

土石坝压实质量连续检测指标影响因素分析

吴龙梁^{1,3}, 江辉煌², 彭新平³, 高明显², 黄治³, 张新冈⁴

(1. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 铁科院(深圳)研究设计院有限公司, 广东 深圳 518054; 3. 深圳市建筑工务署, 广东 深圳 518031; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘要: 为了提高土石坝碾压中连续压实控制技术的适用性,设计并开展了3项现场试验,研究了振动碾压时的激振力、行进速度引起的连续检测指标 CMV 、 CCV 、 K_s 和 VCV 的测值偏差,采用线性回归分析方法研究了强、弱振工艺对不同类别连续检测指标相关性校验的影响规律,并分析了连续检测指标测值与碾压遍数之间的相关性,进而给出了土石坝连续压实检测的应用建议。研究表明:激振力引起各类连续检测指标测值的偏差约为 50% ~ 80%,速度引起的偏差小于 15%。激振力对压实度计类指标的相关性校验影响显著,且在弱振工况下各类连续检测指标得到的决定系数更高。 VCV 和 K_s 指标与碾压遍数之间具有强相关性,能够更好地适用于碾压工艺法和测值增量法。

关键词: 土石坝; 压实质量; 连续检测指标; 激振力; 行进速度; 碾压遍数; 相关性校准

中图分类号:TV522; TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0203-07

Influencing factors of continuous testing indices of earth – rock dam compaction quality

WU Longliang^{1,3}, JIANG Huihuang², PENG Xinping³, GAO Mingxian², HUANG Zhi³, ZHANG Xingang⁴

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;

2. Research Institute of Railway Technology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518054, China; 3. Bureau Public

Works of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518031, China; 4. Railway Engineering Research Institute,

China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the applicability of continuous compaction control technique, three field tests were designed and carried out for the granite residual soil filler of an earth – rock dam. The measurement deviations of the continuous testing indices of CMV , CCV , K_s and VCV caused by the exciting force and travel speed of the vibration rolling were studied. Then, the influence of strong and weak vibration techniques on the correlation calibration of different types of continuous testing indices was discussed and the correlation between the measurement value of the continuous testing indices and the number of the rolling passes was analyzed using linear regression analysis method. Finally, practical suggestions on the engineering application of continuous compaction control technique for earth – rock dams were put forward. The research results show that the deviation of various continuous testing indices caused by the exciting force is in the range of 50% to 80%, and the deviation caused by speed is less than 15%. The exciting force has a significant influence on the correlation verification of the compactness gauge indices, and the coefficient of determination obtained by various continuous testing indices in the weak vibration mode is higher. There is a strong correlation between the number of rolling passes and the indices of VCV and K_s , so these two indices can be better applied to the compaction technique and incremental measurement method.

Key words: earth – rock dam; compaction quality; continuous testing index; exciting force; travel

收稿日期:2020-11-20; 修回日期:2021-02-22

基金项目:深圳市建筑工务署技术研究课题 (THZQ-033-2018)

作者简介:吴龙梁(1988-),男,湖南岳阳人,博士,工程师,研究方向为连续压实控制技术。

speed; rolling pass; correlation calibration

1 研究背景

连续压实控制技术是根据振动轮的响应加速度数据计算获取连续检测指标测值,进而通过测值的大小评判填筑体的压实质量,并结合卫星定位技术实现压实质量的连续控制的先进检测技术^[1-3]。该技术具有实时、全面、连续检测等显著优势,在土石坝、路基等填筑工程中得到了越来越多的应用^[2-4]。

连续检测指标是连续压实控制技术的基础和核心,其性能对连续压实控制技术的可靠性具有重要影响。工程实践表明^[1-2,5],在填料确定的情况下,碾压工艺的差异将会使得连续检测指标产生较大偏差,从而可能影响到连续压实控制技术的应用效果。为此,国内外学者开展了大量的压实质量连续检测指标影响因素的研究。Mooney 等^[6-7]分别以粗粒料和细粒料为压实材料开展了试验研究,发现了压实粗粒土的连续检测指标随振幅的增大而增大的规律,而压实细粒土的规律刚好相反,并通过研究揭示了振动压路机的振动频率、振幅和行进速度等工艺参数对 *CMV*、*CCV* 等指标的影响规律。范娟等^[8]开展了振动碾压砂质板岩的试验,分析了振动压路机的振幅、振动频率、碾压速度和行驶方向对 *CMV* 指标的影响。刘东海等^[9-10]针对堆石料研究了压实度计类指标与行车速度、碾压遍数、压实厚度、激振力等参数之间的相关性。

然而,既有研究大多针对单一指标或某一类指标,缺少对不同类型指标的横向比较。由于各类指标的计算原理差异明显,使得既有研究成果的参考性不够广泛。另外,连续压实控制技术针对不同填料的适用性不尽相同^[1,6,11-14]。花岗岩残积土是我国土石坝采用的主要填料之一,而既有研究针对该类填料的研究较少见,限制了该技术的推广和应用。

因此,本文以花岗岩残积土为研究填料,通过开展现场试验,研究工程实际中主要的碾压控制参数对不同类别连续检测指标的影响规律,从而为土石坝碾压中连续压实控制技术的应用提供参考。

2 压实质量连续检测指标

目前,已提出的连续检测指标有 10 余种,根据不同的原理大体可分为 3 类:(1)压实度计指标。如瑞典的 *CMV*、日本的 *CCV* 指标、美国的 *THD* 指标等;(2)力学指标。如瑞士的 K_s 和德国的 E_{mb} 指标等;(3)动力学指标。如我国提出的 *VCV* 指标等。为

了研究不同类型的连续检测指标的影响因素,本文分别选取常用的 *CMV*、*CCV*、 K_s 和 *VCV* 指标作为典型代表进行研究。

2.1 *CMV* 指标^[15]

CMV (compaction measured value) 是通过振动轮垂直加速度在频域上的 2 倍谐波振幅 A_4 与 1 倍谐波振幅 A_2 的比值乘以系数 k (通常取 300) 得到的,其计算公式如公式(1)所示。

$$CMV = k \frac{A_4}{A_2} \quad (1)$$

2.2 *CCV* 指标^[16]

CCV (compaction control value) 指标是对 *CMV* 指标的改进,其基本原理与 *CMV* 相近。*CCV* 指标同时考虑了整数倍和半倍谐波振幅,能够较好地表征谐波形态,其计算公式如公式(2)所示。

$$CCV = \left[\frac{A_1 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6}{A_1 + A_2} \right] \times 100 \quad (2)$$

式中: $A_1 \sim A_6$ 分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 倍谐波的振幅。

2.3 K_s 指标^[17]

根据抵抗力 F_s 和位移 z_d 的比值可表征土体的刚度/模量的原理,Anderegg^[17]忽略压路机框架惯性的影响,提出了刚度系数指标 K_s 。该指标计算采用了两自由度模型,将土体近似为开尔文体,通过测量振动轮垂直加速度和偏心位置来确定滚筒惯性和偏心力,同时通过对加速度峰值积分确定位移振幅,从而得到公式(3)。

$$K_s = \Omega^2 \left[m_d + \frac{m_0 e_0 \cos(\varphi)}{z_d} \right] \quad (3)$$

式中: φ 为偏心力和振动轮位移之间的相位滞后角度,°; Ω 为压路机的激振频率,Hz; m_d 为振动轮的质量,kg; z_d 为振动轮的位移,m; $m_0 e_0$ 为振动轮中的偏心力矩, $N \cdot m$ 。

2.4 *VCV* 指标^[18]

徐光辉等^[18]根据动力学原理,建立了路基振动压实过程中响应加速度与压实程度的关系,以加速度响应指标 *VCV* (vibration compaction value) 作为连续压实控制指标。根据文献[18]的研究结果, *VCV* 仅与振动信号、机械参数有关,即:

$$VCV \sim F(m_d, P, f, u, \dot{u}, \ddot{u}) \quad (4)$$

式中: m_d 为振动轮的质量,kg; P 为激振力幅值,kN; f 为压实机的振动频率,Hz; u 、 $\dot{u}$ 、 $\ddot{u}$ 分别为振动轮的位移、速度和加速度, m 、 m/s 、 m/s^2 。

3 现场试验

3.1 试验概述

工程实践表明,振动碾压工艺中的碾压行进速度、激振力、碾压遍数既是影响连续检测指标测值的重要因素,也是土石坝碾压过程中的主要可控因素。因此,本文以上述 4 个碾压参数为变量开展现场试验,研究振动碾压工艺变动对连续压实控制技术的影响规律,分析各类连续检测指标在激振力变动下的适用性。为了方便现场操作,试验选定为深圳市某填筑工程项目,该项目占地约 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$,设计回填高度为 6 m,摊铺厚度为 30 cm,碾压遍数为 6~10 遍。现场试验时,场地北侧已回填 4.5 m,场地南侧已回填完毕。回填施工采用了花岗岩残积土作为填料,通过室内土工试验得到的填料物理力学特性参数见表 1。

表 1 现场试验填料物理力学特性参数

$\rho_{d \max} /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\omega_{\text{opt}} /$ %	I_p	颗粒组成/%			
			细砾	砂粒	粉粒	黏粒
1.94	12.5	31.6	12.7	23.3	29.8	34.2

根据研究目标需求,设计并开展了 3 项现场试验。试验 1 是基于正交原理设计不同的行进速度和激振力的工艺组合,研究行进速度和激振力对振动测值的影响规律。试验 2 是依次记录不同碾压遍数下各类指标的变化情况,研究碾压遍数与振动测值的关系。试验 3 是在不同激振力下进行相关性校验,研究激振力变动对连续检测指标适用性的影响。试验安排和设计概况如表 2 所示。试验中的碾压方向均为振动轮向前的正向碾压,填料摊铺厚度均为 30 cm,连续检测指标采用了 CMV 、 CCV 、 K_s 和 VCV 指标,常规质量检测采用压实度 K 作为检测指标。

表 2 现场试验安排和设计概况

试验编号	测道编号	测道尺寸 (宽×长)/ m^2	预碾压情况	测试碾压工艺		数据抽样
				激振力/kN	行进速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	
试验 1	1 [#]	2×25	1H+6S+1W	340	1.5	全程记录
	2 [#]	2×25	1H+6S+1W	220	1.5	
	3 [#]	2×25	1H+6S+1W	340	3.0	
	4 [#]	2×25	1H+6S+1W	220	3.0	
试验 2	5 [#]	2×25	1W	220	1.5	随机 5 个
	6 [#]	2×25	1W+2S	220	1.5	随机 5 个
	7 [#]	2×25	1W+6S	220	1.5	随机 5 个
	8 [#]	2×25	1W	340	1.5	随机 5 个
	9 [#]	2×25	1W+2S	340	1.5	随机 5 个
	10 [#]	2×25	1W+6S	340	1.5	随机 5 个
试验 3	11 [#]	2×50		340	1.5(碾压 8 遍)	均匀 10 个/遍

注:H 表示静碾,S 表示强振碾压,W 表示弱振碾压。例如,1H+6S+1W 表示预碾压工艺为静碾 1 遍后强振碾压 6 遍,最后再弱振碾压 1 遍。

3.2 试验设备

现场试验采用了徐州万邦生产的 SRM222C 型振动压路机,其激振方式为偏心式激振,自重为 22 t,振动频率为 17 Hz,激振力为 220、340 kN。在振动压路机上同时安装了 Dynapac 公司生产的 DCA 型压实分析仪和广州中海达公司生产的连续压实控制设备,分别用以采集 CMV 和 VCV 指标。同时,将实时采集的振动加速度、频率、位置坐标等数据上传至远程平台以备后续分析。此外,为了获取 K_s 和 CCV 指标,在振动轮中轴的一侧安装有 INV9823 型压电加速度传感器,通过采集振动轮的加速度以推算指标测值。该传

感器由北京东方振动和噪声技术研究所生产,其测试量程为 25 g,测试频率范围为 0.5~4 000 Hz,测试分辨率为 $0.000\ 25 \text{ m/s}^2$ 。振动数据采集仪器采用北京东方振动和噪声技术研究所生产的 INV3062C 型采集仪,数据处理和分析采用 DASP V11 动态信号采集分析系统。现场试验设备如图 1 所示。

3.3 连续检测指标的计算

通过对采集到的振动轮的加速度时域数据进行傅立叶变换获取频域数据,得到不同倍数谐波的振幅,再分别根据公式(1)和(2)获取 CMV 、 CCV 指标值。在利用公式(3)计算 K_s 指标时, m_d 取 9 600 kg,

m_0e_0 取 $2.794 \text{ N} \cdot \text{m}$, 参考文献[19] 的研究成果确定相位滞后角度 φ 为 $\pi/3$, 位移 z_d 近似通过加速度的二次积分曲线确定(积分常数项取零)。同时, 提取连续压实控制设备记录的 CMV 、 VCV 指标值和坐标数据, 通过对比分析不同计算系统获取的 CMV 值进行试验数据校核, 采用两者偏差不大于 20% 时的测试数据进行结果分析。

4 试验结果与分析

4.1 激振力和行车速度的影响

通过开展试验 1, 得到了不同激振力和行车速

度下各类连续检测指标的测值, 如图 2 所示。

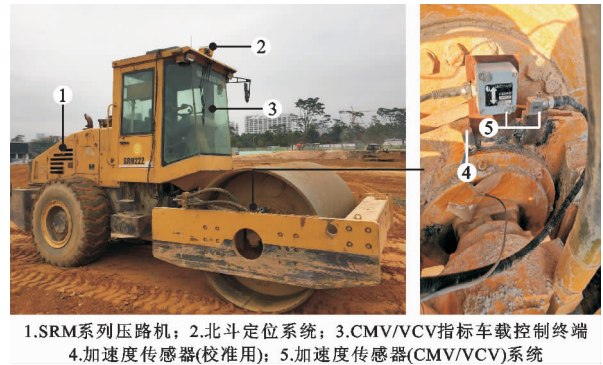


图 1 现场试验设备

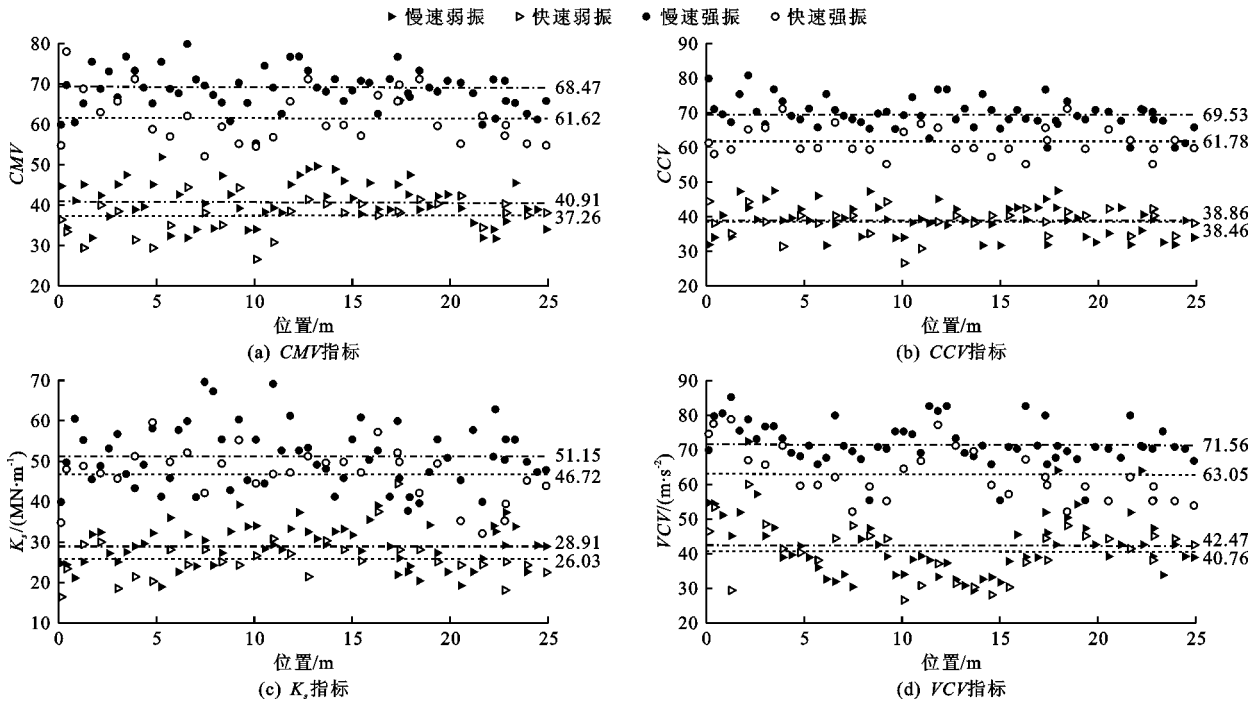


图 2 不同激振力和行车速度下各类连续检测指标的测值

由图 2 可知, 不同碾压工艺组合下各类振动测值均存在差异, 表明激振力和行车速度对振动测值产生了一定的影响。总体上, 强振碾压时的振动测值的均值较大, 弱振碾压时相对较小; 慢速行进时的振动测值的均值较大, 快速行进时相对较小。在本试验条件下, CMV 的平均值范围为 $37.26 \sim 68.47$, 波动幅度约为 83.76%; CCV 的平均值范围为 $38.46 \sim 69.53$, 波动幅度约为 80.8%; K_s 的平均值范围为 $26.03 \sim 51.15 \text{ MN/m}$, 波动幅度约为 118.7%; VCV 的平均值范围为 $40.76 \sim 71.56 \text{ m/s}^2$, 波动幅度约为 75.6%。由此可见, 当激振力和行车速度不同时, 振动测值的波动十分显著。因此, 在土石坝的连续压实控制技术中, 需尽量确保激振力的相对恒定。为了深入研究激振力和行

进速度对各振动测值的影响规律, 计算得到了如表 3 所示的不同工艺引起的连续检测指标平均值的偏差。表 3 中平均值偏差的计算以较小值为基准。

表 3 各连续检测指标平均测值偏差 %

项目	碾压工艺	CMV	CCV	K_s	VCV
速度引起的偏差	强振	11.1	12.5	9.5	13.5
	弱振	9.8	1.0	11.1	4.2
激振力引起的偏差	快速	65.4	60.6	79.5	54.7
	慢速	67.4	78.9	76.9	68.5

由表 3 可知, 在本试验条件下因行进速度引起的各类指标测值偏差的范围均小于 14%, 因激振力不同所产生的偏差范围为 54.7% ~ 78.9%。由此可见, 由速度引起的测值偏差相对较小, 而因激振力

引起的偏差相对较大。除力学指标 K_s 外,其余各指标在弱振碾压工况下因速度引起的偏差相对较小,在不同行进速度下各指标因激振力引起的偏差较为接近。因此,建议采用弱振碾压工艺进行土石坝的连续碾压检测。

4.2 激振力对相关性校验的影响

由 4.1 节结果可知,激振力对连续检测指标测值的影响较大。因此,有必要进一步研究激振力对

各指标相关性校验的影响。通过开展试验 2 分别获取了在强、弱振碾压工艺下的连续检测指标测值和常规质量检测结果。对各测点处采集的试验数据进行一元线性回归分析,得到了不同激振力下各连续检测指标与压实度的相关性校验结果,如图 3 所示。汇总图 3 中的决定系数,结果见表 4。图 3 和表 4 中“强、弱振”是基于强振碾压和弱振碾压工艺下的全部测试数据得到的相关性分析结果。

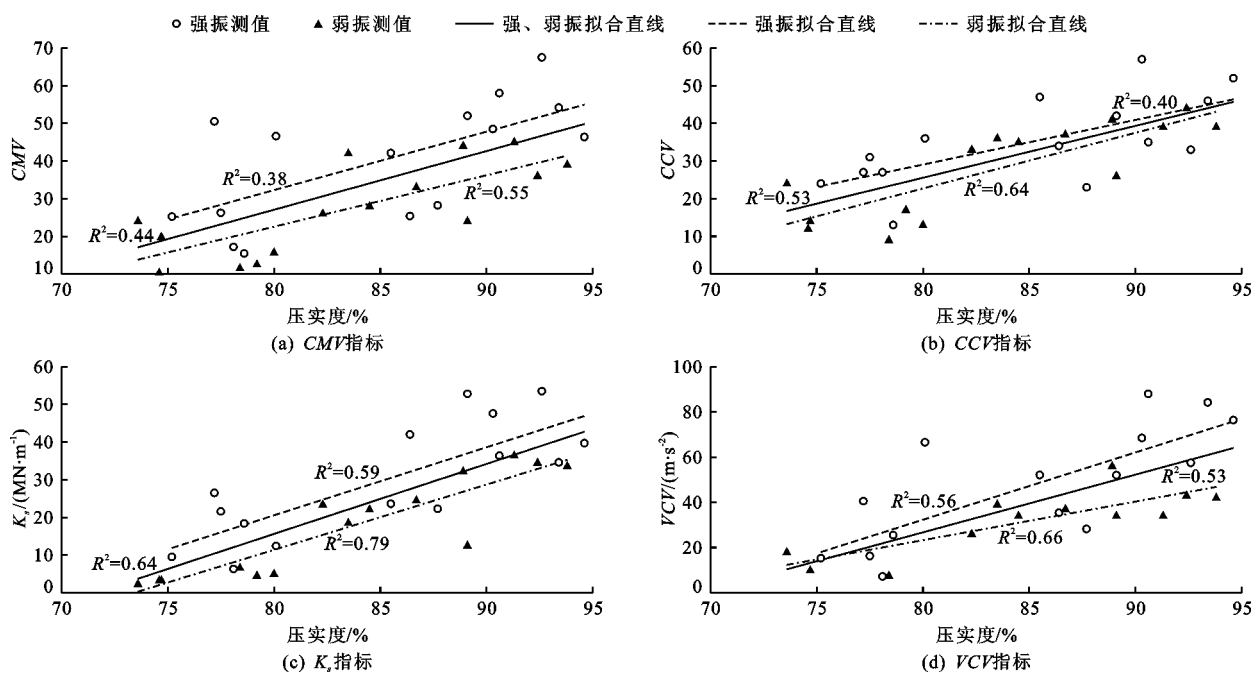


图 3 不同激振力下各连续检测指标与压实度的相关性校验结果

表 4 不同激振力下各连续检测指标与压实度关系的决定系数 R^2

测试工艺 (车速 1.5 km/h)	CMV	CCV	K_s	VCV
弱振(220 kN)	0.55	0.64	0.79	0.66
强振(340 kN)	0.38	0.40	0.59	0.56
强、弱振	0.44	0.53	0.64	0.53

由图 3 和表 4 的结果可知,在弱振碾压测试工况下,各类指标与压实度之间的决定系数均大于 0.5,具有数学意义上的强相关性,能够满足工程应用要求;在强振碾压测试工况下,CMV 和 CCV 指标与压实度之间的决定系数分别为 0.38 和 0.40,小于工程应用的最低标准。此外,各指标在弱振碾压测试下得到决定系数均大于强振碾压测试工况。分析其原因可知,当填筑体的压实程度一定时,强振碾压测试将产生更多的振动轮“跳振”情况。然而,“跳振”时振动轮与填筑体是非耦合的接触,背离了连续压实原理中的两者耦合接触的基本假设条件。因此,强振工况对指标现场校验的影响更显著。

相同工况下,基于 VCV 和 K_s 指标获得的决定系数相比 CMV、CCV 指标更大,表明力学和动力学指标更适用于本试验的工程碾压条件。在不同激振力强度下,基于 CMV、CCV、VCV 和 K_s 指标得到的决定系数波动范围(以弱振结果为基准)依次为 30.9%、37.5%、15.1% 和 25.3%。CMV、CCV 指标的决定系数产生的偏差较大,VCV 和 K_s 指标的决定系数偏差相对较小,表明基于压实度计指标的相关性校验受到激振力的影响更显著。此外,各类指标的强、弱振组合测试的决定系数相比强振测试既有增大情况也有减小情况。由此可见,当激振力不恒定时可能会对相关性校验造成不确定的影响。因此,在进行相关性校验时需确保激振力相对恒定。

4.3 碾压遍数的影响

在试验 3 中,将 50 m 长的碾压长度按照 5 m 的间隔道划分为 10 个检测单元,从起始线向终止线依次编号为 1#~10#。得到了不同碾压遍数下各检测单元各连续检测指标的平均值,如图 4 所示。

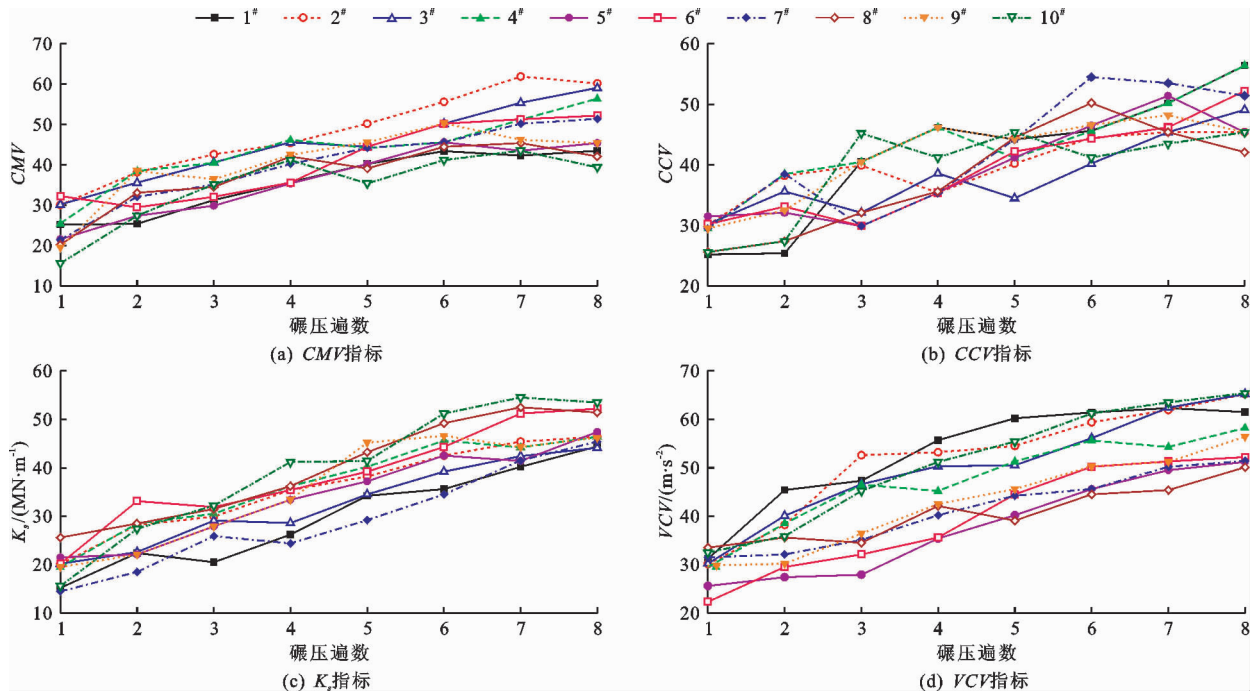


图4 不同碾压遍数下1[#]~10[#]检测单元各连续检测指标的平均值

由图4可知,随着碾压遍数的增加各检测指标均呈现增大趋势。由实践经验可知,碾压遍数越多,填料的压实程度将越高,用以表征填筑体压实程度的连续检测指标值随之增大。图4表明,各检测单元的测值平均值并没有随着碾压遍数的增加而线性增加,存在一定的波动变化。分析其原因可知,测试时的行进速度是通过压路机司机踩踏油门控制的,行车速度存在一定的波动变化,加上测试时采用了强振碾压,根据4.1节的结论可知,强振碾压时由行车速度的波动可能会引起更大的振动测值的变化。另外,碾压测试时的碾压方向正反相间,尽管碾压方向对连续压实控制的影响较小^[8,20],但是这也对振动测试造成了一定的影响。

为了进一步研究各类指标与碾压遍数的关系,对不同碾压遍数下各检测单元的测值平均值进行了相关性分析,计算了碾压遍数与连续检测指标测值的决定系数,结果如表5所示。

由表5可知,各类指标与碾压遍数之间的决定系数均大于0.5,具有较强的线性相关性,表明采用上述指标表征压实质量具有一定的可行性。分析表中决定系数的平均值可知,基于 K_s 指标的结果最大,VCV次之,CMV和CCV相对较小。表明在本试验条件下,力学类指标能够更准确地反馈压实程度的变化。因此,在采用以碾压遍数为主要控制因素的碾压工艺法和测值增量法进行连续压实控制时,选用

K_s 和VCV指标更为合适。

表5 不同检测单元各连续检测指标与碾压遍数关系的决定系数 R^2

检测单元	CMV	CCV	K_s	VCV
1 [#]	0.89	0.84	0.95	0.79
2 [#]	0.89	0.73	0.96	0.86
3 [#]	0.89	0.78	0.97	0.95
4 [#]	0.83	0.83	0.91	0.88
5 [#]	0.92	0.78	0.96	0.96
6 [#]	0.88	0.91	0.92	0.95
7 [#]	0.93	0.74	0.96	0.97
8 [#]	0.67	0.71	0.95	0.88
9 [#]	0.58	0.69	0.85	0.97
10 [#]	0.61	0.51	0.92	0.96
平均值	0.83	0.78	0.94	0.91

5 结 论

本文通过开展现场模拟试验,较为系统的研究了各压实质量连续检测指标的影响因素,所得结论可为土石坝的连续碾压控制提供技术指导和参考。本文得到的主要结论如下:

(1)在本试验条件下,因激振力变动所产生的各连续检测指标测值的偏差约为50%~80%,因行进速度变动产生的偏差在15%以内。此外,因激振

力引起的各指标的相关性校验结果的偏差约为15%~30%。因此,在连续压实控制技术的实际应用中需确保激振力相对恒定。

(2)各连续检测指标在弱振工况下得到的决定系数相对较高,因此建议采用弱振工艺进行连续碾压监测。

(3)相比 CMV 和 CCV 指标, K_s 和 VCV 指标与碾压遍数具有更好的相关性。因此,在采用碾压工艺法和测值增量法进行连续压实控制时,可优先选用 K_s 和 VCV 指标作为控制指标。

参考文献:

- [1] 冯永乾,江辉煌,吴龙梁,等.填筑工程连续压实控制技术研究进展[J].铁道标准设计,2020,64(7):50-58+63.
- [2] 吴龙梁.基于能量耗散的路基连续压实控制技术研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2020.
- [3] 张庆龙,安再展,刘天云,等.土石坝压实的智能控制理论[J].水力发电学报,2020,39(7):34-40.
- [4] 唐建伟,江辉煌,张道修,等.欧美连续压实控制技术规程的技术特点和借鉴[J].土木工程与管理学报,2020,37(3):59-66.
- [5] 吴龙梁,江辉煌,唐建伟,等.基于多元回归分析的连续压实监控技术[J].岩土力学,2020,41(6):2081-2090.
- [6] MOONEY M A, RINEHART R V. *In situ* soil response to vibratory loading and its relationship to roller-measured soil stiffness[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(8):1022-1031.
- [7] MOONEY M A, RINEHART R V, FACAS N W, et al. Intelligent soil compaction systems[R]. National Cooperative Highway Research Program Report, Washington D. C.:Transportation Research Board, 2010.
- [8] 范娟,宋晓东,田利锋,等.高速铁路路基连续压实质量检测指标 CMV 影响因素分析[J].铁道科学与工程学报,2015,12(3):463-467.
- [9] 刘东海,李子龙,王爱国.堆石料压实质量实时监测指标与碾压参数的相关性分析[J].天津大学学报,2013,46(4):361-366.
- [10] 刘东海,刘志磊,冯友文.堆石坝料压实监测指标影响因素及适用性分析[J].水力发电学报,2019,38(6):1-10.
- [11] BARMAN M, NAZARI M, IMRAN S A, et al. Quality control of subgrade soil using intelligent compaction[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2016,1(1):255-263.
- [12] LING Jianming, LIN Sheng, QIAN Jinsong, et al. Continuous compaction control technology for granite residual subgrade compaction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(12):04018316.
- [13] SAVAN C M, NG K W, KSAIBATI K. Benefit-cost analysis and application of intelligent compaction for transportation[J]. Transportation Geotechnics, 2016,9:57-68.
- [14] European Committee for Standardization. Earthworks continuous compaction control: PD CEN/TS 17006:2016[S]. London:BSI Standards Limited, 2017.
- [15] THUMER H, SANDSTROM A. Continuous compaction control, CCC[C]//European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, Presses Fonts et Chaussees. France, Paris. 2000.
- [16] NOHSE Y, KITANO M. Development of a new type of single drum vibratory roller[C]//14th International ISTVS Conference. US, Vicksburg MS, 2002.
- [17] ANDEREGG R. Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern[R]. Zürich:Eidgenössische Technische Hochschule, 1998.
- [18] 徐光辉,高辉,王哲人.路基压实质量连续动态监控技术[J].中国公路学报,2007,20(3):17-22.
- [19] MOONEY M A, RINEHART R V. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(3):257-265.
- [20] KASSEM E, LIU Wenting, SCULLION T, et al. Development of compaction monitoring system for asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96:334-345.