

文章编号:1671-6833(2002)02-0047-04

落锤式弯沉仪在道路施工质量控制中的应用

刘建华, 乐金朝, 王复明, 李 强

(郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 落锤式弯沉仪(FWD)是目前国际上最先进的路面弯沉检测设备,利用FWD检测弯沉盆数据能够反算路面结构层的模量,进而对路面状况作出评价.在分析了FWD与传统弯沉检测设备贝克曼梁相比所具有的优越性和二者的线性相关性的基础上,利用基于系统识别原理的模量反算软件SIDMOD,结合具体工程实际,探讨了通过FWD弯沉检测进行道路施工质量控制的应用技术.实践表明,在道路施工期间,FWD弯沉检测技术结合路面结构层模量反算理论能够真实地反映道路实际施工质量,识别施工质量问题或隐患的路段和结构层.

关键词: 落锤式弯沉仪; 贝克曼梁; 弯沉盆; 模量; 反算; 质量控制

中图分类号: U 415.12 **文献标识码:** A

落锤式弯沉仪(FWD)是目前国际上最先进的路面弯沉检测设备,它具有无破损、测速快、精度高等优点,并很好地模拟了行车荷载作用,检测结果为弯沉盆数据,因此在国际上的应用也日益广泛.其应用范围主要是在路面养护管理方面,而在道路施工阶段对弯沉指标的检测,仍然采用传统的设备——贝克曼梁^[1].由于路面结构是多层体系,仅仅采用贝克曼梁所检测的路面单点最大弯沉不能有效地反映路面各层的施工质量,特别是在施工验收阶段.

利用FWD检测弯沉盆数据进行路面结构层模量反算在国际上已研究和发展了20多年^[2].在道路施工阶段,利用这项技术可以获取路面各结构层的施工质量信息,从而能够有效地解决贝克曼梁所遇到的问题.本文结合河南省道路检测工程技术研究中心的具体工程实践,就FWD在道路施工质量控制中的应用开展了一些研究工作,所取得的成果可供工程质量控制时参考.

1 FWD 简介

1.1 FWD 基本原理

FWD的工作过程是这样的:通过落锤对路面施加冲击荷载,荷载时程和路面的变形(动态弯沉盆)均由相应的传感器测定,荷载大小由落锤质量和起落高度控制.Dynatest FWD通常在距荷载中

心1.8m的范围内布置7~9个速度传感器.9000信息处理系统记录荷载和路面变形的全部时程信息.整个操作过程均通过微机自动控制.

1.2 FWD 与贝克曼梁的对比

FWD作为新一代的弯沉检测设备,与传统的弯沉检测设备——贝克曼梁(Benkelman Beam)相比,其性能具有多方面的优点.二者的性能对比如表1所示.

表1 贝克曼梁与FWD的性能对比

Tab.1 Comparison between BB and FWD

贝克曼梁(BB)	FWD
静力弯沉	动态弯沉,信息更准确
单点最大弯沉	弯沉盆曲线,信息量更大
人工操作	数据自动采集,计算机自动处理,效率高,并可减小人为误差
测速慢	测速快,每个点只需不到一分钟的时间
精度0.01 mm	精度0.001 mm

从表1可以看出,FWD在弯沉检测方面有了很大的改进.由于FWD在模拟行车荷载、测速和精度方面的优越性,不少国家已制定有相应的FWD规范.我国的《公路路基路面现场测试规程》(JTJ 059-95)中已将FWD列为弯沉检测设备^[3].

虽然FWD与贝克曼梁(BB)之间有诸多区别,但一般情况下,二者的检测数据具有密切的线性相关性^[4]:

收稿日期:2001-12-02;修订日期:2002-02-15

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(19625205)

作者简介:刘建华(1978-),男,湖北省大冶市人,郑州大学硕士研究生.

$$\delta_{BB} = a \delta_{FWD} + b, \tag{1}$$

式中： δ_{BB} 、 δ_{FWD} 分别为贝克曼梁和 FWD 的检测弯沉值； a 、 b 为线性相关系数。

梁新政^[3]和宋焕宇^[9]等曾在平顶山市一条二级公路施工路段上作了对比试验。该路段的路面结构情况详见参考文献^[5, 6]。由试验得到 FWD 与贝克曼梁检测弯沉的线性关系如表 2 所示。

表 2 贝克曼梁与 FWD 的线性相关分析结果

Tab. 2 Linear relativity between BB and FWD

项目	土基	底基层	基层	面层
测试数据	20	20	20	20
统计数据	17	18	16	18
a	0.8623	0.6394	1.009	0.7595
b	87.27	51.499	29.707	12.372
相关系数	0.878	0.8367	0.817	0.876

虽然不同路段、不同材料时，二者的回归公式、相关系数可能稍有区别，但二者密切相关这一性质已被国内外学者所普遍接受。

2 路面结构层模量反算

根据 FWD 检测的弯沉盆数据来反算路面各结构层的模量是目前国内外研究的热点^[3]。河南省道路检测工程技术中心应用系统识别原理，开发了基于静力线弹性层状体系理论的路面模量反算软件 SIDMOD。

系统识别是根据系统的输入和输出来确定系统的特性。较常用的方法是建立一个数学模型来模拟未知系统，然后调整模型参数，使模型和系统在相同输入条件下二者输出之间的误差在某种意义上达到最小。文献^[7]根据系统识别原理，建立了路面结构反分析基本方法，其过程如图 1 所示。

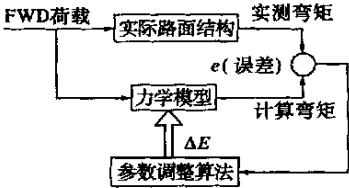


图 1 系统识别反分析过程

Fig. 1 System identification method

根据上述系统识别过程，可建立路面结构反分析方法：

- (1) 利用 FWD 检测系统，对路面进行无损检测试验，观测路面结构在已知荷载作用下的变形（弯沉盆）；
- (2) 应用路面结构力学模型，计算在相同荷载作用下路面的变形；
- (3) 建立模型修改算法，逐步调整模型参数，

使计算结果与观测结果之间的误差达到最小。

由此可知，系统识别反分析不仅要求试验数据精确，理论模型合理，而且需要具有较好的稳定性和收敛性的参数修改算法。以灵敏度分析为基础，可建立较有效的迭代方法。其控制方程为

$$[F] \{\Delta E\} = \{e\}, \tag{2}$$

式中： $\{\Delta E\}$ 、 $\{e\}$ 分别为参数调整向量和误差向量，

$$\{\Delta E\} = [\Delta E_1, \Delta E_2, \dots, \Delta E_n]^T;$$

$$\{e\} = [\Delta e_1, \Delta e_2, \dots, \Delta e_m]^T.$$

$[F]$ 表示灵敏度矩阵，为

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_1}{\partial E_1} & \frac{\partial W_1}{\partial E_2} & \dots & \frac{\partial W_1}{\partial E_n} \\ \frac{\partial W_2}{\partial E_1} & \frac{\partial W_2}{\partial E_2} & \dots & \frac{\partial W_2}{\partial E_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial W_m}{\partial E_1} & \frac{\partial W_m}{\partial E_2} & \dots & \frac{\partial W_m}{\partial E_n} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

式中： $\frac{\partial W_i}{\partial E_j}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 表示路面第 i 点的变形对第 j 个点的敏感性，其数值计算方法见文献^[7]。

3 利用 FWD 进行施工质量控制

利用 FWD 弯沉盆数据能够反算路面各结构层的模量，在道路施工过程中，通过对不同的施工层位进行弯沉检测，可以获取已施工结构层的质量信息，对施工质量进行及时的反馈，并找出存在质量问题或隐患的路段，尽早处理，从而达到控制质量的目的。下面结合具体工程实践进行说明。

例 1 P 路段底基层为 35cm 石灰土，分两次铺筑，第一次铺筑下层 20cm，第二次铺筑上层 15cm。

当时有些标段为追求施工进度，下层 20cm 石灰土的压实不够，但又担心无法通过质量验收，于是等到铺筑完上层 15cm 石灰土后加强了表层石灰土的压实。利用贝克曼梁进行检测，弯沉均能满足要求，之后再利用 FWD 进行弯沉检测，弯沉检测结果如图 2 所示。

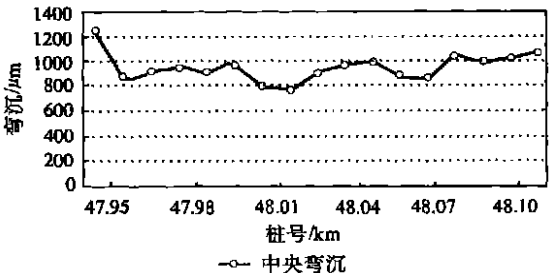


图 2 P 路段弯沉检测结果

Fig. 2 Deflection for road P

首先将石灰土层和土基作为两层进行反算得出它们的模量反算结果,如图 3 所示.

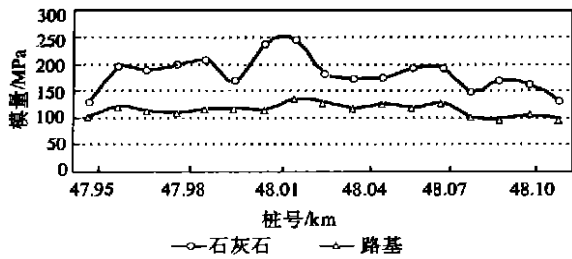


图 3 P 路段分两层模量反算结果

Fig. 3 Modulus for road P with two layers

然后将石灰土层按 15+20 分为两层,再加上土基按三层进行反算,得出三层模量反算结果,如图 4 所示.由图可以看出,下层 20cm 石灰土模量明显偏低(石灰土的模量不应低于土基的模量),说明该部分石灰土施工质量存在问题.

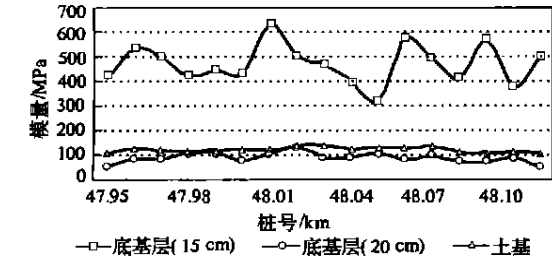


图 4 P 路段分三层模量反算结果

Fig. 4 Modulus for road P with three layers

从此例中可以看出,FWD 在反映施工质量情况方面比贝克曼梁更准确、更有效.

例 2 表 3 是 S 高速公路在施工期间利用 FWD 对基层进行弯沉检测的结果.该路段底基层为 15cm 级配碎石,基层为 37cm 或 27cm 水稳碎石.K9+608~K37+840 与 K92+620~K117+300 分别由两个施工单位进行施工.从表 3 中发现,虽然两个路段都铺筑到基层,路面结构相同,但弯沉值却相差如此悬殊,显然 A 路段可能存在质量问题.

通过反算模量得知,两个路段的土基与底基层施工质量并无太大差别,而基层却存在非常大的差别,如表 4 所示.后来对两路段分别钻芯取样,发现 B 路段取芯完好,而 A 路段芯样破碎,有些地方甚至无法取芯.

通过 FWD 弯沉检测和结构层模量反算,能够全面了解该高速公路检测路段施工质量的整体概况和施工质量可能存在问题或隐患的路段,为道路施工质量的控制提供了参考依据.

表 3 S 高速公路基层 FWD 弯沉检测统计结果(平均值)

Tab. 3 The statistic of FWD deflection (average)

路段	桩号	左车道/	右车道/
		10 ⁻³ mm	10 ⁻³ mm
A	K9+608~K37+840	188.0	186.8
B	K92+620~K117+300	96.6	102.4

表 4 S 公路路面各结构层反算模量统计结果(平均值)

Tab. 4 The statistic of modulus (average)

路段	标段桩号	车道	路面结构层模量/MPa		
			基层	底基层	土基
A	K9+608~K37+840	右	2236.0	613.6	212.3
		左	2128.4	555.4	223.4
B	K92+620~K117+300	右	6798.6	641.6	208.6
		左	7486.2	638.7	219.7

4 结束语

FWD 是目前国际上最先进的路面弯沉检测设备,它与贝克曼梁相比具有很大的优越性,同时二者又存在着良好的线性相关性.

FWD 弯沉检测可以作为一种控制道路施工质量的有效手段.在道路施工质量检查期间,利用 FWD 检测弯沉盆数据来反算结构层模量,不仅可以对道路结构层整体进行评价,而且可以获取每一结构层的信息,并找出存在质量问题的路段和具体的结构层.

此外,FWD 弯沉检测具有无破损的特点,不会破坏原有路面结构而影响道路施工进度;同时,FWD 测试速度快,可实现道路施工期间实时全线各层位跟踪检测.

参考文献:

[1] JTJ 071—98,公路工程质量检验评定标准[S].
[2] LYTTON R L,ROBERTS F L.Determination of Asphaltic Concrete Pavement Structural Properties of NDT[A]. NCHRP Report[C].Texas : Texas Transportation Institute and Texas A & M University ,1986.10—27.
[3] JTJ 059—95,公路路基路面现场测试规程[S].
[4] THOLEM O, THOMPSON M R. Comparison of Falling Weight Deflectometer with other Deflectometer Testing Devices[J].Transportation Research Record ,1986(1007):78—91.
[5] 梁新政,王复明,孔宪京.路基模量反算结果分析[J].岩土工程学报,2000,22(5):619—621.
[6] 宋焕宇,何荣裕,冯建亚.路面弯沉检测方法相关性的试验研究[J].郑州工业大学学报,2000,21(4):51

—54.

method for backcalculating pavement layer properties[J].

[7] WANG Fu —ming ,LYTTON R L .System identification

Transportation Research Report ,1993,(1384) :1—7.

Application of FWD in Quality Control of Road Construction

LIU Jian —hua , YUE Jin —chao , WANG Fu —ming , LI Qiang

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

Abstract : Falling Weight Deflectometer (FWD) is the most advanced device in testing the deflection of pavement and the deflection —basin data from FWD testing can be used to backcalculate the modulus of pavement and valuate the performance of pavement . This paper analyses the advantage of FWD comparing with Benkel man Beam which is a traditional device and the good linear relativity between the two devices . Then the paper uses SIDMOD , a modulus backcalculation soft based on System Identification Method , to discuss the technology in using FWD to control the quality of road construction with actual projects . It is shows that FWD and the backcalculation of modulus of pavement can correctly reflect the quality of road construction and identify sections or structure layer of a road .

Key words : Falling Weight Deflectometer ; Benkel man beam ; deflection —basin ; modulus ; back —calculation ; quality control

(上接第 43 页)

Numerical Computation of Crack Stress Intensity Factors in Pavement Structure

YUE Jin —chao , DING Wu —yang , XIE Li

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

Abstract : Stress intensity factor is an important criterion which can determine the developing of road crack . Based on the singular isoparametric element and fracture mechanics , this paper analyzes and discusses the problem about the singular crack in pavement structure under three types of load . At the crack tips , we get the corresponding stress intensity factors by means of regression analysis . Then this paper presents the finite strip model to verify the program . The results indicate that length of crack and the modulus of base course have a remarkable influence . Under the convex load , the crack develops more easily .

Key words : singular isoparametric element fracture mechanics stress intensity factors pavement