

落球法联合连续智能碾压系统在路基施工中的应用

闫涛¹, 杨垒², 杨森¹, 刘军¹, 李科³

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213; 2. 黄河工程咨询监理有限责任公司, 河南 郑州 450003;
3. 四川升拓检测技术股份有限公司, 四川 成都 610045)

摘要:路基压实过程中经常会出现超欠压、部分区域漏压、碾压搭接宽度不够等问题。阐述了采用落球法联合连续智能碾压系统对路基施工质量进行的研究。通过探讨落球法和连续智能碾压系统的技术原理,建立了某公路水稳层回弹模量与压实度之间的关系以及回弹模量与压实模量之间的关系。研究表明:上述关系相关性较好,达到 0.98 以上。当路基的回弹模量达到 128 MPa、压实模量达到 54 MPa 时,其压实度大于 96%。通过落球法和连续智能碾压系统的应用,不仅保证了施工质量,而且提升了施工效率,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。

关键词:落球法;连续智能碾压系统;压实度;路基施工

中图分类号:U213.1+5;U215.7

文献标志码:B

文章编号:1001-2184(2024)06-0015-04

Application of Falling Ball Method Combined with Continuous Intelligent Rolling System in Roadbed Construction

YAN Tao¹, YANG Lei², YANG Sen¹, LIU Jun, LI Ke³

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610213;
2. Yellow River Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450003;
3. Sichuan Shengtuo Testing Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610045)

Abstract: In the process of roadbed compaction, there are some problems, such as over-pressure, under-pressure, leakage pressure in some areas, insufficient lap width and so on. This paper introduces the research on the construction quality of roadbed by falling ball method combined with continuous intelligent rolling system. By discussing the technical principle of falling ball method and continuous intelligent rolling system, the relationship between resilient modulus and compaction degree of water-stabilized layer of a highway and the relationship between resilient modulus and compaction modulus are established. The results show that the correlation of the above relationship is more than 0.98. When the resilient modulus of the soil foundation reaches 128 MPa and the compaction modulus reaches 54 MPa, the compaction degree can reach the requirement of not less than 96%. Through the application of falling ball method and continuous rolling system, not only is the construction quality guaranteed, but also the construction efficiency is improved, and the problems such as over-pressure, under-pressure, partial area leakage pressure and insufficient lap width are fundamentally avoided.

Key words: Falling ball method; Continuous intelligent rolling system; Compaction degree; Roadbed construction

1 概述

在填方工程施工中,由于传统的作业模式无法实时监控现场的压实情况(包括压实轨迹、速度、振动模态以及土体的力学特性等),容易出现漏压、欠压和过压等问题,进而导致路基的不均匀沉降以及路面开裂等质量问题 and 安全隐患产生^[1-3]。《公路路基施工技术规范》JTG/T 3610—2019^[4]规定的检测频率为每 1 000 m² 不少于

2 点,而且检查时挖坑点常常选择在路基中间碾压质量较好的部位。因此,路基的路肩部位经常会出现压实度不均匀的情况,进而出现的沉降将引起纵向开裂。

连续智能碾压系统最早起源于北欧,在上世纪 70 年代中叶被瑞典提出。从上世纪 80 年代开始,该项技术受到了广泛的关注^[5]。2021 年 4 月 1 日,日本国土交通局出台了连续智能碾压系统代替灌砂法作为路基压实质量控制的相关标

收稿日期:2023-12-10

准,进而提高了其管理水平和效率。

笔者以某高速公路为依托工程,分别采用灌砂法、落球法和连续智能碾压系统测试水稳层的压实度、回弹模量和压实模量,并将其用于评价路基的压实质量;同时对所使用的灌砂法、落球法和连续智能碾压系统进行对比试验研究。

2 试验设备

2.1 落球式回弹仪

落球式回弹仪主要由落球系统、法兰把手和仪器主机组成。测试原理为 Hertz 碰撞理论^[6],该理论认为已知刚性的物体 X(落球系统)与一个未知物体 Y(路基)碰撞时,未知物体 Y 的刚性越大其碰撞时间越短。Hertz 碰撞理论见图 1。试验中,先采用落球标定未知路基的干密度与回弹模量之间的关系,通过落球法测试未知物体 Y 的回弹模量,计算得到干密度,与标准击实试验测试该土样得到的最大干密度的比值即为压实度。

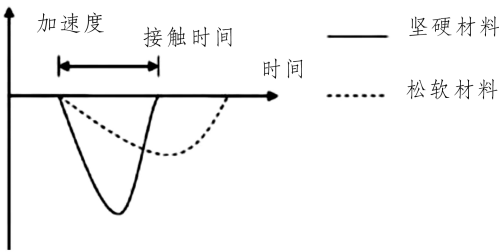


图1 Hertz碰撞理论示意图

2.2 连续智能碾压系统

随着碾压次数的增加,路基会变得越来越坚硬,此时,碾压轮与路基会出现两次碰撞,从而引起碾压轮振动模态的变化(通常会诱发高阶模态)。同时,碾压轮的最大加速度一般也会随之增加。基于该现象,相关学者提出了连续智能碾压评价指标^[7]。

为了能够采用连续智能碾压系统对路基质量进行控制和检验,需要将连续压实指标与常规指标建立联系以验证各类指标的一致性,进而为连续压实指标的使用奠定基础;同时亦可通过连续压实指标确定最薄弱的控制点。

3 路基碾压工艺与测点的布置

3.1 路基碾压工艺

采用落球法标定路基的回弹模量,然后计算其压实度,建立回弹模量与压实模量的关系。因

此,在传统的压实工艺上需要添加落球与连续碾压设备以实现连续智能碾压施工。

3.2 测点布置

现场试验段选择纵向长度约为 130 m,横向宽度约为 16 m 的水稳层。整个路段每次碾压采用灌砂法随机挖坑 10 个。将落球法测点布置在路段(4 条路)的中线,每 20 m 测一点。碾压施工以纵向退行的方式进行,碾压轮长 2.5 m,纵向碾压轮迹重合 0.5 m。分别采用灌砂法、落球法和连续智能碾压法测试路基的压实度、回弹模量和压实模量后建立其相关关系。

4 测试结果与分析

4.1 灌砂法

现场试验时,每碾压一次后用灌砂法测 10 个点的平均值作为其压实度。采用 26 t 振动钢轮压路机以纵向进退的方式进行碾压,连续 8 次(来回记为 1 次)。碾压次数与压实度的关系见图 2。随着碾压次数的增加其压实度的增长幅度越来越小。当碾压次数超过 5 次,曲线趋于平缓;碾压次数达到第 8 次时,其路基压实度为 96.2%,能够满足大于 96% 的设计要求。

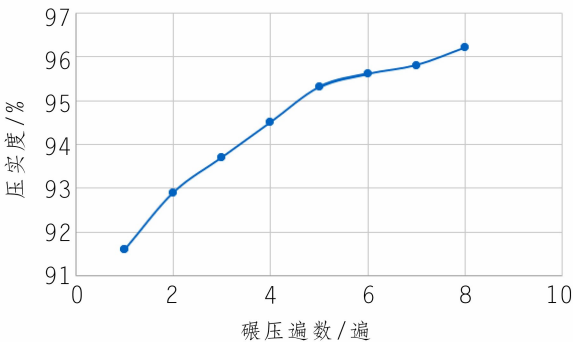


图2 碾压次数与压实度关系图

4.2 落球法

通过大量的现场试验发现:对于无黏性土,落球测试技术取得的变形模量与干密度、压实度之间具有良好的相关关系,即变形模量 $E \sim$ 干密度 ρ_d 之间具有良好的相关关系,其可表示为:

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

式中: ρ_d 为路基干密度, g/cm^3 ; E 为回弹模量, MPa; a 、 b 为系数。

振动压路机每碾压一次,采用落球法测试 28 个点,去除 2 个最大值和 2 个最小值后的平均值即为该碾压次数下的回弹模量。不同碾压遍数下

的路基回弹模量与干密度的关系见图 3。路基回弹模量与灌砂法测试得到的干密度曲线呈指数关系,相关性较好,线性拟合系数为 0.98。这种水稳层材料在式(1)中的 a 、 b 值分别为 0.139 7 和 1.502 5。

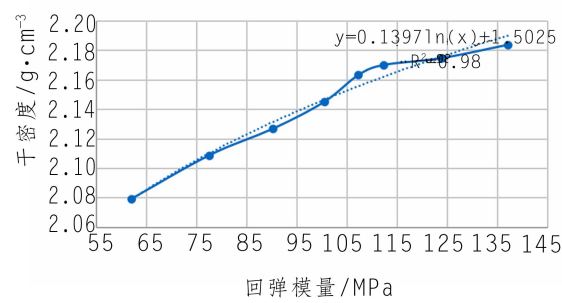


图 3 不同碾压遍数下路基回弹模量与干密度关系图

现场水稳层的回弹模量与压实度之间的关系见图 4。由图 4 可见,当水稳层的回弹模量大于 128 MPa 时,其压实度满足大于 96% 的设计要求。

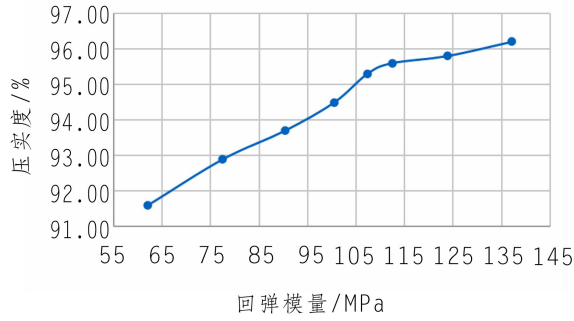


图 4 不同碾压遍数下路基回弹模量与干密度关系图

4.3 连续智能碾压法

此次研究采用已知且可靠的回弹模量值(落球法)与压实模量建立线性关系。其关系式可以表示为:

$$E_{回弹} = a \times E_{压实} + b \tag{2}$$

现场水稳层的压实模量与回弹模量的关系见图 5。从图 5 中可以看出:其压实模量与回弹模量相关性极好,线性拟合系数达到 0.991。式(2)中的 a 、 b 值分别为 2.348 与 1.526 8。因此,由上述可知:回弹模量达到 128 MPa 时其压实度大于 96%;而当压实模量大于 54 MPa 时,其回弹模量达到了 128 MPa。因此,当压实模量大于 54 MPa

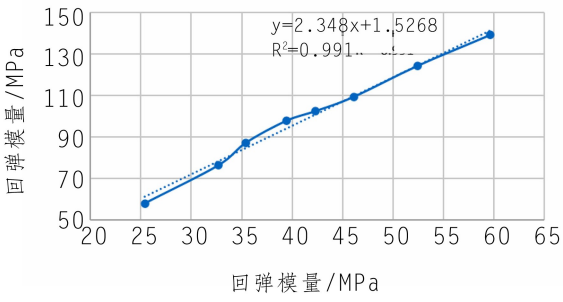


图 5 水稳层的压实模量与回弹模量关系图

时,其压实度即满足 96% 的设计要求。因此,由上述可知:采用落球法测试回弹模量达到 128 MPa 时,其压实度大于 96%。将落球法与灌砂法测试压实度建立曲线关系,其相关系数达到 0.98;而采用连续智能碾压系统测试压实模量大于 54 MPa 时,其回弹模量达到了 128 MPa。因此,当压实模量大于 54 MPa 时,其压实度即满足 96% 的设计要求。而采用落球法联合连续智能碾压系统与灌砂法测试压实度建立曲线关系,其相关系数达到 0.991。

采用压实模量较其他方法具有以下特点:压实模量本身就是弹模指标,其理论上与材料的弹性模量具有良好的线性关系;压实模量可以反映碾压轮的起振力、质量以及宽度等指标,其适用性更广。连续智能碾压取得的数据可以实时上传至网络,从而使工程技术人员能够更清楚地了解压实情况、保证压实质量。

鉴于路基材料的种类多,其级配、含水率等因素对路基的性能影响很大,故每次碾压施工换填料时均需对其进行重新标定,从而在一定程度上会影响到施工效率,这就要求试验室需要提前取碾压土进行回弹模量、压实度与压实模量之间关系的标定,建立回弹模量与压实模量的关系,以实现连续智能施工。

5 结 语

笔者讨论了落球法联合连续智能碾压系统对路基碾压质量进行控制的过程,所取得的结果为:

(1)采用落球法测试水稳层的回弹模量与灌砂法测试的压实度建立了良好的关系,相关系数达到 0.98。当回弹模量大于 128 MPa 时,水稳层的压实度满足设计要求,达到 96%。

(2)落球法联合连续智能碾压系统测试的回

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.

[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)

(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.

[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)