

便携式落锤弯沉仪在路基压实质量快速检测中的应用

褚佰超¹ 蔡智渊²

1 常州市金坛区金沙交通工程质量检测有限公司, 江苏 常州 213200

2 常州市金坛区交通工程有限公司, 江苏 常州 213200

[摘要]我国经济社会不断发展的同时, 国家大力推动基础设施建设, 新建了大量的公路, 在这一过程中对路基质量快速检测与评价显得尤为重要。文中主要针对路基压实度、回弹模量和弯沉值等评价指标, 对便携式落锤弯沉仪(PFWD)快速检测方法进行了试验研究, 为路基压实质量快速检测的推广应用提供参考。

[关键词]PFWD; 路基压实; 快速检测; 弯沉值

DOI: 10.33142/sca.v3i4.2256

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

Application of Portable Falling Weight Deflectometer in Rapid Detection of Subgrade Compaction Quality

CHU Baichao¹, CAI Zhiyuan²

1 Changzhou Jintan Jinsha Traffic Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213200, China

2 Changzhou Jintan Traffic Engineering Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213200, China

Abstract: With the continuous development of Chinese economy and society, the country vigorously promotes the infrastructure construction and builds a large number of highways. In this process, the rapid detection and evaluation of subgrade quality is particularly important. In this paper, aiming at the evaluation indexes of subgrade compactness, modulus of resilience and deflection value, the fast detection method of portable falling weight deflectometer (PFWD) is tested and studied, which provides reference for popularization and application of rapid detection of subgrade compaction quality.

Keywords: PFWD; subgrade compaction; rapid detection; deflection value

引言

路基压实质量依靠几个重要的指标来反映, 包括回弹模量、弯沉值和压实度等。目前, 在路基压实质量检测领域, 常用的传统测试方法普遍存在耗时、复杂、昂贵的特点, 便携式落锤弯沉仪法是近年来新发展出的一种检测方法, 具有较大优势。

1 便携式落锤弯沉仪基本原理

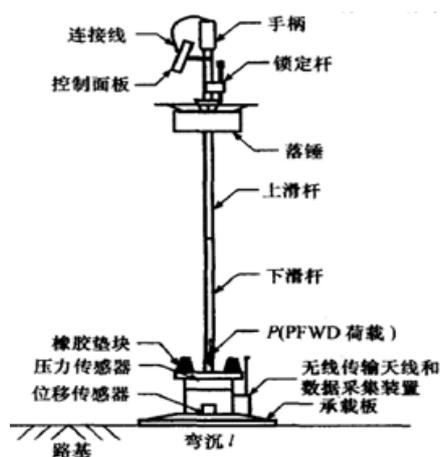


图1 PFWD 构造示意图

便携式落锤弯沉仪 (PFWD) 是一种动力检测设备, 它是在落锤式弯沉仪 (FWD) 基础上发展的一种新型检测设备, 利用它可以测出路基动态弹性模量。PFWD 具有携带便捷、使用成本低、检测迅速、应用范围广、荷载大小与路基实际工作条件类似、可进行路基施工全过程质量控制、可满足规范高检测频率要求等优点, 在国内外得到广泛应用。

便携式落锤弯沉仪 (PFWD) 试验的原理是使自由落体的重锤冲击路基表面的承载板, 通过记录相关的移动和受力数据, 从而计算出路基的回弹模量。

PFWD 的工作原理基于几点假设: 一是忽略了仪器与路基之间的动力相互作用, 这处于工程精度误差所允许的范围之内。二是把路基看成弹性半空间体, 虽然与事实有出入, 会导致测试结果存在较大误差, 但由于目前业界均这样处理, 且相关经验和数据都是基于这个假设得来的, 因此我们接受这种假设。三是把重锤下落产生的冲击荷载假设为静载。我们假设落锤产生的冲击荷载均匀分布在承载板上。重量为 W 的落锤静置在承载板上, 地面在静力荷载作用下产生静力位移 δ_j 。重量为 W 的落锤从高度为 H 处落下, 产生的冲击荷载作用于承载板, 在承载板下产生动力位移 δ_d 。根据能量守恒定理, 我们可以得到:

$$W(H + \delta_d) - \frac{1}{2} K \delta_d^2 = 0 \quad (2-1)$$

其中 K 为地基劲度系数。由公式 (2-1) 就可以解出动力位移 δ_d :

$$\delta_d = \frac{W}{K} + \sqrt{\left(\frac{W}{K}\right)^2 + 2H \frac{W}{K}} \quad (2-2)$$

又因 $W = K \delta_j$, 带入公式 (2-2), 可得:

$$\frac{\delta_d}{\delta_j} = 1 + \sqrt{1 + 2 \frac{H}{\delta_j}} \quad (2-3)$$

δ_d / δ_j 即为落锤冲击作用所产生的动荷系数, 因此我们可以将重量为 W 的物体在高度为 H 情况下产生的冲击荷载表示为:

$$P = W \left(1 + \sqrt{1 + 2 \frac{H}{\delta_j}} \right) \quad (2-4)$$

但现实中很难直接精确测量冲击荷载 P , 因此 Jong Ryeol Kim 推荐公式 (2-5):

$$P = W \times H \quad (2-5)$$

P 均匀分布在承载板上, 即可得到均布荷载 p , 因此可用 Livneh 推荐的公式 (2-6) 计算出路基动态弹性模量。

$$E = \frac{2(1 - \mu^2) p \gamma}{L} \quad (2-6)$$

其中 E 为动态弹性模量 (MPa); p 为均布荷载 (kPa); μ 为路基土泊松比, 一般取 0.35; L 为弯沉值 (0.01mm); γ 为承载板半径 (mm)。

2 便携式落锤弯沉仪与路基弯沉值的相关性研究

因为规范里建议的公式是考虑了全国各地情况的基础上得出来的, 具有广泛代表性, 但我国地域广阔, 各地有其特殊的地理气候环境, 现有规范公式针对性不够, 因此在徐州地区建立回弹模量与弯沉值的相关关系也很有必要。本项目依托于徐州地区某高速公路工程进行 PFWD 与贝克曼梁 (BB) 试验, 建立 PFWD 与 BB 弯沉值的相关关系式。

本次试验选择在 A 段灰土路基进行 PFWD 与 BB 对比试验研究。在现场先进行贝克曼梁试验, 然后在测点 0.5m 范围内附近进行 PFWD 试验。通过利用上述公式计算可知, 贝克曼梁试验所得转换模量的平均值为 208MPa, 变异系数为 0.41, PFWD 试验所得回弹模量 241MPa, 变异系数为 0.21。两种试验方法所测得回弹模量相差不大, PFWD 试验所得回弹模量均值是 BB 试验回弹模量均值的 1.16 倍, 但 PFWD 所测模量为动态弹性模量, 而贝克曼梁测得模量为静弹模量, 因此这

一试验结果与理论相吻合。由两种试验结果的变异系数可知，PFWD 试验结果的变异系数较小，数据更加稳定。

现对这两种方法的数据进行相关性分析，研究 PFWD 测得模量与 BB 试验的弯沉值、换算模量值之间的相关性，关系曲线见图 2 与图 3。

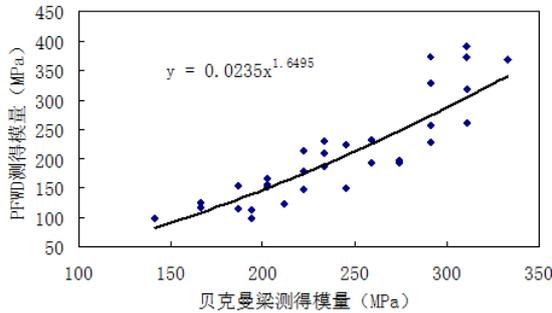


图 2 BB 试验测得模量与 PFWD 试验测得模量关系曲线图

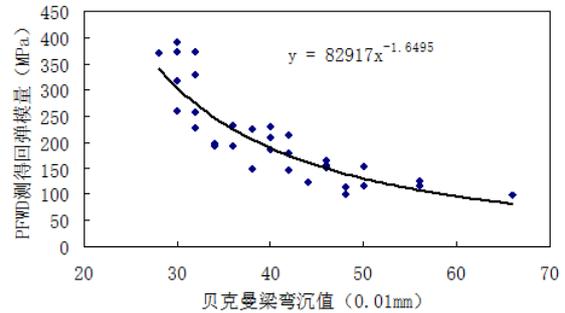


图 3 BB 试验弯沉值与 PFWD 试验测得模量关系曲线图

图 2 显示出，PFWD 试验与 BB 试验测得路基模量之间基本呈正相关，软件拟合出以下的关系式： $y=0.0235x^{1.6495}$ ，其中相关系数为 0.89，式子中 x 为 BB 试验所得转换模量 (MPa)，y 为 PFWD 试验测出的模量 (MPa)。试验结果说明 PFWD 进行路基检测是可行的。

图 3 显示出，PFWD 试验测得路基模量与贝克曼梁弯沉值之间具有较好的相关性，软件拟合出的二者关系式为： $y=82917x^{-1.6495}$ ，相关系数为 0.89，这里 y 的含义与上文相同，x 变更为 BB 试验弯沉值 (0.01mm)，试验结果进一步表明采用 PFWD 进行路基质量快速检测的可行性。

为研究 PFWD 试验所测模量值与 BB 试验弯沉值相关关系 $y=82917x^{-1.6495}$ 的适用范围，我们取另一路段进行试验验证，并用《公路路面基层施工技术规范》中推荐的弯沉与土基回弹模量关系式 $10=9308E0-0.938$ 反算弯沉值。

从试验结果中我们能够看出，经过经验公式 $y=82917x^{-1.6495}$ 反算所得弯沉值均值为 39.93 (0.01mm)，接近实测弯沉均值 39.00 (0.01mm)，而通过规范推荐公式反算所得弯沉值均值为 60.13 (0.01mm)，与实测值相差较大。图 4 显示出实测结果与经验公式算出数值多位于 23~59 (0.01mm) 区间，相比之下规范公式反算得出的弯沉值分布较散，因此，本文建议在此地区土基静弹模量与弯沉值采用 $y=82917x^{-1.6495}$ 反算。

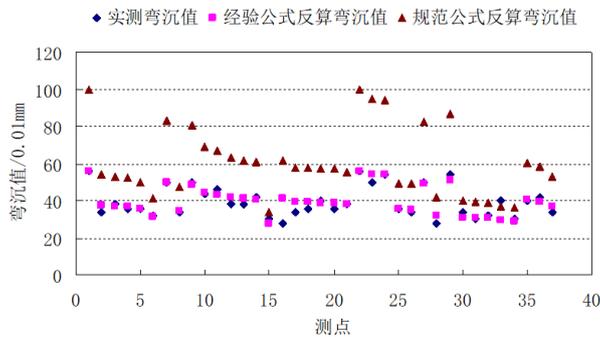


图 4 弯沉值对比图

3 PFWD 的稳定性与重复性试验

(1) 稳定性试验

通过选择两两间距为 50m 的八个测点，使用相同质量的重锤进行同高度 PFWD 试验，每个测点试验一次，得到如图 5 所示结果。

从图 5 中可以看出，所有选择的测点动弹性模量的变异系数处于 6.11%~10.98%，仅有两个测点测得的变异系数大于 10%，这表明 PFWD 仪器具有很高的稳定性。同时，8 个测点的模量均值偏差较大，这主要是由于现场大型车量碾压

不均造成的。

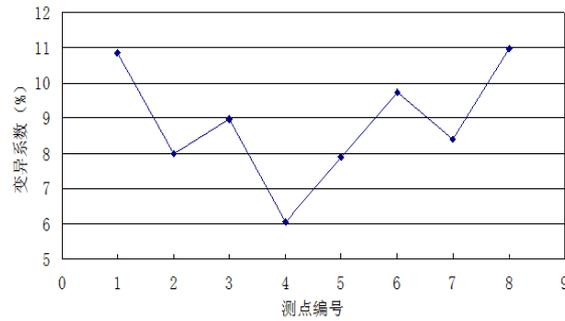


图5 稳定性试验曲线图

(2) 重复性试验

共选出 24 个测点，其中各个测点均经历两轮的测试，两轮测试之间间隔一天，以证明试验结果的可重复性。现场承载板直径 30cm，落锤高度 70cm，锤重 10kg，测点间距 50m，具体结果见图 6、图 7，其中 $RAT = |第二天测量值 - 第一天测量值| / 第一天测量值 \times 100\%$ 。

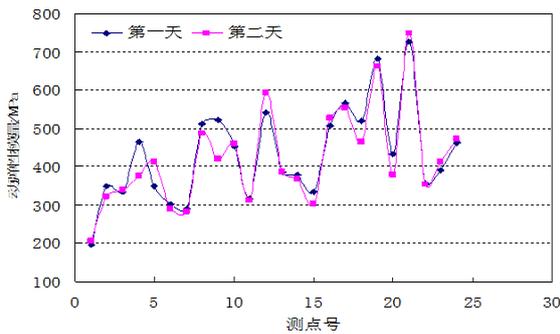


图6 可重复试验曲线图

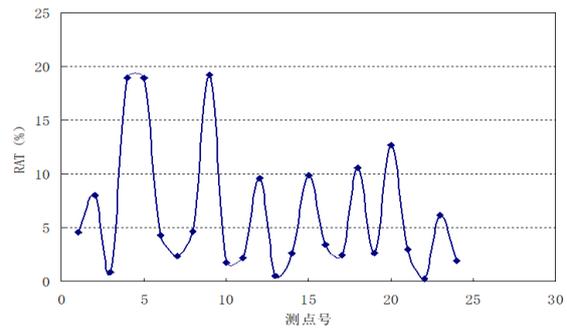


图7 各测点 RAT 曲线图

从结果来看，两轮测试中，绝大多数测点的测试数值相差不大，图 6 中显示出两轮测试结果几乎重合，差距甚微，这也证明两轮测试的结果非常稳定。由 RAT 指标可以看出，同一测点两天测试结果差的绝对值占动弹性模量的比值较小，说明测点误差对结果的影响不大，除 4、5、9、18、20 等五个测点的 RAT 大于 10% 之外，其他个点的 RAT 值均小于 10%。第一天 24 个测点的动弹性模量均值为 432MPa，第二天所有测点动弹性模量的平均值为 421MPa，这进一步说明了 PFWD 试验具有较好的可重复性。

4 结束语

本文通过进行 PFWD 路基压实质量评价研究试验，并对仪器的稳定性、可重复性进行试验研究，证明便携式落锤弯沉仪试验检测的路基动弹性模量与弯沉值具有较好的相关性。随着该种检测方法的不断发展，路基压实质量检测的过程也会更加轻松和简单，我们期待 PFWD 在该领域的广泛应用。

[参考文献]

- [1]董刚,王佳蓉,曹高尚.国内外路基路面承载能力测试方法综述[J].城市建设理论研究(电子版),2013,11(4):22-24.
- [2]王登忠.基于便携式落锤弯沉仪的路基弯沉与压实度无损检测技术研究[D].江苏:东南大学,2011.
- [3]徐鸿喆.便携式落锤弯沉仪(PFWD)检测技术的开发与应用[D].河北:河北工业大学,2012.
- [4]孙璐,王登忠.基于便携式落锤弯沉仪动态弯沉的路基压实度无损检测与评估[J].公路交通科技,2012,29(12):41-47.

作者简介:褚佰超(1982-),男,湖南常德,本科学历,常州市金坛区金沙交通工程质量检测有限公司。蔡智渊(1981-),男,江苏南京人,大专学历,常州市金坛区交通工程有限公司。