

# LWD在建筑垃圾路基压实检测中的应用

刘明, 王晨, 张磊\*

山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南

收稿日期: 2022年4月19日; 录用日期: 2022年5月17日; 发布日期: 2022年5月24日

## 摘要

为了验证轻型落锤弯沉仪(LWD)在建筑垃圾路基压实检测的适用性, 选用不同碾压遍数, 对路基进行动态回弹模量和压实度定点检测, 验证其相关性。得到以下结论: 在填筑厚度为30 cm时, 建筑垃圾路基在碾压6遍后, 即可达到96%的压实度, 在填筑2层的情况下, 动态回弹模量可达到96.3 MPa; 使用PFWD得到的动态回弹模量与灌砂法得到的压实度相关系数为0.8506, 有良好的正相关性, 表明在建筑垃圾路基的工程建设中, LWD可以代替灌砂法作为便捷、无损的压实度检测的手段。

## 关键词

LWD, 建筑垃圾, 压实度, 碾压遍数, 动态回弹模量

# Application of LWD in Compaction Detection of Construction Waste Subgrade

Ming Liu, Chen Wang, Lei Zhang\*

Shandong Hi-Speed Engineering Construction Group Company Limited, Jinan Shandong

Received: Apr. 19<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 17<sup>th</sup>, 2022; published: May 24<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to verify the applicability of Light Weight Deflectometer (LWD) in the compaction detection of construction waste subgrade, different rolling times are selected to detect the dynamic modulus of resilience and compactness of Subgrade at fixed points. The following conclusions are obtained: when the filling thickness is 30 cm, the compactness of construction waste subgrade can reach 96% after rolling for 6 times, and the dynamic resilience modulus can reach 96.3 mpa when filling two layers; The correlation coefficient between the dynamic resilience modulus obtained by

\*通讯作者。

PFWD and the compactness obtained by sand filling method is 0.8506, which has a good positive correlation, indicating that PFWD can replace sand filling method as a convenient and nondestructive means of compactness detection in the engineering construction of construction waste subgrade.

## Keywords

LWD, Construction Waste, Degree of Compaction, Rolling Times, Dynamic Modulus of Resilience

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

建筑垃圾的资源化也正逐步成为具有广阔前景的新兴产业，国外发达国家通常以再生骨料的形式对建筑废弃物进行循环利用，其中 68% 的再生骨料用于道路工程和建筑物基础[1] [2] [3]。我国在建筑垃圾资源化利用的工作开展上虽然起步比较晚，但是，近年来通过一些政策法规的颁布，也取得了一些成果，建筑垃圾从前期的简单、粗放的处理方式，逐步转变为系统、规范化。在建筑垃圾造景、环保砖生产、再生骨料生产和路基填筑方面应用广泛，具有极大社会经济价值[4] [5]。在实际应用过程中发现用建筑垃圾填筑的路基并没有一套简洁有效的压实度检测方法。与传统普通填料相比，建筑垃圾内部组成成分复杂，砖、混凝土、砂浆等含量很不均匀，造成室内试验确定的最大干密度和最佳含水量离散性比较大，现场用灌砂法进行压实度检测的离散性更大，多次出现超百或压实度不足的情况，无法有效指导大面积施工。所以在施工过程中采用较为直观的轮迹法和沉降观测法，压实度只能作为参考[6] [7] [8]；由于材料本身的不均匀性以及各种材料吸水率的不同，造成最佳含水量范围比较宽，都给现场施工控制带来很大困难。所以在现场仅依靠前期调研和室内试验无法完全明确其工程特性，很难掌控现场施工质量。目前有大量学者[9] [10]采用 LWD 检测方法运用到路基压实质量检测中，轻型落锤弯沉仪(LDW)是目前较为便捷的道路路基检测设备，与传统检测方法相比，具有精度高、操作简便、安全可靠等优点。

本文通过建立 LDW 的动态回弹模量与压实度的关系，提出以动态回弹模量为指标的建筑垃圾路基压实度评价方法，达到建筑垃圾路基压实检测的快速、准确的目的。为建筑垃圾在道路工程中的应用和推广提供更准确的数据支撑。

## 2. LDW 检测原理

LDW 测试原理是将一定重量的落锤提升至固定高度，然后释放自由下落，落锤冲击置放在路基表面的承载板和底座并产生冲击荷载，在冲击荷载作用下，承载板与路基表面产生竖向位移。由此，压力传感器和位移传感器将荷载和位移的时程数据记录下来，并传输到计算机数据处理软件中，从而根据压力和位移的峰值确定路基动弹性模量。LDW 落锤冲击的加载卸载时间很短，一般在 20 ms 以内，虽然路基力学特性具有非线性性质，但在 LDW 冲击荷载作用下，塑性变形来不及产生，所以，LDW 实测的路基竖向变形以回弹变形为主，大量的现场检测结果表明，LDW 荷载与变形关系近似线弹性。因此，根据 LDW 工作原理，可以采用圆形垂直刚性分布荷载作用下的弹性半空间理论分析计算路基动模量值，并可近似为路基回弹模量值，同时，进行动态模量计算时有如下假设：

1) 采用弹性半空间体 Boussinesq 理论, 认为土基为弹性半空间体, 计算公式如下所示:

$$E_p = \frac{\pi}{4} \times \frac{2p\delta(1-\mu^2)}{l} \quad (1)$$

式中:  $E_p$ ——手持式落锤弯沉仪所测动态变形模量;  $p$ ——承载板所受圆形均布荷载为 0.1 MPa;  $\delta$ ——为承载板半径取 0.15 m;  $\mu$ ——土的泊松比取 0.35;  $l$ ——为承载板下变形(mm)。

本试验所用的 LDW 仪器锤子的重量和下落重量分别为 10 kg 和 85 cm, 加载板的直径为 30 cm。

### 3. 现场材料特性及检测方案

#### 3.1. 现场材料特性

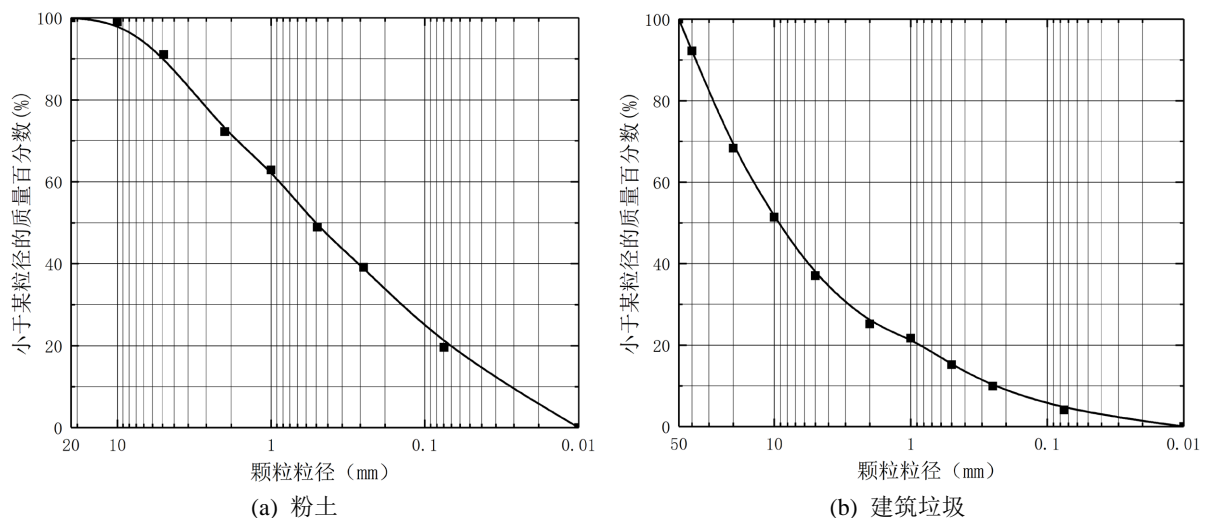
分别对素土、建筑垃圾的工程性质进行室内试验分析, 结果见表 1。

**Table 1.** Basic physical properties of soil

**表 1.** 素土基本物理性质

液限	塑限	塑性指数	最大干密度	最佳含水率	土的分类
%	%	%	g/cm <sup>3</sup>	%	
31.4	19.4	12	1.76	15.1	低液限黏土
42.1	21.1	21	2.23	9.3	/

分别对试验材料颗粒级配进行分析, 结果见图 1。所选素土最大粒径小于 20 mm, 不均匀系数  $C_u = 35.3$ , 曲率系数  $C_c = 1.49$ , 级配良好。



**Figure 1.** Particle gradation analysis

**图 1.** 颗粒级配分析

所选建筑垃圾主要有破碎混凝土块和砖块组成。最大粒径小于 50 mm, 粒径大于 4.75 mm 的颗粒含量为 64.5%, 小于 0.075 mm 的颗粒含量为 4.1%, 满足《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》中粒径大于 4.75 mm 的颗粒含量不小于 50%、小于 0.075 mm 的颗粒含量不小于 10%的规定。建筑垃圾不均匀系数  $C_u = 58.2$ , 曲率系数  $C_c = 2.1$ , 当  $C_u > 5$ , 且  $1 < C_c < 3$  时, 可以判断其级配良好。

### 3.2. 试验及检测方案

选取山东某高速路段为试验段, 长度为 200 m, 每 10 m 布置一个测点检测压实度和动态回弹模量。路基结构为土基 + 60 cm 建筑垃圾。粉土路基的压实度不小于 94%; 上方填筑 2 层建筑垃圾路基, 建筑垃圾路基每层 30 cm。每层建筑垃圾碾压遍数为 6 遍, 且最终压实度不小于 96%。同时为了验证建筑垃圾路基的性能, 选用纯素土路基进行对比实验。

因所采用的建筑垃圾粒料尺寸较大, 所以在碾压时采用先静压、后弱振、再强振的方式, 即先采用钢轮压路机静压 2 遍, 再弱振 2 遍。在强振作用时, 如过度碾压则将对建筑垃圾粒料产生破坏, 为了确定强振碾压遍数, 在碾压过程中, 每碾压 2 遍进行 LDW 和压实度检测。

## 4. 现场数据分析

### 4.1. 动态回弹模量和压实度分析

通过对现场试验段不同层位进行了 LDW 和压实度检测, 结果汇总到表 2 和表 3。

**Table 2.** Summary of LDW and compactness data of the first layer of construction waste subgrade

**表 2.** 第一层建筑垃圾路基 LDW 和压实度数据汇总

桩号	建筑垃圾第一层					
	碾压 2 遍		碾压 4 遍		碾压 6 遍	
	压实度/%	动态回弹模量/MPa	压实度/%	动态回弹模量/MPa	压实度/%	动态回弹模量/MPa
K0+000	89.4	34	92	55	96.9	88
K0+010	88.3	36	91.9	60	96.9	81
K0+020	89.2	35	91.1	59	96.4	83
K0+030	88.4	35	93.2	51	96.1	75
K0+040	89.7	43	93	67	96	70
K0+050	90.5	43	91	51	96.6	86
K0+060	89.7	38	93.8	56	96	86
K0+070	89.9	42	92.1	55	96.3	82
K0+080	89.7	37	93.3	61	96.6	66
K0+090	90.5	30	93.8	55	96.6	78
K0+100	88.1	41	92.4	53	96.2	77
K0+110	88.7	48	92.3	57	96.2	78
K0+120	89.2	37	91.9	48	96.3	85
K0+130	89.4	34	92	42	96.4	70
K0+140	90.3	27	91.3	55	96.1	72
K0+150	89.5	38	92.3	57	96.3	75
K0+160	88.4	36	92.9	54	97	83
K0+170	88.7	42	91.3	55	96.7	90
K0+180	90	36	93.1	66	96.8	70

Continued

K0+190	90.4	45	91.5	65	96.3	93
K0+200	89	44	93.2	57	96.6	88

**Table 3.** Summary of LDW and compactness data of the second layer of construction waste subgrade  
**表 3.** 第二层建筑垃圾路基 LDW 和压实度数据汇总

桩号	建筑垃圾第二层					
	碾压 2 遍		碾压 4 遍		碾压 6 遍	
	压实度/%	动态回弹模量 /MPa	压实度/%	动态回弹模量 /MPa	压实度/%	动态回弹模量 /MPa
K0+000	88.2	74	93.8	83	96.4	98
K0+010	88.4	74	94.7	86	96.3	92
K0+020	90.9	70	93	89	96.8	97
K0+030	89.3	79	93.8	83	96.8	97
K0+040	89.4	69	93.1	76	96.6	95
K0+050	89.6	68	92.6	84	96.1	96
K0+060	90.6	72	92.8	75	96.9	101
K0+070	89	73	95	86	96.1	96
K0+080	88.7	69	93	80	96.3	92
K0+090	89.4	64	91.6	85	97	97
K0+100	88.5	70	91.3	78	96.2	103
K0+110	88.9	64	94.3	87	96.5	94
K0+120	88.6	69	94.8	81	97	99
K0+130	89.1	64	93.3	83	96.4	95
K0+140	89.1	72	93.1	84	96.3	94
K0+150	88.8	77	91	80	96.3	95
K0+160	88	74	91.5	83	96.1	97
K0+170	89	66	93.3	83	96	93
K0+180	88.7	71	94.8	88	96.1	91
K0+190	89.5	76	94.9	89	96.4	91
K0+200	90.4	77	92	82	97	103

通过图 2 可以发现随着碾压遍数的增加, 建筑垃圾路基的动态回弹模量呈增加趋势, 第一层建筑垃圾路基在碾压 6 遍后, 动态回弹模量达到了 74.6 MPa, 压实度达到了 96.4%; 第二层建筑垃圾路基在碾压 6 遍后, 动态回弹模量达到了 96.3 MPa, 压实度达到了 96.5%。从结果上来看, 在强振压实 6 遍后, 建筑垃圾路基能达到 96% 的压实度, 从而可以判断, 建筑垃圾路基的碾压工艺为采用钢轮压路机静压 2 遍, 再弱振 2 遍, 最后强振 6 遍即可。

总体上来说, 第二层的动态回弹模量要高于第一层, 但是第二层建筑垃圾路基碾压 2 遍后的动态回弹模量低于第一层建筑垃圾路基碾压 6 遍, 这是因为在碾压 2 遍时, 建筑垃圾还没完全形成稳定骨架结

构, 强度没有完全形成。与纯素土路基相比, 在达到压实度 96% 时, 素土路基的动态回弹模量仅为 46.3 MPa, 远低于建筑垃圾路基的动态回弹模量。说明建筑垃圾具有更好地承载能力。同时《建筑垃圾再生材料路基施工技术规范》规定, 高速公路及一级公路的路基动态回弹模量不应小于 30 MPa, 建筑垃圾路基完全满足规范要求。

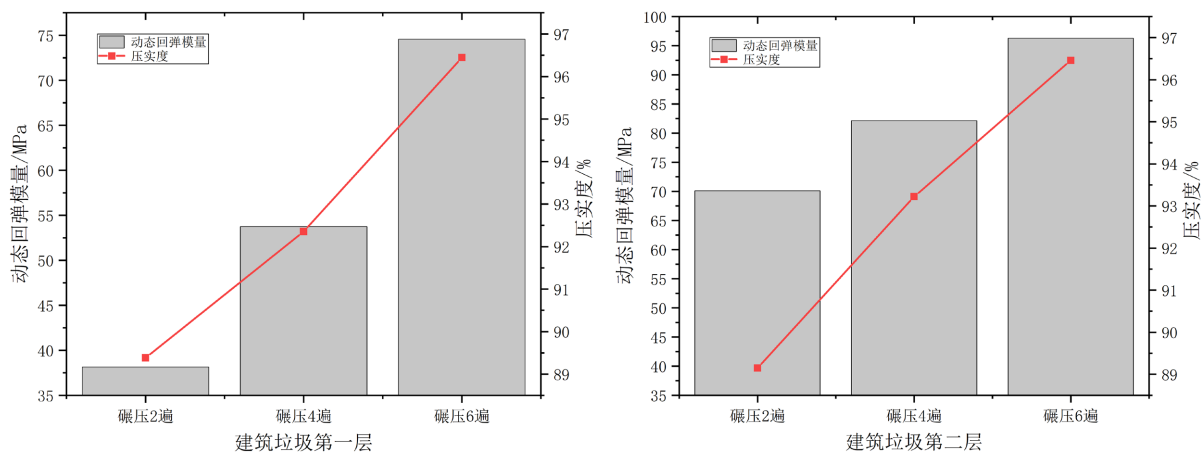


Figure 2. Analysis of dynamic resilient modulus and compactness under different rolling times

图 2. 不同碾压遍数下的动态回弹模量和压实度分析

#### 4.2. LDW 与压实度相关性

为了验证 LDW 与压实度的相关性, 在施工过程中在不同碾压遍数时分别采用灌砂法和 LDW 定点测试, 得到不同压实度下的动态回弹模量, 并分析其相关性, 通过对比不同层位的数据, 得到以下关系。

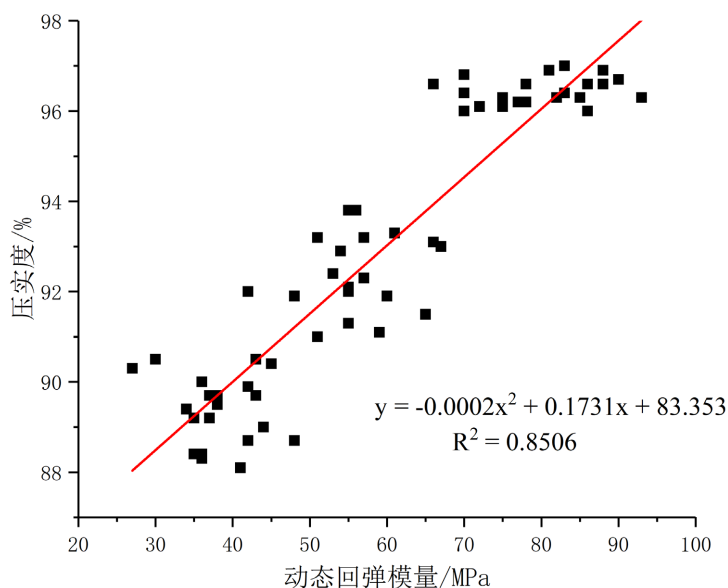


Figure 3. Correlation Analysis between compactness and dynamic resilience modulus of construction waste subgrade

图 3. 建筑垃圾路基压实度与动态回弹模量相关性分析

通过图 3 可以发现, 随着压实度的增加, 动态回弹模量也随之增加, 建筑垃圾路基的压实度和动态模量有明显得正相关性, 于是对两者关系进行拟合, 得到以下拟合公式

$$y = -0.0002x^2 + 0.1731x + 83.353 (R^2 = 0.8506)$$

从拟合公式可以看出  $R^2$  大于 0.8, 表现出良好的相关性, 其关系曲线可以在今后工程中运用 LDW 检测压实度提供了数据支撑。

## 5. 结论

1) 通过现场对建筑垃圾路基进行 LDW、压实度检测, 发现当强振碾压 6 遍时, 即能达到 96% 的压实度, 当填筑两层建筑垃圾后, 动态回弹模量提升到 96.3 MPa, 远大于粉土路基的 46.3 MPa, 满足规范要求的 30 MPa。

2) 通过施工过程中在不同碾压遍数时分别采用灌砂法和 LDW 定点测试, 发现两者相关性为 0.8506, 表现出良好的相关性, 表明在建筑垃圾路基的工程建设中, LDW 可以代替灌砂法作为便捷、无损的压实度检测的手段。

## 参考文献

- [1] 夏伟龙, 田军, 张博. 建筑垃圾在高速公路路基中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8(5): 70-72.
- [2] 张军辉, 丁乐, 张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 135-154.
- [3] 吴贤国, 李惠强, 杜婷. 建筑施工废料的数量、组成与产生原因分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2000, 28(12): 96-97.
- [4] 张玉斌, 毛洪强. 建筑垃圾路基填料试验研究与应用[J]. 安徽建筑, 2017, 24(6): 181-183.
- [5] 袁帅, 张磊, 高岳峰, 等. 粗粒式建筑垃圾路基材料工程特性与应用研究[J]. 材料科学, 2021, 11(10): 1076-1081. <https://doi.org/10.12677/ms.2021.1110124>
- [6] 文利, 钱劲松, 房浩. PFWD 检测细砂路基回弹模量的现场试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3): 179-181+191.
- [7] 郭成超, 王鹏. 便携式弯沉仪快速检测路基压实度的应用研究[J]. 路基工程, 2008(6): 131-132.
- [8] 方涛, 李跃军. PFWD 在路基回弹模量检测中的应用[J]. 公路工程, 2010, 35(3): 123-124+135.
- [9] 王龙, 解晓光, 姜立东. 基于 PFWD 碎石土路基压实快速检测与均匀性评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 66-71.
- [10] 范磊. 基于 PFWD 的土石混填路基压实质量快速检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.