

基于落球法测试土基压实度的技术研究

侯建军¹, 闫涛¹, 杨森¹, 刘军¹, 李科²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213;

2. 四川升拓检测技术股份有限公司, 四川 成都 610045)

摘 要:对于施工现场土基压实度的检测方法,最常用的是灌砂法和灌水法,但这两种方法均属于破坏检测,费时、费力、代表性差。阐述了对落球法测试土基压实度适应性进行的研究。采用落球式回弹仪对土基压实度进行检测,并将其与灌砂法得到的数据进行对比,结果表明:相较于灌砂法,落球法获得的数据误差在 0.4% 以内、变异系数为 0.006~0.008。由此可知采用落球法测试土基压实度可靠、稳定性好、离散性小。

关键词:落球法;灌砂法;土基压实度

中图分类号:TV7;TV522;TV523

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)06-0006-03

Research on the Technology of Soil Foundation Compactness Testing Based on Falling Ball Method

HOU Jianjun¹, YAN Tao¹, YANG Sen¹, LIU Jun¹, LI Ke²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610213;

2. Sichuan Shengtuo Testing Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610045)

Abstract: Sand filling method and water filling method are the most commonly used methods for testing the compactness of soil foundation at the construction site, but these two methods belong to failure detection, which are time-consuming, laborious and poorly representative. This paper studies the adaptability of the falling ball method to detect the compactness of the soil foundation, uses the falling ball rebound instrument to detect the compactness of the soil foundation, and compares it with the data obtained by the sand filling method. The results show that compared with the sand filling method, the data error obtained by the falling ball method is less than 0.4%, and the coefficient of variation is 0.006-0.008, thus it can be known that the falling ball method is reliable, stable and discrete.

Key words: Falling ball method; Sand filling method; Soil foundation compactness

1 概 述

填方土基的压实度系指施工现场土基的干密度与现场土样通过室内标准击实试验得到的最大干密度的比值,为路基路面施工质量检测的关键指标之一,亦为路面基层施工质量控制和验收质量评定中压实质量的依据^[1-2]。目前,施工现场土基压实度检测中常用的检测方法为灌砂法和灌水法,但上述方法均属于破坏检测,检测完成后还需填筑相同的填料再次碾压密实,导致该检测方法费时、费力^[3-4]。根据《公路路基施工技术规范》JTG/T3610-2019^[5]中的规定:填土路堤压实

度检测频率为每 1 000 m² 不少于 2 点。《公路工程质量检验评定标准》JTG F80/1-2017^[6]中规定:土方路基压实度的检测频率为每 200 m 测 2 处。因此,采用灌砂法检测土基压实度的代表性差。

落球测试法是一种新型无损检测土基压实度的方法^[7],首先通过标准击实试验标定不同干密度下回弹模量与干密度的关系,再通过测试施工现场土基的回弹模量计算干密度,与击实试验中最大干密度的比值为压实度。上述计算数据仅需要在测试系统中输入标定参数即可得到压实度数据。落球法属于无损检测,其操作简便并可加大采样频率,数据代表性佳^[8-9]。

收稿日期:2023-12-12

中国水利水电第七工程局有限公司科研项目:《无黏性土基压实度快速无损检测方法研究》。项目编号:2022-803-54-39。

此次研究采用落球法测试公路水稳层的压实度,并将其与灌砂法测试的压实度进行比对研究,所取得的研究成果可为此类工程施工质量检测借鉴。

2 土样标定与测点布置

2.1 土样标定

首先取施工填筑用的级配碎石对不同含水率进行标准击实试验,测出不同含水率下级配碎石的干密度,绘图求出其最大干密度。施工用级配碎石的最大干密度 $\rho_{\max}$ 为 2.25 g/cm^3 ,最佳含水率为 5.0% 。

对于无黏性土基来说,变形模量 E 与干密度 ρ_d 间具有良好的关系,可以表示为式(1):

$$\rho_d = a \times \ln E + b \tag{1}$$

式中: ρ_d 为土基干密度; E 为落球法测试土基取得的回弹模量; a, b 为系数。

通过室内击实试验制成试块并确定每个试块的干密度,采用落球式回弹仪测试其回弹模量,解出测试样品的 a, b 值分别为 0.3115 和 0.8783 。

2.2 测点的布置

对该水稳层中的两段分别在其碾压过程中用灌砂法和落球法检测土基的压实度。现场试验段的纵向长度约为 150 m ,横向长度约为 16 m ,成分为砂砾土和水泥稳定土。纵向 10 m 布置一个测点,横向 2 m 布置一个测点,呈交叉排列。

2.3 试验过程

采用 26 t 振动式压路机从左向右依次碾压。每个点来回碾压一次记为第一轮碾压,第二轮碾压则从右至左,依此类推进行碾压。每碾压一轮,在标记的点中采用落球法测试其压实度,同时随机采用灌砂法挖取 8 个点进行压实度对比。

3 试验结果

3.1 落球法测试技术的验证

不同碾压遍数下地基系数 K_{30} 的测试结果见图 1。此次研究在纵向土基中测试得到了 42 个数据。为保证所取得数据的稳定性,采用按照检测顺序依次取 3 个点求平均值的方法,确定每个点的数值,例如图 1 中的点数 1 为实际测试的 $1, 2, 3$ 三个数据的平均值。从图 1 中可以看出:随着碾压次数的增加, K_{30} 值增加,整体 K_{30} 值数据离散型较大,以碾压第七遍为例,其最大值为 288.4 MPa ,最小值为 103.0 MPa ,变异系数为

52.9 。因此,按照每填高 0.9 m ,纵向每 100 m 检查 2 个断面、 4 个点的要求,所取得的检测数据会出现误差较大的情况。

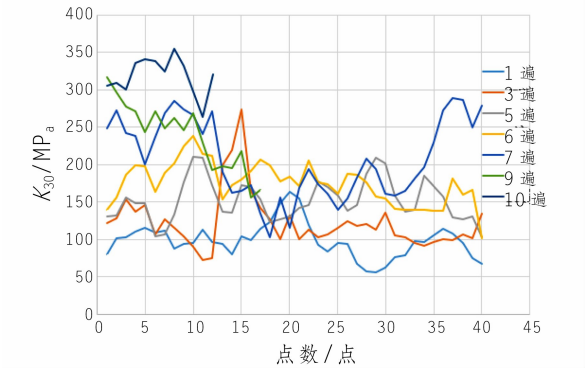


图 1 不同碾压遍数下地基其承载系数 K_{30} 的测试结果示意图

不同碾压遍数下落球法回弹模量的测试结果见图 2。其测试点的数值与 K_{30} 的处理方法相同,选用 3 点平均值法。从图 2 中可以看出:随着碾压次数的增加,回弹模量值亦增加,但其增加幅度没有 K_{30} 值大,整体回弹模量数据的离散性较小。以碾压第 $1, 3, 5, 6, 7$ 遍为例,其变异系数分别为 $3.1, 6.0, 5.4, 3.8, 13.4$,因此可以认为:采用落球法测试土基取得的回弹模量数据较为稳定。

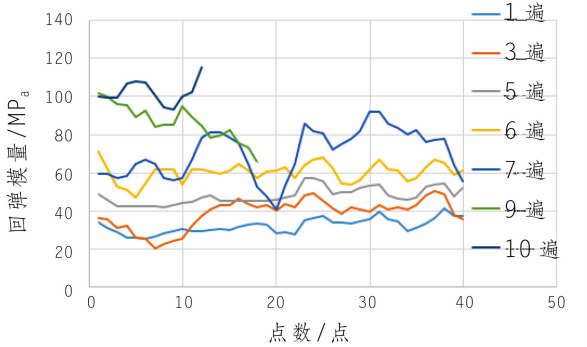


图 2 不同碾压遍数下落球法回弹模量的测试结果示意图

采用 K_{30} 与落球法测试土基模量关系见图 3。回弹模量与 K_{30} 值的线性相关性极好,其 R^2 达到 0.979 ,其中线性指数 a, b 分别为 2.9308 和 5.4831 。

通过对整体数据进行对比发现:回弹模量随碾压遍数增加的趋势比较明显, K_{30} 前 5 次碾压数据离散性较大,辨识度差;后期离散性较小,易区分。落球法取得的数据存在轻微离散情况,而

K_{30} 数据离散的情况较为严重。

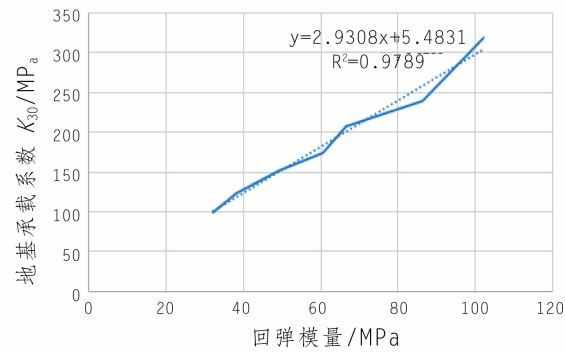


图 3 K_{30} 与落球法测试土基模量关系示意图

经过对大量数据进行比对发现:回弹模量与地基承载系数 K_{30} 值的相关性较好,但不同土基之间的回弹模量与 K_{30} 值之间线性关系的斜率和截距值有区别,因此,当填料发生变化时,采用落球法检测需要重新标定回弹模量与 K_{30} 值的关系。

3.2 落球法与灌砂法测试土基压实度结果的对比

土基碾压遍数与压实度的关系见图 4。每碾压一次、测四个点求出的平均值为该遍数的压实度。碾压第一遍时压实度为 84.1%,第二遍、第三遍、第四遍的压实度分别为 90.6%、95.4%、97.0%。随着碾压次数的增加,级配碎石的压实度亦增加。仔细观察发现:随着碾压遍数的增长其压实度增长的幅度逐渐降低并趋于平稳,说明随着压实度的增长,再增加相同的压实度需要消耗更多的碾压功率。当碾压至第四遍后,土基的压实度为 97%,达到了高速公路路面压实度不小于 96%的要求。

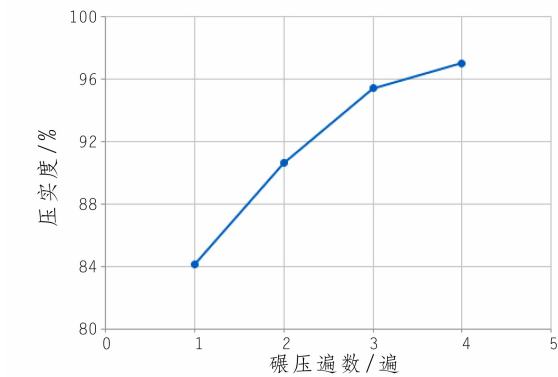


图 4 土基碾压遍数与压实度的关系

灌砂法与落球法测试压实度取得的数据见图

5。与灌砂法测试取得的数据(116 组数据)相比,落球法测试的结果稍微偏低,整体结果误差为 0.4%,说明采用落球法测试回弹模量、再通过标定系数计算土基压实度的方法可行,且其相关性较好。从图 5 可以看出:落球法测试土基回弹模量存在某些值偏大的情况,可能是因为试验中落球锤击石子聚集的部位造成其回弹模量值偏大。116 组落球法测试压实度的结果大多数聚集在灌砂法测试结果的 $\pm 2\%$ 以内,呈现正态分布,其平均值接近灌砂法测试数据的压实度。落球法测试数据的变异系数为 0.006~0.008,低于灌砂法试验数据的变异系数,说明所取得的数据离散性小、稳定性高。

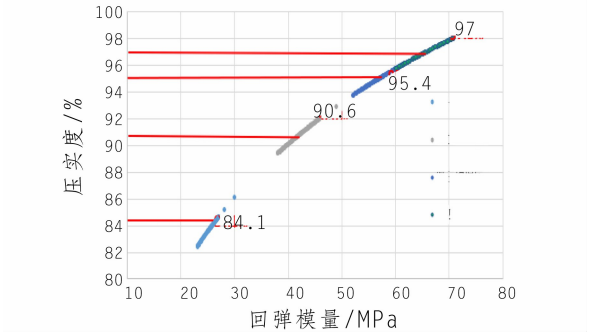


图 5 灌砂法与落球法测试压实度取得的数据示意图

3.3 讨论

本次试验在 150 m 长的路段采用灌砂法取 8 个点,按照《公路工程质量检验评定标准》JTGF 80/1—2017 的要求 200 m 需测 2 个点。灌砂法与落球法测试压实度取得的数据对比情况见表 1。以表 1 中第 3 遍和第 4 遍碾压的 8 个数据为例,第 3 遍取得的数据分别为 93.5%、93.9%、94.8%、95.4%、95.9%、96.1%、96.7%、96.8%,若取到 96.1%、96.7%和 96.8%时则不需要碾压;第 4 遍取得的数据分别为 94.8%、95.2%、96.4%、96.7%、97.8%、97.6%、98.2%、98.9%,若取到 94.8%和 95.2%时则还需要再次碾压。因此,第 3 遍和第 4 遍碾压结果仅取了两个点,有可能会出第 3 遍碾压既达到压实度要求或出现需要碾压第 5 遍才能满足压实度要求的结果。最为关键的是:现场有经验的挖坑人员甚至可以看出压实度高的区域。由此可知:灌砂法的离散系数大,同时可能会受到人为因素的干扰。

(下转第 18 页)

弹模量与压实模量的相关性系数达到 0.99。当压实模量大于 54 MPa 时,水稳层的压实度满足设计要求,达到 96%。

(3)连续智能碾压系统可以根据施工前标定的参数对压路机的振动频率、振幅、压实速度等进行调整,进而有效地保证了在压实过程中实时监测被碾压路基的压实情况,保证了施工质量,满足了设计要求,提高了工作效率,从根本上避免了超欠压、部分区域漏压、搭接宽度不够等问题的出现。

参考文献:

[1] 宋宏伟,刘永祥.路基智能碾压在实际施工中的运用[J].中国港湾建设,2022,42(7):64-67.
[2] 王佳俊.心墙堆石坝坝面碾压智能监控方法与应用研究[D].天津大学,2019.
[3] 江纤夫.智能碾压设备在路基工程施工中的应用[J].中国建筑装饰装修,2021,20(9):30-31.

(上接第8页)

表1 灌砂法与落球法测试压实度取得的数据对比表

碾压次数 /次	灌砂法		落球法			
	压实度 /%	变异系数	压实度 /%	最大值 /%	最小值 /%	变异系数
1	84.1	0.011	83.8	86.1	82.4	0.006 7
2	90.6	0.011	90.7	92.9	89.3	0.008 0
3	95.4	0.014	95.0	96.2	93.8	0.006 5
4	97.0	0.012	96.8	98.0	95.7	0.007 2

采用落球法测试土基压实度需要的测试点数多、密集,可以代表整个面层,所取得的数据离散系数小、稳定性高;同时,落球法的操作简单、快捷。随着碾压次数的增加,采用灌砂法测量土基压实度与落球法测量土基压实度成正相关,误差在 0.5%以内。

3 结 语

(1)落球法测得的回弹模量与 K_{30} 相关性较好,达到了 0.98。回弹模量随碾压遍数增加的趋势比较明显且分辨率高,而 K_{30} 前 5 次碾压取得的数据分辨率低,但其后期增加的较为明显。

(2)采用落球法建立的回弹模量和压实度的关系可靠、相关系数高、离散系数小、稳定性好。随着碾压次数的增加,采用灌砂法测量土基压实度与落球法测量土基压实度成正相关,误差在 0.5%以内。

参考文献:

[1] 刘国民,黄梅.落锤法与落球法路面基层弯沉检测技术的对比研究[J].四川水泥,2022,44(8):190-192.
[2] 何静.基于落球式测试法的宕渣路施工质量检测技术研究[D].长安大学,2014.

[4] 公路路基施工技术规范:JTG/T 3610-2019 [S].
[5] 李丙扬.高土石坝坝料压实质量实时监测机理及其装置研制[D].天津大学,2012.
[6] 王曦光.落球式岩土力学测试仪的原理与应用[J].北方交通,2016,39(6):82-85.
[7] 党晓,侯子义.路基智能压实技术探究[J].中国公路,2022,29(1):100-101.

作者简介:

闫涛(1995-),男,四川成都人,工程师,硕士,从事水利水电与市政工程试验检测及混凝土材料研究工作;
杨奎(1985-),男,重庆万州人,工程师,硕士,从事高性能混凝土材料研发工作;
杨森(1977-),男,四川巴中人,正高级工程师,从事混凝土材料研究及试验检测工作;
刘军(1968-),男,四川射洪人,正高级工程师,学士,从事土木工程建设施工技术工作;
李科(1987-),男,四川成都人,工程师,硕士,从事智慧工地系统开发集成工作。

(编辑:李燕辉)

[3] 李东印,周星星,李伟.落球与传统密度检测法检测压实度对比研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):88-94.
[4] 林震岳.落球与传统密度检测法检测压实度对比研究[D].沈阳建筑大学,2018.
[5] 《公路路基施工技术规范》:JTG/T 3610-2019[S].
[6] 《公路工程质量检验评定标准》:JTG F80/1-2017[S].
[7] 王曦光.落球式岩土力学测试仪的原理与应用[J].北方交通,2016,39(6):4-7.
[8] 郎雷.落球仪与 LFG 检测岩土压实质量对比试验研究[D].沈阳建筑大学,2017.
[9] 包孔波,眭封云.碎石土路基压实度与回弹模量关系研究[J].城市道桥与防洪,2019,36(8):240-241,249.

作者简介:

侯建军(1981-),男,山西吕梁人,副高级工程师,从事水利水电工程试验检测技术与管理工
闫涛(1995-),男,四川成都人,工程师,硕士,从事试验检测及混凝土材料研究工作;
杨森(1977-),男,四川巴中人,正高级工程师,从事混凝土材料研究及试验检测工作;
刘军(1968-),男,四川射洪人,正高级工程师,学士,从事土木工程建设施工技术工作;
李科(1987-),男,四川成都人,工程师,硕士,从事智慧工地系统开发集成工作。

(编辑:李燕辉)