

沥青层反算模量的温度修正系数

周亮^{1,2}, 凌建明¹, 林小平³, 吴青峰⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通运输部规划研究院, 北京 100028;
3. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 4. 上海市公路管理处, 上海 200063)

摘要: 采用落锤式弯沉仪(FWD)对上海地区路面结构进行评价,发现沥青层反算模量与沥青层温度间存在较好的指数关系,建立了上海地区道路结构的沥青层反算模量与沥青层温度回归模型,推荐了沥青层反算模量温度修正系数值.将沥青层反算模量温度修正结果与室内外模量测试结果进行对比,结果表明所推荐的温度修正系数具有较高的可靠性.

关键词: 沥青路面; 模量反算; 温度; 修正系数; 落锤式弯沉仪

中图分类号: U 416.217

文献标识码: A

Temperature Adjustment Factor for Back-calculated Modulus of Asphalt Pavement Layer

ZHOU Liang^{1,2}, LING Jianming¹, LIN Xiaoping³, WU Qingfeng⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Transport Planning Research Institute, Ministry of Transport of P R China, Beijing 100028, China; 3. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 4. Shanghai Highway Administration Department, Shanghai 200063, China)

Abstract: Falling weight deflectometer (FWD) tests were conducted at the pavements in Shanghai. The collected data were used to back-calculate the modulus of asphalt pavement layer. There was a good exponential relationship between the pavement layer modulus and the asphalt layer temperature. The equation of temperature and modulus was developed for the pavements in Shanghai. The temperature adjustment factors were proposed to correct the back-calculated modulus at any temperature to reference temperature modulus. Comparisons were made between the temperature corrected modulus and indoor and outdoor modulus. Results indicate that the temperature adjustment factor is of a high degree of reliability.

Key words: asphalt pavement; back-calculated modulus; temperature; adjustment factor; falling weight deflectometer (FWD)

利用落锤式弯沉仪(FWD)进行路面结构评价已在国内外得到广泛应用,合理选取沥青层反算模量值对于道路结构评价结果具有重要影响^[1].而沥青层材料属于典型的黏弹塑性材料,具有强烈的温度敏感性,其强度与刚度随着温度变化发生显著改变.因此,准确地将沥青层反算模量值修正为标准条件模量值,对于道路结构评价与道路网管理具有重要的现实意义.

我国规范^[2]及部分国外研究成果^[3-4]直接针对弯沉进行温度修正,但由于其修正系数与路面结构、测试设备有较大关系,使得其推广应用受到限制. Baltzer^[5]与 Marshall^[6]研究认为可以直接对反算后的模量值进行温度校正,与测试过程中 FWD 施加的荷载水平及道路结构层厚度无关.我国研究学者^[7-8]对沥青层反算模量的温度修正也进行过有益探讨,但均由于其所研究路面结构类型较少,难以代表我国典型路面结构状况,使其研究结果具有局限性.

本文借鉴国内外研究经验,对上海地区道路结构进行 FWD 测试,将大量实测弯沉数据进行反算,建立了道路结构沥青层反算模量与沥青层温度关系式,推荐了沥青层反算模量温度修正系数值.

1 数据来源与处理

1.1 沥青层温度预估

贾璐^[9]通过在我国上海、乌鲁木齐、唐山和武汉

收稿日期: 2010-09-06

基金项目: 上海市市政工程管理局科技发展基金项目(2008-1-4)

第一作者: 周亮(1981—),男,工程师,工学博士,主要研究方向道路与机场工程. E-mail: tinyzhou2014@gmail.com

通讯作者: 凌建明(1966—),男,教授,工学博士,博士生导师,主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: jimling01@yahoo.com.cn

等多个地区高等级沥青路面结构内不同深度处理设温度传感器,长期实测了沥青路面温度场,建立了沥青路面结构温度场预估模型如下:

$$T_p(H) = a_1 H^2 \cdot T_a(0,2) + a_2 H \cdot T_a(0,2) + a_3 T_a(0,2) + a_4 H \cdot \bar{Q}\left(\frac{1}{5}H, 5\right) + a_5 \bar{Q}\left(\frac{1}{5}H, 5\right) + a_6 H + a_7 H \cdot T_m + a_8 T_m + a_9 \quad (1)$$

式中: $T_p(H)$ 为深度 H 处沥青路面温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为深度, cm ; $T_a(0,2)$ 为当前气温与前一小时气温的平均值, $^{\circ}\text{C}$; $\bar{Q}\left(\frac{1}{5}H, 5\right)$ 为综合太阳辐射因子, $\text{kw} \cdot \text{m}^{-2}$;

T_m 为历年月平均气温, $^{\circ}\text{C}$; $a_1 \sim a_9$ 为待定系数. 该模型根据我国实测气象数据建立, 因此具有较强的适应性, 但此模型需要较为完备的气象参数, 如小时气温与小时太阳辐射等数据, 而我国多数地区难以获得上述气象资料, 使得该温度预估模型的应用受到限制, 故该模型的推广有待于进一步研究.

国外针对沥青层温度预估已进行了大量研究工作, 其预估模型可以分为理论法与统计法两大类, 其中较有影响力的主要包括 AI 模型、SHRP 模型、LTPP 模型与 BELLS3 模型. 其中 BELLS3 模型^[10]计算方法如下:

$$T_d = 0.95 + 0.892T_{\text{IR}} + 0.042T_{\text{IR}} \cdot \sin(t_{\text{hr18}} - 13.5) + [\lg d - 1.25] \cdot [-0.048T_{\text{IR}} + 0.621T_1 + 1.83 \cdot \sin(t_{\text{hr18}} - 15.5)] \quad (2)$$

式中: T_d 为沥青面层某点预测温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{IR} 为 FWD 测试时红外测温计读数, $^{\circ}\text{C}$; d 为距路表深度, mm ; T_1 为测试前一天平均气温, $^{\circ}\text{C}$; \sin 为弧度计算单位, 18 h 为 2π 周期; t_{hr18} 为每天中 24 h 时间系统中对应的测试时间, 计算时采用以 18 h 表征一天中沥青面层材料的温度循环周期.

BELLS3 预估模型最大优势在于计算参数容易获取, 且可以实现具体测试时间条件下, 沥青层中间层温度的准确预估. 该法已通过大量试验路验证, 被 NCHRP 1-37A 设计规范所采纳, 可信度较高, 该方法在沪宁高速公路(上海段)改扩建工程中已有成功应用^[11], 表明该温度预估方法完全适应于上海地区自然环境条件. 鉴于 BELLS3 预估模型的上述特点, 本文直接采用该方法进行沥青层中间点温度预估, 作为沥青层温度.

1.2 沥青层模量反算

作者对上海地区 24 条干线公路的沥青路面进

行性能调查^[12], 将上海地区常用沥青路面结构形式及厚度进行汇总, 见表 1, 其中泊松比为假定值. 利用 CARL BRO FWD 设备对 24 条路段进行弯沉测试, 荷载为 $50 \sim 100\text{ kN}$, 荷载板直径 30 cm , 设置 9 个弯沉传感器, 在距荷载中心位置 2.5 m 范围内根据实际情况进行位置调节. 其中 FWD 上配备有红外温度传感器, 可以测量并记录气温与路表温度.

表 1 路面结构形式汇总
Tab.1 Pavements structures

| | 面层 | 基层 | 底基层 | 路基 |
|-----------------|-------|-------|-------|----------|
| 厚度/ cm | 12~18 | 30~45 | 15~25 | ∞ |
| 泊松比 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.4 |

目前国内外存在多种模量反算方法, 如迭代法、数据库搜索法、同伦法等, 且每种算法均开发了相应程序软件. 其中包括美国华盛顿州的 Evercalc、美国德克萨斯州的 Modulus、我国长沙理工大学的 Hmdef 等. Modulus 以软件数据库为依托, 搜索满足弯沉盆拟和精度要求的模量组合, 由于该程序规定了较为严格的模量取值范围和数据库搜索方法, 因此该方法所得模量反演值收敛性较好. 其计算流程如图 1 所示. 图 1, RMSE 表示均方根误差 (Root-mean-square error), $W_{\text{计算}}$ 表示 Modulus 软件利用输入的传感器测试位置, 结构层厚度与层泊松比等参数计算得到的弯沉值. $D_{\text{实测}}$ 表示利用 FWD 现场实测的弯沉盆信息. 本文即采用 Modulus 软件对 FWD 测得的弯沉盆信息进行反分析, 计算各路面沥青层模量.

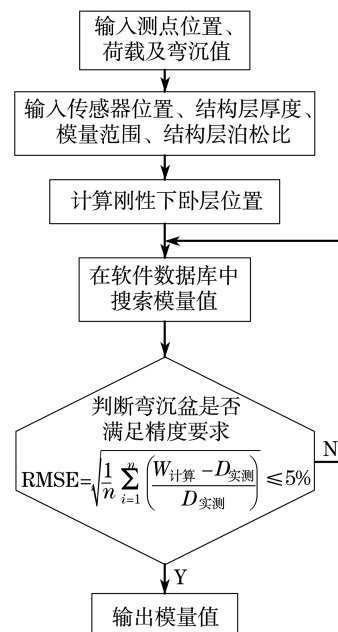


图 1 Modulus 反算求解过程

Fig.1 Procedure of backcalculation of Modulus

2 沥青层模量修正系数

2.1 沥青层反算模量与温度

据前述沥青层模量与温度算法,得到不同温度条件下沥青层反算模量平均值,为保证回归方程的精度与可靠性,对异常数据按照“格拉布斯方法”进行取舍,将沥青层反算模量与沥青层温度绘于图 2.

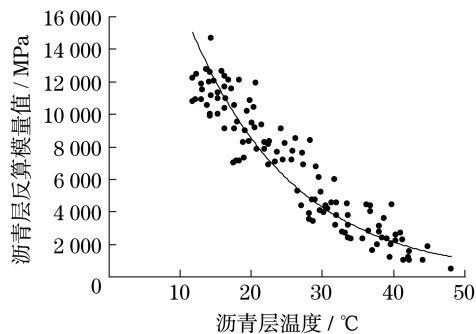


图 2 沥青层反算模量与沥青层温度关系图

Fig.2 Relationship between back-calculated modulus and temperature

可以看到,沥青层反算模量 E 与沥青层温度 T 呈现出显著的指数关系,此关系式形式与国内外研究结论相符^[5-6,8].通过回归得到其指数关系式如下:

$$E = 33\,787e^{-0.068\,9T}, n = 114, R^2 = 0.856\,3 \quad (3)$$

进行 FWD 测试时间为四至十月份,沥青层温度多处于 10~50 °C 之间,故本关系式温度约束条件为 10~50 °C.由于测试路段为干线公路,难以中断交通,在测试过程中存在社会车辆的干扰,故可能对弯沉测试结果及模量反算结果产生影响,导致回归关系式复相关系数不是非常高.但本文测试样本容量为 114 个,复相关系数为 0.8563 已经完全满足相关系数临界值要求,即回归模型具有较高的拟合准确性.另一方面,测试路段路面结构形式不同,使用年限不同,结构承载能力不同,使得本回归模型具有较强的代表性.

2.2 温度修正系数

本文定义沥青层模量温度修正系数 K 为任意温度条件下沥青层反算模量与标准条件下反算模量的比值,则沥青层模量温度修正系数计算方法如下:

$$K = E_{\text{pav}} / E_{\text{ref}} \quad (4)$$

式中: E_{pav} 为沥青层反算模量值,MPa; E_{ref} 为参考温度模量值,MPa.

本文设定标准温度为 20 °C,根据沥青层模量温

度修正系数定义,将式(3)代入式(4)进行求解,可以得到沥青层模量在标准温度条件下(20 °C)修正系数推荐值,如图 3 所示.同时,图中汇出了 LTPP-SMP 计划开发的 DataPave 2.0 数据库中三条不同编号的路段的模量修正系数进行对比.为与本文的温度约束条件相协调,剔除了数据库中低于 10 °C 与高于 50 °C 的沥青层反算模量值.

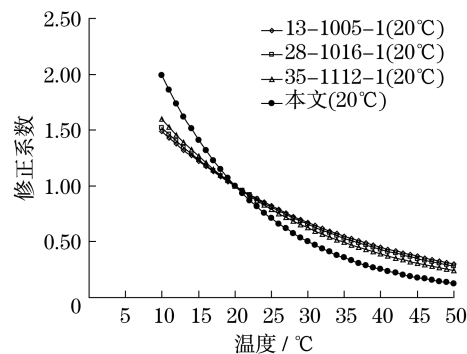


图 3 温度修正系数图

Fig.3 Chart of temperature adjustment factor

可以看出,DataPave 数据库中的温度修正系数形式与本文修正系数形式总体呈现出高度相似性,说明本文推荐的温度修正系数具有较高的比对性.修正系数值在高低温区域均有所区别,主要是由于沥青层材料性质与路面结构形式不同所造成,如沥青混合料种类,基层类型与厚度等.

3 修正系数的可靠性验证

3.1 与现有研究成果对比

文献[13]将国内多家单位对不同温度下沥青混合料抗压回弹模量 E_T 测试结果进行汇总,认为沥青混合料抗压回弹模量受温度影响关系式为

$$E_T / E_{20} = 2.980 - 0.099T \quad (5)$$

式中: E_{20} 为标准温度 20 °C 下抗压回弹模量.

文献[13]建议测得 E_{20} ,即可利用该关系式推算出 -10~30 °C 范围内的相应模量值.由于当 T 为 30 °C 时,其修正系数值为 0.01,显然与实际情况不符,故该模型只适用于低温条件.该文献为我国沥青路面设计规范中参数推荐值提供了大量翔实可靠数据,故本文将温度修正系数与式(5)计算值进行对比,结果见表 2.

可以看到,当温度低于 20 °C 时,本文推荐的温度修正系数与式(5)修正值差值极小,最大相对误差绝对值仅为 5.64%,可见本文与式(5)结果相关性极

高. 可以利用式(5)的低温区域修正系数值对本文温度修正系数推荐值进行外延, 以弥补本文低温域试验数据不足的缺点.

表 2 温度修正系数对比
Tab.2 Comparison of temperature adjustment factor

| 温度/℃ | 修正系数 | | 相对误差 绝对值/% | | 温度/℃ | 修正系数 | | 相对误差 绝对值/% |
|------|--------|-------|---------------|--|------|--------|-------|---------------|
| | 式(5)方法 | 本文方法 | | | | 式(5)方法 | 本文方法 | |
| 10 | 1.990 | 1.992 | 0.087 | | 18 | 1.198 | 1.148 | 4.195 |
| 11 | 1.891 | 1.859 | 1.686 | | 19 | 1.099 | 1.071 | 2.518 |
| 12 | 1.792 | 1.735 | 3.162 | | 20 | 1.000 | 1.000 | 0.000 |
| 13 | 1.693 | 1.620 | 4.324 | | 21 | 0.901 | 0.933 | 3.598 |
| 14 | 1.594 | 1.512 | 5.147 | | 22 | 0.802 | 0.871 | 8.638 |
| 15 | 1.495 | 1.411 | 5.600 | | 23 | 0.703 | 0.813 | 15.685 |
| 16 | 1.396 | 1.317 | 5.636 | | 24 | 0.604 | 0.759 | 25.682 |
| 17 | 1.297 | 1.230 | 5.196 | | 25 | 0.505 | 0.709 | 40.312 |

3.2 实测结果验证

本文利用上海市外环线整修工程作为试验路, 在其路面结构整修完毕尚未通车之际, 对试验路段进行 FWD 测试, 测试完毕后在测试位置进行钻取芯

样. 将芯样进行 20 ℃ 室内动态回弹模量试验, 沥青层反算模量的温度修正结果与室内动态回弹模量测试结果见表 3, 统计分析结果见表 4.

表 3 沥青层反算模量与室内动态模量测试结果汇总
Tab.3 Results of back-calculated modulus and dynamic modulus

| 试件 编号 | 室外结果 | | | 室内结果 /MPa | | 试件 编号 | 室外结果 | | | 室内结果 /MPa |
|----------|--------------|----------|--------------|--------------|--|----------|--------------|----------|--------------|--------------|
| | 反算结果/ MPa | 修正 系数 | 修正结果/ MPa | | | | 反算结果/ MPa | 修正 系数 | 修正结果/ MPa | |
| 1 | 7 226 | 0.813 3 | 8 885 | 7 942 | | 6 | 5 009 | 0.708 6 | 7 069 | 6 921 |
| 2 | 6 745 | 0.802 6 | 8 404 | 8 315 | | 7 | 5 667 | 0.670 8 | 8 448 | 5 448 |
| 3 | 6 624 | 0.791 2 | 8 373 | 9 403 | | 8 | 4 279 | 0.661 4 | 6 469 | 7 268 |
| 4 | 5 818 | 0.759 1 | 7 664 | 6 791 | | 9 | 4 187 | 0.637 3 | 6 571 | 7 461 |
| 5 | 5 126 | 0.745 5 | 6 876 | 7 193 | | 10 | 4 622 | 0.617 4 | 7 486 | 5 847 |

表 4 数据分析统计结果
Tab.4 Results of statistical data analysis

| 结果 类型 | 样本 均值/MPa | 样本标 准差/MPa | 变异 系数 | 95%置信区间 | |
|----------|--------------|---------------|----------|---------------|---------------|
| | | | | 代表值上 限/MPa | 代表值下 限/MPa |
| 修正结果 | 7 258.9 | 1 146.51 | 0.16 | 8 079.06 | 6 438.74 |
| 室内结果 | 7 624.5 | 867.28 | 0.11 | 8 244.91 | 7 004.09 |

由表 3 及表 4 可见, 室内动态模量测试结果与修正结果的样本均值相差不大, 修正结果的变异系数稍大于室内结果, 主要是由于室内外试验力学模型与受力状态不同而造成. 由于在同一天不同时间段进行 FWD 测试, 沥青层温度变化幅度不大, 故温度修正系数范围较小. 通过将反算模量修正结果与室内动态模量测试结果相比较, 可以认为, 本文推荐

的沥青层模量修正系数具有较强的可靠性.

故上海地区在进行道路结构性能评价时, 只需将 FWD 测试反算模量值除以本文推荐的沥青层反算模量温度修正系数, 即可得到标准条件(20 ℃)下沥青层模量值, 可利用该模量修正值进行道路结构承载能力验算.

4 结论

(1) 沥青层反算模量与沥青层温度间存在较好的指数关系形式, 据此建立了上海地区道路结构沥青层反算模量与沥青层温度回归模型, 推荐了沥青层反算模量温度修正系数值.

(2) 与 DataPave 2.0 数据库数据相比较, 不同类型路面结构的反算模量温度修正系数形式相似,

修正系数值的不同主要是由于路面结构类型或材料性质差异所造成.

(3) 与文献中温度修正系数相比,在 10~20 ℃ 低温区域时,本文推荐值与文献推荐值具有极高相似度,故可利用文献数据对本文推荐的修正系数在低于 10 ℃ 条件下进行外延.

(4) 沥青层反算模量的温度修正结果与室内标准条件下(20 ℃)动态模量测试结果相差较小,表明本文推荐的温度修正系数具有较高的可靠性.

(5) 在进行道路结构性能评价时,只需将测试所得模量值除以本文推荐的沥青层反算模量温度修正系数,即可得到标准条件(20 ℃)下沥青层模量值,可利用该模量修正值进行道路结构承载能力验算.

(6) 本文对上海地区干线公路的沥青层反算模量与沥青层温度间关系进行了研究,但由于沥青层温度场对受到日最高温度持续时间的影响,由上述因素引起的温度场差别可能会导致模量反算结果产生差异,本文下一步的工作将对此方面内容进行深入研究.

参考文献:

- [1] 张小宁,孙立军. 沥青路面面层和基层结构模量的反算[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(10):1386.
ZHANG Xiaoning, SUN Lijun. Backcalculating moduli of surface and base course for asphalt pavement[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1386.
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG E60—2008 公路路基路面现场检测规程[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
Ministry of Transport of People's Republic of China. JTG E60—2008 Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [3] Park S W, Kim Y R. Temperature correction of backcalculated moduli and deflections using linear viscoelasticity and time-temperature superposition [J]. Transportation Research Record, 1997, 1570: 108.
- [4] Chen Darhao, Bilyeu John, Lin Huangsiung, et al. Temperature correction on falling weight deflectometer measurements[J]. Transportation Research Record, 2000, 1716: 30.
- [5] Baltzer S, Jansen J M. Temperature correction of asphalt - moduli for FWD measurements[C] // Proceedings of the 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. Minneapolis: ICBRA, 1994: 753 - 768.
- [6] Marshall C, Roger M, Welch M. Seasonal temperature effects on flexible pavements in Tennessee[J]. Transportation Research Record, 2001, 1764: 89.
- [7] 查旭东. 沥青路面反算模量的温度修正[J]. 公路, 2002 (6): 51.
ZHA Xudong. Temperature adjustment for back calculation moduli of asphalt pavement[J]. Highway, 2002(6): 51.
- [8] 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, 2007, 27(6): 43.
KANG Haigui, ZHENG Yuanxun, CAI Yingchun, et al. Temperature adjustment for deflection and back calculation moduli of asphalt pavement based on FWD[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(6): 43.
- [9] 贾璐. 沥青路面温度场预估方法及其应用[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
JIA Lu. The temperature prediction methods for asphalt pavement and its applications[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2008.
- [10] Lukanen E O, Stubstad R, Briggs R C. Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement [R]. McLean: Federal Highway Administration, Research and Development Turner - Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike, 2000.
- [11] 邱欣. 基于 FWD 的半刚性基层沥青路面模量参数反演及校正方法研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2009.
QIU Xin. Study on modulus parameter backcalculation and correction method for CTB asphalt pavement based on FWD testing technology[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2009.
- [12] 上海市公路管理处. 上海市干线公路性能状况分析与技术对策研究[R]. 上海: 上海市公路管理处, 2009.
Shanghai Highway Administration Department. Analysis on performance conditions of arterial highway in Shanghai and research on technological countermeasures [R]. Shanghai: Shanghai Highway Administration Department, 2009.
- [13] 许志鸿, 杨孟余. 路面材料设计参数研究报告[R]. 上海: 同济大学道路与交通工程研究所, 1994.
XU Zhihong, YANG Mengyu. Study report of pavement materials design parameters[R]. Shanghai: Tongji University. College of Road and Traffic Engineering, 1994.