

高速铁路路基压实质量多参数影响规律及机制研究

张欣伟¹ 王佶琨²

1. 中科(湖南)先进轨道交通研究院有限公司, 中国·湖南 株洲 412000

2. 广深铁路股份有限公司广州工务段, 中国·广东 广州 510000

摘要: 路基工程是高速铁路的重要组成部分, 其压实质量对后期高速列车的运营安全至关重要。针对高速铁路路基压实质量控制中多工艺参数交互作用机理不明确的问题, 本研究通过开展振动压实现场试验, 通过控制碾压速度、振动频率和振动幅值三种参数, 系统的研究路基压实质量的影响规律, 揭示振动波的传播机制。为保证高速铁路振动碾压路基填方压实的效率和质量提供参考, 有效提高高速铁路路基的运营稳定性。

关键词: 高速铁路路基; 碾压速度; 振动频率; 振动幅值

Research on the Multi-parameter Influence Law and Mechanism of Compaction Quality of High-speed Railway Subgrade

Xinwei Zhang¹ Jikun Wang²

1. Zhongke (Hunan) Advanced Rail Transit Research Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan, 412000, China

2. Guangzhou-Shenzhen Railway Corporation Limited, Guangzhou Works Section, Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract: Subgrade engineering is an important part of high-speed railway, and its compaction quality is crucial to the operation safety of high-speed trains in the later period. In view of the problem of the unclear interaction mechanism of multiple process parameters in the compaction quality control of high-speed railway subgrade, this study conducts the field test of vibration compaction, systematically studies the influence law of vibration compaction quality by controlling the rolling speed, vibration frequency and vibration amplitude, and reveals the propagation mechanism of vibration wave. In order to ensure the efficiency and quality of high-speed railway vibration rolling subgrade compaction, and effectively improve the operation stability of high-speed railway subgrade.

Keywords: high-speed railway subgrade; rolling speed; vibration frequency; vibration amplitude

0 前言

随着社会经济的发展和公众长距离出行需求的增长, 中国铁路运输发展迅速, 已建成较为完善的铁路网络。据相关研究显示, 中国高速铁路运营里程将在未来几年内持续显著提升^[1]。在列车循环动荷载作用下^[2], 高速铁路易出现沉降、变形等病害, 进而影响列车的安全使用性能。因此, 在复杂交通条件下保证路基的良好运营, 并在此基础上维持其稳定性就成为亟待解决的问题^[3]。

近年来, 振动压路机作为一种有效的动态压实设备, 广泛应用于路基填料的压实作业中, 基于振动响应的实时监测逐渐成为评估压实质量的研究热点。振动压路机通过振动轮产生的振动波在路基填料中传播, 能够反映土体的动态响应特性, 进而推断压实质量。然而, 振动波的传播机制、频率与车速等因素对土体动态响应的影响尚不完全明了。因此, 如何准确捕捉振动波对土体压实效果的影响, 成为研究的关键。目前, 众多学者就此类问题展开相关研究。林鹏^[4]通过室内动三轴试验, 进行了振动荷载下高铁路基粗粒土填料应变规律研究; 邓国栋等^[5]分析了高速铁路粗粒土填料的动力参数。虽然此类研究方法已趋于成熟, 但对振动波

的传递规律及其与土体压实质量之间的关系研究还有欠缺。本研究旨在通过实验分析不同车速和振动工况下振动压路机的动态响应, 探索振动波的传递规律及其与土体压实质量之间的关系, 为振动压路机压实质量的实时监测提供理论依据, 并为未来相关研究和工程应用提供指导。

1 现场试验简介

本次试验振动压实设备采用三一重工 SSR260C-6 型振动压路机, 整机质量 26.7t, 额定功率 180kW, 振动频率为 27~31Hz, 振动幅值为 1.03~2.05mm。数据采集设备采用东华测试 32 通道动态数据采集设备 DH5922D, 加速度传感器分别采用东华测试三向加速度传感器 1C302, 量程为 $\pm 5.0g$, 埋置在路基填料表层。试验场地及设备如图 1 所示。

2 路基压实质量参数影响规律

2.1 碾压速度对压实效果的影响规律

为研究在相同工况下, 振动压路机在不同车速下对路基填料振动响应的规律, 本研究仅改变振动压路机的行车速度, 分析不同车速下路基填料中加速度信号的加速度幅值, 以此揭示车速对路基内动力响应的影响。具体通过对比不同

车速条件下路基填料中加速度信号的幅值变化,探讨车速变化对路基内动力响应强度的影响。图2展示了在碾压过程中,振动压路机位于测点二时,测点一至测点六处的加速度峰值曲线。从图中可以看出,随着振动压路机行驶速度的提高,路基填料内部的动力响应加速度幅值呈现显著降低的趋势。这表明,车速的升高对路基内动力响应的影响较为显著,且随着车速的增加,路基填料的振动响应逐渐减弱,可能是由于高车速下的振动压路机作用力分布发生变化,导致填料的振动响应减弱。



图 1 试验场地与设备示意图

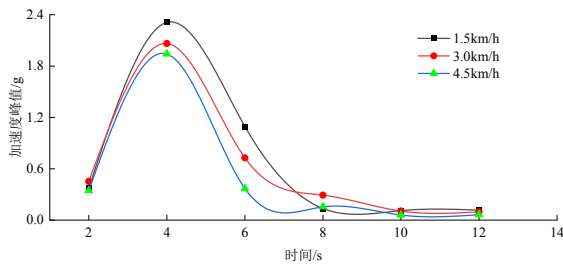


图 2 碾压过程中不同车速加速度峰值

由此,振动压路机在碾压过程中产生的振动波会在路基填料中传播,车速较低时,振动波传递的时间较长,能量积累较多,从而导致较强的加速度响应;而随着车速的提高,

振动波的传播速度增加,振动能量更快地传递到更远的地方,减少了能量在路基填料中的积累,导致加速度幅值的降低。因此,车速对振动波传递机制的影响直接决定了路基内动力响应的强度。

2.2 振动幅值对压实效果的影响规律

振幅是动力系统中的一个重要特征参数,能够反映振动的强度和对物体的作用效果。在振动压路机的工作过程中,振幅可以分为名义振幅和实际振幅两种类型。名义振幅是指在不考虑土体作用的理想状态下,通过悬空振动测得的振幅值,是一种理论值。在本次实验中,振动压路机的强振名义振幅为 2.05mm,而弱振名义振幅则为 1.03mm。实际碾压过程中,由于振动轮与被压土体之间的相互作用,土体的存在会对振动的传播和振幅产生影响,因此,实际振幅通常不同于名义振幅。图3展示了在第1遍和第14遍碾压过程中,分别对应两种不同振动模式下的实际振幅。从图中可以看出,强振模式下的实际振幅明显大于弱振模式下的实际振幅,其中强振的实际振幅约为 3mm,弱振的实际振幅约为 1.5mm。值得注意的是,实际振幅普遍大于名义振幅,这表明土体的压实效应在实际碾压过程中对振动幅值有着显著的影响。振幅越大,意味着土体受到的变形越大,从而带来更好的压实效果。因此,强振模式的压实效果明显优于弱振模式,能够更有效地提高土体的密实度和稳定性。

在实际碾压过程中,振动压路机的振幅不仅受到车速和压实模式的影响,还受到土体的力学特性和与振动轮的相互作用的影响。强振模式下,由于较大的振幅,振动波在土体中的传播距离较长,能量得以更充分地传递到土体深层,导致土体的变形和压实效果更显著。这表明,较大的振幅能够使得更多的振动能量有效地传递到土体中,促进土体颗粒之间的相互作用和压实。

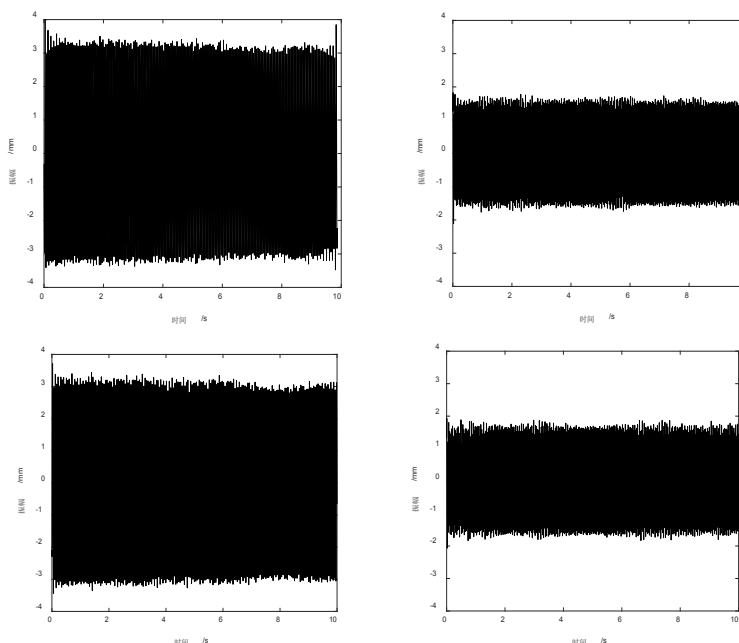


图 3 强振与弱振工况振幅对比

弱振模式下,较小的振幅导致振动波的能量传递受限,波传播的距离较短,无法充分影响土体深层,导致较低的变形和压实效果。因此,振动波的传递机制不仅依赖于振动压路机的振幅大小,还与土体的力学性质、密实度以及振动波在土体中的传播特性密切相关。较大的实际振幅反映了振动波在土体中的有效传播和能量转化,从而能够有效提高压实质量。

2.3 振动频率对压实效果的影响规律

图 4 展示了分别在两条强振与弱振工况试验车道中,加速度幅值 A 与碾压遍数之间的关系。通过图中数据可以看出,所有试验工况下的加速度幅值 A 都随着碾压遍数的增加而逐渐增大。这表明,在碾压过程中,无论是强振还是弱振工况,随着压实过程的深入,路基填料的动力响应逐渐加强。然而,在弱振工况下,两条试验车道的加速度幅值 A 基本一致,从初始的 57m/s^2 逐步增加至稳定的 63m/s^2 。这表明,弱振工况下的加速度幅值变化较为稳定,且具有较好的可重复性,能够在不同的试验条件下得到一致的结果。

相比之下,在强振工况下,两条试验车道的加速度幅值差异较大。1 车道的 A 范围为 70m/s^2 到 73m/s^2 ,而 2 车道的 A 范围为 64m/s^2 到 69m/s^2 ,显示出强振工况下的加速度幅值存在较大的离散性。这种离散性可能是由于振动压路机的工作状态、土体的密实性、振动传递的差异等多种因素共同作用所导致的。此外,强振工况下加速度的变化率明显小于弱振工况,这意味着在强振状态下,随着碾压遍数的增加,加速度的提升幅度相对较小,可能表明土体已经较为密实,进一步的压实效果趋于平缓。

综上所述,虽然加速度幅值 A 能够反映压实过程中土体的动力响应,但在强振工况下,由于其较大的离散性和变化的不稳定性,无法作为粗粒土填料压实质量连续检测的有效指标。特别是在强振工况下,加速度的波动较大,不适合作为衡量土体压实质量的精确标准。

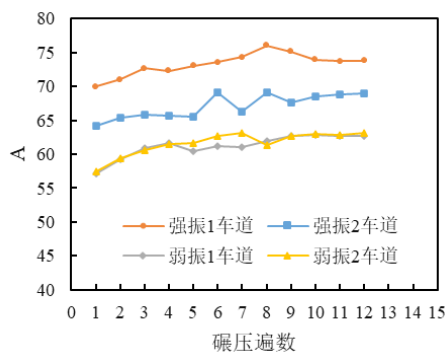


图 4 振动模式对加速度幅值的影响

在强振工况下,由于较高的振幅和较高的频率,振动波的能量传播可能更为集中,并且在土体内部的传播速度较快。高频振动波通常在土体中传播的距离较短,能量会迅速被吸收或衰减,因此土体的振动响应可能更加复杂和不稳定,导致加速度幅值 A 的离散性增大。这种情况下,较高频率的振动波可能更容易激发土体颗粒之间的微观位移和相互作用,从而引起不均匀的能量分布和土体内部的振动响应差异。相反,在弱振工况下,频率较低的振动波能量传播较为均匀,较低的频率意味着波的传播距离较远,能够影响到更深层次的土体结构。因此,频率较低时,振动波的能量更容易在土体内部扩散和传递,导致土体的动力响应更加平稳,振动幅值较为一致,变化较小,从而表现出较好的可重复性。

3 结语

本研究通过对振动压路机在不同车速和振动工况下的碾压试验,揭示了振动波在路基填料中的传递机制及其对加速度响应的影响。实验结果表明,车速和振动模式对路基内动力响应有显著影响,尤其在强振工况下,振动波传播的能量较为复杂,导致加速度幅值呈现较大的离散性,而在弱振工况下,振动波的传递较为均匀,能量分布稳定,加速度幅值变化较小且可重复性较好。此外,频率对振动波传播和土体的动力响应也起到重要作用,较高频率的振动波可能引发不均匀的能量分布,而较低频率则有助于能量在土体中的平稳传播。研究表明,加速度幅值在强振工况下不适合作为粗粒土填料压实质量的连续检测指标,而弱振工况下的加速度响应则具有更好的稳定性和可控性,为压实质量监测提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 夏林.高速铁路路路基上拱变形问题综述及对策[J].汽车周刊,2024(11):234-236.
- [2] 郭万里,朱俊高,钱彬,等.粗粒土的颗粒破碎演化模型及其试验验证[J].岩土力学,2019,40(3):1023-1029.
- [3] 罗佳,杨长卫,徐贤青,等.千枚岩及灰岩路基填料击实特性试验研究[J].铁道建筑,2024,64(8):117-122.
- [4] 林鹏.振动荷载下高速铁路粗粒土填料应变规律研究[J].江西建材,2024(7):279-281.
- [5] 邓国栋,张家生,王启云,等.高速铁路粗粒土填料动力参数试验研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(2):76-83.

作者简介:张欣伟(1994-),男,中国陕西西安人,本科,初级工程师,从事路线及路基路面设计研究。