fitting curves

动,这种变化将导致应变率曲线的最低点向左移动(FN变小),该分析得到了表5数据的验证;当K值逐渐减小至1.5时,应变率曲线变化较为明显;当K值从1.5减小至1.3时,2种混合料的应变率曲线均无明显变化,几乎保持在原位置。

由表5可见:随着K值的减小,2种混合料的FN均值逐渐减小,但减小速率变慢。当 $K > 1.5$ 时,2种混合料的流动次数均快速变化,而当 $K < 1.5$ 时,2种混合料的流动次数几乎保持不变。当K值过

表5 不同K值时的流动次数
Table 5 Flow numbers of different K values

Sample	K value					
	4.0	3.0	2.5	2.0	1.5	1.3
AC-1			783	769	761	759
AC-2	817	751	727	708	691	692

小时,拟合范围内的实测应变率曲线整体上几乎趋近于直线,不能明显表征先减小后增大的趋势。根据应变率拟合曲线和流动次数随K值变化的规律,确定本次试验最优K值为1.5。因此,2种混合料的流动次数分别为761和691。对比发现,采用局部拟合法得到的流动次数与实验值法和函数拟合法有较大差异,该方法可以避免测量值抖动和拟合区间选择的随机性带来的影响,得到精确而稳定的计算结果。

3 结论

(1)直接实验值法计算结果误差较大,移动平均值法计算结果受步长的影响明显,函数拟合法的计算结果受拟合范围起始条件和终止条件的影响,其中终止条件的影响更为显著。

(2)采用Francken模型拟合应变曲线时,随着K值减小,2种沥青混合料应变率曲线的右侧逐渐向上移动而左侧向下移动,流动次数逐渐变小。当 $K < 1.5$ 时,2种沥青混合料的应变率曲线和流动次数几乎保持不变,本试验最优局部区间的区间系数K为1.5。

参考文献:

- [1] 赵毅,梁乃兴,舒国明,等. 沥青路面永久变形预估研究[J]. 建筑材料学报,2016,19(6):1038-1045.
ZHAO Yi, LIANG Naixing, SHU Guoming, et al. Permanent deformation prediction of asphalt pavement [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):1038-1045. (in Chinese)
- [2] 张冬峰,韩振宇,石英. CSIRO-Mk3.6.0模式及其驱动下RegCM4.4模式对中国气候变化的预估[J]. 气候变化研究进展,2017,13(6):557-568.
ZHANG Dongfeng, HAN Zhenyu, SHI Ying. Comparison of climate projection between the driving CSIRO-Mk3.6.0 and the downscaling simulation of RegCM4.4 over China [J]. Climate Change Research, 2017, 13(6):557-568. (in Chinese)
- [3] 石英,韩振宇,徐影,等. 6.25 km高分辨率降尺度数据对雄安新区及整个京津冀地区未来极端气候事件的预估[J]. 气候变化研究进展,2019,15(2):140-149.
SHI Ying, HAN Zhenyu, XU Ying, et al. Future changes of climate extremes in Xiong'an New Area and Jing-Jin-Ji district based on high resolution (6.25 km) combined statistical and dynamical downscaling datasets [J]. Climate Change Re-

- search, 2019, 15(2):140-149. (in Chinese)
- [4] WU J, HAN Z Y, LI R K, et al. Changes of extreme climate events and related risk exposures in Huang-Huai-Hai river basin under 1.5-2 °C global warming targets based on high resolution combined dynamical and statistical downscaling dataset[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(2): 1383-1401.
- [5] 张久鹏, 黄晓明, 高英, 等. 沥青混合料永久变形的三轴重复荷载试验方法[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 616-620.
- ZHANG Jiupeng, HUANG Xiaoming, GAO Ying, et al. Tri-axial repeated load test method for permanent deformation of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 616-620. (in Chinese)
- [6] 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): 1-14.
- LI Qiang, GAO Lei, WANG Hongchang, et al. Experiment on flow number of asphalt mixture under repeated load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(12): 1-14. (in Chinese)
- [7] 季节, 陈磊, 索智, 等. 高温和重载对 DCLR 改性沥青混合料抗变形能力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 1-8.
- JI Jie, CHEN Lei, SUO Zhi, et al. Effect of high temperature and heavy load on deformation resistance of DCLR modified asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 1-8. (in Chinese)
- [8] 张久鹏, 李彦伟, 裴建中, 等. 基于永久变形试验的沥青混合料损伤分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 40(10): 1522-1526.
- ZHANG Jiupeng, LI Yanwei, PEI Jianzhong, et al. Damage characteristic of asphalt mixture by permanent deformation test[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 40(10): 1522-1526. (in Chinese).
- [9] 王旭东. 足尺路面试验环道路面结构与材料设计[J]. 公路交通科技, 2017, 34(6): 30-37.
- WANG Xudong. Design of pavement structure and material for full-scale test track[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(6): 30-37. (in Chinese).