

路面结构层厚度误差对模量反算结果的影响

钟燕辉,王复明,蔡迎春,乐金朝,刘文廷

(郑州工业大学水利与环境工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要 :研究了路面结构层厚度误差对模量反算结果的影响.结果表明,路面结构层厚度误差对模量反算结果具有较大的影响.各层厚度误差对底基层模量反算结果影响较大,而对土基模量反算结果影响甚微.当各结构层厚度误差控制在 $\pm 5\%$ 以内时,可以使反算的各结构层模量误差不超过 $\pm 15\%$.

关键词 :落锤式弯沉仪 ;系统识别 ;模量反算 ;厚度误差

中图分类号 :U 416 文献标识码 :A

0 引言

利用落锤式弯沉仪(FWD)测试的路表弯沉盆来评价路面结构性能的研究在国际上已开展了二十多年,其中路面结构层模量反算是评价路面结构性能的关键性环节.在模量反算中,路面结构层厚度一般作为已知数据输入,其值取为设计厚度或根据有限的钻孔取芯结果确定.实际上,路面结构层厚度不可避免地存在变异性,设计厚度与实际厚度之间存在一定的误差,这种误差必然会对模量反算结果产生一定的影响.本文基于 FWD 检测试验,采用系统识别分析方法分别考察了单层厚度误差和各结构层都有误差时对模量反算结果的影响.本文的研究结果对于进一步开展路面结构无损检测技术的研究与开发具有重要的参考价值.

1 路面结构模型

本文采用的路面结构模型为图 1 所示的 4 层路面结构体系.其中,面层厚度为 150 mm,模量为

3000 MPa,泊松比为 0.35;基层厚度 200 mm,模量 4500 MPa,泊松比为 0.25;底基层厚度 300 mm,模量 500 MPa,泊松比为 0.30;土基设为无限深,模量 150 MPa,泊松比为 0.40.

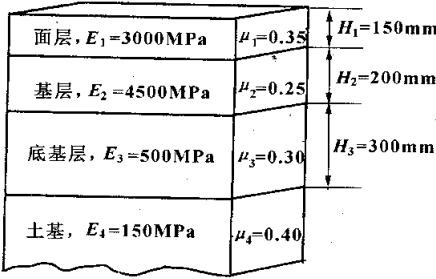


图 1 路面结构模型

设定 FWD 荷载 50 kN,加载板半径 150 mm,相应压强为 693 kPa.大部分 FWD 一般都有 6~9 个弯沉传感器,考虑到我国所用 FWD 一般都为 9 个弯沉传感器,参考美国战略性公路研究计划(SHRP)的传感器排列方式,传感器按表 1 方式排列.利用路面多层弹性体程序 BISAR 计算出理论弯沉盆,一并列于表 1.

表 1 FWD 设备采用的弯沉传感器布置方式

| 弯沉传感器编号 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 距荷载中心距离/mm | 0 | 200 | 305 | 450 | 610 | 914 | 1219 | 1524 | 1829 |
| 弯沉/ μm | 188.0 | 151.1 | 138.4 | 125.7 | 113.0 | 92.2 | 75.6 | 62.5 | 52.3 |

2 模量反算方法

系统识别原理是根据系统的输入和输出来确

定系统的特征.文献 [1]曾较早地将该方法用于反算路面结构层的模量,其基本原理如图 2 所示.

模量反算的关键在于如何保证反算过程的稳

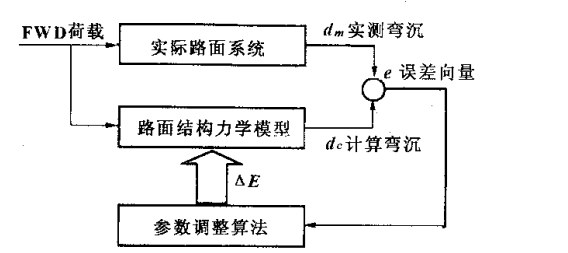


图 2 系统识别基本原理

定性. 现有迭代法研究成果大部分对初始模量值的选取要求非常苛刻. 初始值选取不当将使计算过程不收敛, 或者对不同的初始值有不同的收敛结果, 其根本原因在于未能有效地处理控制方程的“病态”问题^[2]. 采用奇异值分解方法能够有效地处理灵敏度矩阵的病态特性, 不仅计算稳定、收敛快, 精度高, 而且在相当大的范围内反演结果基本不受初始模量值的影响^[3]. 本文基于系统识别原理和灵敏度分析理论, 采用奇异值分解方法研究了路面结构层厚度误差对模量反算结果的影响.

在计算过程中, 弯沉拟和精度以相对误差绝对值的均值(ABS)表示:

$$ABS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right| \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: ABS——相对误差绝对值的均值, %;
n——弯沉传刚器数;
 d_{ci} ——第 i 点计算弯沉 ($i = 1, 2, \dots, n$);
 d_{mi} ——第 i 点实测弯沉 ($i = 1, 2, \dots, n$).
一般要求 ABS 误差要限定在 1% ~ 2% 以下.

模量反算的精度, 单层以相对误差表示, 总体以均方差 RMS 表示:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{E_{ci} - E_{mi}}{E_{mi}} \right| \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: RMS——模量均方差, %;
n——路面结构层数;

E_{ci} ——第 i 层反算模量 ($i = 1, 2, \dots, n$);
 E_{mi} ——第 i 层实际模量 ($i = 1, 2, \dots, n$).

3 数值结果分析

为了考察结构层厚度误差对模量反算结果的影响, 本文分别对以下两种情况进行了计算分析.

第一种情况是考察单层结构层厚度误差对模量反算结果的影响. 分别让面层、基层、底基层厚度单独产生 -20% ~ +20% 的误差, 而其他结构层厚度取准确值, 采用上述方法分别反算结构层模量, 其反算结果列于表 2. 从反算结果可以看出:

(1) 基层厚度误差对模量反算结果的影响最大. 当基层厚度误差范围为 ±20% 时, 面层、基层、底基层和土基的反算模量误差范围分别为 -3.5% ~ 5.1%, -18.8% ~ 28.4%, -34.6% ~ 48.4% 和 -0.1% ~ 0.5%, 反算的结构层模量均方误差 RMS 最大为 28.1%.

(2) 各结构层厚度误差对底基层模量反算结果影响较大, 对土基模量反算结果影响甚微. 以面层厚度误差影响为例: 当面层厚度误差范围为 ±20% 时, 面层、基层和底基层的反算模量误差范围分别为 -8.8% ~ 6.0%, -12.2% ~ 10.2%, -29.5% ~ 40.6% 和 -0.1% ~ 0.4%.

第二种情况是考察面层、基层和底基层厚度都有随机误差时对模量反算结果的影响. 把结构层厚度的随机误差分别限定在 ±5%, ±10%, ±20% 以内, 在每种随机误差限下分别产生 10 组随机结构层厚度, 保持弯沉盆不变, 其反算结果分别列于表 3、表 4 和表 5. 由此可以看出: 当各结构层厚度误差限定在 ±20% 内时, 面层、基层、底基层和土基的反算模量误差范围分别为 -1.5% ~ 7.1%, -21.2% ~ 11.8%, -34.0% ~ 69.5% 和 -0.3% ~ 0.6%. 如果各层厚度误差限控制在 ±5% 以内, 反算的各层模量误差基本都可控制在 ±15% 以内.

表 2 路面结构单层厚度误差对模量反算结果的影响

| 结构层 | 层厚 误差/% | SIDMOD 反算模量/MPa | | | | | | | | 弯沉 ABS/% | 模量 RMS/% |
|-----|------------|-----------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|-------------|
| | | 面层 | 误差/% | 基层 | 误差/% | 底基层 | 误差/% | 土基 | 误差/% | | |
| 面层 | -20 | 2736.0 | -8.8 | 4960.8 | 10.2 | 703.0 | 40.6 | 149.8 | -0.1 | 0.08 | 21.4 |
| 面层 | -10 | 2886.8 | -3.8 | 4737.1 | 5.3 | 594.5 | 18.9 | 149.8 | -0.1 | 0.04 | 10.0 |
| 面层 | -5 | 2950.5 | -1.7 | 4616.9 | 2.6 | 545.5 | 9.1 | 149.9 | -0.1 | 0.03 | 4.8 |
| 面层 | 5 | 3058.0 | 1.9 | 4361.6 | -3.1 | 458.3 | -8.3 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 4.5 |
| 面层 | 10 | 3102.6 | 3.4 | 4230.0 | -6.0 | 419.6 | -16.1 | 150.2 | 0.1 | 0.03 | 8.8 |
| 面层 | 20 | 3179.2 | 6.0 | 3949.7 | -12.2 | 352.7 | -29.5 | 150.6 | 0.4 | 0.06 | 16.2 |

续表

| 结构层 | 层厚 误差/% | SIDMOD 反算模量/MPa | | | | | | | | 弯沉 ABS/% | 模量 RMS/% |
|-----|------------|-----------------|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|-------------|
| | | 面层 | 误差/% | 基层 | 误差/% | 底基层 | 误差/% | 土基 | 误差/% | | |
| 基层 | -20 | 2894.8 | -3.5 | 5776.4 | 28.4 | 742.1 | 48.4 | 149.9 | -0.1 | 0.05 | 28.1 |
| 基层 | -10 | 2946.8 | -1.8 | 5056.6 | 12.4 | 611.4 | 22.3 | 149.9 | -0.1 | 0.03 | 12.8 |
| 基层 | -5 | 2976.0 | -0.8 | 4758.0 | 5.7 | 553.6 | 10.7 | 149.9 | -0.1 | 0.03 | 6.1 |
| 基层 | 5 | 3040.6 | 1.4 | 4251.6 | -5.5 | 451.0 | -9.8 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 5.7 |
| 基层 | 10 | 3075.3 | 2.5 | 4036.4 | -10.3 | 405.7 | -18.9 | 150.2 | 0.1 | 0.03 | 10.8 |
| 基层 | 20 | 3151.8 | 5.1 | 3654.3 | -18.8 | 326.9 | -34.6 | 150.7 | 0.5 | 0.06 | 19.9 |
| 底基层 | -20 | 3107.5 | 3.6 | 3986.8 | -11.4 | 677.3 | 35.5 | 150.7 | 0.5 | 0.06 | 18.7 |
| 底基层 | -10 | 3052.8 | 1.8 | 4251.7 | -5.5 | 572.8 | 14.6 | 150.3 | 0.2 | 0.03 | 7.8 |
| 底基层 | -5 | 3029.1 | 1.0 | 4373.3 | -2.8 | 533.5 | 6.7 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 3.7 |
| 底基层 | 5 | 2987.2 | -0.4 | 4603.5 | 2.3 | 471.9 | -5.6 | 149.8 | -0.1 | 0.03 | 3.0 |
| 底基层 | 10 | 2971.0 | -1.0 | 4698.5 | 4.4 | 448.1 | -10.4 | 149.6 | -0.3 | 0.04 | 5.7 |
| 底基层 | 20 | 2940.2 | -2.0 | 4884.4 | 8.5 | 409.3 | -18.1 | 149.3 | -0.5 | 0.07 | 10.1 |

表 3 路面结构层厚度随机误差对模量反算结果的影响(误差限为 ± 5%)

| 编号 | SIDMOD 反算模量/MPa | | | | | | | | 弯沉 ABS/% | 模量 RMS/% |
|-----|-----------------|------|--------|------|-------|------|-------|------|-------------|-------------|
| | 面层 | 误差/% | 基层 | 误差/% | 底基层 | 误差/% | 土基 | 误差/% | | |
| 1 | 3009.3 | 0.3 | 4393.3 | -2.4 | 520.7 | 4.1 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 2.4 |
| 2 | 3035.5 | 1.2 | 4465.8 | -0.8 | 466.2 | -6.8 | 150.0 | 0.0 | 0.02 | 3.5 |
| 3 | 3036.7 | 1.2 | 4411.8 | -2.0 | 509.1 | 1.8 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 1.5 |
| 4 | 2971.0 | -1.0 | 4518.1 | 0.4 | 550.1 | 10.0 | 150.0 | 0.0 | 0.02 | 5.0 |
| 5 | 2984.9 | -0.5 | 4418.6 | -1.8 | 556.9 | 11.4 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 5.8 |
| 6 | 2921.4 | -2.6 | 4885.9 | 8.6 | 570.8 | 14.2 | 149.8 | -0.1 | 0.04 | 8.4 |
| 7 | 2979.8 | -0.7 | 4573.2 | 1.6 | 511.0 | 2.2 | 149.9 | -0.1 | 0.03 | 1.4 |
| 8 | 2994.0 | -0.2 | 4569.2 | 1.5 | 486.0 | -2.8 | 149.9 | -0.1 | 0.03 | 1.6 |
| 9 | 3023.6 | 0.8 | 4482.2 | -0.4 | 497.7 | -0.5 | 150.0 | 0.0 | 0.02 | 0.5 |
| 10 | 3014.7 | 0.5 | 4394.0 | -2.4 | 454.4 | -9.1 | 149.9 | -0.1 | 0.02 | 4.7 |
| 均值 | 2997.1 | -0.1 | 4511.2 | 0.2 | 512.3 | 2.5 | 150.0 | 0.0 | 0.02 | 3.5 |
| 最大值 | 3036.7 | 1.2 | 4885.9 | 8.6 | 570.8 | 14.2 | 150.1 | 0.1 | 0.04 | 8.4 |
| 最小值 | 2921.4 | -2.6 | 4393.3 | -2.4 | 454.4 | -9.1 | 149.8 | -0.1 | 0.02 | 0.5 |
| 均方差 | 35.1 | 1.2 | 147.8 | 3.3 | 38.4 | 7.7 | 0.1 | 0.1 | 0.01 | 2.5 |

表 4 路面结构层厚度随机误差对模量反算结果的影响(误差限为 ± 10%)

| 编号 | SIDMOD 反算模量/MPa | | | | | | | | 弯沉 ABS/% | 模量 RMS/% |
|-----|-----------------|------|--------|------|-------|-------|-------|------|-------------|-------------|
| | 面层 | 误差/% | 基层 | 误差/% | 底基层 | 误差/% | 土基 | 误差/% | | |
| 1 | 3051.2 | 1.7 | 4575.5 | 1.7 | 551.5 | 10.3 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 5.3 |
| 2 | 2980.7 | -0.6 | 4784.0 | 6.3 | 539.5 | 7.9 | 149.9 | -0.1 | 0.03 | 5.1 |
| 3 | 2958.9 | -1.4 | 4637.7 | 3.1 | 649.5 | 29.9 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 15.0 |
| 4 | 2892.7 | -3.6 | 4727.9 | 5.1 | 478.9 | -4.2 | 149.5 | -0.3 | 0.06 | 3.8 |
| 5 | 3065.3 | 2.2 | 4206.3 | -6.5 | 410.4 | -17.9 | 150.1 | 0.1 | 0.03 | 9.6 |
| 6 | 3066.8 | 2.2 | 4176.9 | -7.2 | 376.6 | -24.7 | 150.1 | 0.1 | 0.03 | 12.9 |
| 7 | 2940.0 | -2.0 | 5135.6 | 14.1 | 581.6 | 16.3 | 149.8 | -0.1 | 0.04 | 10.8 |
| 8 | 3085.8 | 2.9 | 4332.2 | -3.7 | 482.7 | -3.5 | 150.2 | 0.1 | 0.03 | 2.9 |
| 9 | 2984.5 | -0.5 | 4462.2 | -0.8 | 573.9 | 14.8 | 150.1 | 0.1 | 0.02 | 7.4 |
| 10 | 3076.3 | 2.5 | 4186.8 | -7.0 | 517.9 | 3.6 | 150.3 | 0.2 | 0.03 | 4.1 |
| 均值 | 3010.2 | 0.3 | 4522.5 | 0.5 | 516.3 | 3.3 | 150.0 | 0.0 | 0.03 | 7.7 |
| 最大值 | 3085.8 | 2.9 | 5135.6 | 14.1 | 649.5 | 29.9 | 150.3 | 0.2 | 0.06 | 15.0 |
| 最小值 | 2892.7 | -3.6 | 4176.9 | -7.2 | 376.6 | -24.7 | 149.5 | -0.3 | 0.02 | 2.9 |
| 均方差 | 16.4 | 2.2 | 311.7 | 6.9 | 81.9 | 16.4 | 0.2 | 0.2 | 0.01 | 4.2 |

表 5 路面结构层厚度随机误差对模量反算结果的影响(误差限为 $\pm 20\%$)

| 编号 | SIDMOD 反算模量/MPa | | | | | | | | 弯沉 ABS/% | 模量 RMS/% |
|-----|-----------------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|----------|----------|
| | 面层 | 误差/% | 基层 | 误差/% | 底基层 | 误差/% | 土基 | 误差/% | | |
| 1 | 3039.6 | 1.3 | 4234.2 | - 5.9 | 412.4 | - 17.5 | 150.0 | 0.0 | 0.02 | 9.3 |
| 2 | 3164.2 | 5.5 | 3866.2 | - 14.1 | 330.1 | - 34.0 | 150.6 | 0.4 | 0.05 | 18.6 |
| 3 | 2975.3 | - 0.8 | 4575.3 | 1.7 | 386.6 | - 22.7 | 149.5 | - 0.3 | 0.05 | 11.4 |
| 4 | 3211.7 | 7.1 | 3544.0 | - 21.2 | 380.1 | - 24.0 | 150.9 | 0.6 | 0.09 | 16.4 |
| 5 | 3085.4 | 2.8 | 4143.7 | - 7.9 | 446.0 | - 10.8 | 150.2 | 0.1 | 0.03 | 6.8 |
| 6 | 2956.4 | - 1.5 | 5031.4 | 11.8 | 847.4 | 69.5 | 150.4 | 0.3 | 0.02 | 35.2 |
| 7 | 2994.9 | - 0.2 | 4129.2 | - 8.2 | 358.1 | - 28.4 | 149.9 | - 0.1 | 0.03 | 14.8 |
| 8 | 3197.2 | 6.6 | 3645.5 | - 19.0 | 377.0 | - 24.6 | 150.8 | 0.5 | 0.08 | 15.9 |
| 9 | 3117.5 | 3.9 | 4115.5 | - 8.5 | 434.3 | - 13.1 | 150.3 | 0.2 | 0.04 | 8.1 |
| 10 | 3076.0 | 2.5 | 3931.7 | - 12.6 | 337.8 | - 32.4 | 150.2 | 0.1 | 0.03 | 17.5 |
| 均值 | 3081.8 | 2.7 | 4121.7 | - 8.4 | 431.0 | - 13.8 | 150.3 | 0.2 | 0.04 | 15.4 |
| 最大值 | 3211.7 | 7.1 | 5031.4 | 11.8 | 847.4 | 69.5 | 150.9 | 0.6 | 0.09 | 35.2 |
| 最小值 | 2956.4 | - 1.5 | 3544.0 | - 21.2 | 330.1 | - 34.0 | 149.5 | - 0.3 | 0.02 | 6.8 |
| 均方差 | 91.1 | 3.0 | 435.7 | 9.7 | 151.2 | 30.2 | 0.4 | 0.3 | 0.02 | 8.1 |

4 结论

- (1)路面结构层厚度误差对模量反算结果具有较大的影响 ,其中 ,基层厚度误差的影响最大 .因此 ,为了能够准确地反算出路面结构层的模量 ,就需要较为准确地测量出结构层的实际厚度 ;
- (2)模量反算时 ,当输入面层厚度比实际层厚度小时 ,反算的面层和土基模量将偏小 ,基层和底基层模量将偏大 ,当面层厚度比实际层厚度大时 ,则反之 ;基层与面层的规律一样 ;当底基层厚度比实际层厚小时 ,反算的面层、底基层及土基模量将偏大 ,基层模量偏小 ,当底基层层厚比实际层厚度大时 ,则反之 ;
- (3)各层厚度误差对底基层模量反算结果影

响较大 ,对土基模量反算结果影响甚微 ;

(4)当各结构层厚度误差控制在 $\pm 5\%$ 以内时 ,可以使反算的各结构层模量误差不超过 $\pm 15\%$.

参考文献 :

[1] WANG Fu - ming ,LYTTON R L. System identification method for backcalculating pavement layer properties[J]. TRR ,1993(1384) :1 - 7.

[2] 王复明 ,刘文廷 .高等级公路无损检测与评价——工程力学反问题研究[A].杨卫 ,郑泉水 ,靳征谟 .走向 21 世纪的中国力学[C].北京 :清华大学出版社 ,1996.230 - 238.

[3] 郑州工业大学 .路面基层、底基层材料和土基动态模量的研究[R].郑州 :郑州工业大学 ,1997.

Effect of Thickness Errors of Pavement Layers on Moduli Backcalculating

ZHONG Yan - hui , WANG Fu - ming , CAI Ying - chun , YUE Jin - chao , LIU Wen - ting

(College of Hydraulic & Environmental Engineering Zhengzhou University of Technology Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract :The effect of the thickness errors of pavement layers on moduli backcalculating is discussed.The results show that the errors have great influence on moduli backcalculating.The subbase modulus is easily influenced and the subgrade modulus is basically not influenced by the thickness errors. The errors of backcalculated moduli will not exceed $\pm 15\%$ if the errors of pavement layer thickness are controlled within $\pm 5\%$.

Key words :falling weight deflectometer ; system identification ; moduli backcalculating ; thickness error