

文章编号: 0451-0712(2005)06-0092-04

中图分类号: U416.01

文献标识码: A

路面结构层模量的反算精度

孙瑞华, 谈至明

(同济大学教育部道路和交通工程重点实验室 上海市 200092)

摘 要: 给出了具有较高精度的两层路面结构模量反算回归式,在此基础上,讨论了弯沉测量误差和面层厚度偏差的传递效应。最后,定量分析了 FWD 系统的随机误差和面层厚度误差对面层和地基模量反算结果的影响。

关键词: 道路与铁道工程; 路面工程; FWD; 模量反算; 误差传递

应用 FWD(落锤式弯沉仪)的弯沉盆数据来评估路面各结构层模量,是一种高效方便的路面结构无破坏评价方法,对此的研究在国内外已经开展 20 多年了。但是,大多数的研究没有考虑 FWD 弯沉盆的测量误差和结构层厚度偏差对模量反算结果的影响,从而也无法正确地估计结构层模量反算结果的精度。

1 两层路面结构的模量反算回归式

利用多层弹性体程序计算得到 792 个两层路面

结构的 FWD 弯沉盆数据,两层路面结构参数见表 1。FWD 的落锤重 50 kN,加载半径 15 cm,弯沉传感器布设如表 2。

表 1 两层路面结构参数

结构层	厚度/m	模量/MPa	泊松比
面层	$h=0.25\sim 0.85$	$E=400\sim 2\,000$	0.25
地基	无限深	$E_0=25\sim 100$	0.35

基金项目:上海市重点学科建设项目资助

收稿日期:2005-01-25

A Study on Mechanism and Countermeasures of Deformation and Failure of Stratified Side Slops with Gently Inclined Bedding

FENG Xue-gang

(Highway and Waterway Engineering Quality Supervising Station, Department of Communications of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: Deformation and sliding failure of stratified side slops with gently inclined bedding have occurred in Guang-Nan section of No. 108 national highways during the construction period. On the basis of comprehensive analyses of structure of rock mass, hydro-geological condition and rock mass hydraulic property of slide district, and landslide shape and its kinematics character, the models of the mechanism of deformation and failure and main induced factors are mainly discussed in this paper. Consequently, stability calculation and synthesis valuation of the landslides are performed. Last, technique feasibility and economic target of landslide control measures are compared and an economic rational countermeasure is put forward.

Key words: stratified side slop with gently inclined bedding; mechanism of deformation and failure; stability valuation; countermeasure

表 2 弯沉盆各传感器测点的布置方式

弯沉传感器编号	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9
距荷重中心距离/m	0	0.20	0.30	0.45	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
弯沉值/m	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9

利用上述 792 个两层路面结构的 FWD 弯沉盆数据,得到了地基模量和面层模量反算回归公式:

$$E_0=a_1\times(w_7-w_9)/w_3+a_2\times h^{0.05}/w_9+a_3$$

(1-1)

$$\ln(E)=b_1\times\ln(w_1-w_3)+b_2\times\ln(w_6-w_7)+b_3$$

(1-2)

式(1-1)中的回归系数 a_1 、 a_2 、 a_3 和式(1-2)中的回归系数 b_1 、 b_2 、 b_3 均与面层厚度 h 有关,其中, a_1 、 a_2 、 a_3 与面层厚度 h 的关系见表3; b_1 、 b_2 、 b_3 与面层厚度 h 的关系如图1所示,它们可用式(2)的二次曲线拟合,回归系数见表4。上述回归式具有良好的精度,地基模量回归值的相对误差不超过4%,平均相对误差为1.5%;面层模量回归值的相对误差不超过3%,除面层模量和厚度均较大的个别点之外,绝大多数的相对误差小于2%。

表 3 地基模量的回归系数 a_1 、 a_2 、 a_3

h/m	a_1	a_2	a_3
0.25~0.45	62.06	8 495	-9.334
0.45~0.65	113.2	8 552	-18.32
0.65~0.85	182.5	8 113	-26.40

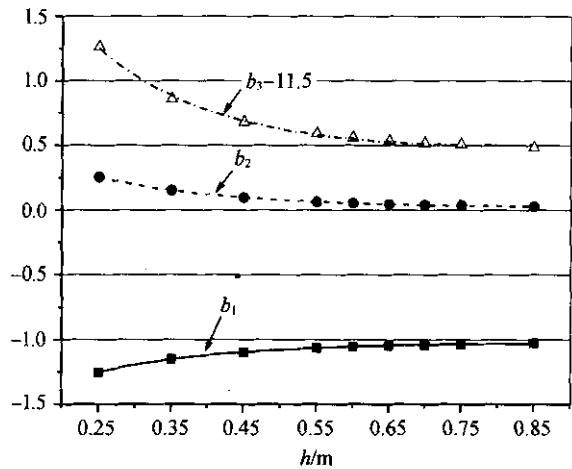


图 1 面层模量回归系数 b_1 、 b_2 、 b_3 与面层厚度 h 的关系

表 4 面层模量的回归系数 b_1 、 b_2 、 b_3

回归系数	c_1	c_2	c_3
b_1	-0.131 3	-0.019 0	-1.028 9
b_2	0.132 7	0.021 8	0.029 6
b_3	0.545 4	0.232 0	12.03

$$b_i=c_{1i}(\ln h)^2+c_{2i}\ln h+c_{3i}$$

(2)

2 反算数据的误差及误差传递

2.1 反算数据的误差

FWD 弯沉盆的测量误差是由 FWD 系统的随机误差和测试误差构成。目前,多数落锤式弯沉仪 FWD 的弯沉读数分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$,相对精度为 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}\pm 2\%$ [2]。测试误差是指测试时,由于路面的粗糙不平整,或者有粉尘砂砾、不清洁,导致个别弯沉传感器与路面接触不紧密所造成的误差,这种误差可利用 FWD 重锤预砸 1~2 锤,使其影响减小 [5]。因此,以下仅分析研究 FWD 系统随机误差对结构层模量的影响。

在路面结构模量反算时,面层厚度视作一个已知的确定量,一般取其设计厚度,或取有限的钻孔取芯试件的平均值,而不考虑面层厚度的变异性。据以往的研究,面层厚度的变异系数范围为 2%~12% [3]。

2.2 误差传递公式

为了方便起见,地基模量 E_0 和面层模量 E 的反算回归式(1-1)和式(1-2)改写为:

$$E_0=f_0(w_1,\cdots,w_9,h)$$

(3-1)

$$E=f(w_1,\cdots,w_9,h)$$

(3-2)

将式(3-1)和式(3-2)按泰勒级数展开,并略去二阶以上微量,则得到如下的相对误差传递公式:

$$\frac{\Delta E_0}{E_0}=\sum M_i\frac{\Delta w_i}{w_i}+M_h\frac{\Delta h}{h}$$

(4-1)

$$\frac{\Delta E}{E}=\sum N_i\frac{\Delta w_i}{w_i}+N_h\frac{\Delta h}{h}$$

(4-2)

式中: ΔE_0 和 ΔE 分别为地基模量和面层模量的反算偏差; Δw_i 和 Δh 分别为 w_i 和 h 的偏差; M_i 、 N_i 和 N_h 、 M_h 分别为 w_i 和 h 对地基模量 E_0 和面层模量 E 的弹性系数,表达式分别为 $M_i=\frac{\partial f_0}{\partial w_i}\frac{f_0}{w_i}$ 、 $M_h=\frac{\partial f_0}{\partial h}\frac{f_0}{h}$ 、 $N_i=\frac{\partial f}{\partial w_i}\frac{f}{w_i}$ 和 $N_h=\frac{\partial f}{\partial h}\frac{f}{h}$ 。

假设各测点随机误差和板厚均相互独立,则式(4-1)和式(4-2)可改写为:

$$C\nu(E_0)^2=\sum M_i^2C\nu(w_i)^2+M_h^2C\nu(h)^2$$

(5-1)

$$C\nu(E)^2=\sum N_i^2C\nu(w_i)^2+N_h^2C\nu(h)^2$$

(5-2)

式中: $C\nu(E_0)$ 和 $C\nu(E)$ 分别为地基模量和面层模量反算结果的变异系数; $C\nu(w_i)$ 和 $C\nu(h)$ 分别为 w_i 和 h 的变异系数,其中, $C\nu(w_i)=2\%+\frac{2\text{ }\mu\text{m}}{w_i}$ 。

3 地基模量的反算精度

在影响地基模量反算结果 E_0 的 w_3 、 w_7 、 w_9 和 h 这 4 个变量中, w_9 的误差对 E_0 精度影响最大, w_7 、 w_3 次之, h 的影响最小。就这 4 个变量对地基模量 E_0 的弹性系数 M_3 、 M_7 、 M_9 和 M_h 而言, 它们的绝对值与路面结构条件之间关系是相似的, 均随着面层厚度 h 和面层模量 E 增大而增大。在表 1 所列的不同路面结构条件下, M_9 变化在 $-1.2 \sim -6.8$ 之间(见图 2), 也就是说, 地基模量 E_0 的相对误差 $\Delta E_0/E_0$ 比 w_9 的相对误差 $\Delta w_9/w_9$ 大 1.2~6.8 倍, 其负号说明, w_9 每偏大增加 1%, E_0 则偏小增加 1.2%~6.8%, 反之亦然; M_7 的变化范围为 0.3~6.2; M_3 变化在 $-0.07 \sim -1.1$ 之间; 而 M_h 不大于 0.06, 可予忽略。

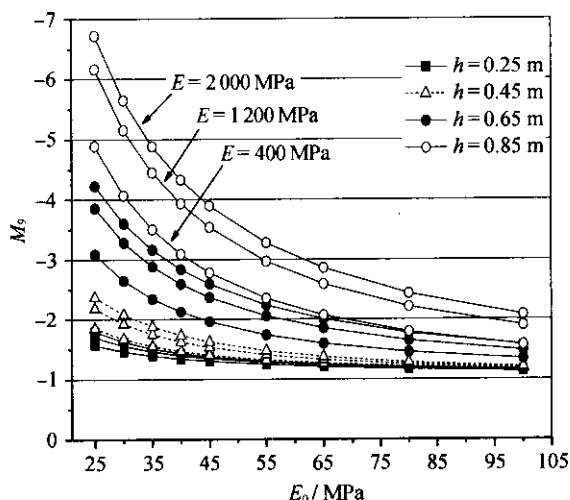


图 2 不同路面结构时的 M_9 变化规律

将 w_3 、 w_7 、 w_9 的变异系数 $C_v(w_i)$ 代入式(5-1), 则得到地基模量反算结果的变异系数, $C_v(E_0)$ 的变化规律如图 3 所示。由图 3 表明, 影响 $C_v(E_0)$ 的主要路面结构参数是面层厚度 h , 在 h 小于 0.45 m 时, 面层模量 E 和地基模量 E_0 的影响均较小, $C_v(E_0)$ 约在 5%~7% 之间; 当 h 超过 0.45 m, 面层模量 E 和地基模量 E_0 的影响显著增大, 随着 E 增大和(或) E_0 减小, $C_v(E_0)$ 迅速增大, 其最大值已超过 25%。

4 面层模量的反算精度

影响面层模量反算结果 E 的有 w_1 、 w_3 、 w_6 、 w_7 和 h 等 5 个变量。按误差的影响程度由大到小排列的次序为 w_1 、 w_3 、 h 、 w_6 和 w_7 , 其中, w_1 、 w_3 为主要影响因素, 面层模量反算结果 E 偏差的 90% 以上源于 w_1 、 w_3 的随机测量误差。在表 1 所列的不同路面结构条件下, N_1 变化范围为 $-1.7 \sim -8.7$, 其绝对值随着

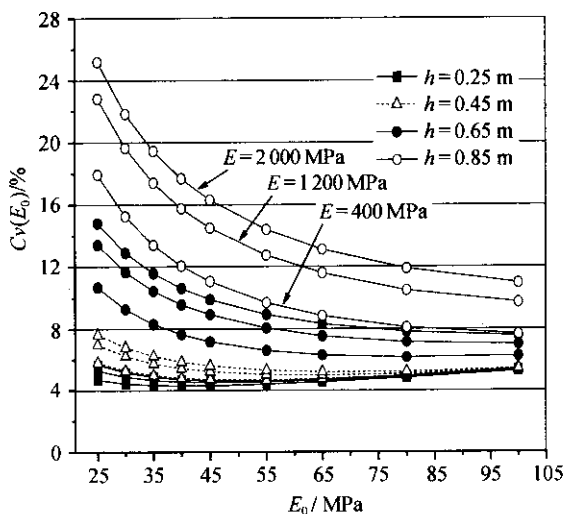


图 3 不同路面结构时的 $C_v(E_0)$ 变化规律

面层厚度 h 的减薄和面层相对刚度 E/E_0 的增加而增大(图 4); N_3 、 N_6 、 N_7 的变化规律与 N_1 相同, 其中, N_3 的变化范围为 0.7~7.4, N_6 的变化范围在 0.2~1.3 之间, N_7 的变化范围为 $-0.1 \sim -1.0$; N_h 与面层厚度 h 的关系较其他路面结构参数更为敏感, 在 $h > 0.65$ m 时, N_h 很小, $h = 0.25$ m 时, $N_h = -0.9 \sim -1.2$, 由于 $C_v(h)$ 较 $C_v(w_i)$ 大 1 倍左右, 故其影响程度排序在 w_6 、 w_7 之前。应用式(5-2)得到不同路面结构条件下的面层模量反算结果 E 的变异系数 $C_v(E)$ 如图 5 所示, 其中, 面层厚度 h 的变异系数 $C_v(h)$ 取 5%。从图 5 可以看到, 面层模量反算结果 E 的变异系数 $C_v(E)$ 随着面层厚度 h 的减薄和面层相对刚度 E/E_0 的增加而增大, 其变化区间为 4.5%~26.0%。

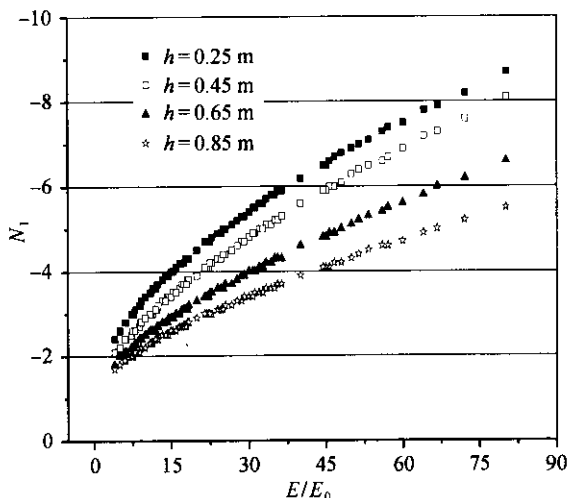


图 4 不同路面结构时的 N_1 变化规律

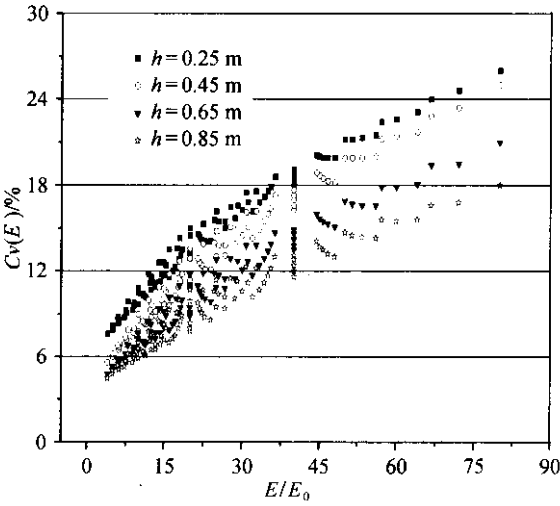


图 5 不同路面结构时的 $C_v(E)$ 变化规律

5 结语

地基模量 E_0 的随机误差主要来源于 w_7 、 w_9 的测量误差, 面层模量 E 的随机误差主要来源于 w_1 、 w_3 的测量误差。在表 1 给出的两层路面结构条件下, FWD 的 $\pm 2 \mu\text{m} \pm 2\%$ 弯沉随机误差和 5% 的面层厚度随机误差, 会造成地基模量 E_0 和面层模量 E 的反算结果带有变异系数为 5%~26% 的随机误差。其中, 对于地基模量 E_0 而言, 其变异系数 $C_v(E_0)$ 随着面层模量和厚度增大而增大; 面层模量的变异系

数 $C_v(E)$ 随着面层的减薄和面层相对刚度的增大而增大。

从上述结果中可以看到, 在利用 FWD 弯沉盆数据进行路面结构层模量反算时, FWD 系统的随机误差及面层厚度的变异性, 将传递至路面结构层模量反算结果, 其误差有扩大之势。因此, 在应用其模量反算结果时, 应充分考虑其精度范围。

参考文献:

[1] Yung-Chien Lee. Condition Assessment of Flexible Pavements Using FWD Deflections [D]. A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University for the Degree of Doctor of Philosophy, 1997.

[2] 钟伟逞. 应用冲击式挠度仪观测路面结构强度之研究 [D]. 台湾国立中央大学, 2000.

[3] 沙庆林. 高等级道路半刚性路面 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.

[4] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 层状结构顶面当量模量的近似计算 [J]. 公路, 2003, (8).

[5] 钟燕辉. 路面结构层模量及路基深度反算方法研究 [D]. 郑州工业大学, 2000.

[6] 刘萍. 误差传递公式的特殊形式及应用 [J]. 山东工程学院学报, 2001, (3).

Back-Calculated Precision of Pavement Layer Moduli

SUN Rui-hua, TAN Zhi-ming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The regression equations are well developed to back-calculated the moduli of 2-layer pavement. The transferring effects of errors of sensor deflection and layer thickness are then discussed based on regression equations. Last, it is quantitatively analyzed that the random errors of FWD system and layer thickness errors affect the back-calculated results of muduli of layers and road bed.

Key words: road and railway engineering; pavement engineering; FWD (Falling Weight Deflectometer); back-culcation of moduli; errors transfer