

# 手持式落锤弯沉仪的系统缺陷研究

胡庸<sup>1</sup>, 杨露<sup>2</sup>, 吴佳晔<sup>1</sup>

(1. 四川理工学院建筑工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 河南高速公路发展有限责任公司, 郑州 450052)

**摘要:**近年来,手持式落锤弯沉仪的使用日益广泛,动态弹性模量也日益受到重视。文章就手持式落锤弯沉仪(包括动态弹性模量测试仪)的系统缺陷进行分析,并针对该缺陷提出解决方案,以探讨一种提高手持式落锤弯沉仪测试精度的方法。

**关键词:**手持式落锤弯沉仪;动态弹性模量;测试精度

**中图分类号:**N34

**文献标识码:**A

不管是在公路系统还是铁路系统的质量检测控制中,路基的变形特性都是非常重要的指标。然而,传统的平板荷载试验、CBR、贝克曼弯沉试验等静荷载测试方法均存在着耗时长、费用高等问题,而且需要反力设备,为检测工作带来很大不便。

近年来,以手持式落锤弯沉仪为代表的动荷载测试方法开始广受关注。其中之一的动态弹性模量测试仪(Evd)更被纳入《铁路工程土工试验规程》(TB 10102-2004)<sup>[1]</sup>。但是,该方法也存在着不少问题,影响其测试精度。本文则从动荷载测试系统的特点入手,分析了其固有的系统缺陷并提出了解决的思路。

## 1 手持式落锤弯沉仪简介

手持式落锤弯沉仪(PFWD)是目前国际上普遍采用的路基路面结构强度无损检测仪器。目前在许多国家都得到了推广和应用,主要的国际厂商有德国的ZORN,丹麦的Carl Bro,日本的东京测器,国内也有多家厂商研制了相关的仪器。主要由加载装置(主要是落锤及导向杆)、载荷板(垫板、圆形钢板等)及测量装置(量力环及沉降计)组成。该方法利用落锤与载荷板碰撞时产生的冲击荷载以代替静力荷载装置(图1),从而提高了测试效率。

测试时,首先需要平整测试表面,使载荷板与地面良好接触;然后让落锤在指定高度处自由落下(在这一过程中需保持导向杆垂直),记录最大荷重P以及载荷



图1 手持式落锤弯沉仪(PFWD)

板中央的最大沉降量 $S^{[2]}$ 。通过荷载压强P与沉降量S即可求得动态地基系数K:

$$K = P/S$$

当载荷板的直径为30 cm时,测试的动态地基系数K则对应于地基系数 $K_{30}$ 。然而,由于手持式落锤弯沉仪是动力测试方法,与静力测试方法之间存在较大的差异,因此需要根据经验公式对两者进行修正。在《铁路工程土工试验规程》(TB10102-2004)中,在PFWD的基础上进行了修正,提出动荷载测试方法Evd<sup>[3]</sup>。两种测试方法与静力荷载试验方法的对比见表1。

## 2 手持式落锤弯沉仪的系统误差

手持式落锤弯沉仪(包括Evd)是一种动力测试方法,与 $K_{30}$ 静力荷载试验方法相比,其差异主要体现在:

(1)材料粘性的影响:由于材料粘性往往依存于载

表 1 测试方法的对比分析

| 项 目   | K30 静力载荷 | 动力载荷试验方法      |                 |
|-------|----------|---------------|-----------------|
|       | 试验方法     | PFWD          | E <sub>vd</sub> |
| 载荷方法  | 静 力      | 动力冲击          | 动力冲击            |
| 计算沉降量 | 1.25mm   | 1.25mm        | 0.1 - 2mm       |
| 荷载大小  | 根据沉降状况调整 | 根据沉降状况调整      | 最大 7.07KN       |
| 荷载时间  | 一般数十分钟   | 一般数 ms 到数十 ms | 18 ± 2ms        |

荷速率,因此静力载荷试验方法基本不受材料粘性的影响,而手持式落锤弯沉仪则不可避免受到一定的影响。其中,Evd 方法规定了荷载大小和时间,从而规范了荷载速率。

(2)应变水平的影响:土体的变形特性与其应变水平有很大的关系,因此,手持式落锤弯沉仪规定了应变水平以便与 K<sub>30</sub>静力载荷试验方法对应。而 Evd 由于难以改变荷载大小,在测试坚硬材料时,其应变水平较低,测试离散性变大,精度相应变低。

(3)惯性力的影响:根据达朗贝尔原理,当物体产生加速度时,会产生惯性力。在动力测试中,如果不考虑惯性力的影响,可能会造成较大的测试误差。是手持式落锤弯沉仪的传力示意图如图 2 所示。

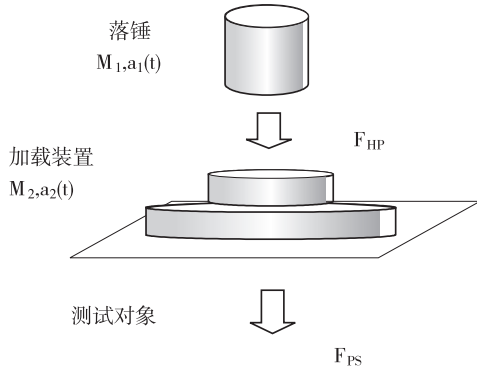


图 2 手持式落锤弯沉仪 (PFWD) 的传力机构

图 2 中,F<sub>HP</sub>为加载装置上测出的荷载。然而,真正作用于测试对象(岩土材料)上的荷载为 F<sub>PS</sub>,忽略加载装置的自重,则:

$$F_{PS}(t) = F_{HP}(t) - M_2 a_2(t) \tag{1}$$

式中, M<sub>2</sub>、a<sub>2</sub>(t) 分别为加载装置的质量和加速度, M<sub>2</sub>a<sub>2</sub>(t) 为垫板的惯性力。

可以看出,在静荷载试验中,垫板的加速度 a<sub>2</sub>(t) 趋近于零,因此垫板的惯性力 M<sub>2</sub>a<sub>2</sub>(t) 可以忽略,即是说量力环记录的冲击力和实际对地基的冲击力基本相等。但是在动荷载试验中,垫板的加速度 a<sub>2</sub> 不能忽略,即有较大的惯性力 M<sub>2</sub>a<sub>2</sub>(t)。因此,手持式落锤弯沉仪测试的冲击力 F<sub>HP</sub>与实际上传到地基上的冲击力 F<sub>PS</sub>之间有

一定的误差产生。

以 Evd 为例分析上述惯性力带来的误差。

以标准的 Evd 的测试参数为例<sup>[1]</sup>:落锤距离(H):90 cm、落锤重量(M1):10 kg、加载装置重量(M2):15 kg、最大冲击荷载(F<sub>HPmax</sub>):7.07 KN ± 0.07 KN、冲击持续时间(T):18 ms ± 2 ms、测试沉降范围(D):0.1 ~ 2 mm。

由于加载装置在受到冲击前,其加速度和速度均为零,因此其沉降可以表示为:

$$D = \iint a_2(t) dt dt \tag{2}$$

出于简化考虑,可以假设 a<sub>2</sub>(t) = A<sub>0</sub>sin(2πt/T),并将积分区间限定在压缩时间(可以认为是冲击持续时间 T 的 1/2),可得:

$$A_0 = \frac{4\pi D}{T^2} \tag{3}$$

因此,加载装置的最大加速度约在 3.9 m/s<sup>2</sup> ~ 77.6 m/s<sup>2</sup>,对应的惯性力约为 39 N ~ 776 N,最大对应于冲击荷载的 11% 左右。而且,测试的土体沉降越大、冲击持续时间越短,该惯性力所造成的误差比率也越大。

此外,被测土体也会产生相应的惯性力。与加载装置的惯性力一起,减少了产生土体变形的荷载。因此,采用动力测试得到的土体动态变形模量要大于其静态变形模量。对于 Evd,文献[3]给出了如下相关关系:

$$\text{细粒土: } K_{30} (MN/m^3) = 3.45 E_{vd} (MPa) + 0.1 \tag{4}$$

其中, E<sub>vd</sub> 为规范<sup>[1]</sup>给出的测试动弹性模量。与理论公式相比,

$$K_{30} = \frac{E}{0.79 \times 2R(1 - \mu^2)} \approx 4.44 E/m \tag{5}$$

可以看出动态弹性模量较静态弹性模量高 30% 左右。此外,对于粗粒土和碎石土,其提高比例有所增加。同样的规律,在手持式落锤弯沉仪中也有所体现,最大提高比例可以达到 100% 左右<sup>[4]</sup>。

### 3 提高测试精度的方法

在影响手持式落锤弯沉仪(包括 Evd)与 K<sub>30</sub>静力载荷试验方法的因素中,材料的粘性是在动力荷载下材料本身的特性,因此需要修正的主要有应变水平和惯性力。其中,由于采用 300 mm 直径的载荷板,要达到相应的应变水平主要靠加大落锤的重量和落距。但是,这一方面会增加装置的重量和操作难度,在冲击过程中,垫板(加载装置)还会产生相应的压缩变形并积累应变能,当冲击力过大时,积累的应变能会使垫板产生强烈震动和跳板的现象,从而影响测试精度。

所以,提高手持式落锤弯沉仪(包括 Evd)测试精度的有效手段就是怎样消除惯性力的影响。其中包括

#### (1) 垫板(加载装置)的惯性力

从式(1)可以看出,只要能够测出垫板的加速度  $a_2$ ,即可简单地加以修正。为此,提出了在垫板中使用加速度传感器来代替现有测试技术中的沉降仪的方法<sup>[5]</sup>。通过该方法,不仅可以直接测试出  $a_2$ ,而且还通过积分的方法计算出垫板的沉降量  $S$ 。

在  $t$  时刻垫板的加速度  $a_2(t)$  和速度  $v(t)$ , 与  $t + \Delta t$  时刻垫板的加速度  $a_2(t + \Delta t)$  和速度  $v(t + \Delta t)$ , 以及  $t + \Delta t$  时刻垫板的沉降量  $S(t + \Delta t)$  之间存在如下关系:

$$S(t + \Delta t) = S(t) + v(t)\Delta t + \left[ \frac{a_2(t)}{3} + \frac{a_2(t + \Delta t)}{6} \right] \Delta t^2 \quad (6)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{\Delta t}{2} [a_2(t) + a_2(t + \Delta t)] \quad (7)$$

考虑到初始时刻( $t = 0$ ),垫板的沉降量和速度为零。通过(6)式、(7)式,可以计算任意时刻垫板的沉降量。当然当垫板的刚性远大于地基的刚性时,垫板的沉降量和地基的沉降量大体相等。

我们对手持式落锤弯沉仪按上述方法进行了改进,计算结果表明,对于动弹性模量在 10 ~ 40 Mpa 的土质材料,垫板的惯性力可以达到总冲击荷载的 10% ~ 30% 左右<sup>[5]</sup>。通过对垫板惯性力的修正,在一定程度上提高了手持式落锤弯沉仪的测试精度。

#### (2) 土体材料的惯性力

土体材料的惯性力的影响因素则比较复杂,需要借用相应的碰撞理论。为此,我们与日本鹿岛株式会社等共同提出了一种基于 Hertz 碰撞理论的落球式岩土材料变形特性测试技术<sup>[6-8]</sup>。该技术则很好地解决了这两类惯性力的问题,适用土体的范围也扩展。目前,该技术

已成为东日本旅客铁道株式会社的桥墩回填施工管理规范,在铁道、交通和水利等方面都得到了广泛的应用。

## 4 结束语

本文系统地分析了两类具有代表性的岩土材料变形特性现场快速测试技术,(手持式落锤弯沉仪 PFWD 和动态弹性模量测试仪 Evd)的特点,并与  $K_{30}$  静力载荷试验方法进行了对比。其中,着重强调了惯性力的影响,并提出了一种修正垫板惯性力的方法以提高测试精度。

### 参考文献:

- [1] TB 10102-2004,铁路工程土工试验规程[S].
- [2] 刘林芽,雷晓燕,练松良.高速铁路路基质量检测方法及注意事项[J].铁道标准设计,2004(10):64-66.
- [3] 李怒放.动态变形模量 Evd 标准的应用与展望[J].铁道标准设计,2003(6):37-39.
- [4] 日本土木学会,FWD 及び小型 FWD 運用の手引き[S].
- [5] 吴佳晔,吴曾炜.采用加速度传感器来提高便携式弯沉仪(H-FWD)测试精度的方法[P].中国专利:zl200510021852.X[P],2009.
- [6] 北本幸義,吉田輝,池尻健,等.落球探查手法による砂礫盛土の締固め管理[R].日本:第 41 回地盤工学研究発表会,2007.
- [7] 吴佳晔,杨露,胡庸.填土材料现场检测技术的现状和进展[J].四川理工学院学报:自然科学版,2009,22(6):1-4.
- [8] 田北平,吴佳晔,蒋世龙,等.基于落球检测技术原理的测试系统在填土路基碾压质量管理中的应用[J].公路交通科技应用技术版,2009,12:70-72.

## Research on the System's Defects of PFWD

HU Yong<sup>1</sup>, YANG Lu<sup>2</sup>, WU Jia-ye<sup>1</sup>

(1. School of Architecture Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Expressway Development Co, Ltd of Henan Province, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In recent years, with the use of portable falling weight deflect meter(PFWD) becomes more and more extensive, Dynamic elastic modulus(Evd) gets more and more attention. In this paper, the system's defects of PFWD (including Evd) are analyzed, and solution program is proposed according to the defects so as to probe into a way of improving the test precision of PFWD.

**Key words:** PFWD; Evd; test precision