

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201803080

PFWD 冲击荷载的影响深度及参数配置

王 龙, 夏浩然

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为研究 PFWD 冲击荷载对道路结构层的影响深度, 提出合理的 PFWD 检测试验参数配置, 首先分析 PFWD 最大荷载的影响参数, 提出应力余量 θ 作为应力衰减量的指标, 根据刚性承载板下弹性半空间体应力解, 建立单层结构应力衰减与深度和板半径的关系; 然后, 建立刚性承载板下双层结构的有限元模型, 研究层厚、板半径、结构层模量和泊松比对应力深度衰减的影响, 建立了应力余量 θ 与模量比 (E_1/E_0) 和层厚 (H_1/δ) 的关系; 最后, 按应力衰减至绝对水平定义了影响深度. 研究结果表明: 锤重、落高和承载板半径等参数影响 PFWD 最大荷载; 单层结构中应力衰减量只取决于深度与板半径比值; 随着上层模量增大, 应力加速衰减; 随着下层模量增大, 应力衰减延缓; 上下层模量比 E_1/E_0 对双层结构应力衰减有影响; 泊松比几乎不影响应力衰减; 不同 PFWD 配置下 (锤重、承载板) 有不同的影响深度, 结合理论分析结果和工程实际, 按照被检测层与下承层的模量比 (E_1/E_0) 提出了合理的参数配置.

关键词: 道路工程; 半刚性基层; PFWD; 应力余量; 影响深度; 配置参数

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)09-0062-06

Analysis on the action depth of PFWD impact load and parameters configuration

WANG Long, XIA Haoran

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: This research focused on the action depth of portable falling weight deflectometer (PFWD) impact load on road structure and proposed reasonable testing parameters for PFWD. Influence parameters of PFWD maximum load were analyzed and stress allowance θ was proposed as an index of stress attenuation. According to the stress solution of elastic half-space under rigid bearing plate, the relationship between θ and depth and radius of single-layer structure was established. Then the finite element model of double-layer structure under rigid bearing plate was built to analyze the effects of thickness, radius, modulus, and Poisson's ratio on the vertical stress, and the relationship between θ and modulus ratio and thickness was established. The action depth was defined as the depth at which the stress decreases to a certain value. Results show that parameters such as the weight, height of the hammer, and the radius of the plate have effects on the maximum load. The degree of stress attenuation in a single layer structure depends only on the ratio of depth to plate radius. Stress attenuation becomes faster with the increase of the upper layer modulus, while it slows down with the increase of underlying layer modulus. Poisson's ratio almost has no effect on the stress attenuation. The action depth of PFWD is different with different configurations (hammer weight, plate radius), which is recommended in accordance with analysis result and engineering practice, and reasonable parameters configuration was then proposed based on the stiffness ratio of the tested layer and the underlying layer.

Keywords: highway engineering; semi-rigid base; PFWD; stress attenuation; action depth; configuration parameters

便携式落锤弯沉仪 (portable falling weight deflectometer, PFWD) 或称轻型落锤弯沉仪 (light weight deflectometer, LWD), 作为一种用于测量包括路基 (单层体系) 和基层 (双层体系) 刚度的快速无损检测仪器^[1], 研究其影响深度是确定 PFWD 配置参数与被检测对象相匹配的关键问题.

数值模拟方法采用有限元软件对 PFWD 的测试过程进行动态仿真模拟, 分析不同影响因素对测试结果的影响^[2-3]. 文献[4]利用刚性承载板中心下弹性半空间体 z 轴上的应力 σ_z 来分析落锤自由下落对土石填料产生的冲击影响深度. 文献[5]通过室内填筑试验, 研究 LWD 作用影响深度为 267 ~ 280 mm. 文献[6]在室内填筑的细粒土体中埋设土压力盒, 结果表明落锤冲击能量 70% 消耗在 40 ~ 50 cm 土层内, 该研究成果被写进了《铁路工程土工

收稿日期: 2018-03-08
作者简介: 王 龙 (1968—), 男, 博士, 副教授
通信作者: 王 龙, hitwwll@sina.com

$$p(r) = \begin{cases} \frac{p}{2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{\delta^2}}}, r < \delta; \\ 0, r > \delta. \end{cases}$$

式中 $p(r)$ 为压应力.

由文献[11]可知刚性承载板下弹性半空间体对称轴(z 轴)上竖向应力 σ_z 解析解为

$$\sigma_{z,r=0} = -\frac{p}{2} \frac{1 + 3\frac{z^2}{\delta^2}}{(1 + \frac{z^2}{\delta^2})^2}. \tag{2}$$

从式(2)中可以看出,对于单层结构,对称轴上竖向应力只与荷载大小、板半径和深度有关,图3为不同板半径和不同平均荷载集度下板底中心处的竖向应力曲线.

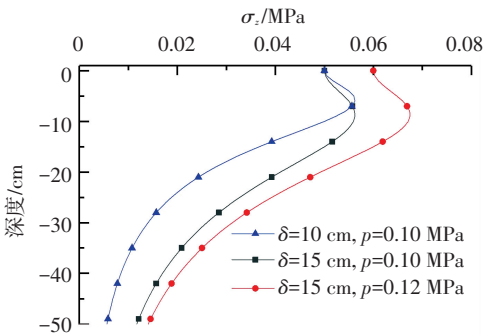


图 3 不同板半径 δ 和不同荷载平均集度 p 下板底中心竖向应力曲线

Fig.3 Vertical stress curves at the bottom under different plate radii and loads

从图3可以看出,板中心处竖向应力沿着深度方向均是先增加后减小, $z=0$ 和 $z=\delta$ 处竖向应力均为 $-p/2$. 同一板半径,荷载越大,竖向应力曲线右移,曲线形式是相似的,如 $\delta=15\text{ cm}$ 的两条曲线;对于相同荷载,半径越小, σ_z 减小更快,如 $p=0.10\text{ MPa}$ 的两条曲线.

2.2 应力余量

应用PFWD对单层结构(路基)进行检测时,其测试深度即落锤自由下落对其产生的冲击影响深度,是需要考虑的一个重要问题. 利用刚性承载板中心下弹性半空间体 z 轴上的应力 σ_z 来分析落锤自由下落对路基产生的冲击影响深度,从式(2)可知荷载 p 变化时, σ_z 的曲线形式总是相似的. 定义应力余量 θ 为刚性承载板中心下弹性体 z 轴上的应力 σ_z 与表面中心处(即 O 点)的应力之比,即

$$\theta = \frac{\sigma_{z,r=0}}{\sigma_{z=0,r=0}} \times 100\%. \tag{3}$$

由式(2)、(3)得到,弹性半空间体对称轴上应力余量 θ 为

$$\theta = \frac{1 + 3\frac{z^2}{\delta^2}}{(1 + \frac{z^2}{\delta^2})^2} \times 100\%. \tag{4}$$

这样仅需要研究 θ ,便可知 σ_z 的深度分布,由式(4)可以反算出影响深度 z ,计算公式为

$$\frac{z}{\delta} = \sqrt{\frac{3 - 2\theta + \sqrt{9 - 8\theta}}{2\theta}}.$$

由此可见,应力余量 θ 只取决于深度与板半径相对大小 z/δ ,如 $\theta=30\%$,即衰减70%,此时 $z=2.88\delta$;若 $\theta=10\%$,即衰减90%,此时 $z=5.32\delta$. 图4为半空间体(单层) θ 与 z/δ 的关系曲线.

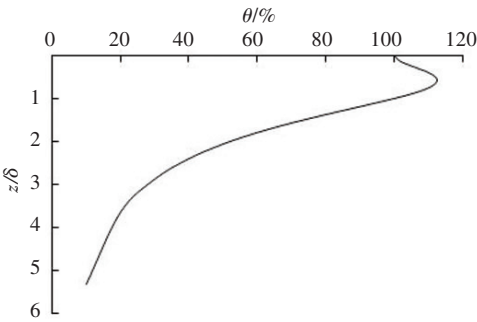


图 4 应力余量 θ 与 z/δ 的关系

Fig.4 Relationship between θ and z/δ

从图4中看出,竖向应力必然遵循这样的衰减规律:并不是自板底($z=0$)沿着深度方向一直单调衰减,而是在厚度为 $0 \sim \delta$ 时,应力是一个先增加后减小的过程,此后在 $z=\delta$ 时,竖向应力的大小与板底中心竖向应力相等,而后是沿着深度方向一直衰减,图4描述了半空间体任意荷载,任意板半径作用下对称轴上的竖向应力衰减规律.

3 双层结构应力衰减分析

应用PFWD对底基层(基层)进行试验检测时,此时路面力学模型对应为双层结构,如图5所示. 层与层在泊松比、模量存在差异,因而应力衰减必然要考虑到这些参数的影响. 对于多层结构,不能用初等函数表示出应力分量解析解,为此需要通过COMSOL软件建立模型进行因素影响分析.

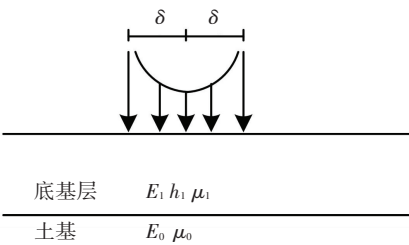


图 5 刚性荷载作用下双层结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of double-layer structure under rigid load

3.1 模型建立

建立路面三维实体模型,图 6 为模型及网格划分. 荷载圆位于表面中心位置,半径用 δ 表示,荷载集度用 p 表示,模型尺寸为 $10\delta \times 10\delta \times H_i$ 的长方体,分为两层,其中 $i = 0$ 或 1 , $i = 0$ 代表下承层, $i = 1$ 代表检测层,两层结构材料模量、泊松比分别用 E_i, μ_i 表示,层间设为连续接触,下层底为固定约束,四周均为辊轴约束.

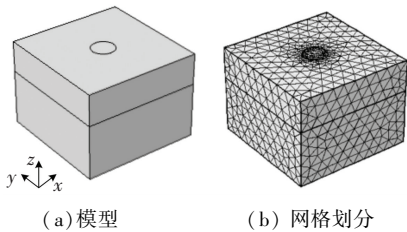


图 6 模型及网格划分

Fig.6 Model and mesh

3.2 应力余量与结构层模量的关系

当 PFWD 用于半刚性基层压实质量控制时,新摊铺的混合料铺筑在路基之上,刚压实完毕的模量(刚度)尚处于一个低水平,随着养生开始,刚度迅速增长,7 d 养生后模量会增长 10~20 倍. 对于双层结构,由于上下层模量、泊松比往往不同,尤其是模量变化大,需要研究其对应力衰减的影响. 本节模型设定 $\delta = 15\text{ cm}$, $p = 0.1\text{ MPa}$, $H_0 = 1.5\text{ m}$, $H_1 = 2\delta = 30\text{ cm}$, $\mu_0 = \mu_1 = 0.35$.

3.2.1 上层模量对应力衰减的影响

设定下层模量 $E_0 = 40\text{ MPa}$,上层模量 $E_1 = 40 \sim 5\,000\text{ MPa}$,以此研究随着半刚性基层模量的增长,应力衰减程度的变化规律,分析结果如图 7 所示. 从中可以看出,以上、下层模量相等($E_1 = E_0$)时作为参考,当上层模量大于下层模量时($E_1 > E_0$),衰减曲线向左偏移,即加速衰减,体现了半刚性基层扩散应力的作用,半刚性基层从摊铺压实至养生期结束,正是模量从低水平增长到高水平过程,这期间下层(路基)模量基本稳定,上下层之间的模量存在

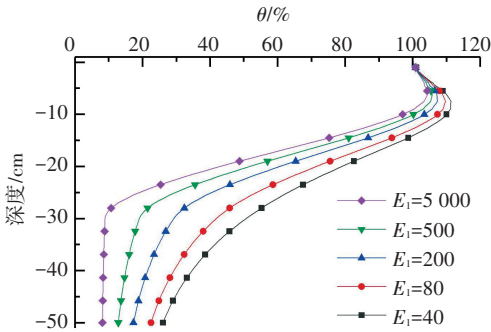


图 7 上层模量 E_1 对竖向应力衰减的影响 ($E_1 \geq E_0$)

Fig.7 Effect of upper layer modulus E_1 on vertical stress ($E_1 \geq E_0$)

显著差异,因而 PFWD 用于压实质量检测与养生结束后板体质量检测时的影响深度必然不同.

3.2.2 下层模量对应力衰减的影响

以上分析均是假定下层为路基,因此模量很小且变化不大,而工程中底基层施工验收合格后,便是基层施工,或是基层分层铺筑,下层对应就是下基层. 这样下层模量(刚度)就会处在较高水平且变化较大. 为模拟材料铺筑在不同结构层之上,设上层模量 $E_1 = 40\text{ MPa}$ (表征压实完毕后的基层),下层模量 $E_0 = 40 \sim 5\,000\text{ MPa}$,以此研究下层刚度变化对应力衰减程度的影响,分析结果如图 8 所示.

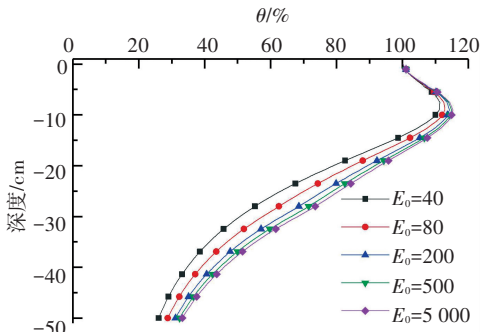


图 8 下层模量 E_0 对竖向应力衰减的影响 ($E_1 \leq E_0$)

Fig.8 Effect of underlying layer modulus E_0 on vertical stress ($E_1 \leq E_0$)

从图 8 可见,以上、下层模量相等时($E_0 = E_1$)作为参考,随着下层模量的增长,衰减曲线向右偏移,即延缓衰减,表明下承层刚度越大,层底竖向应力越大,PFWD 落锤作用影响深度会变大,表明随着道路施工层位越来越高,对于底基层与基层压实质量控制的 PFWD 影响深度也不同.

3.2.3 相对模量对应力衰减的影响

从以上单变量的分析可见,应力衰减是与上下层相对模量大小有关的,为此设定不同的上下层模量比 E_1/E_0 和不同的层厚 H_1/δ ,计算上层层底($z = -H_1$)的竖向应力 σ_z ,研究不同模量比对层底应力余量 θ 的影响规律,模型计算结果如图 9 所示.

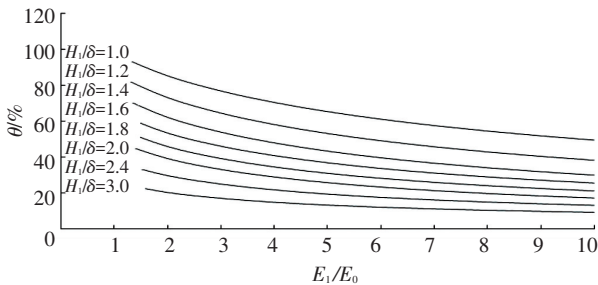


图 9 双层结构下应力余量 θ 计算图

Fig.9 Calculation of θ under double-layer structure

图 9 为不同层厚 H_1/δ 下应力余量 θ 随模量比 E_1/E_0 的衰减曲线. 整体上看,对于特定的层厚,随

着 E_1/E_0 的增大,应力余量 θ 逐渐减小;对于特定的 E_1/E_0 ,随着层厚的增加,应力余量也随之减小。

当 $E_1/E_0 = 1$ 时,即模型退化为单层结构, $H_1/\delta = 1$ 时,模型计算结果 $\theta = 97\%$,而将 $z/\delta = -H_1/\delta = -1$ 代入式(4),得单层结构的理论应力余量 $\theta = 100\%$,模型计算结果与理论接近,只有 3% 的偏差。同样当 $H_1/\delta = 2$ 时,模型计算结果 $\theta = 49\%$,理论应力余量 $\theta = 52\%$,模型计算结果与理论很接近,模型计算结果可以满足工程应用需要。

3.3 泊松比对应力衰减的影响

以上分析中,均是假定上下层泊松比是相等的,工程实际中,基层材料往往采用半刚性材料,泊松比的变化范围很小。为研究泊松比对衰减的影响,图 10 为不同泊松比的竖向应力衰减曲线 ($H_1 = 30\text{ cm}$, $\delta = 15\text{ cm}$, $E_0 = 40\text{ MPa}$, $E_1 = 500\text{ MPa}$, $\mu_0 = 0.4$)。

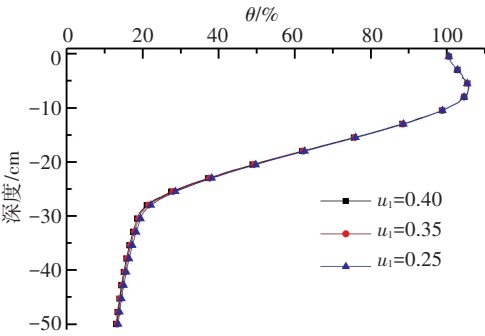


图 10 泊松比 μ 对竖向应力衰减的影响

Fig.10 Influence of Poisson's ratio on vertical stress

从中可以看出,检测层的泊松比在 0.25~0.40 之间变化时,竖向应力衰减曲线几乎重合在一起,即泊松比对应力衰减影响极小,在实际工程应用中可以忽略不计。

4 影响深度分析

铁路路基领域研究者通过在土体不同深度中埋设压力盒试验研究 PFWD 的影响深度^[6],其施加承载板板下荷载集度固定为 0.1 MPa(该值被认为是列车高速运行时对路基产生的最大动应力),以应力衰减 70% 的深度作为影响深度,则影响深度为 40 cm 左右^[7,12-13],满足路基施工中填土每碾压 30 cm 厚度检测一次的要求。铁路领域应用的 PFWD 一般是 ZFG 或 LFG 型,采用标准配置:直径为 30 cm 承载板,落锤 10 kg,下落高度固定约 72.5 cm。

在道路工程领域中,目前很多研究者将其用在路基压实质量检测中,采用标准配置时,其影响深度均沿用铁路领域中的规定。当将 PFWD 应用到(底)基层检测中,力学模型变为双层结构,上下层存在模量差异,表面施加的荷载水平自然要随之改变。同时,施

加不同的荷载水平必然产生不同的影响深度。考虑表面施加的荷载水平不同,若仍按照应力衰减百分比定义影响深度显然是不准确的,相同的衰减百分比,施加的荷载不同,影响深度不同,应当以应力衰减至某一绝对水平来定义影响深度。铁路路基领域中以应力衰减 70%,即对称轴 z 轴上的竖向应力从 0.05 MPa 衰减至 0.015 MPa 的深度为影响深度,为保持与路基检测影响深度一致,本研究规定对称轴 z 轴竖向应力衰减至 0.015 MPa 时的深度为影响深度。

本研究所用的 PRIMA 100 配备有 10 kg 和 15 kg 重锤,承载板有直径 10、20、30 cm 可选,通过改变 PFWD 的配置(锤重、板半径组合)即可施加不同大小的表面荷载 p ,板底中心竖向应力沿着深度向下衰减,令竖向应力衰减至 0.015 MPa 可计算出该配置下的荷载影响深度。表 1 为计算得到的 PFWD 不同配置下的道路结构层(基层)影响深度。

表 1 PFWD 检测影响深度

Tab.1 Action depth of PFWD

E_1/E_0	影响深度/cm			
	$\delta = 10\text{ cm}$		$\delta = 15\text{ cm}$	
	$m = 10\text{ kg}$	$m = 15\text{ kg}$	$m = 10\text{ kg}$	$m = 15\text{ kg}$
<1	>45	>50	>43	>48
1~2	38~45	43~50	36~43	40~48
2~5	30~38	34~43	27~36	32~40
5~10	24~30	26~34	21~27	24~32

注:落高 72.5 cm。

计算过程分 3 步:1) 确定施加荷载水平;2) 确定影响深度所对应的应力余量值;3) 结合 E_1/E_0 的值,从图 9 中读取影响深度值,比如:当板半径 $\delta = 15\text{ cm}$,锤重 $m = 15\text{ kg}$,代入式(1)得 $p = 0.122\text{ MPa}$, $\theta = 0.015/(0.122/2) = 24.5\%$,若 $E_1/E_0 = 2$,查图 9 可知交点处于 $H_1/\delta = 2.6 \sim 2.8$,即 $H_1 = 39 \sim 42\text{ cm}$,以此类推。

5 PFWD 参数配置

影响 PFWD 测量结果的配置参数有锤重、落高、承载板尺寸,最显著的因素是承载板尺寸和锤重,而落锤高度对 PFWD 模量影响很小可忽略。此外还有承载板与材料层之间的接触,良好接触才能确保测试结果的准确^[14-15]。在实际中频繁改变高度不利于维持稳定的荷载水平,且高度对检测的模量值影响不大,将落锤高度固定为 72.5 cm 不变,且仅通过改变锤重和承载板尺寸来施加不同荷载水平。10 cm 的承载板尺寸过小,基层混合料公称最大粒径一般为 26.5~31.5 mm,此接触面积不具代表性,而且操作中一旦落锤提升,重心过高不利于设备保持平稳放置,影响测量准确性,因而只推荐选用

20 cm 以上的承载板。

PFWD 应用广泛的领域之一就是压实质量控制, 目前研究和应用主要针对单层结构的路基, 其结果无法直接应用到公路工程中双层结构的底基层(基层)结构, 以下分类论述不同工况下配置参数选择。

1) 路基土上摊铺底基层时(压实未养生), 此时水稳底基层模量接近或稍高于下承层(路基土)模量, 层厚度为 20~30 cm, 结合表 1 的影响深度, 采用标准配置即可(锤重 10 kg, 30 cm 承载板)。

2) 底基层上新铺压实未养生的基层, 下层的底基层和路基, 可视为整体复合模量接近底基层的基层, 新铺层刚度远低于下承层的刚度($E_1/E_0 < 1$), 且压实未养生层刚度还处于低水平, 为了防止荷载水平过大或材料含水量过大产生塑性变形, 同时考虑到摊铺层厚度在 20~30 cm, 标准配置即可满足。

3) 对于养生 7 d 后的底基层板体刚度检测, 底基层模量相较路基大很多, 上下层模量比 E_1/E_0 处在 5~10 之间, 小尺寸承载板与底基层顶面可以更容易紧密接触, 提高检测结果的准确可靠性, 推荐锤重 10 kg 和 20 cm 承载板组合, 而对于养生 7 d 后的基层板体刚度检测, 该组合配置仍可满足。

综上分析, PFWD 主要应用于基层压实质量控制和板体刚度检测两方面, 配置锤重 10 kg, 对应的承载板直径分别为 30 cm 和 20 cm。

6 结 论

1) 定义应力余量 θ 为刚性承载板对称轴(z 轴)上的应力 σ_z 与表面中心处(即 $\sigma_{z=0}$) 的应力之比, 单层结构中应力衰减程度的大小只取决于深度与板半径相对大小 z/δ , 双层结构中还取决于模量比 E_1/E_0 , 但与表面施加的荷载大小无关。

2) 荷载中心处的竖向应力 σ_z , 并不是自板底($z = 0$) 沿着深度方向一直单调衰减, 而是在厚度为 $0 \sim \delta$ 时, 应力 σ_z 是一个先增加后减小的过程, 此后在 $z = \delta$ 时, 竖向应力的大小与 $z = 0$ 的竖向应力相等, 此后沿着深度方向一直衰减。

3) 以对称轴竖向应力衰减至 0.015 MPa 时的厚度作为影响深度, 计算出了不同 PFWD 配置下的基层结构适宜检测深度, 结合工程实际推荐了配置参数组合, 用于新铺层检测推荐锤重 10 kg 和 30 cm 承载板, 养生 7 d 后的底基层(基层)的刚度检测, 推荐锤重 10 kg 和 20 cm 承载板。

参考文献

[1] STEINERT B C, HUMPHREY D N, KESTLER M A. Portable falling weight deflectometer study; NETCR52[R]. Maine: University of Maine, 2005

[2] 周文. PFWD 测试工作特性仿真研究[J]. 公路工程, 2009, 34(6):112
ZHOU Wen. Research on PFWD simulation technology[J]. Highway Engineering, 2009, 34(6):112

[3] 李跃军. 路基强度的快速无损检测、评价与控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011
LI Yuejun. Research on rapid nondestructive detection, evaluation and control of subgrade strength[D]. Changsha: Central South University, 2011

[4] 王复明, 渠建伟, 王运生. 便携式落锤弯沉仪 PFWD 在土石填料压实质量控制中的应用[J]. 铁道建筑, 2008, 415(9):67
WANG Fuming, QU Jianwei, WANG Yunsheng. Application of PFWD (portable falling weight deflectometer) to quality control over compactness of filled soil-stone[J]. Railway Engineering, 2008, 415(9):67

[5] NAZZAL M D. Field evaluation of in-situ test technology for Q_c/Q_A during construction of pavement layers and embankments[D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2003

[6] 李恕放. DBM 型动态变形模量测试仪的研制及其工程应用[D]. 成都:西南交通大学, 2005
LI Nufang. The development of the measuring instrument for dynamic deformation modulus and its application in engineering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005

[7] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程:TB 10102—2010[S]. 北京:中国铁道出版社, 2011:423
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for soil test of railway engineering: TB 10102—2010[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011:423

[8] ELHAKIM A F, ELBAZ K, AMER M I. The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction[J]. HBRC Journal, 2014, 10(3):298

[9] 查旭东, 袁盛杰, 肖秋明. 冲击荷载作用下的路基动力反算[J]. 长沙理工大学学报, 2014, 11(4):1
ZHA Xudong, YUAN Shengjie, XIAO Qiuming. Subgrade dynamic backcalculation under impact loading[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 11(4):1

[10] 唐伯明, 李锦华, 谭忠明. PHONIX FWD 量测性能评价[J]. 华东公路, 1995, 6:24
TANG Boming, LI Jinhua, TAN Zhongming. Evaluation of PHONIX FWD measurement performance[J]. East China Highway, 1995, 6:24

[11] 郭大智. 层状弹性体系力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001:64
GUO Dazhi. Layered elastic system mechanics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001:64

[12] Road and Transportation Research Association. Supplementary technical terms and conditions of contract and guidelines for earthworks in road construction; ZTVE-StB 94[S]. Cologne: Earthworks and Foundation Engineering Task Force, 1994

[13] GEORGE V, KUMAR A. Studies on modulus of resilience using cyclic tri-axial test and correlations to PFWD, DCP, and CBR[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(11):976

[14] STAMP D H, MOONEY M A. Influence of lightweight deflectometer characteristics on deflection measurement[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(2):216

[15] MAKWANA P. Structural evaluation and quality assurance of flexible pavement using light weight deflectometer[J]. Journal of Civil & Structural Engineering, 2016, 6(3):160 (编辑 魏希柱)