

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221262

表面振动激励下新拌混凝土动力响应与能量传递特征

马宇航, 田正宏, 马元山

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究面层振动荷载作用下新拌混凝土内部动力响应与能量传递的时空演变特征, 开展了新浇混凝土的室内平板振动密实试验。通过受振混凝土内部不同埋深处加速度传感器获取密实过程中实时动力响应特征参数, 采用小波阈值去噪法对振动信号降噪处理, 通过测点加速度响应分析新拌混凝土内部运动能量的时空演变规律。结果表明, 表面振动源附近集料颗粒以竖向运动为主, 宏观尺度下表现为新拌混凝土表面明显沉降; 随埋深增加, 内部远端颗粒因无法获得充足振动能量, 难以克服颗粒间嵌挤力与介质内摩擦阻力而保持初始平衡状态, 受振影响小; 新拌混凝土振动密实过程中内部颗粒的竖向加速度大于侧向加速度, 随着新拌混凝土密实程度的增加, 竖向加速度幅值先减小后基本保持不变, 侧向加速度幅值先减小后略有增大; 振源附近混凝土振动能量衰减幅度最大, 但随着埋深增加振动能量衰减不显著。该结论可为新拌混凝土振动密实理论构建及深入研究提供参考。

关键词: 振动密实; 新拌混凝土; 滤波去噪; 动力响应; 能量衰减

中图分类号: TV431; TV53⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)03-0157-04

1 引言

在混凝土浇筑过程中, 可利用振动排出拌合物内部气泡, 使骨料结合紧密, 从而提高混凝土的密度、强度和耐久性^[1]。振动能量在混凝土内传播过程中, 随着传播距离的增大, 按某种规律衰减, 在有效振捣范围外的颗粒因无法获得充足的振动能量而无法实现有效密实^[2]。因此, 研究振动荷载作用下混凝土内部颗粒间运动状态及能量状态时空演变规律, 对控制混凝土质量至关重要。现有研究大多集中在插入式振捣棒振动对混凝土流变性能与骨料沉降的影响, 极少探讨面层振动荷载作用下新拌混凝土内部动力响应与能量状态时空演变特征。ZHANG JUNYI 等^[3]通过室内振捣试验, 分析了不同振动参数、砂浆粘度、振动时间等因素对新拌混凝土离析的影响; LI ZHUGUO 等^[4]基于艾林速率过程理论, 探讨了振捣时间、混凝土坍落度与厚度等因素对新拌混凝土抗剪切变形能力的影响, 提出了振动状态下新拌混凝土的流变模型。为此, 本文开展了新拌混凝土

室内平板振动密实试验, 采用小波阈值法对振动信号降噪处理, 分析振动密实过程中新拌混凝土内部不同埋深处加速度时程响应及其运动能量时空演变规律, 以期分析表面振动荷载作用下混凝土密实机理提供参考。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料与配合比

水泥采用标号 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥; 粗骨料为 5~25 mm 连续级配碎石, 表观密度为 2 700 kg/m³; 细骨料采用连续级配河沙, 细度模数 2.4, 密度为 2 650 kg/m³; 减水剂采用聚羧酸高效减水剂; 拌合水为自来水。混凝土配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Concrete mix proportions

水灰比	原料/(kg·m ⁻³)				减水剂
	水	水泥	细骨料	粗骨料	
0.5	230	460	676	1 060	2.3

2.2 平板振动密实试验

试验所用混凝土振动密实设备为 ZW-2.5 型

收稿日期: 2022-05-17, 修回日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879094)

作者简介: 马宇航(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利水电新材料、新技术, E-mail: 3334636612@qq.com

通讯作者: 田正宏(1966-), 男, 教授、博导, 研究方向为土木与水利工程施工新材料、新技术, E-mail: zh-tian@hhu.edu.cn

平板振动器,额定功率 0.55 kW,激振力 2 500 N,振动频率为 48 Hz,数据采集设备采用东方所 16 通道动态数据采集设备 INV3062A4,加速度传感器采用利恩斯三向加速度传感器 B06Y70,采样频率为 2 kHz,量程为 ±50g。以边填筑边埋设的方式将传感器与直径 19.0、25.4 mm 钢球布置在平板振动器下四层混凝土铺层(图 1),每层间隔 50 mm,获取振动过程中混凝土各测点的加速度同步响应数据,振动结束后测量各钢球的沉降量。

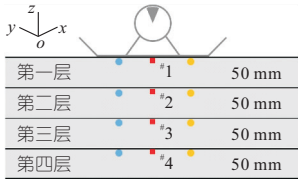


图 1 测点布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring points layout

3 振动信号时程响应分析

3.1 振动信号去噪处理

由于振动波在混凝土内传播途径复杂多变,振动密实过程中产生的是宽频带、非平稳、非线性的随机振动信号。为此,采用小波阈值法对混凝土振动信号进行分解、阈值去噪和重构,可有效提取出较纯净的加速度特征信号。小波阈值去噪方法是一种多尺度的信号分析方法,结合 Daubechies 小波系列较好的紧支撑性、光滑性及近似对称性,采用小波基 db6 对含噪信号进行 5 层小波分解,选取固定阈值确定阈值系数,考虑到硬阈值函数去噪后振动信号将产生不连续性和跳跃性,因此采用软阈值函数进行处理,软阈值函数表达式为:

$$\omega_\lambda = \begin{cases} \text{sgn}(\omega)(|\omega| - \lambda) & |\omega| \geq \lambda \\ 0 & |\omega| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_λ 为阈值算法处理后小波系数; ω 为原始信号经过小波分解后的小波系数; λ 为阈值。

降噪效果常用信噪比、均方根差进行衡量,信噪比越大、均方根差越小,去噪效果越好。信噪比 S_{SNR} 、均方根差 R_{RMSE} 的计算公式分别为:

$$S_{SNR} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \right] \quad (2)$$

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (3)$$

式中, x_i 为原始信号序列; \hat{x}_i 为去噪后的信号序列; N 为信号长度。

以 #1 测点的 z 向加速度去噪为例,分别采用

小波阈值法与低通滤波法对其进行处理,结果见表 2。由表 2 可知,小波阈值法在信噪比和均方根差上均优于传统低通滤波法。原始波形与小波重构波形见图 2。由图 2 可知,预处理后的信号波形重新回到基线中央,同时曲线更加光滑,受噪声导致幅值拉高的影响,经预处理后消失,表明采用小波分析能较准确地提取振动特征信号。

表 2 衡量指标对比

Tab. 2 Comparison of measurement indicators

处理方法	S_{SNR}	R_{RMSE}
小波阈值法	7.009 7	3.307 8
低通滤波法	4.436 0	3.736 2

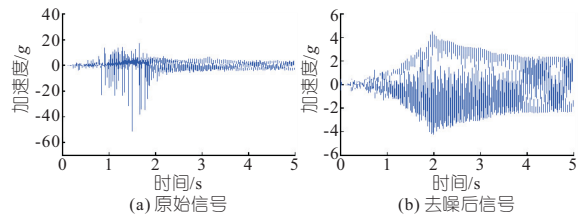


图 2 预处理前后信号波形

Fig. 2 Signal waveforms before and after preprocessing

3.2 加速度时程响应分析

为便于比较分析不同测点加速度的时程响应规律,将各测点加速度时程响应取上下包络线,见图 3。由图 3 可知,新拌混凝土受振密实过程中不同空间位置处的加速度时程曲线变化规律较为类似,即颗粒的竖向加速度均大于侧向加速度,侧向加速度是指 x 、 y 向加速度。振动开始时由于

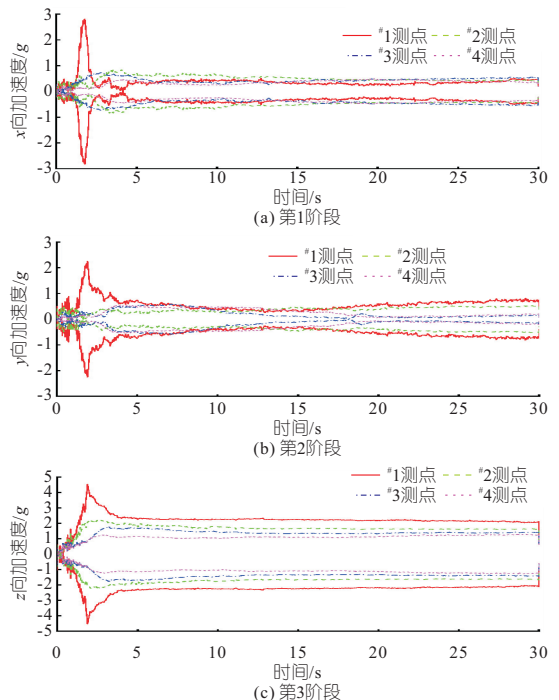


图 3 不同阶段混凝土内部不同位置处的加速度时程曲线
Fig. 3 Time history curves of acceleration responses placed at different positions inside the concrete during different stages

振动能量瞬间作用于新拌混凝土,使混凝土的各向加速度急剧上升,随着新拌混凝土逐步振动密实,竖向加速度幅值先减小后基本保持不变,侧向加速度则先减小后稍有增大。

(1)振动密实的第 1 阶段(0~10 s)。混凝土受振后快速液化,表面不再发生明显沉降现象。具体表现为 0~10 s 内各测点不同方向加速度逐渐减小,这是因为在静止状态的新拌混凝土中,粗骨料颗粒相互接触形成“拱结构”而成为稳定状态。激振力产生的剪应力超过粗骨料颗粒之间的内摩擦阻力与砂浆粘滞阻力,作用在颗粒上的激振力周期性地与重力同向叠加导致颗粒下沉,颗粒间空隙迅速减小,新拌混凝土逐渐密实,运动空间变小,颗粒的运动趋势逐渐减小。同时该阶段 z 向加速度远大于 x、y 向加速度,表明颗粒主要发生较大的竖向位移。距离振动源最远的 # 4 测点竖向加速度基本保持不变,这是因为振动能量在由混凝土上表面向下传播的过程中发生了衰减,即随着与振动源距离的增加,颗粒的动能减小,而作用在剪切面上的法向应力随着深度的增加而增大,随着法向应力引起的骨料颗粒间摩擦的增加,位于较深位置的混凝土具有较大的抗剪切变形能力^[5],故 # 4 测点因无法获得足够振动能量以克服摩擦阻力而在初始平衡位置保持振动状态。

(2)振动密实第 2 阶段(10~20 s)。各测点的 z、x、y 向加速度由基本稳定转为逐渐增大,表明该阶段骨料颗粒已排列成较为致密骨架,颗粒竖向运动受限,有较小的水平向运动空间,运动较为稳定。

(3)振动密实第 3 阶段(20~30 s)。该阶段混凝土排气基本结束,新拌混凝土已达密实状态^[6]。各测点各向加速度基本保持不变,个别测点的侧向加速度有小幅变化,这表明整个颗粒结构变得稳定。此外,振动能量不足以破坏骨架支撑力与颗粒间摩擦阻力形成的致密结构,而被大量耗散,达到该外力作用下的密实状态。

混凝土振动密实试验结束后统计钢珠竖向位置见图 4。由图 4 可知, # 1 测点钢球由初始位置 20 cm 处分别沉落至 14、13 cm 处, # 4 测点钢球

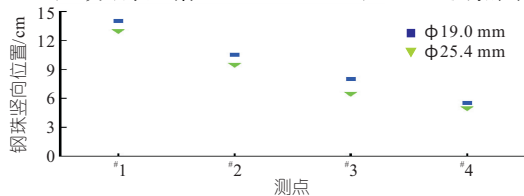


图 4 各测点钢珠位置

Fig. 4 Location of steel ball at each measuring point

未发生明显竖向位移,基本保持初始位置不变,故越靠近振动源,骨料的沉降位移越大,且大粒径骨料由于受到的惯性力较大其竖向位移均大于小粒径骨料,这进一步证明了分析的正确性。

4 振动荷载下颗粒运动能量分布规律

为进一步量化非线性振动信号所携带的运动能量及其时空演变规律,对各测点加速度信号进行本征模态分解,进而提取一系列具有不同特征尺度的固有模态分量 IMF,对分解出的信号分量进行希尔伯特黄变换,即:

$$E(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^{n+1} a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (4)$$

式中, $E(\omega, t)$ 为振动信号能量谱; $a_i(t)$ 为 IMF 幅值随时间的函数; $\omega_i(t)$ 为 IMF 频率随时间变化的函数; Re 为取实部; n 为 IMF 数量。

对式(4)积分,即可得振动加速度在频率—幅值尺度上的能量谱为:

$$e(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega, t) dt \quad (5)$$

式中, $e(\omega, t)$ 为振动信号边际谱。

图 5 为新拌混凝土振动密实不同阶段不同埋深处在不同方向的能量幅值统计结果。由图 5 可看出,不同密实阶段混凝土的能量在竖直方向变化类似,均随埋深增加不断减小,说明振动波在由新拌混凝土顶部向底部传播的过程中发生了衰减,在振动密实 3 个不同阶段,振源附近的混凝土振动能量衰减幅度最大,随着埋深增加振动能量衰减率逐渐减小,主要原因为平板振动器周边混凝土受振剪切稀化,浆体粘度减小显著,动量传递运输减弱;另一方面,表面浆体内携带许多因振动

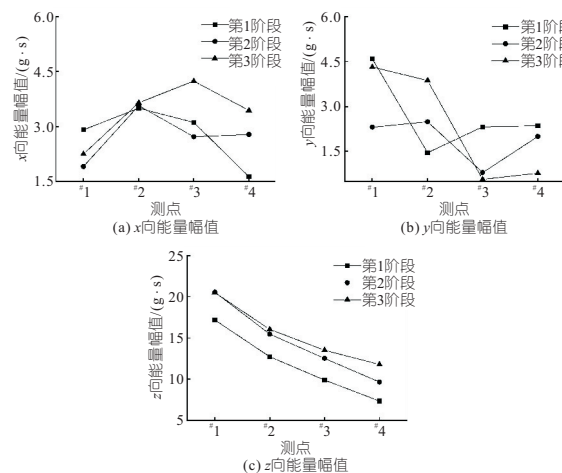


图 5 不同阶段混凝土内部不同位置处的能量幅值

Fig. 5 Kinematic energy amplitudes placed at different positions inside the concrete during different stages

压实而排出的小气泡,这些气泡会阻滞能量传播^[7]。由 z 向能量幅值统计图还可发现,在振动密实第 1 阶段,不同位置的竖向能量幅值均明显大于水平方向,进一步证实该阶段颗粒以竖向运动为主,即新拌混凝土振动密实过程中颗粒以竖向运动为主,整体表现为发生明显沉降。随着埋深的增加,各测点 2、3 阶段能量幅值差异不断增加,表明表层荷载作用下新拌混凝土的密实特征为上层混凝土比中下层可获得更高的能量,并先趋于密实状态。

5 新拌混凝土振动密实机理分析

新拌混凝土可视为一种特殊的含水颗粒材料。颗粒间结构强度表示系统的整体抗剪切性,由浆体层面的颗粒间表面力和骨料间的嵌挤力与内摩擦阻力共同决定。新拌混凝土振动密实过程中颗粒结构变化过程如图 6 所示,在振动荷载作用下,由于压缩波波速大于剪切波波速,且固体压缩波波速大于流体压缩波波速,从而使固体骨架先于流体受力和获得能量,颗粒表面吸附的结合水便受到骨架的挤压使孔隙水压力增大,而剪切波将使集料受到周期性的、大小、方向不断变化的剪应力重复剪切作用,导致颗粒间的粘性降低^[8]。同时压力波在混凝土中使水泥浆体产生的运动比骨料颗粒剧烈,在骨料间来回运动,迫使骨料颗粒间距加宽,破坏了水泥浆连接骨料之间的絮凝网状结构从而使粘聚力下降。另一方面,振源附近颗粒动能较大,离振源较远的颗粒动能较小,粒径较大的颗粒惯性力较大,粒径较小的颗粒惯性力较小,使得混凝土各组分颗粒处于不断相互运动,进一步破坏颗粒初始“拱结构”。以上作用降低了骨料间的嵌锁程度及嵌挤力并极大减小了颗粒间的内摩擦阻力,这与文献[9]研究结论相吻合。原先通过颗粒接触点传递的有效应力由孔隙水承担,导致孔隙水压力增加,骨料颗粒的下沉运动受到孔隙水在超静孔隙水压力作用下向上排出的阻

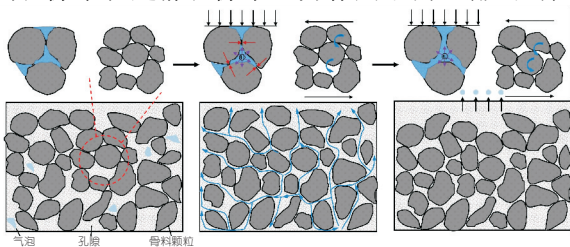


图 6 新拌混凝土振动密实过程微观结构变化示意图

Fig. 6 Schematic diagram of microstructure change in vibration compaction process of fresh concrete

碍,此时混凝土的抗剪强度为零,表现流体特性。孔隙中气泡随着水泥浆液的逐渐挤压排出,骨料颗粒在激振力与重力作用下缓慢下沉试图占据底层最稳定的位置,颗粒重新排列堆叠,颗粒间隙不断减小直至重新稳定接触,骨料间的接触压力增加,内摩擦阻力也进一步增大,达到密实状态。

6 结论

a. 振源附近集料颗粒动能较高以竖向运动为主,宏观表现为混凝土表面发生明显沉降,随着埋深的增加,内部颗粒因无法获得充足振动能量,难以克服颗粒间嵌挤力与内摩擦阻力而在初始平衡位置保持振动状态。

b. 新拌混凝土振动密实过程中内部颗粒的竖向加速度大于侧向加速度,随着新拌混凝土密实程度的增加,竖向加速度幅值先减小后基本保持不变,侧向加速度幅值先减小后略有增大。振源附近的混凝土振动能量衰减幅度最大,随着埋深增加振动能量衰减率减小。

参考文献:

[1] ACI COMMITTEE 309. Report on behavior of fresh concrete during vibration[R]. FARMINGTON HILLS MI, USA: American concrete institute, 2008.

[2] 王凤军. 表面振动对水泥混凝土路面铺层密实深度的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 1993(5): 24-25, 30.

[3] ZHANG JUNYI, GAO XIAOJIAN, SU YUE. Influence of poker vibration on aggregate settlement in fresh concrete with variable rheological properties [J]. Journal of materials in civil engineering, 2019, 31(7): 04019128.

[4] LI ZHUGUO, CAO GUODONG. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state [J]. Cement and concrete research, 2019, 152(1-4): 217-226.

[5] YAN WEISHUO, CUI WEI, QI LAN. DEM study on the response of fresh concrete under vibration [J]. Granular matter, 2022, 24(1): 37.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工规范: GB50666-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[7] 边策, 田正宏, 刘志明, 等. 新拌混凝土振动密实评价指标表征性试验研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(2): 67-80.

[8] 孙业志. 振动场中散体的动力效应与分形特征研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.

[9] HEMITE R L, TOURNNON G. The vibration of fresh concrete[M]. Princeton university, Winterkorn Road Research Institute: 1948.

