

文章编号:1671-6833(2010)06-0039-04

FWD与BB工作性能对比及其测试数据相关性研究

郑元勋, 蔡迎春, 张亚敏

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对目前道路检测领域落锤式弯沉仪(FWD)与贝克曼梁(BB)共存现状,对两种设备的工作性能如测试稳定性及对行车荷载的模拟能力进行了对比分析.在国内外相关研究文献的基础上,对落锤式弯沉仪(FWD)与贝克曼梁(BB)两种不同性质弯沉仪测试弯沉数据间的相关性进行了研究,并利用实测弯沉数据对两者间的转换关系进行了对比验证.结果表明:相对贝克曼梁,落锤式弯沉仪稳定性高,且能较好的模拟行车荷载;两者间测试数据存在一定的相关性,但受试验路段结构及地域条件影响较大.

关键词: 道路工程;落锤式弯沉仪(FWD);贝克曼梁(BB);工作性能;路面弯沉

中图分类号: U416.2 **文献标识码:** A

0 引言

路面弯沉是路面整体结构在荷载作用下的竖向位移量,是表征路面整体强度大小的指标,它反映了路面整体结构的抗变能力,是路面设计、施工、验收及维护的一个重要参考指标^[1].最早用来测量路面弯沉的设备是梁式弯沉仪贝克曼梁(1953年, Benkelman Beam, 以下简称 BB),但存在效率低、精度差以及不能较好的模拟行车荷载等不足^[1-2].相对梁式弯沉仪贝克曼梁,落锤式弯沉仪(FWD)作为一种新的路面弯沉检测设备因能较好的模拟行车荷载、可测量路面弯沉盆以及测量速度快、精度高等优点在道路检测领域得到了广泛的应用^[3-7].我国规范《公路路基路面现场测试规程》虽已将 FWD 列为弯沉检测设备,但尚缺乏具体的评定标准,目前其测量值只能作为道路质量评定的一个参考,或将其测试弯沉数据按相关转换关系转化为贝克曼梁测量弯沉数据后方能用于道路施工质量的评测.针对该现状,有必要对 FWD 和 BB 间工作性能的优劣,以及两者之间测量弯沉数据的相关性展开系统的研究,以便为 FWD 检测技术的应用与推广提供技术支持.笔者在国内外相关文献^[8-14]的基础上,通过现场试验研究对 FWD 与 BB 的工作性能进行对比分析,并对两者测试弯沉数据间的相关性进行了系统的研究.

1 FWD与BB测量稳定性试验

为了比较 FWD 与 BB 工作性能的稳定性,分别利用两种设备在同一路段上的相同测点进行可重复性实验,由于不同组测试结果随机误差的主要来源(如材料的不均匀性、人为因素影响等)基本相同,所以系统稳定、性能较优的测试设备多次测量结果相近,否则表明该系统稳定性较差,测试结果可靠性低.

1.1 试验设计

为验证及对比 FWD 与 BB 的系统稳定性,在同一沥青路面分别选取 3 个测点,利用 FWD 与 BB 在相同条件下(测量温度、测量人员、测量设备等)按照相关操作规程分别在每个测点进行 8 次弯沉测量实验,实验路段结构如表 1 所示.

表 1 重复性试验沥青路面结构
Tab.1 The structure of AC pavement for repeatability experiments

桩号位置/km	路面结构
K282+500~K283+230	面层 15 cm 厚沥青混凝土
	基层 33 cm 水泥稳定碎石砂
	底基层 18 cm 厚石灰土

为消除由于 FWD 的承载板、位移传感器与路表面接触不紧密或不稳定造成的偏差、保证试验数据的准确性,在进行 FWD 弯沉测量时,同一测点锤击 3 次,取后两次的平均值作为一次测量

收稿日期:2010-06-10; 修订日期:2010-08-11

作者简介:郑元勋(1978-),男,河南驻马店人,郑州大学讲师,博士,主要从事道路、桥梁检测等研究,Email: yxzhen@zzu.edu.cn.

的弯沉值^[3-6].

1.2 数据整理及分析

在试验进行中应严格按照相关操作规程,尽可能避免出现随机误差影响试验结果的准确性.试验数据整理如图1所示.

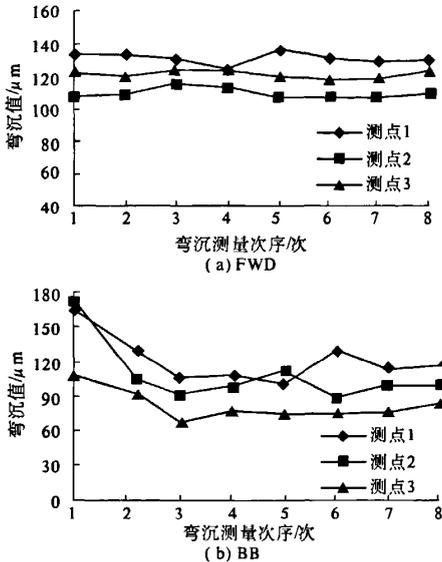


图1 FWD与BB重复性试验测试数据统计分析
Fig.1 The statistic analysis of FWD and BB repeatability experiments

如图1所示,FWD在3个测点的测量弯沉值上下浮动较小,稳定性较好;相对FWD测量弯沉值,BB在同一测点的8次测量弯沉值波动较大,这说明贝克曼梁受环境影响很大,稳定性差.综上,FWD的系统稳定性优于BB.

2 FWD与BB模拟实际行车荷载对比试验

FWD与BB相比,其技术特点除了表现在测速快、精度高及稳定性好外,且能较好地模拟实际行车荷载对路面的动力作用,能较真实地体现路面的实际力学性能.

为了研究FWD和BB模拟实际行车荷载的能力,在新修路面结构中埋置压力计、应变计及位移传感器,分别按照贝克曼梁和FWD加载方法对路面施加荷载,并测量各点的应力、应变和弯沉.然后测量实际行车作用下路面的应力和弯沉.采用不同的荷载级别重复上述实验,从而可以分析对比贝克曼梁和FWD模拟实际行车荷载的能力和效果.实验路段具体结构见表1.

从图2可以看出,FWD施加的荷载与实际行车荷载(车速40~60 km/h)产生的路面应力、弯

沉是吻合较好,而贝克曼梁方法与实际行车荷载产生的应力、弯沉存在较大差异.

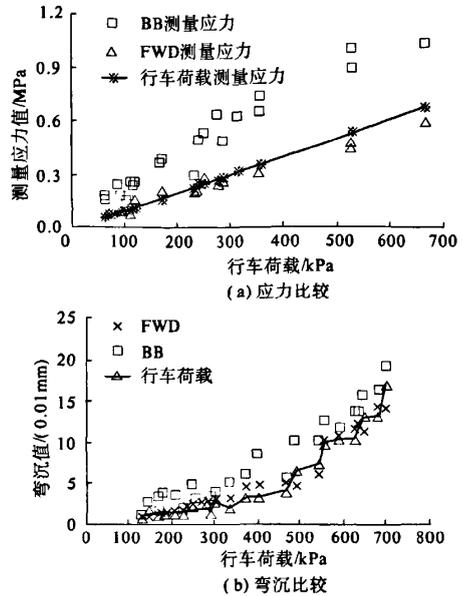


图2 行车荷载与BB、FWD作用下路面的应力及弯沉比较

Fig.2 The comparison of stress and deflection which measured under travel loading and BB, FWD

3 FWD与BB测试弯沉数据相关性研究

通过前文的研究可以发现与BB相比,FWD具有稳定性好、能模拟实际行车荷载等优越性,因此在我国道路检测等领域得到了广泛的应用,但是由于FWD在我国引进较晚,其应用尚未规范化、标准化.虽然规范^[1-2]已将FWD列为弯沉检测设备,但由于尚未建立具体的评定标准,限制其被直接用于实际工程.因此,为了将FWD弯沉数据直接用于道路质量检测等领域,国内外一些学者及科研机构希望能通过研究FWD和BB测量弯沉数据之间的关系建立其相关性,进而将其应用于实际工程.

3.1 国内外FWD与贝克曼梁(BB)测试弯沉数据分析

为了统一评价标准,国内外一些机构曾进行过几种弯沉仪的对比实验研究^[8-14].1982年Stubstad通过试验得出了下列线性回归关系,相关系数在0.7左右(单位 μm):

$$l_{\text{BB}} = 1.94 \times l_{\text{FWD}} - 69 \quad (1)$$

1990年唐伯明等^[8]通过5条试验路段的实测数据,对落锤式弯沉仪和贝克曼梁作用下的路表实测弯沉、弯沉盆进行了较系统的对比分析.结

论认为,两种测量弯沉间具有一定的差异,但存在良好的相关关系.其建立的相关公式如下(单位为 0.01 mm, R 表示相关系数).

沥青路面:

$$l_{BB} = 1.327 \times l_{FWD} - 8.65, R = 0.98 \quad (2)$$

碎石路面:

$$l_{BB} = 1.13 \times l_{FWD} - 5.06, R = 0.99 \quad (3)$$

1993 年张洪华^[9]通过多种结构的半刚性基层沥青路面的落锤式弯沉仪(FWD)与贝克曼梁(BB)定点弯沉测试,建立两种弯沉仪测量数据之间的相互关系如下(单位为 0.01 mm).

半刚性基层沥青路面:

$$l_{BB} = 1.06 \times l_{FWD} - 1.6, R = 0.91 \quad (4)$$

1995 年李锦华等^[10]在上海市区 10 条典型结构的沥青路面上,进行了落锤式弯沉仪(简称 FWD)与贝克曼梁的定点对比测试,经统计分析,建立 FWD 弯沉与贝克曼梁弯沉间的转换关系如下所示(单位为 μm).

$$l_{BB} = 1.43 \times l_{FWD} - 89.6, R = 0.96 \quad (5)$$

2003 年樊兆强等^[11]针对天津市高速公路、市内道路和二级道路 3 种类型道路的不同结构层形式,分别进行了 FWD 与贝克曼梁的弯沉对比实验,分别建立起相关关系如下(单位为 μm).

高速公路:

$$l_{BB} = 1.41 \times l_{FWD} - 10.04, R = 0.91 \quad (6)$$

市内道路:

$$l_{BB} = 1.34 \times l_{FWD} - 22.99, R = 0.92 \quad (7)$$

二级公路:

$$l_{BB} = 1.28 \times l_{FWD} + 6.47, R = 0.90 \quad (8)$$

2004 年张向阳等^[12]通过在某路基进行了 FWD 和贝克曼梁路基弯沉对比实验,研究了两者在弯沉检测结果之间的相关性,建立两者之间的相互转换公式如下(单位为 0.01 mm):

$$\text{路基: } l_{BB} = 3.87 \times l_{FWD}^{0.765}, R = 0.95 \quad (9)$$

2005 年澳大利亚公路协会^[13]通过实验研究,在当年的国际报告中提出 FWD 与贝克曼梁(BB)测量弯沉数据具有以下相关关系(单位为 0.01 mm).

$$l_{BB(40\text{kN}550\text{kPa})} = 0.8 \times l_{FWD(50\text{kN})}, R = 0.93 \quad (10)$$

$$l_{BB(40\text{kN}550\text{kPa})} = 1.1 \times l_{FWD(40\text{kN})} \cdots (\text{当 } l < 1 \text{ mm}), R = 0.94 \quad (11)$$

2007 年徐平等^[14]以太澳高速公路在建路基为工程实例,采用点对点的方式,分别进行了 FWD (1t、3t 和 5t) 和 BB 测试,建立了其相关关系如下所示(单位为 μm).

$$l_{BB} = 2.1519 \times l_{FWD-1t} + 784.5, R = 0.88 \quad (12)$$

$$l_{BB} = 1.3012 \times l_{FWD-3t} + 663.7, R = 0.93 \quad (13)$$

$$l_{BB} = 0.8639 \times l_{FWD-5t} + 471.7, R = 0.93 \quad (14)$$

上(10)~(14)式中, l_{BB} 为贝克曼梁(BB)测量弯沉值; $l_{BB(40\text{kN}550\text{kPa})}$ 为轮载 40 kN 和胎压 550 kPa 下 BB 的测量回弹弯沉值; l_{FWD} 为落锤式弯沉仪(FWD)测量弯沉值; l_{FWD-i} 为落锤式弯沉仪(FWD)在加载级为 i 吨时的测量弯沉值.

3.2 FWD 与贝克曼梁(BB)测试弯沉数据相关性不同转换关系式的比较

分析以上研究结果发现, FWD 与 BB 测量弯沉数据之间存在一定的相关性,但由于路面结构及地区差异性的关系,不同研究结果之间的通用性较差,图 3 给出了相同 FWD 测量弯沉值下利用不同转化公式计算的 BB 转换弯沉值.为了使结果具有可比性,所选 FWD 弯沉数据主要为高速公路沥青路面测得数据.

由图 3 可以发现,不同转化公式之间存在一定的偏差,尤其是在路面强度较好、弯沉值较小(弯沉值 $l_{FWD} < 0.15 \text{ mm}$),或路面整体强度较差、弯沉值较大(弯沉值 $l_{FWD} > 0.35 \text{ mm}$)时,各转化公式之间偏差较大;当 FWD 实测弯沉值大于 0.35 mm 时,最大偏差亦达 15% 以上.当 FWD 实测数据在 0.25 mm 左右时,各转化公式之间偏差最小,此时可以认为 FWD 与 BB 实测弯沉值大小相近.

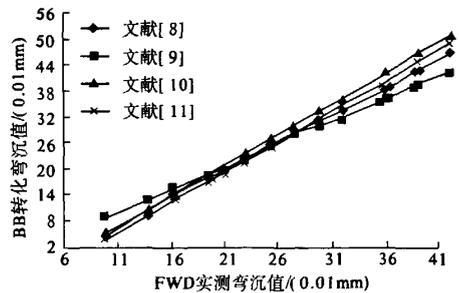


图 3 不同 FWD 与 BB 测量弯沉转化公式计算结果比较
Fig.3 The transition results comparison for different transition formulas of measured deflection

4 结论

(1) 对 FWD 与 BB 两种弯沉检测设备的工作性能如测试稳定性及对行车荷载的模拟能力进行了对比实验,结果表明:相对贝克曼梁,落锤式弯沉仪稳定性高,且能较好的模拟行车荷载。(2) 研究表明 FWD 与 BB 间测试数据存在一定的相关性,但受试验路段结构及地域条件影响较大.如一般当路面结构强度适中时($0.15 \text{ mm} < l_{FWD} < 0.35 \text{ mm}$), l_{FWD} 与 l_{BB} 实测弯沉值较接近,此时个转换公

式间的偏差相对较小。当路面强度较差、弯沉值较大时($l_{FWD} > 0.35 \text{ mm}$), l_{BB} 有大于 l_{FWD} 的趋势,且各转换公式偏差较大;当路面强度较强、弯沉值较小时($l_{FWD} < 0.15 \text{ mm}$),此时由于 BB 受限于测量精度, l_{BB} 一般小于 l_{FWD} 。(3)虽然动(FWD)静(BB)弯沉值之间在某条道路上存在一定的线性关系,但由于 FWD 与 BB 加载原理不同,加上地域及路面类型等因素的影响,不同转换公式间的通用性较差。为了更快地推动 FWD 在我国的应用与发展,充分发挥其在道路检测及材料参数反演等方面的优越性,应尽快制定与 FWD 相关规范的制定。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部发布. JTJ E60—2008 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 中华人民共和国交通部发布. JTJ D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [3] LYTTON R L, GERMANN F P, CHOU Y J, et al. Determining asphalt concrete pavement structural properties by nondestructive testing[R]. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 327, Transportation Research Board, Washington D. C. 1990.
- [4] 王复明,刘文廷. 路面无损检测与评价技术的研究与应用[J]. 中国科学基金,1998(2):92-97.
- [5] ULLIDITZ P. Verification of the analytical-empirical method of pavement evaluation based on FWD testing [C]//6th, Int, Conf on the structural Design of Asphalt pavement, Ann. Arbor, MI: The university of Michigan, 1987, 521-532.
- [6] 熊焕荣. 落锤式弯沉仪(FWD)在路基和柔性路面性能评定中的应用[J]. 公路交通科技,1992,9(1) 16-25.
- [7] MAGNUSON A H, LYTTON R L. Development of dynamic analysis techniques for falling weight deflectometer data[R]. Research Report 1175-2, TX. college station: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, 1997.
- [8] 唐伯明,邓学钧,李一鸣. 落锤式弯沉仪(FWD)与贝克曼梁式弯沉仪(BB)的对比试验研究[J]. 中国公路学报,1990,3(3):37-43.
- [9] 张洪华. 落锤式弯沉仪与贝克曼梁在半刚性路面上的弯沉对比实验研究[J]. 公路交通科技,1993,10(4):13-16.
- [10] 李锦华,徐明德,唐伯明. 城市道路沥青路面上 FWD 与贝克曼梁的对比实验研究[J]. 城市道桥与防洪,1995(2):22-26.
- [11] 樊兆强,杨辉,杨辉. FWD 与贝克曼梁相关关系研究[J]. 市政技术,2003,25(5):295-296.
- [12] 张向阳,王光明. FWD 和贝克曼梁在路基弯沉检测中的相关性分析[J]. 中南公路工程,2004,29(2):76-78.
- [13] Austroads internal report. Guidelines for Road Network Condition Monitoring: Part 3 - Pavement Strength [R]. Sydney: Austroads Project No. AS1122, 2005.
- [14] 徐平,蔡迎春,陈忠平,等. FWD 法和 BB 法在路基-检测中的对比分析[J]. 公路,2007(10):181-183.

Comparative Study of Working Performance and Test Data Correlation between FWD and Benkelman Beam

ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-chun, ZHANG Ya-min

(School of Hydraulics and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China)

Abstract: Aiming to the status of coexistence of Falling Weight Deflection (FWD) and the Benkelman Beam (BB) in the field of road detection, the work performances of two kinds of test equipment such as stability and performance on simulation of vehicle load capacities were compared. Based on related literature both at home and abroad, the correlation of deflection test data between FWD and BB are studied, and comparison and verification for the relationships of conversion between the FWD and BB were done based on measured deflection data. The results show: FWD possesses with more stability work performance than BB, and can better simulate the vehicle load; a certain correlation of measured deflection data exists between FWD and BB, but it is greatly influenced greater by the geographical conditions and road structure.

Key words: road engineering; falling weight deflectometer (FWD); Benkelman beam (BB); work performance; pavement deflection