

文章编号: 1674—8247(2024)04—0050—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 04. 010

高速铁路路基智能压实与检测技术研究

岳 茂¹ 杨长卫¹ 申雪松² 周秋来² 王鹏翔³ 刘 洋⁴

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁三局集团有限公司, 太原 030001;

3. 四川西南交大铁路发展股份有限公司, 成都 610041; 4. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要: 本文在京滨城际铁路北辰站开展了现场路基连续压实检测试验, 探讨振动轮与填料表面加速度特征, 同时对能量压实值 CEV 的适用性进行研究。研究表明, 碾压过程中振动轮上的加速度时程数据较为稳定, 地面加速度数据的基波频率与振动压路机的弱振模式频率一致。通过相关性分析, CEV 与常规检测指标的相关系数 ≥ 0.7 , 表明 CEV 整体上的稳定性、抗干扰能力与精准度皆优于 CMV, 更适用于 A 组、B 组粗颗粒填料的压实度检测。

关键词: 高速铁路路基; 连续压实检测; 基波频率; 压实能量值; 相关性

中图分类号: U416.1 文献标志码: A

Research on Intelligent Compaction and Detection Technology of High-speed Railway Subgrade

YUE Mao¹ YANG Changwei¹ SHEN Xuesong² ZHOU Qiulai² WANG Pengxiang³ LIU Yang⁴

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway No. 3 Engineering Group Co., Ltd.,

Taiyuan 030001, China; 3. Sichuan Swjtu Railway Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper carries out on-site continuous compaction detection of subgrade conducted at Beichen Station of Beijing-Binhai Intercity Railway, to explore the acceleration characteristics of the vibrating wheel and the filler surface, and investigates the applicability of the Compaction Energy Value (CEV). The research findings indicate that the acceleration time history data recorded from the vibrating wheel during the rolling process is relatively stable, and the fundamental wave frequency of the ground acceleration data is consistent with the soft vibration mode frequency of the roller. Through correlation analysis, the correlation coefficients between CEV and conventional testing indicators are all ≥ 0.7 , suggesting that CEV is better than CMV in overall stability, anti-interference ability and accuracy, thereby making it a more suitable tool for compaction testing of group A, group B coarse-grained fill.

Key words: high-speed railway subgrade; continuous compaction detection; base wave frequency; compaction energy value; correlation

收稿日期: 2024-08-02

作者简介: 岳茂(1997-), 男, 博士研究生。

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2023-A-03); 四川省科技计划资助(2024YFHZ0121)

引文格式: 岳茂, 杨长卫, 申雪松, 等. 高速铁路路基智能压实与检测技术研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 50-55.

YUE Mao, YANG Changwei, SHEN Xuesong, et al. Research on Intelligent Compaction and Detection Technology of High-speed Railway Subgrade[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 50-55.

路基作为高速铁路的重要载体,其稳定性能关乎列车的正常行驶,因此须对填筑阶段的压实质量进行严格控制^[1-4]。长久以来,高速铁路路基压实质量主要通过力学与物理双指标进行控制^[5-6],但传统的方法无法全面、有效且在短时间内完成检测^[7-8]。部分线路将此技术在工程上进行了应用,并取得了较好的实际效果,在此基础上,国内先后颁布了Q/CR 9210-2015《铁路路基填筑工程连续压实控制技术规程》^[9]和JT/T 1127-2017《公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件》^[10]。

在连续检测技术中,核心部分就是确定检测指标控制值。关于检测指标的发展,最开始由Thurner和Sandstrom^[11]提出了压实计值(Compaction Meter Value, CMV),后面学者在CMV的基础上提出了压实控制指标值(Compaction Control Value, CCV)^[12],此外还有一些国外学者提出了总谐波失真(Total Harmonic Distortion, THD)^[13]、谐振计值(Resonance Meter Value, RMV)^[14]等指标。国内学者结合具体情况也提出了一些检测指标,如徐光辉^[15]等提出了抵抗力指标振动压实值(Vibration Compaction Value, VCV),吴龙梁^[16]提出了一种与机械耗能相关的能量耗散指标耗散测量值(Dissipation Measured Value, DMV)。

综上所述,连续压实控制技术在国内外都经历了一定的发展阶段,但由于较多的检测指标控制值的存在,选择合适的指标显得非常关键,而这主要是根据路基填料来确定的。中国高速铁路路基基本上采用级配较好的A组、B组粗粒土填料进行填筑,研究表明现有的连续检测指标精度不能满足此种填料^[17]。振动碾压其实是一个能量互馈的过程,即振动压路机输入振动能量传递到填料上,而填料在受到作用后又将反馈一部分能量给振动轮。在此基础上,叶阳升^[18]等提出了能量压实值(Compaction Energy Value, CEV)。基于上述内容,本文在京滨北辰站开展现场路基压实试验,并通过CEV、CMV与常规检测指标的相关性对比来验证CEV的精确性,为后续研究提供借鉴。

1 现场试验简介

为了对连续压实检测指标CEV与常规检测指标的相关性进行研究,在天津北辰车站施工现场开展了原型试验。该地区深度0~30 m土层为黄褐色或灰褐色的黏土,地形较平坦,且浅层地下水含量较少,地质岩性孔隙度小。试验进行前,已填筑路基部分的压实

度 $K \geq 0.97$,地基系数 $K_{30} \geq 190$, $E_{vd} \geq 55$,满足现有高速铁路设计规范的相应要求。为进行相应研究,在现场布置了4块50 m×6.21 m的试验区域,每一区域中间2.07 m×24 m的部分作为加速度信号数据收集的部分。每隔1 m设置1个时间记录节点,本次试验采用SSR260C-6振动压路机。本次选择区域3的实测数据来进行研究。其中,每隔1 m设置4个 E_{vd} 测点,共96个 E_{vd} 测点,设置6个 K_{30} 测点与5个压实度测点,并在地面布置5个加速度传感器,如图1所示。其中,划分的24个区域也用于后续连续检测指标CEV与CMV的计算处理,即每一遍检测都有24个连续检测指数数据。图中6~10为加速度传感器。

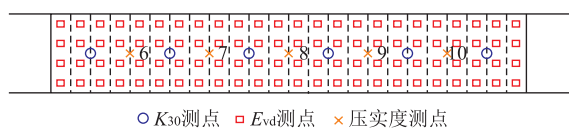


图1 E_{vd} 测点布置示意图

路基填料为A组、B组集料,每次的松铺厚度控制在40 cm左右。在压实试验前,先选取5组土样并通过筛分试验得到其颗粒级配曲线,如图2所示。计算结果得出不均匀系数 C_u 为53.747,曲率系数 C_c 为1.228,说明所用填料级配良好。此外,根据室内试验测试^[19],土体的最大干密度为2.32 g/cm³,土样的平均含水率为6%。在区域3试验设置了3遍的弱振碾压用于指标检测,在每一遍压实之后,按照图1布置的测点对 E_{vd} 数据进行测量。在试验完成后,回收安置在压路机驾驶室内以及汽车上的数据采集仪的数据。

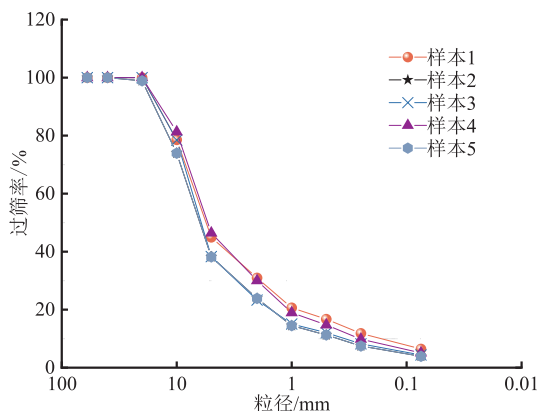


图2 颗粒级配曲线图

2 振动轮与填料表面加速度信号分析

选取第1遍弱振碾压10 s振动轮上的加速度时程以及频域曲线,如图3所示。由图3可知,振动轮

上的加速度时程数据较为稳定,且基波出现在 31 Hz 左右,与压路机的弱振频率 31 Hz 接近,可见所采集到的数据较稳定且精确。

此外,选取 8 号加速度传感器频域曲线进行分析,如图 4 所示。由图 4 可知,3 遍碾压下均出现了多次谐波现象,且基波位于 31 Hz 附近,与压路机弱振模式的频率一致,同时与振动轮上的基波幅值一致,这也说明了此过程能量传递的稳定性。此外,二次谐波与三次谐波分别位于 62 Hz、93 Hz 附近,基本上都为倍数增长。同时,在 3 遍弱振的工况下,随着碾压遍数的增加,基波的峰值也在逐渐增加。

加速度传感器 z 方向上的加速度峰值如图 5 所示。由图 5 可知,在 3 遍弱振工况下,整体上地面与振动轮上的加速度峰值都呈现出递增的趋势。振动轮数据整体上较为稳定,与每一遍加速度峰值的平均值较为接近。在填料振压密实的进程中,填料所接收消耗的能量逐渐减少,因此振动轮传递给地面的能量再反馈给振动轮的能量便会增多,振动轮上的加速度峰值也会相应增大。

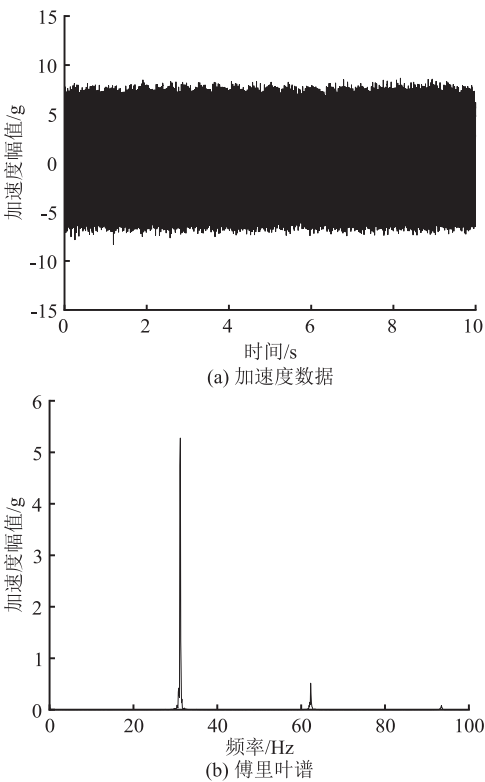


图 3 振动轮加速度时程与傅里叶谱数据图

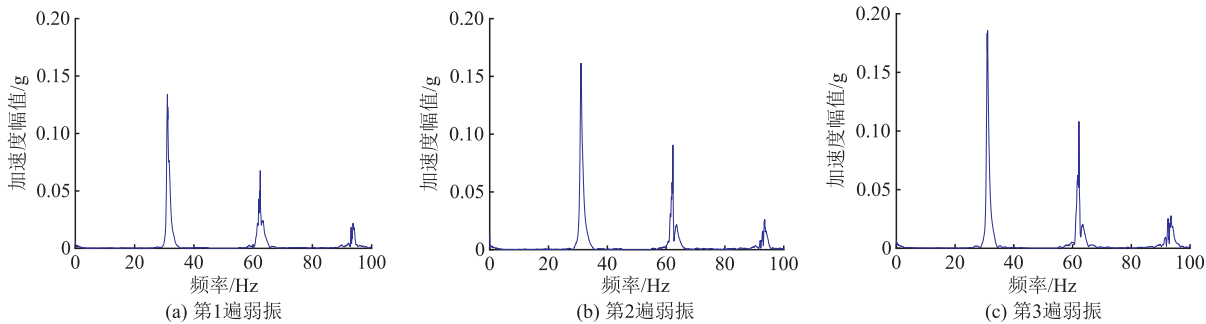


图 4 加速度传感器频域曲线图

此外,选取地面 8 号加速度传感器与振动轮的边际谱曲线进行分析,如图 6 所示。由图 6 可知,3 遍弱振碾压下的地面测点与振动轮的峰值频率均位于 31 Hz 左右,且随碾压遍数的增加而逐渐增加,可见能量的传递过程较稳定,同时也能说明可以通过振动轮的加速度信号及其变换的能量信号来对填料的压实质量进行检测。

3 常规与连续压实检测指标相关性分析

3.1 CEV 简介

CEV 作为能量指标,其计算过程大致如下:第一步,对振动轮实测加速度进行经验模态分解

(Empirical Mode Decomposition, EMD),并利用上下包络线确立“瞬时平衡位置”,然后得到一系列的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF);第二步,对分解得到的多个 IMF 进行 Hilbert 变换,然后得到能量谱;第三步,对能量谱进行积分,即可得到边际谱;第四步,对边际谱曲线进行积分,即可确定振动信号所携带的总能量。

3.2 检测指标分析

通过对现场实测数据进行整理,分别绘制了 3 遍检测下的连续检测指标 CMV、CEV 与常规检测指标 E_{vd} 、 K_{30} 相关数据图,如图 7、图 8 所示。

由图 7 可知,在 3 遍检测结果下,整体上 CEV 与 CMV 数据都呈现出递增的趋势。对比来看,CMV 出

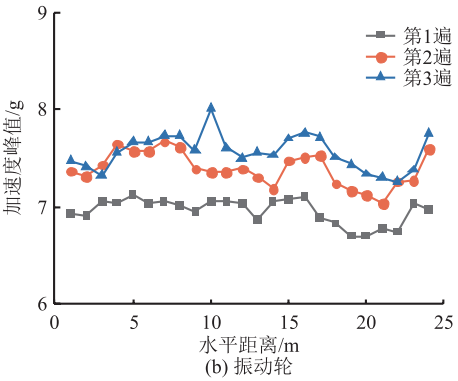
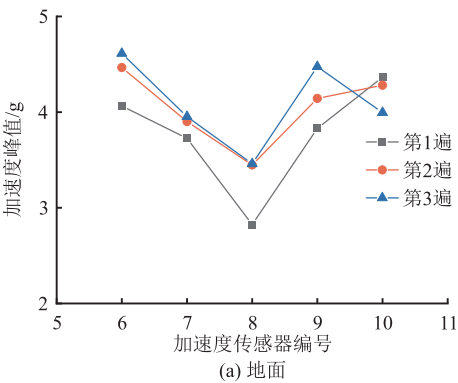


图5 加速度传感器z方向上的加速度峰值图

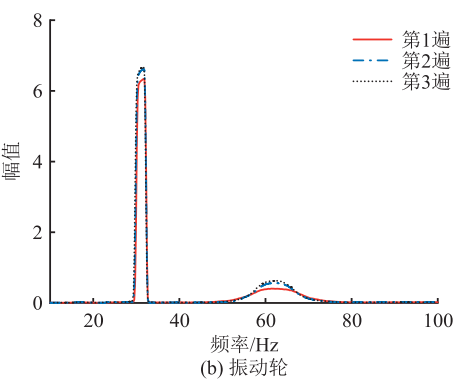
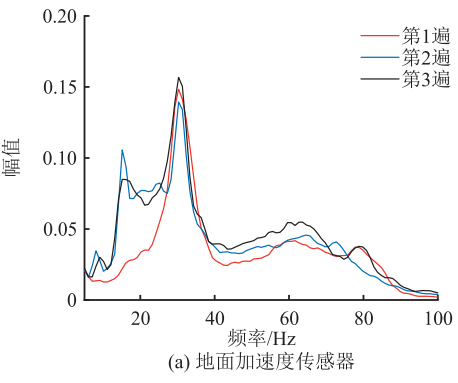


图6 加速度传感器与振动轮的边际谱曲线图

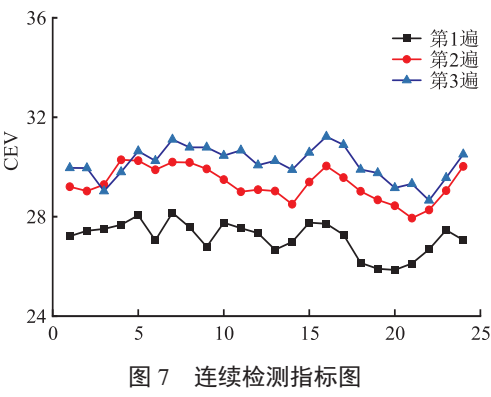
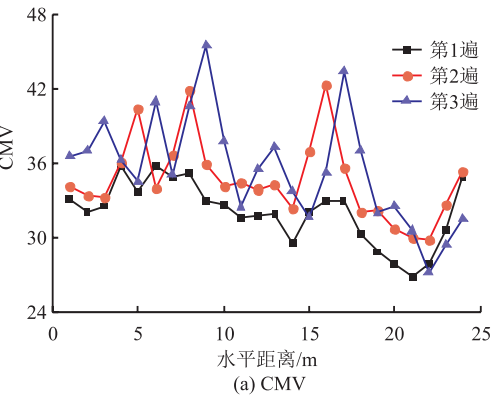


图7 连续检测指标图

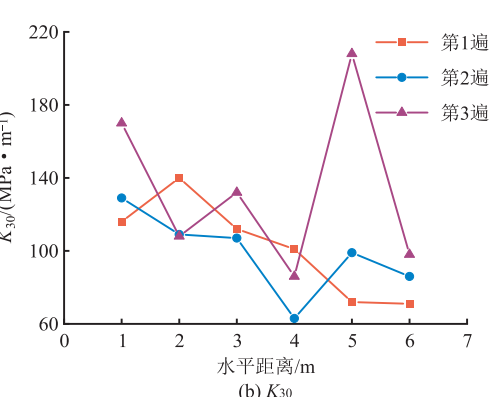
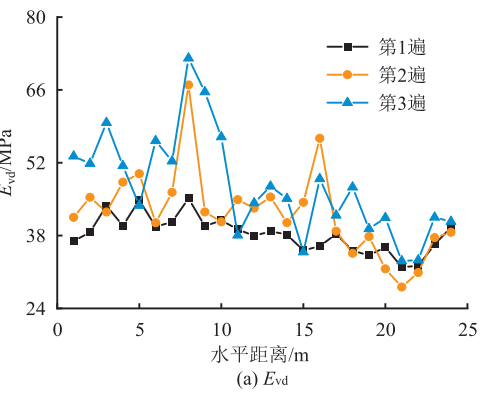


图8 常规检测指标图

现了多处突出点,说明存在的干扰较大,数据并不平稳,而CEV数据整体趋势较为平缓,同时递增现象较为明显,可见CEV的稳定性与抗干扰能力优于CMV。

由图8可知,在3遍检测结果下, E_{vd} 与 K_{30} 整体

上也呈现出递增的趋势,但不同区域的差异性较大,最大值与最小值之间的差距较为明显,可见常规检测指标数据离散性较强。尤其是 K_{30} 数据,因测点较少

且测取耗时相对较长,测取结果存在一定误差,分析时需要一定的考量。

3.3 相关性分析

为研究现场碾压过程中 CMV、CEV 与 E_{vd} 、 K_{30} 和压实度之间的相关性,对三者的数据进行拟合分析,结果如图 9~图 11 所示。

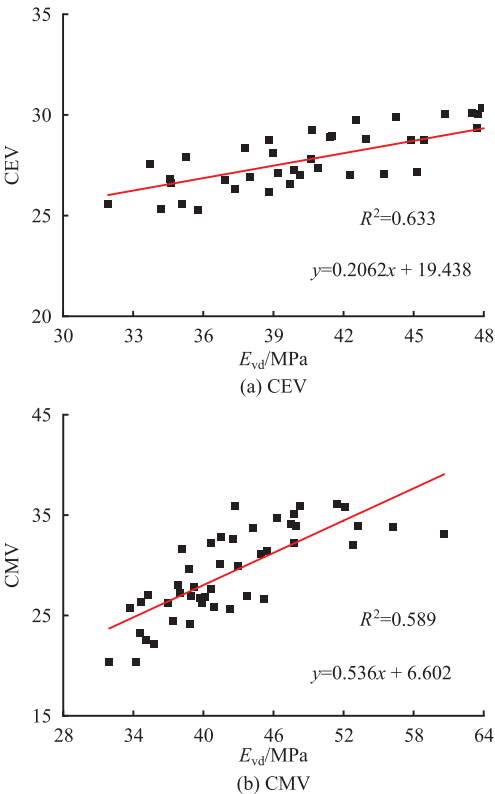


图 9 3 遍检测下碾压 CMV/CEV- E_{vd} 拟合图

由图 9~图 11 可知,3 遍检测下 CEV 和 CMV 与 E_{vd} 拟合得出的决定系数 R^2 分别为 0.633、0.589,与 K_{30} 拟合得出的 R^2 分别为 0.522、0.449,与压实度拟合得出的 R^2 分别为 0.627、0.479。可以看出,CEV 与常规检测指标的拟合程度显著高于 CMV。而所测取的 CMV 数据相对离散,导致其与常规检测指标的拟合性相对较差,且与 K_{30} 和压实度的 R^2 值皆小于 0.49,而现有规范规定连续压实检测指标与常规检测指标的相关性系数 $R \geq 0.7$,即 $R^2 \geq 0.49$,可见此时 CMV 不满足规范要求。

此外,其他场地的连续压实检测指标与常规检测指标相关性系数如表 1 所示。由表 1 可知,CMV 与 E_{vd} 和 K_{30} 的 R^2 值分别为 0.193、0.473,同样未满足规范要求。对比而言,CEV 在两场地与常规检测指标的相关性强,其 R^2 值全部大于 CMV 对应的 R^2 值。

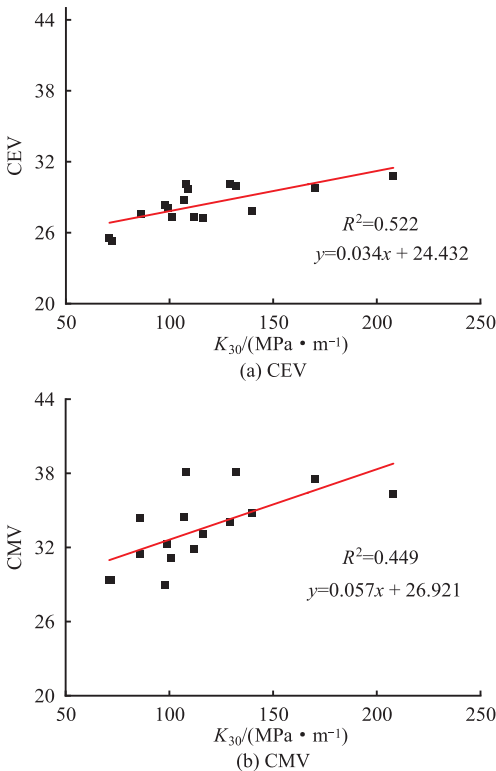


图 10 3 遍检测下碾压 CMV/CEV- K_{30} 拟合图

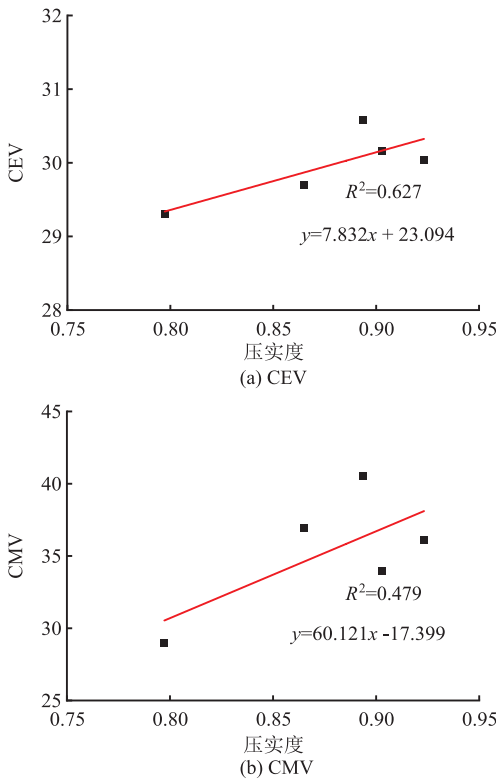


图 11 CMV / CEV-压实度拟合图

表 1 连续压实检测指标与常规检测指标的相关性系数表

决定系数 R^2	CEV	CMV
E_{vd}	0.542	0.193
K_{30}	0.732	0.473

振动压实本质上是一个能量传递与反馈的过程,利用能量检测指标来进行压实质量检测是可行的。对于高速铁路A组、B组集料填筑路基而言,因其不均匀系数较大,导致以谐波计算为主的连续压实检测指标(如CMV)的精准度大幅下降,但以能量计算检测为主的CEV的精准度更高,更适合用于高速铁路A组、B组集料填筑路基的压实质量检测。

4 结论

本文通过开展现场试验,对高速铁路路基连续压实检测技术与检测指标进行了研究,得到主要结论如下:

(1)在碾压过程中,振动轮上的加速度时程数据较为稳定,地面加速度数据的基波频率与弱振频率一致。

(2)在3遍弱振工况下,地面与振动轮上的加速度峰值与边际谱峰值整体上呈递增趋势。

(3)连续检测指标CEV整体上的稳定性与抗干扰能力优于CMV。

(4)通过相关性分析,CEV与常规检测指标的相关系数 ≥ 0.7 ,且CEV的精准度高于CMV,更适用于A组、B组粗颗粒填料的压实度检测。

参考文献:

- [1] 叶阳升,朱宏伟,尧俊凯,等. 高速铁路路基振动压实理论与智能压实技术综述[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 1-11.
YE Yangsheng, ZHU Hongwei, YAO Junkai, et al. Review on Vibration Compaction Theory and Intelligent Compaction Technology of High-speed Railway Subgrade [J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 1-11.
- [2] 岳茂,马洪生,苏珂,等. 循环位移荷载作用下路基动力响应特征[J]. 铁道建筑, 2023, 63(5): 145-148.
YUE Mao, MA Hongsheng, SU Ke, et al. Dynamic Response Characteristics of Subgrade under Cyclic Displacement Load [J]. Railway Engineering, 2023, 63(5): 145-148.
- [3] 苏珂,蔡德钧,马洪生,等. 路基振动压实过程中振动波传播规律[J]. 铁道建筑, 2023, 63(7): 129-133.
SU Ke, CAI Degou, MA Hongsheng, et al. Propagation Laws of Vibration Waves during Process of Subgrade Vibration Compaction [J]. Railway Engineering, 2023, 63(7): 129-133.
- [4] 胡超,张健,陈伟志,等. 盐渍土既有高速铁路路基压实质量检测[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 45-49.
HU Chao, ZHANG Jian, CHEN Weizhi, et al. Quality Inspection of Compaction of Subgrade for Existing High-speed Railway in Saline Soil Environments [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 45-49.
- [5] 叶阳升,蔡德钧,安再展,等. 基于机-土耦合模型的铁路路基连

续压实质量控制方法[J]. 铁道学报, 2024, 46(3): 1-10.

YE Yangsheng, CAI Degou, AN Zaizhan, et al. Quality Control Method for Continuous Compaction of Railway Subgrade Based on Roller-soil Coupling Model [J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(3): 1-10.

- [6] 岳茂. 高速铁路基动力特性与碾压关键参数规划研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
YUE Mao. Study on Dynamic Characteristics of High-speed Railway Subgrade and Key Parametric Programming of Rolling [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [7] 安再展,蔡德钧,叶阳升,等. 基于连续检测的高速铁路路基压实质量控制方法[J]. 铁道建筑, 2024, 64(2): 13-19.
AN Zaizhan, CAI Degou, YE Yangsheng, et al. Compaction Quality Control Method of High Speed Railway Subgrade Based on Continuous Detection [J]. Railway Engineering, 2024, 64(2): 13-19.
- [8] 钱劲松,庞劲松,费伦林,等. 路基智能压实评价指标研究进展综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 388-397.
QIAN Jinsong, PANG Jinsong, FEI Lunlin, et al. A Review of Research Progress on Intelligent Compaction Measurement Values for Subgrade [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(3): 388-397.
- [9] Q/CR 9210-2015 铁路路基填筑工程连续压实控制技术规范[S].
Q/CR 9210-2015 Technical Specification for Continuous Compaction Control of Fill Engineering of Railway Earth Structure [S].
- [10] JT/T 1127-2017 公路路基填筑工程连续压实控制系统技术条件[S].
JT/T 1127-2017 Technical Requirements for Continuous Compaction Control System of Fill Engineering of Subgrade for Highway [S].
- [11] THURNER H, SANDSTROM A. Compaction of Soils and Granular Materials [C]. Modeling and Properties of Compacted Materials. Paris: 2000, 237-246.
- [12] XU Qinwu, CHANG G K. Evaluation of Intelligent Compaction for Asphalt Materials [J]. Automation in Construction, 2013, 30: 104-112.
- [13] 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.
- [14] BOARD T R. Intelligent Soil Compaction Systems [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2010.
- [15] 徐光辉. 路基连续压实控制动力学原理与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
XU Guanghui. Dynamics Principle and Engineering Application for Continuous Compaction Control of Fill Engineering of Subgrade [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [16] 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.
WU Longliang. Research on Control Technology of Subgrade (下转第93页)

参考文献:

- [1] 田四明,王伟,杨昌宇,等. 中国铁路隧道40年发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1903–1930.
TIAN Siming, WANG Wei, YANG Changyu, et al. Development and Prospect of Railway Tunnels in China in Recent 40 Years [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1903–1930.
- [2] 周航,陈仕阔,刘彤,等. 复杂山区深埋隧道软岩大变形机理研究:以杨家坪隧道为例[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 852–862.
ZHOU Hang, CHEN Shikuo, LIU Tong, et al. Large Deformation Mechanism of Soft Rock Surrounding Tunnel Deep Buried in Complex Mountainous: a Case Study of Yangjiaping Tunnel [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 852–862.
- [3] 白明洲,陈云,师海. 山岭隧道施工诱发地下水位下降环境风险评估[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 5–10, 15.
BAI Mingzhou, CHEN Yun, SHI Hai. Environmental Risk Assessment of Underground Water Level Falling Induced by Construction in Mountain Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 5–10, 15.
- [4] 李晓军,徐昊, Gokdemir Cagri,等. 隧道排水诱发地下水位下降对地表植被影响的TSPAC分析方法[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(9): 1261–1271.
LI Xiaojun, XU Hao, CAGRI G, et al. TSPAC Analysis Method for Impact of Groundwater Drawdown Induced by Tunnel Drainage on Terrestrial Vegetation [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(9): 1261–1271.
- [5] 肖泽荣. 基于地下水生态平衡埋深的隧道排水量设计计算[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(10): 1471–1479.
XIAO Zerong. Design and Calculation of Tunnel Drainage Based on Ecological Equilibrium Embedment Depth of Groundwater [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(10): 1471–1479.
- [6] 郭鸿雁,纪亚英,方林,等. 基于流固耦合分析的富水隧道外水压力与限量排放标准研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 165–168.
GUO Hongyan, JI Yaying, FANG Lin, et al. Study on External Water Pressure and Limited Discharge Standard of Water-rich Tunnel Based on Fluid-solid Coupling Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 165–168.
- [7] 陈国栋. 城际铁路矿山法隧道防排水体系探讨[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(3): 45–51.
CHEN Guodong. Discussion on Water Handling System for Mined Tunnels of Intercity Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 45–51.
- [8] 樊浩博,周定坤,刘勇,等. 富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1884–1898.
FAN Haobo, ZHOU Dingkun, LIU Yong, et al. Mechanical Response Characteristics of Lining Structure of Pipeline Karst Tunnels in Water-rich Areas [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1884–1898.
- [9] 尚海松,郑波,郭瑞. 岩溶富水隧道水压变化引起的结构力学响应及防治措施[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 374–381.
SHANG Haisong, ZHENG Bo, GUO Rui. Structural Mechanical Response Caused by Water Pressure Change in Karst Water-rich Tunnel and Its Prevention Measures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 374–381.
- [10] 郭瑞,郑波,吴剑,等. 降雨过程中隧道衬砌水压力的动态规律研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(5): 75–81.
GUO Rui, ZHENG Bo, WU Jian, et al. Research on the Dynamic Law of Water Pressure in Tunnel Lining during Rainfall [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(5): 75–81.
- [11] 曹艳妮. 溶岩与非溶岩地区隧道排水系统堵塞机理[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 35–39.
CAO Yanni. Blockage Mechanism of Tunnel Drainage System in Karst and Non-karst Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 35–39.

(上接第55页)

- Continuous Compaction Based on Energy Dissipation [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [17] 徐光辉. 路基系统形成过程动态监控技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
XU Guanghui. Dynamic Monitoring Technology of Subgrade System Formation Process [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [18] 叶阳升,蔡德钧,朱宏伟,等. 基于振动能量的新型高速铁路路基压实连续检测控制指标研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 127–132.
YE Yangsheng, CAI Degou, ZHU Hongwei, et al. Research on New Continuous Compaction Control Index of High-speed Railway Subgrade Based on Vibration Energy [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 127–132.
- [19] 东爱明. 高速铁路粗粒土最大干密度试验方法研究[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(5): 1–5.
DONG Aiming. Research on Test Method for Maximum Dry Density of Coarse-grained Soil in High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(5): 1–5.