

路基路面弯沉检测中 FWD 法与 BB 法的比较研究

纪念

(湖南省勘测设计院, 湖南 长沙 410011)

摘要: 采用贝克曼梁(BB)和落锤式弯沉仪(FWD)对 3 种不同等级道路试验段进行弯沉测试, 研究 2 种方式所测弯沉间的相关性, 分析 FWD 法的准确度和有效性。结果表明, 与 BB 法相比, FWD 法的稳定性较好, 准确度较高, 在高等级公路中采用该方法测试弯沉具有更高的稳定性, 且采用 FWD 法对各试验段进行弯沉测试所得规律与道路等级的承载能力一致。

关键词: 公路; 路基; 路面; 弯沉; 落锤式弯沉仪(FWD); 贝克曼梁(BB)

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0076-03

弯沉作为评价道路力学特性的指标之一, 被广泛用于理论研究和工程验收。常用道路弯沉测试方法主要有贝克曼梁(BB)法、落锤式弯沉仪(FWD)法。唐伯明等通过对 FWD 和 BB 不同性质荷载作用下路表弯沉和弯沉盆数据进行分析, 认为 FWD 和 BB 之间具有较好的相关性; 高丹通过试验比对, 提出用提高 FWD 与 BB 数据转换精度的方法来提高两者间的相关系数; 李存华对 BB 与 FWD 弯沉数据的对比分析结果表明, 在精度、稳定性和检测效率方面 FWD 优于 BB, 且两者所测路面弯沉值的线性

关系较好; 石志勇等采用变量分离的方法对弯沉温度进行修正, 研究了沥青路面动态弯沉随行车荷载的演化规律。该文通过对 3 种不同等级道路试验段进行 FWD 法与 BB 法弯沉测试, 研究 2 种方法所测弯沉数据之间的相关性, 分析采用 FWD 法进行弯沉检测的有效性。

1 现场试验

以湖北省 3 种不同道路结构层作为试验段, 其结构组成见表 1。

表 1 3 种不同结构试验段的结构层组成

试验段编号	面层	基层	道路等级
试验段一	4 cm SMA+6 cm AC-20+8 cm ATB	36 cm 水泥稳定碎石	高速公路
试验段二	4 cm AC-13+4 cm AC-20	16 cm 水泥稳定碎石	一、二级公路
试验段三	18 cm 级配砾石	16 cm 水泥稳定碎石	乡镇道路

采用 FWD 法与 BB 法分别对 3 条试验段进行弯沉检测。为使所测弯沉值较准确, 保证 BB 法和 FWD 法所检测部位一致, 位置偏差控制在 1 cm 内。由于 FWD 检测道路弯沉会对路面结构层造成一定扰动, 先采用 BB 法对弯沉进行检测, 并对弯沉仪触头所接触的位置进行定位标记, 分别标记左、右轮的位置; 待 BB 法测试完毕后, 立即采用 FWD 法进行测试, 测试中使 FWD 的落锤承载板中心与 BB 法所作标记点尽量重合, 保证 2 次所测值免受外界环境的影响。FWD 弯沉测试时, 对每个测试点进行 4 次落锤, 采集后 3 次的弯沉值, 取其均值作为最终弯沉测试值。分别对 3 条试验段进行 20 次弯沉采集, 舍弃特异值后, 分别计算各试验段 20 组测试数据的均值 μ 、标准差 σ 、变异系数 δ ($\delta = \text{标准差 } \sigma / \text{均值 } \mu \times 100\%$) 等统计参数, 结果见图 1~3。

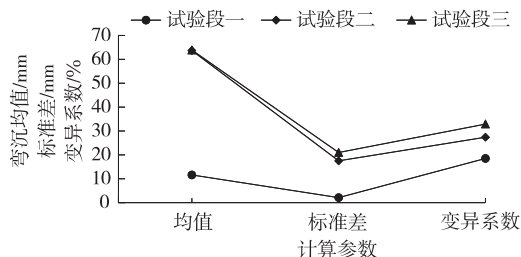


图 1 各试验段 FWD 法弯沉测试结果的统计参数

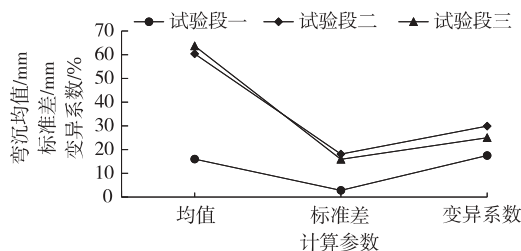


图 2 各试验段 BB 法弯沉测试结果的统计参数

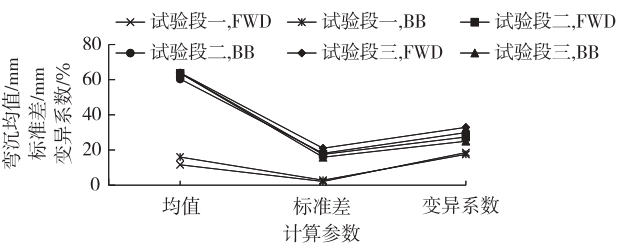


图 3 各试验段 FWD 法和 BB 法弯沉测试结果的统计参数对比

道路弯沉值与路基、路面的承载能力存在关联，测量弯沉值越小则道路承载能力越高，对在建或竣工道路进行弯沉测试可检验路基和路面是否满足设计强度要求。由图 1、图 2 可知：1) 采用 FWD 法对道路弯沉进行检测，3 条试验段的弯沉值大小为试验段三最大、试验段二次之、试验段一最小，道路结构层的承载能力顺序与规范规定的道路等级的承载力一致；采用 BB 法检测时，3 条试验段的弯沉值大小为试验段二最大、试验段三次之、试验段一最小，不符合道路等级的承载能力，这是由于 BB 法受自身构造和外界环境影响较大，所得弯沉波动较大。2) 按 2 种测试方法下弯沉变异系数 δ 大小，3 条试验段的排序为试验段三>试验段二>试验段一。变异系数表示数据的相对变化，表明上述规律适用于 3 条试验段结构层的弯沉值离散程度，可推广于其他类似路面中。出现上述规律的主要原因，一是在高等级公路施工中，路面及路基所用原材料的配合比较严格，材料颗粒较均匀、密实度较好，且对施工工序要求严格，道路弯沉值变异性较小；二是在道路后期运营维护中，通常对高等级公路较重视，发现其出现损坏现象时会立即展开修复养护，使弯沉衰减得到及时控制，防止其继续发展，因而变异系数较小；三是等级较低道路一般所用原材料的颗粒及形状不均匀性较大，道路内部空隙较多，承载能力不足，如试验段三表面层采用级配砾石，其为松散集料，使表面层内部较松散，影响对弯沉值的采集，因而试验数据产生较大变异。

由图 3 可知：鉴于均值和标准差表示的是样本的绝对指标，不具备普遍性，采用变异系数来衡量 FWD 法和 BB 法对道路弯沉的测量效果。对于试验段一，2 种测试方法所测弯沉的变异系数基本相同，相差不大；对于试验段二，FWD 法所测弯沉的变异系数比 BB 法的小 2.5%；对于试验段三，FWD 法所测弯沉的弯沉变异系数比 BB 法的大 7.9%。这

是由于高等级道路行车状况良好，弯沉测试受外界环境的影响较小，测试数据也较稳定。而较低等级道路路况较差，采用 2 种方法测得的弯沉值会出现一定波动。

综上，不同等级道路 BB 法测试弯沉出现波动，而采用 FWD 法测得的弯沉值较稳定，且准确度较高，对高等级公路利用 FWD 法进行道路弯沉测量的稳定性更好。

2 相关性分析

为分析采用 2 种测试方法对道路测试弯沉值的相关性，采用最小二乘法，结合线性、指数及二次多项式拟合回归方程对弯沉测试数据进行相关性分析，结果见表 2~4。

表 2 试验段一弯沉数据拟合结果

拟合方式	拟合方程	相关系数 R	相关系数 R ²
线性	$y=1.248\ 4x+0.823\ 1$	0.97	0.931\ 2
指数	$y=5.590\ 5e^{0.091\ 1x}$	0.96	0.939\ 0
二次多项式	$y=0.035\ 6x^2+0.568\ 1x+4.364\ 1$	0.97	0.923\ 5

表 3 试验段二弯沉数据拟合结果

拟合方式	拟合方程	相关系数 R	相关系数 R ²
线性	$y=0.995\ 8x+3.288\ 7$	0.95	0.910\ 1
指数	$y=17.262\ 4e^{0.0228\ 4x}$	0.96	0.927\ 4
二次多项式	$y=0.009\ 61x^2-0.295\ 2x+28.234\ 8$	0.97	0.937\ 0

表 4 试验段三弯沉数据拟合结果

拟合方式	拟合方程	相关系数 R	相关系数 R ²
线性	$y=0.995\ 3x+3.098\ 7$	0.91	0.835\ 4
指数	$y=17.270\ 4e^{0.023\ 2x}$	0.89	0.799\ 2
二次多项式	$y=0.009\ 49x^2-0.290\ 2x+28.864\ 1$	0.91	0.829\ 9

由表 2 可知：1) 采用 3 种拟合方式得到的相关系数 R 及 R² 均满足拟合精度要求，表明试验段一的 FWD 法和 BB 法测试弯沉值在 3 种数据拟合方式下的相关性较好，也反映出高等级公路利用 FWD 法进行弯沉检测的准确性比 BB 法高。2) 对比 3 种数据拟合方式下的 R² 值，采用二次多项式方式对 2 种方法的测试数据进行拟合的相关性最好，其次是线性方式拟合，最后是指数方式拟合。若考虑对数据拟合的效率和简便性，在施工现场优先采用线性方式对测试数据进行拟合和相关性分析。

由表 3 可知：1) 采用 3 种拟合方式的相关系数

$R > 0.95$, 且二次多项式的相关系数高达 0.97, 满足相关拟合精度要求, 表明试验段二的 FWD 法和 BB 法测试弯沉值在 3 种数据拟合方式下的相关性较好, 也反映出一、二级公路利用 FWD 法进行弯沉检测的准确性比 BB 法高。2) 对比 3 种数据拟合方式下 R^2 值, 采用二次多项式对 2 种方法的测试数据进行拟合的相关性最好, 其次是指数方式拟合, 最后是线性方式拟合。考虑到对数据拟合的效率和简便性, 优先采用二次多项式对所测数据进行拟合和相关性分析。

由表 4 可知: 采用 3 种拟合方式得到的相关系数 $R < 0.95$, 不能满足相关拟合精度要求, 表明试验段三的 FWD 法和 BB 法测试弯沉值在 3 种数据拟合方式下的相关性不是很好。但数据拟合较差不代表利用 FWD 法检测弯沉的准确性不好, 这是因为利用 BB 法检测弯沉受自身构造的影响会产生波动, 且其测试弯沉是静态的, 而 FWD 法测试弯沉是动态的, 需进行换算后再用于相关性分析及评价。

3 结论

通过采用 FWD 法和 BB 法分别对 3 条公路试验段进行弯沉测试, 并对测试弯沉值进行相关性分析, 得到如下结论:

(1) 与 BB 法相比, FWD 法测试弯沉值的稳定性较好, 准确度较高, 在高等级公路中采用 FWD 法进行弯沉测试具有更好的稳定性。

(2) 各试验段 FWD 法测试弯沉值的变异系数大小为试验段三 > 试验段二 > 试验段一, 与道路规范中道路等级的承载能力一致, 表明可采用 FWD 法对不同等级公路进行弯沉测试。

(3) 根据 FWD 法和 BB 法测试弯沉值相关性

分析结果, 高等级公路优先采用线性方式对 FWD 法和 BB 法测试弯沉值进行拟合和相关性分析; 3 种拟合方式对低等级公路 FWD 法和 BB 法测试弯沉值的拟合相关性均较差, 应对 FWD 法测试弯沉进行更深层次的研究, 确保数据准确。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 贝克曼梁路面弯沉仪: JT/T 120—2008 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2008.
- [3] 全国公路专用计量器具计量技术委员会. 落锤式弯沉仪: JJG(交通) 133—2017 [S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2017.
- [4] 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.
- [5] 高丹. 提高落锤式弯沉仪与贝克曼梁检测相关性的方法探讨[J]. 福建交通科技, 2019(4): 28—30.
- [6] 李存华. 贝克曼梁弯沉仪与落锤式弯沉仪(FWD)检测结果对比分析[J]. 市政技术, 2016, 34(5): 28—30.
- [7] 石志勇, 李倩倩, 周兴业, 等. 沥青路面弯沉的温度修正研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 36—42.
- [8] 李颖. 落锤式弯沉仪弯沉检测有效性分析[J]. 道路工程, 2020(6): 47—79.
- [9] 交通运输部公路科学研究院. 公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [10] 赵青. FWD 与 BB 检测道路弯沉的相关性探讨[J]. 交通世界(建养·机械), 2009(5): 172—173.

收稿日期: 2021-04-19

(上接第 75 页)

- 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 44—47.
- [7] 张丽宏. 沥青黏度影响因素的研究[J]. 石油沥青, 2014, 28(4): 68—72.
- [8] 林江涛, 孙洪福. 沥青黏度的不同测试方法研究[J]. 山东交通科技, 2011(3): 30—31.
- [9] 程龙, 于江, 李林萍, 等. 基于表观黏度的新疆岩沥青改性沥青的老化动力性能[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 295—301.
- [10] 丁湛, 赵浚凯, 董浩, 等. 测试条件对橡胶改性沥青黏度的影响分析[J]. 河北工业大学学报, 2020, 49(3):

74—80.

- [11] 李立寒, 耿韩, 孙艳娜. 高黏度沥青黏度的评价方法与评价指标[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(3): 352—356+362.
- [12] 弥海晨, 郭平, 胡苗. 橡胶沥青黏度测试影响因素及黏度值确定方法研究[J]. 中外公路, 2010, 30(5): 301—304.
- [13] 交通部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

收稿日期: 2020-12-07