

沥青路面弯沉的温度修正研究

石志勇¹, 李倩倩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:为了更好地分析沥青路面动态弯沉随行车荷载的演化规律,通过 FWD 现场实测动态弯沉和不同类型的温度采集,采用变量分离的方法开展弯沉温度的修正研究。首先选取指数函数、Boltzmann 和 DoseResp 函数模型分别与 6 种温度指标拟合,寻找出最能反映路面动态弯沉变化的温度类型,在此基础上建立了 3 种温度修正模型,从修正效果对比发现,基于 DoseResp 函数的类 S 形曲线温度修正模型的相关系数达到了 0.92 以上,可靠度高,形式简洁,修正效果良好,符合路面动态弯沉演变规律。

关键词: 沥青路面; 动态弯沉; 代表温度; S 形曲线; 温度修正

1 前言

弯沉是反映路面整体刚度与强度的重要指标,它体现了路面结构承载力的大小。因 FWD(落锤式弯沉仪)实测弯沉盆能较好地反映路面实际力学响应状态,从而受到了广泛的认可和应用,在役沥青路面弯沉水平在服役过程中受到车辆荷载与环境的耦合作用而逐

渐增加,路面结构长期服役性能演化模型的建立都是基于一定的标准温度状态下,为了客观、准确描述弯沉水平的演变规律,需采用变量分离的方法,开展弯沉的温度修正研究。

一般来说,用于评价沥青路面性能的环境温度指标有:路面结构(特别是沥青混凝土结构层)内部温度、沥青路面路表温度和大气温度等。但是在实际工程中,同一时段的这 3 个温度数值并不相等,有时甚至相

度应力基本保持不变。

(3) 随着面层厚度的增大,基层顶部温度、温度梯度和接缝顶部温度应力都显著减小。

(4) 温度与荷载耦合作用下比单独温度场作用有明显的应力提升,升温增长的幅度大于降温;存在路载情况下降温对基层接缝应力的影响远大于升温;无论升温降温,随着温差增大,施加荷载对其影响变小。

(5) 无论路表温差为多少,在超载作用下接缝应力均是显著增长,并且正温差比负温差更易受超载影响,超、重载对路面有严重危害。

参考文献:

- [1] 严作人. 层状路面体系的温度场分析[J]. 同济大学学报, 1984(3).
- [2] 吴赣昌. 层状路面结构温度应力分析[J]. 中国公路学报, 1993(4).

- [3] 谈至明,姚祖康,刘伯莹. 双层水泥混凝土路面板的温度应力[J]. 中国公路学报,2003(2).
- [4] 杨斌. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究[D]. 长安大学博士学位论文,2005.
- [5] 郭寅川,王礼根,申爱琴,等. 甘肃半刚性沥青路面结构的温度场及温度应力三维有限元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016(3).
- [6] 颜祥程,翁兴中,杨立耀. 机场水泥混凝土道面加铺层结构接缝传荷能力分析[J]. 公路,2015(8).
- [7] 张伟,彭妙娟. 机场复合道面基层裂缝的断裂力学分析[J]. 中外公路,2017(6).
- [8] 申爱琴. 超声波法测定水泥砂浆弹性模量的可靠性分析[J]. 西安公路学院学报,1994(14).
- [9] 冯德成,胡伟超,于飞,等. 沥青路面材料热物性参数对温度场的影响及敏感性分析[J]. 公路交通科技,2011(11).
- [10] 谈至明,姚祖康. 非线性温度场下的水泥混凝土路面温度应力[J]. 中国公路学报,1993(4).

收稿日期:2020-12-01(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0840200);交通运输部科技示范工程项目(编号:2016010)

作者简介:石志勇,男,硕士研究生. E-mail:2676578406@qq.com

差很大,3 种温度可从不同角度反映环境对路面结构使用性能的影响。也就是说,对于不同的道路服役指标,采用不同温度指标更有利于建立准确的温度修正模型。因此,在探讨温度修正时,确定与弯沉最密切的代表温度是首先考虑的问题。由于不同路面结构服役性能指标各自本身的特点,对于不同的路面服役性能指标,温度修正过程中所选择的温度类型不尽相同。大多数学者采用沥青面层平均温度或者路表温度作为路面结构的代表温度开展弯沉的温度修正工作。然而弯沉是结构整体强度指标,可能与路面整体结构温度的关系更加密切,并且温度在路面结构内部是呈梯度分布的,具有滞后性与累积性,将路表温度或者将沥青层温度平均作为路面结构的代表温度并不准确。当量温度是路面疲劳损伤确定的最不利温度,是路面服役性能指标进行温度修正的重要参数,更能代表路面结构的变化特征。因此具体分析时需要根据路面结构与材料的特点,选择与弯沉关系最密切的代表温度,才能建立更加有效可信的温度修正模型。

关于弯沉温度修正问题,JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中采用分段指数形式给出沥青路面弯沉的修正系数公式,但当温度低于 20 ℃时,其修正预测值逐渐偏离实测值趋于无穷大,与实际路面服役性能不符。JTGE60—2008《公路路基路面现场测试规程》中给出了 4 个沥青层厚度的温度修正系数,但可操作性不强。康海贵、郑元勋、董元帅等通过试验路建立了弯沉的温度修正模型,这类模型一般形式为简单二次函数或指数函数,在一定条件下具有较高可靠性,但存在实测路面结构形式单一、适用温度范围小等缺

点;宋小金等在考虑沥青层厚度的基础上回归出弯沉温度修正模型,但表达式过于复杂。研究表明,沥青混合料的动态模型具有温度依赖性,随温度呈现典型的反 S 形变化规律,与之相反弯沉应为 S 形变化规律,考虑到上述弯沉的温度修正模型并没有讨论如何确定与路面结构弯沉的最密切温度,针对上述问题,该文依托足尺环道试验路面 RIOHTrack(下称 RIOHTrack)4 种典型结构开展弯沉的温度修正研究,建立基于路面代表温度的更加简洁可靠的 S 形弯沉温度修正模型。

2 数据来源

RIOHTrack 所处的北京通州地区四季分明,气候差异较大,且超车道一直处于零荷载状态,定期开展 FWD 弯沉检测和温度数据收集工作,利于开展弯沉温度修正的相关研究。该文通过宽刚度域的 RIOHTrack 道路结构全寿命周期的加速加载试验验证,采集 50 kN 下,强基薄面半刚性基层结构 STR1、设置有应力吸收层的刚性基层结构 STR5、复合式基层路面结构 STR13 和全厚式沥青路面结构 STR19 共 4 种沥青路面的弯沉数据,具体材料与结构组合形式如表 1 所示。FWD 设备的 9 个弯沉传感器 D_0 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_8 距离承载板中心处的距离分别为 0、23、53、69、85、116、153、175、205 cm。FWD 检测时,可同时测量路表温度和大气温度,STR1 的温度传感器随路面结构深度布置如图 1 所示。其他 3 种结构布置情况和 STR1 相似。STR1 不同深度处日温度变化曲线如图 2 所示。

表 1 4 种路面结构组合

层位	STR1	STR5	STR13	STR19
1	4 cmSBS—SAC13	4 cmSBS—AC13	4 cmSBS—AC13	4 cmSBS—SMA13
2	防 1	防 1	防 1	防 1
3	8 cmA30—AC20	6 cmA30—AC20	8 cmSBS—AC20	8 cmA30—AC20
4	防 2	黏层	黏层	黏层
5	20 cmCBG—A	2 cmSBS—AC10	12 cmA70—AC25	12 cmA30—AC25
6	20 cmCBG—A	黏层	防 2	黏层
7	20 cmCS	24 cmCC	20 cmCBG—A	12 cmA30—AC25
8	20 cmCS	20 cmCBG—A	20 cmCBG—A	黏层
9		20 cmCS	20 cmCS	12 cmA30—AC25
10				黏层
11				20 cmCBG—B
沥青面层总厚度/cm	12	12	24	48
基层总厚度/cm	80	64	60	20

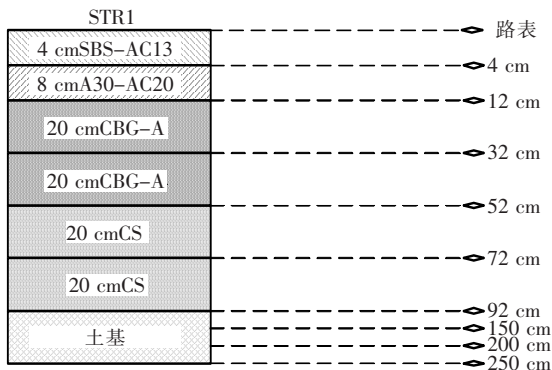


图 1 温度传感器布设深度

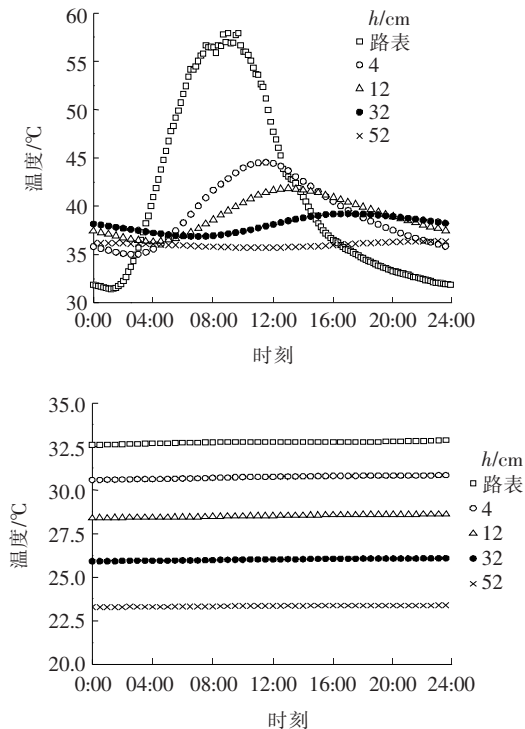


图 2 路面结构不同深度处的日温度变化曲线

3 代表温度的选取

该文主要选取 6 种温度类型收集、计算、汇总和分析,即:① 路表温度;② 大气温度;③ 大气 5 d 日当量平均温度;④ 路表 5 d 日当量平均温度;⑤ 路面整体结构当量温度(路基以上部分);⑥ 路面沥青面层当量温度。

(1) 路表与大气温度是弯沉检测时 FWD 自带温度传感器与弯沉同步记录的温度,可直接获取用作弯沉的温度修正。

(2) 日当量平均温度的获取通过下列方法计算得到。首先,得到路面每个传感器深度处的日当量平均

温度。路面结构内部温度传感器数据采集频率为 10 min,换算成 1/6 h,采用 Bigaussion 函数拟合得到不同深度的时间温度曲线,由于该函数难以积分,因此以 1/6 h 为单位,将 24 h 内的时间温度曲线分割为 144 个近似梯形,计算得到每个梯形的面积,累加得到时间温度曲线几何图形面积,如式(1):

$$S = \sum_{i=1}^{144} \frac{(T_i + T_{i-1})(t_i - t_{i-1})}{2} \quad (1)$$

式中: S 为时间温度曲线围成的面积; t_i 与 t_{i-1} 为相邻温度采集时刻; T_i 与 T_{i-1} 分别为时刻 t_i 与 t_{i-1} 对应的温度。

将得到的时间温度曲线几何图形面积除以 24 即得到某一传感器深度 h 处的日当量平均温度,如式(2):

$$\bar{T} = \frac{S_h}{24} \quad (2)$$

其次,把同一个断面得到的不同深度日当量平均温度,绘成随深度变化的日当量平均温度曲线,将曲线与深度轴围成的几何图形分割成若干个梯形,计算每个梯形的质心坐标 (X_i, Y_i) ,再以梯形的面积为加权值,计算温度曲线与深度轴围成的几何图形的质心,即得到该路面结构的日当量平均温度及平均温度对应的深度位置,计算公式如式(3)、(4)所示。同理,沥青面层日当量温度的计算同样基于上述理论。

$$T_{\text{日当量}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (3)$$

$$h_{\text{日当量}} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

同样的大气 5 d 日当量平均温度与路表 5 d 日当量温度采用 RIOHTrack 小型气象站的实测温度,计算出弯沉检测时前后 5 d 大气和路表的平均温度,然后采用式(1)计算得到大气和路表 5 d 日当量平均温度,由于大气温度是气象站测得的 RIOHTrack 区域内的温度,所以该文选取的 4 种结构的大气 5 d 日当量平均温度是一致的。

从大量实测沥青路面动态弯沉可以看出:对于同一路面结构不同时期的弯沉水平差异很大,温度高,弯沉水平高。反之,温度低,则弯沉水平低,这说明沥青路面弯沉水平具有显著的温度依赖性。其随温度的变化曲线是从一个特定初始水平开始增长,呈现出初期较慢,中期陡增,后期趋缓并最终达到饱和的 S 形变化

过程,如图3所示, $\Delta l=l_{\max}-l_{\min}$, $\Delta T=T_2-T_1$ 。 Δl 为弯沉的变化范围, ΔT 为温度敏感区间, l_{\max} 为弯沉的最大值, l_{\min} 为弯沉的最小值, T_1 和 T_2 分别为弯沉变化曲线拐点处对应的温度。 $\Delta l/\Delta T$ 为温度敏感区间内的弯沉变化速率。该文通过大量数据统计和分析选取两种S形曲线 Boltzmann、DoseResp 和一种简单的指数曲线,基于3种函数建立温度与弯沉关系,选取路

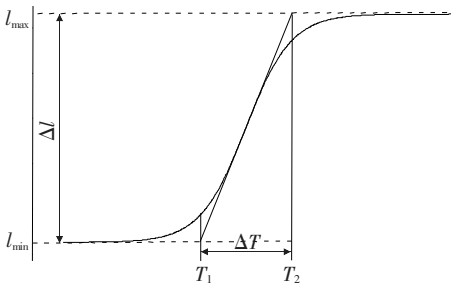


图3 弯沉温度变化曲线

面结构代表温度对比分析进而建立一种更加科学有效的弯沉温度修正模型。

Boltzmann 和 DoseResp 函数都是典型的随自变量变化的类 S 形曲线。建立基于 Boltzmann 和 DoseResp 函数的弯沉与温度关系,具体形式如式(5)、(6)所示。

$$l=\frac{l_{\max}-l_{\min}}{1+e^{(T-T_0)/p}}+l_{\min}$$
 (5)

式中: $T_0=\frac{T_2-T_1}{2}$; p 为固定参数。

$$l=l_{\min}+\frac{l_{\max}-l_{\min}}{1+10^{(T_0-T)q}}$$
 (6)

指数模型为最简单的指数形式函数,如式(7):

$$l=a e^{b T}$$
 (7)

式中: a 、 b 为固定参数。

根据式(5)~(7)计算得到的3种模型的弯沉与温度相关系数见表2。

表2 弯沉与温度指标的相关系数 R²

项目	STR1			STR13		
	Boltzmann	DoseResp	指数	Boltzmann	DoseResp	指数
路表	0.828 29	0.820 06	0.828 29	0.731 70	0.829 15	0.792 69
大气	0.829 70	0.817 34	0.829 70	0.752 34	0.652 56	0.767 35
大气 5 d	0.853 91	0.865 11	0.853 91	0.928 92	0.911 15	0.905 72
路表 5 d	0.868 66	0.882 74	0.868 66	0.924 67	0.890 72	0.900 14
沥青面层	0.877 33	0.882 52	0.877 33	0.853 48	0.902 05	0.853 48
整体结构层	0.920 21	0.928 14	0.920 21	0.818 08	0.883 42	0.818 08

项目	STR15			STR19		
	Boltzmann	DoseResp	指数	Boltzmann	DoseResp	指数
路表	0.531 82	0.717 39	0.531 82	0.675 82	0.692 04	0.837 93
大气	0.822 57	0.843 36	0.822 57	0.734 90	0.633 25	0.859 22
大气 5 d	0.824 42	0.857 34	0.824 42	0.883 28	0.894 07	0.883 28
路表 5 d	0.869 91	0.824 45	0.869 91	0.903 21	0.816 53	0.865 72
沥青面层	0.927 25	0.920 86	0.927 25	0.822 28	0.847 99	0.823 36
整体结构层	0.904 34	0.906 5	0.904 34	0.823 36	0.843 12	0.823 36

从表2可以看出:①对于同一种结构,弯沉与不同的温度指标拟合效果是不同的,有的结构甚至相差很大,不同的结构存在着不同的代表温度;②3种模型对于同一结构的代表温度的选择基本一致,即3种模型下,同一结构的代表温度是相同的;③STR1、STR5、STR13、STR19的代表温度分别为路面整体结构当量温度、路面沥青面层当量温度、大气5d日当量平均温度、路表5d日当量平均温度,说明当量温度更能反映弯沉的变化规律,除了STR19最低的0.88之

外,其余3种的代表温度和弯沉的拟合效果都达到了0.9以上,拟合效果良好,当量温度更能反映弯沉的变化规律。基于此,该文分别以不同结构的代表温度建立弯沉的温度修正模型。

4 弯沉温度修正模型的建立

弯沉的温度修正基本思路如下:

(1) 分别利用式(5)~(7)将超车道不同路面结构

的实测中心点弯沉与代表温度拟合,得到弯沉与温度的关系式:

$$l=f(T) \tag{8}$$

(2) 计算出 RIOHTrack 地区的当量温度 $T_{\text{当量}}$,以此为基准温度,代入式(8)计算该温度下的弯沉值 $l_{\text{当量}}$ 。

(3) 计算弯沉值 $l_{\text{当量}}$ 与各个结构不同温度下的实测中心点弯沉值的比值,即弯沉的温度修正系数 $K=l_{\text{当量}}/l_T$,分别利用式(1)~(3)将 K 与相应的实测温度拟合,得到修正系数 K 与温度的关系式:

$$K=F(T) \tag{9}$$

(4) 根据(3)的计算结果,将实测弯沉值与式(9)相乘,即得到路面结构的弯沉修正式(10)。

$$f_{\text{修}}=Kl \tag{10}$$

根据不同的代表温度和 3 种模型建立适合于 4 种结构的弯沉温度修正模型。根据计算与分析,

RIOHTrack 所处地区的当量温度为 15 ℃,进一步参照规范,将 15 ℃和 20 ℃分别作为基准温度,计算各个结构在 15 ℃和 20 ℃下的弯沉值水平(表 3)。

由表 3 可得:4 种结构刚度水平大小顺序为 STR1>STR5>STR19>STR13。对于同一种结构 20 ℃下的弯沉值大都大于 15 ℃,这与理论规律一致,在同一温度下,其弯沉水平为 STR1<STR5<STR19<STR13,这与 4 种结构的刚度水平一致。

表 4 为 4 种结构在标准温度下弯沉比即修正系数与温度的拟合相关参数,将其代入式(10)即可得到相应的弯沉温度修正公式,从表 4 可以看出:除了 STR19 的指数函数最小值为 0.899 和 0.903 之外,其余的相关系数均达到了 0.92 以上,相关性良好。说明 3 种模型均适合于温度修正。

图 4 为修正到 15 ℃下的弯沉水平与标准弯沉相对误差频率分布图,20 ℃下的规律基本相似不再赘述。

表 3 基准温度下的弯沉水平

温度/ ℃	STR1/mm			STR5/mm			STR13/mm			STR19/mm		
	Boltzmann	指数	DoseResp	Boltzmann	指数	DoseResp	Boltzmann	指数	DoseResp	Boltzmann	指数	DoseResp
15	5.41	5.53	5.41	5.64	5.68	5.64	5.93	6.19	5.97	5.57	5.86	5.57
20	5.80	5.83	5.08	6.00	5.92	6.00	6.93	7.00	6.80	6.19	6.42	6.19

表 4 修正系数的回归参数

结构	温度/	Boltzmann					指数				DoseResp			
	℃	l_{\max}	l_{\min}	T_0	p	R^2	a	b	R^2	l_{\min}	l_{\max}	T_0	q	R^2
STR1	15	1.31	0.68	13.97	13.82	0.948	1.17	−0.01	0.958	0.67	1.30	15.26	−0.03	0.947
	20	1.41	0.73	13.97	13.82	0.948	1.24	−0.01	0.958	0.73	1.40	14.01	−0.03	0.951
STR5	15	1.15	0.84	15.32	6.05	0.934	1.13	−0.01	0.935	0.84	1.15	15.32	−0.07	0.934
	20	1.22	0.89	15.57	6.64	0.935	1.18	−0.01	0.927	0.89	1.22	15.57	−0.07	0.935
STR13	15	1.70	0.17	18.02	15.55	0.941	1.40	−0.02	0.928	0.14	1.72	18.35	−0.03	0.935
	20	1.96	0.25	17.50	14.90	0.935	1.58	−0.02	0.930	0.25	1.89	17.98	−0.03	0.934
STR19	15	1.26	0.11	30.91	12.77	0.956	1.27	−0.02	0.903	0.11	1.26	30.91	−0.03	0.956
	20	1.40	0.20	29.47	12.29	0.956	1.39	−0.02	0.899	0.20	1.40	29.47	−0.04	0.951

由图 4 可以看到:以 Boltzmann 模型为基础的弯沉修正模型误差相对较大,除 STR5 的 75%的相对误差在 10%以内外,其他 3 种结构在 15%以上者达到了 69%~92%,结构 STR13 甚至出现了超过 250%的相对误差,与实际结果严重偏离。而指数模型与 DoseResp 模型修正后的相对误差在 10%以内者分别为 85%~92%和 77%~92%,在 5%以内者更是分别达到了 31%~83%和 46%~92%,说明基于 Boltzmann 函数的弯沉温度修正模型已经不能用作弯沉修正,而 DosResp 和指数函数的修正效果则非常好,且 DosRe-

sp 修正效果好于指数模型。由式(5)、(6)可知:两种 S 形曲线模型具体参数差别不大,并且在温度敏感区间内的变化速率差基本一致,说明模型的具体形式决定了修正的效果好坏。进一步分析发现,在温度较低时指数函数模型逐渐趋向于无穷大,与实际不符。

5 弯沉修正模型的验证

现有的弯沉设计指标模型是根据中小荷载水平确定的,对于全寿命周期、繁重荷载作用下的弯沉变化规

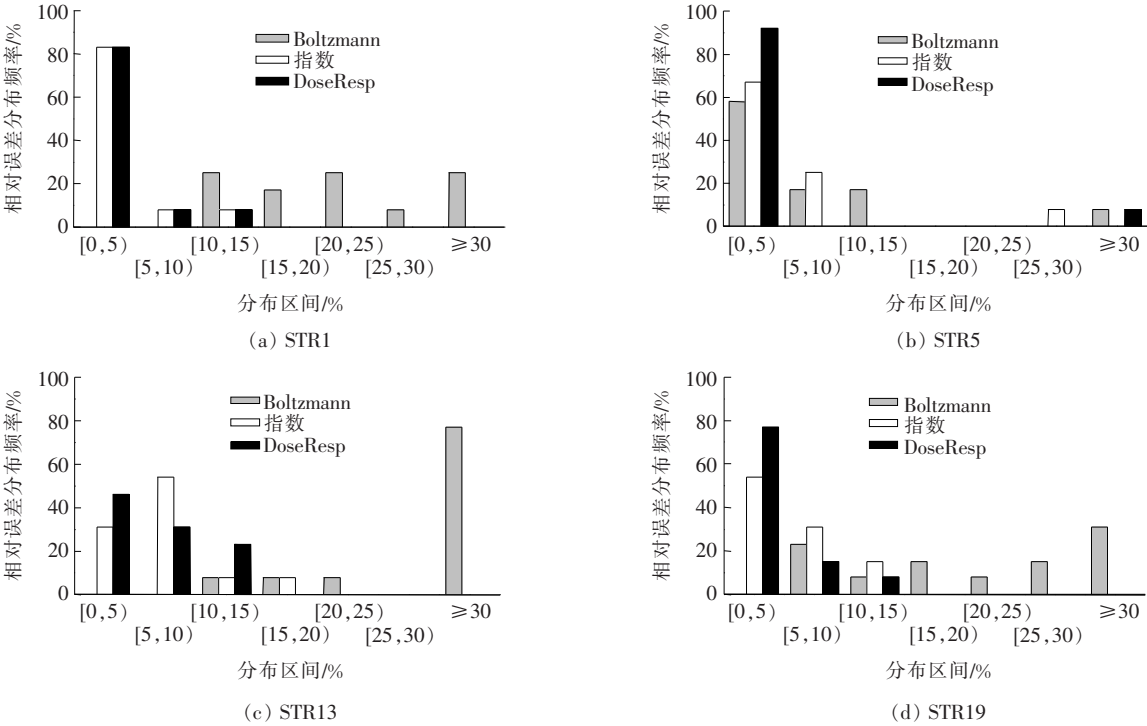


图 4 相对误差的频率分布统计

律尚缺乏全面的试验数据验证。2016 年底至 2018 年底 RIOHTrack 行车道经受了相当于累计 10 t 标准轴载作用近 800 万次的车辆加载作用,从上文的结果分析可以看到,DoseResp 函数模型不仅修正效果最好,

而且更加符合弯沉的实际变化规律,因此选取该模型开展 RIOHTrack 行车道弯沉的温度修正工作。图 5 为 RIOHTrack 行车道弯沉采用上述 3 种修正模型修正为 15 ℃ 下的弯沉水平。

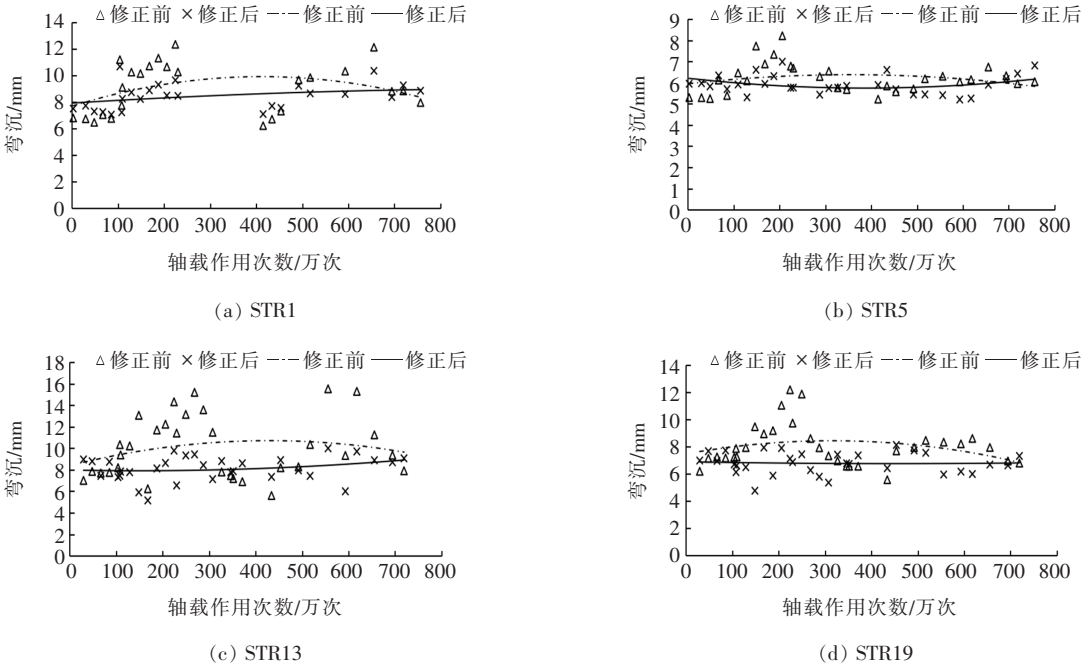


图 5 行车道弯沉修正效果

由图 5 可以看到:经过近 800 万次的加载作用,弯沉的变化趋势为缓慢增加。修正前弯沉水平具有明显的季节依赖性,这说明路面结构在服役前期主要受到环境温度的影响,荷载对其疲劳贡献率并不明显,这验证了修正模型的可靠性并为进一步进行路面服役性能分析提供了一定依据。为了更好地将该模型应用于实际工程中,进行弯沉的温度修正时,对于代表温度为大气 5 d 日当量平均温度的沥青路面结构,可根据当地气象数据得到所需的路面代表温度,而路面代表温度为结构内部的当量温度时,后续可建立大气日当量平均温度与结构内部当量温度的关系,通过实测大气温度,换算出所需的路面结构内部的当量温度来进行弯沉的温度修正。

6 结论

依托北京通州地区 RIOHTrack 4 种典型结构 STR1、STR5、STR13、STR19,以 FWD 实测动态弯沉盆数据为基础,分析了与不同类型温度指标的关系,建立了基于 3 种函数模型的弯沉温度修正公式,通过分析研究,主要得出如下结论:

(1) 当量温度指标与弯沉的关系更加密切,不同的结构与材料组合形式,有不同的最能反映弯沉变化规律的代表温度,即:STR1 为整体结构层当量温度;STR5 为沥青面层当量温度;STR13 和 STR19 为大气 5 d 日当量平均温度,相关系数均达到了 0.88 以上,相关性良好,且对于同一种结构,Boltzmann、DoseResp 和指数模型对应的代表温度基本一致。

(2) 基于 S 形曲线的 Boltzmann 与 DoseResp 函数的弯沉温度修正模型对于超车道弯沉修正效果差异显著,Boltzmann 模型修正效果较差,而 DoseResp 模型效果很好,适宜用作弯沉的温度修正,模型的具体形式决定了修正的效果好坏。基于简单形式的指数函数建立的弯沉温度修正模型对行车道弯沉修正效果良好,在一定温度区间内可以作为弯沉温度修正的备用模型,但是温度适用范围较小,在较低温度时修正效果脱离沥青路面的实际弯沉水平。S 形曲线模型在表征弯沉与温度的关系时,随着温度无穷小或无穷大时,弯沉水平逐渐逼近最小值或最大值,趋于饱和,更加符合

路面实际动态弯沉的变化规律,简洁可用。

(3) 沥青路面结构弯沉水平服役前期主要受到环境温度的影响,经历 2 年近 800 万次的加载作用后,路面结构的弯沉水平总体趋势缓慢增加,荷载对路面结构疲劳贡献率很小。

参考文献:

- [1] 王旭东. 沥青路面弯沉指标的探讨[J]. 公路交通科技, 2015(1).
- [2] 谢懿. 基于 FWD 的沥青路面裂缝状况快速评价[J]. 中外公路, 2017(6).
- [3] 张智豪,李波,魏永政,等. 基于轻型落锤式弯沉仪动态数据的路面质量控制[J]. 中外公路, 2018(4).
- [4] QIU Xing. Study on Modulus Parameter Backcalculation and Correction Method for CTB Asphalt Pavement Based on FWD Testing Technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [5] 顾兴宇,袁青泉,倪富健. 基于实测荷载和温度梯度的沥青路面车辙发展影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2012(6).
- [6] 秦健,孙立军. 沥青路面温度场的分布规律[J]. 公路交通科技, 2006(8).
- [7] 李静. 沥青混合料温度稳定性与路面设计[D]. 长安大学硕士学位论文, 2001.
- [8] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [9] JTG E60—2008 公路路基路面现场测试规程[S].
- [10] 康海贵,郑元勋,蔡迎春,等. 基于 FWD 的沥青路面弯沉及反算模量的温度修正[J]. 中外公路, 2017(6).
- [11] 郑元勋,王复明,康海贵,等. 沥青路面弯沉修正试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010(2).
- [12] 董元帅. 沥青路面动态弯沉综合修正系数研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2010.
- [13] 宋小金,樊亮. 基于 FWD 的沥青路面动态弯沉温度修正系数[J]. 土木工程学报, 2018(3).
- [14] Pellinen T K, Witczak M W, Marasteanu M, et al. Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71: 281—309.
- [15] 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(6).
- [16] 肖倩,许兵,王旭东,等. 足尺路面试验环道路面温度曲线特征及拟合研究[J]. 公路交通科技, 2019(3).