

· 地基与基础 ·



# 抛石基床振动夯实离散元数值模拟分析

罗俊兴<sup>1,2,3</sup>, 周红星<sup>1,2,3</sup>, 刘剑锋<sup>1,2,3</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;  
2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;  
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 针对高频液压振动夯实抛石基床密实机理与施工参数优化问题, 基于振夯试验条件及结果, 建立合理的颗粒离散元模型。分析夯沉量、基床孔隙比和竖向应力, 并分析不同激振力和振动频率作用下的基床振动响应影响规律。结果表明: 1) 夯沉量在初始阶段急剧增大, 随后逐渐趋于平缓。振夯作用下抛石基床竖向应力沿深度基本呈线性变化。2) 最大激振力为 150 kPa 时, 基床浅层达到较好的振动密实效果。而对于基床深层块石, 激振力越大振动密实效果越好, 即最大激振力为 200 kPa 效果较好。3) 对于基床不同深度处的块石, 振动频率 25 Hz 达到较好的振动密实效果。

**关键词:** 振动夯实; 抛石基床; 颗粒离散元; 基床应力

中图分类号: TU 473; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0151-06

## Numerical simulation of vibration compaction of rubble-mound foundation bed by discrete element method

LUO Junxing<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hongxing<sup>1,2,3</sup>, LIU Jianfeng<sup>1,2,3</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd, Guangzhou 510230, China;  
2. Key Laboratory of Environment Protection & Safety of Transportation Foundation Engineering of CCCC, Guangzhou 510230, China;  
3. Southern Marin Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** Regarding the problems of compacting mechanism and construction parameter optimization of high-frequency hydraulic vibration compaction riprap foundation bed, a reasonable particle discrete element model is established based on the conditions and results of vibration compaction test. The rammed settlement, the void ratio and the vertical stress of the foundation bed are analyzed, and the influence of the vibration response of the foundation bed under different excitation forces and vibration frequencies is analyzed. The results show that: 1) At the initial stage, the amount of rammed settlement increases rapidly, and then gradually tends to smooth. The vertical stress of riprap bed under vibro-ramming has a linear change along the depth. 2) When the maximum exciting force is 150 kPa, the shallow subgrade of the foundation bed has a good compaction effect. But for the deep stone foundation bed, the greater the exciting force, the better the compaction effect, that is, the maximum exciting force is 200 kPa. 3) For the stones in different depth of the foundation bed, the vibration frequency of 25 Hz can achieve a good vibration compaction effect.

**Keywords:** vibration compaction; rubble-mound foundation; granular distinct element method; stress on foundation

抛石基床具有抗滑稳定性强、经济费用小、承载能力大、耐久性好等优点, 已广泛应用于重

力式码头、防波堤、沉管隧道、斜坡码头、船坞和船闸等水工建筑物的非岩石地基上的基础形式。

收稿日期: 2022-06-17

作者简介: 罗俊兴 (1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事岩土工程研究。

传统的抛石基床夯实主要采用重锤夯实等方法；由于安全和环保要求，高频液压振动锤夯实技术已开始应用于抛石基床。抛石基床的构成通常为开山爆破的未风化的、不成片状的和无严重裂纹的随机块石，具有离散性，严格来讲是非连续介质。因此，相应的密实原理和工艺成为各方关注的焦点。

冀晋等<sup>[1]</sup>、王翔等<sup>[2]</sup>、蒋晓燕等<sup>[3]</sup>、席俊杰<sup>[4]</sup>、李进等<sup>[5]</sup>依托港珠澳大桥、深中通道等工程对抛石基床振动夯实工艺及参数进行现场试验研究，表明振夯工艺能够满足不同地质条件、不同分层厚度基床的夯实设计要求；王芳等<sup>[6]</sup>利用颗粒流数值模拟软件 PFC2D 研究了振动密实抛石基床的动力作用过程及遍数、锤质量对密实度的影响，结果表明重锤质量为 8 t、振动次数为 6 遍时，抛石基床振动密实效果最佳；何燕清等<sup>[7]</sup>采用 PFC2D 建立水下抛石基床离散元模型，研究基床在高频振动过程中致密机制以及振动频率、激振力、抛石体颗粒级配对高频振动致密效果的影响。

上述文献对高频液压振动夯实抛石基床工艺进行了研究，但总体尚未成熟，现有研究缺乏对振夯过程中基床应力和时程的分析。本文以抛石基床为研究对象，采用颗粒离散元数值计算方法，基于陆上抛石基床振夯试验条件及结果建立合理的数值计算模型，分别对振动夯实荷载作用下的基床孔隙比和竖向应力进行分析，以探讨抛石基床的密实机理，并对不同激振力和振动频率作用的基床振动夯实响应影响规律进行研究与分析。

## 1 数值模型

### 1.1 基床生成及参数选取

传统的颗粒离散元分析方法在考虑不规则块体介质时，大多是简化成圆盘或球体进行替代，没有考虑到颗粒形态的随机性、不规则性和复杂性。本文采用多个颗粒重叠组成的刚性颗粒簇来模拟块石，不考虑块石出现破碎的状态。模型采用现场试验使用的 Grade200 级配石料，块石颗粒

簇见图 1。为提高计算效率，取振夯板两端往外延伸 0.5 m 范围内的抛石基床建立足尺模型（图 2），模型两侧与底部用墙体分隔形成计算区域。

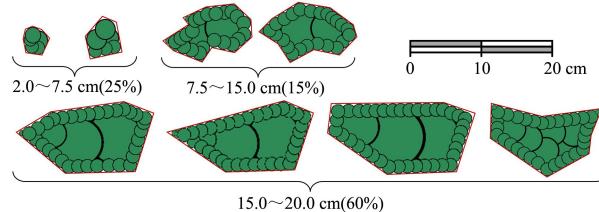


图 1 块石形态及质量含量比例

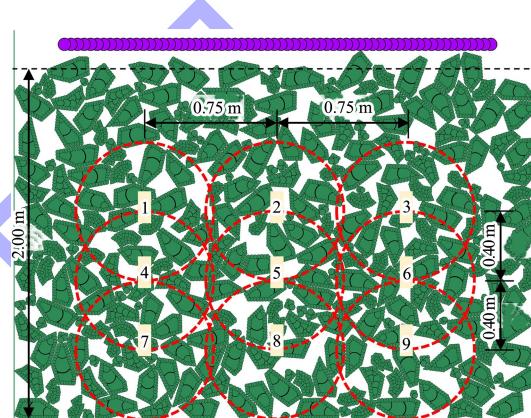


图 2 离散元模型（含测量圆位置）

采用夯沉量模拟结果与现场试验实测结果相近的方式来确定模型细观参数。块石刚性颗粒簇之间、块石与墙体之间的接触特性均采用线性模型，颗粒法向刚度  $k_n$  为 800 MPa，切向刚度  $k_s$  为 400 MPa，摩擦系数为 0.5，法向和切向阻尼均为 0.1。块石体密度取为 3 000 kg/m<sup>3</sup>。此外，为了获得抛石基床不同位置的孔隙比和竖向接触应力的动力响应规律，共设置 9 个直径为 0.8 m 的测量圆来监测区域内响应变化过程。

### 1.2 振夯加载模型及荷载施加

振夯荷载的模拟主要参考 3 种方法，本文以刚性颗粒簇作为振夯板，簇内颗粒位置可任意设置，颗粒间位置相对固定，并且能被赋予质量和荷载，同时颗粒间可任意重叠。即振夯板由 1 排粒径为 7.5 cm、中心间距为 3.75 cm 的颗粒构成，保证振夯板与块石充分接触。模拟时先将振夯板放置在基床表面，然后对其施加振夯荷载，同时

将振夯板的旋转角速度设置为零, 以避免振夯板因接触受力不均而发生旋转。振夯板与块石之间的接触特性采用线弹性模型, 法向和切向刚度均为 1 GPa, 摩擦系数为 0.2。

振夯荷载由静定荷载和激振力组成。根据振动锤资料, 模型中静定荷载取 4.63 kPa、最大激振力取 213.5 kPa、振动频率取 21.67 Hz。考虑到振夯板实际工作特性, 振夯荷载时程曲线见图 3。在计算过程中, 调整振动荷载参数(最大激振力 100、150、200 kPa 和振动频率 20、25、30 Hz), 以符合现场试验。

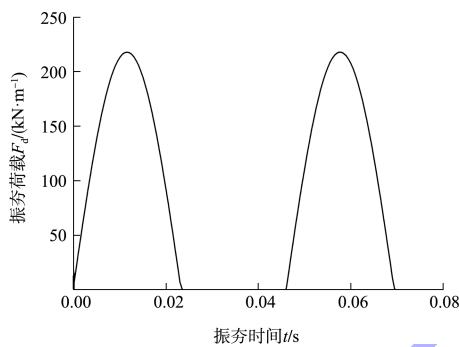


图 3 振夯荷载时程曲线

### 1.3 模型参数合理性验证

如图 4 所示, 随着振夯荷载不断作用, 抛石基床夯沉量不断增大, 表现出初始阶段急剧增大、随后逐渐趋于平缓的变化趋势。现场试验中实测夯沉量分别为 19.00、25.22 cm, 相应的振夯作用持续时间分别为 23、57 s, 而同等荷载条件下的模拟计算夯沉量分别为 19.05、22.35 cm, 可知模拟结果接近现场试验结果, 表明了数值模型建立及参数选取是合理可行的。

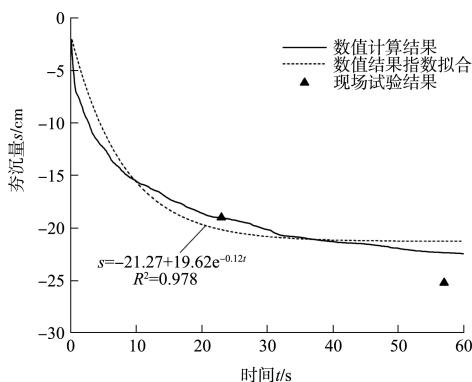
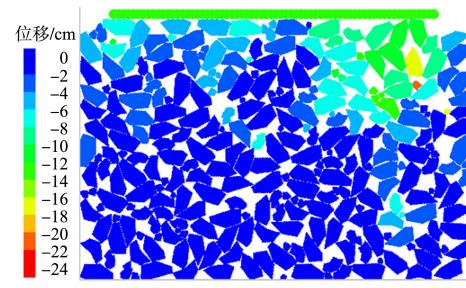


图 4 抛石基床夯沉量时程曲线

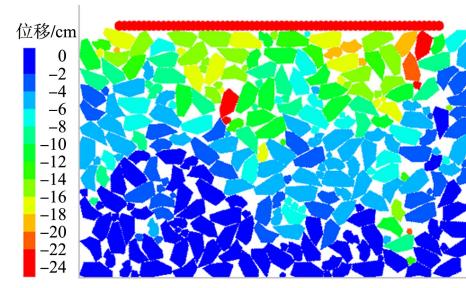
## 2 抛石基床振动夯实数值结果分析

### 2.1 密实过程

振夯前在重力平衡作用下, 抛石基床因块石的任意性、随机性和离散性而呈现松散、非均匀的状态, 块石之间的空隙大且咬合度不高, 基床表面平整度小。随着振夯持续作用, 基床块石之间的作用力通过咬合作用而在块石之间传递, 从而使块石发生不同程度的滑动、转动、错位和挤压, 块石之间相对位置的变化越发明显, 同时块石位置不断发生自适应调整, 直至达到新的平衡, 导致块石之间的空隙不断减小, 抛石基床更加紧密, 由松散堆积状态转变成紧密挤压状态。位移云图(图 5)表明: 对于振夯板范围内的基床块石, 位于振夯板中心区域的块石主要往下方发生运动, 靠近振夯板两端的块石往下方运动的同时也往振夯板中心方向运动, 与竖向位移云图分布相一致, 近似呈半圆形; 对于振夯板范围外的基床块石, 往下方和远离夯板方向发生运动。



a) 第 5 s



b) 第 60 s

图 5 振夯作用下基床块石竖向位移云图

### 2.2 夯沉量

基床夯沉量时程曲线变化规律相近(图 6), 均呈现出初期状态急剧变化、后期趋于平缓的变

化过程, 各曲线数值大小差异明显。振夯模拟结束时(第 60 s), 在振动频率为 21.67 Hz 条件下, 最大激振力为 100、150、200 kPa 的夯沉量依次为 17.08、18.74、21.59 cm; 在最大激振力为 213.5 kPa 条件下, 振动频率为 20、25、30 Hz 的夯沉量依次为 22.20、23.82、23.31 cm。在控制其他试验变量一致的条件下, 200 kPa 和 25 Hz 分别对应的夯沉量均较大。

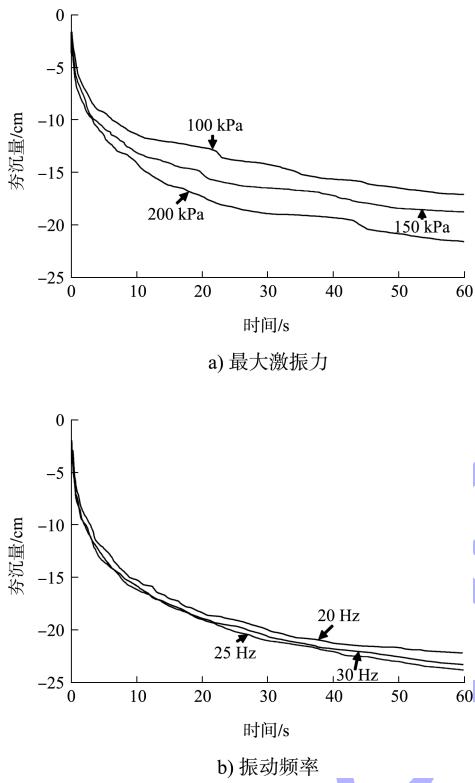


图 6 抛石基床模拟计算夯沉量时程曲线

### 2.3 孔隙比变化

将图 2 中同一深度的测量圆孔隙比取平均值, 按式(1)计算孔隙比变化率  $\Delta e$ ,  $\Delta e$  为负值表示基床孔隙比减小。

$$\Delta e = \frac{e_t - e_0}{e_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $e_t$  为某一时刻的孔隙比;  $e_0$  为振夯开始前的初始孔隙比。

由图 7 可知, 随着振动夯实不断进行, 不同最大激振力作用下基床中各深度的孔隙比整体上呈现不断减小的发展过程, 并且都表现出初期急剧减小、后期趋于平缓的态势。同时, 深度为

0.8 m 处基床孔隙比的急剧减小态势最为明显, 这是因为基床上部所受应力较小、堆积较为松散, 在振夯荷载作用下快速压缩密实。

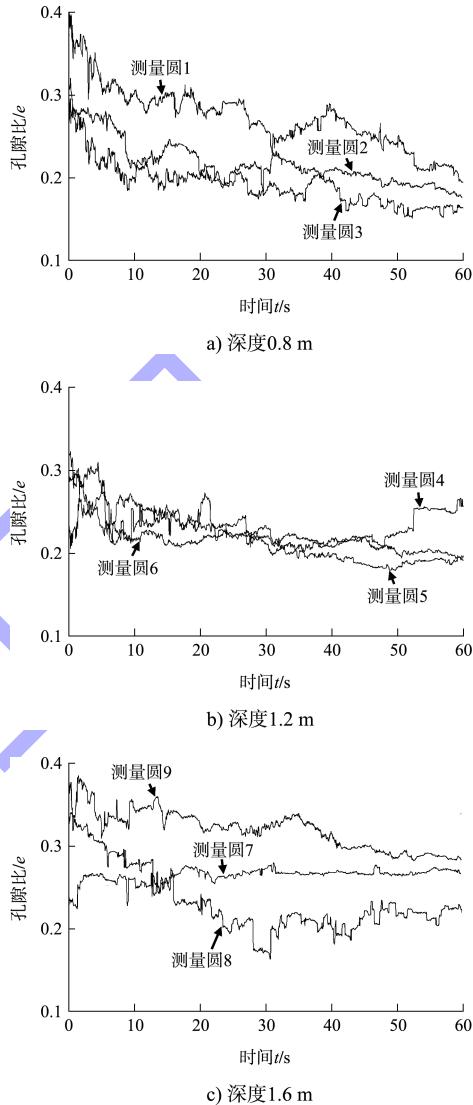


图 7 抛石基床不同深度的孔隙比变化率时程曲线

考虑到孔隙比变化率  $\Delta e$  时程曲线逐渐趋于平缓, 可把 50~60 s 的  $\Delta e$  作平均处理。如图 8 所示, 当最大激振力为 100 kPa 时,  $\Delta e$  为 -23.2%~-11.8%, 孔隙比降低的程度最小, 表明振夯作用能量较小时基床整体仍处于较松散状态; 当最大激振力为 150 kPa 和 200 kPa 时, 振夯作用提供的能量能够克服块石颗粒之间的相互摩擦作用力, 抛石基床从松散状态达到密实状态。这也表明: 在抛石基床浅层, 激振力过大或过小均难以达到较好的振动密实效果; 而对于基床深层块石, 激振力越大振动密实效果越好。

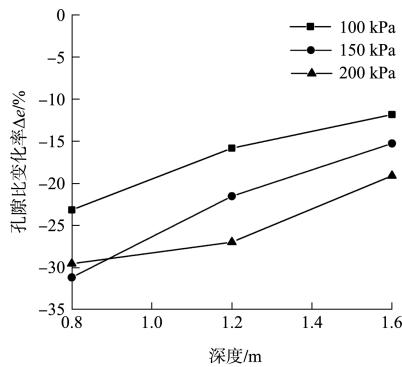


图8 抛石基床不同位置处孔隙比变化率平均值 (50~60 s)

#### 2.4 基床竖向应力

以测量圆1、4、7为例, 1个振夯周期内基床竖向应力呈现出从上往下传递的现象, 见图9。为了进一步分析基床不同位置处竖向应力变化规律, 提取a点位置应力值来分析系统稳定状态时应力变化情况, 提取b点位置应力值来分析峰值应力变化情况。

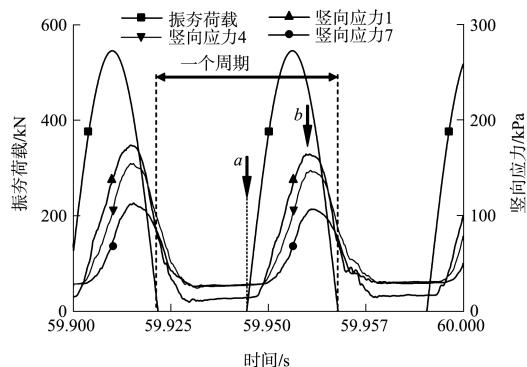


图9 抛石基床竖向应力与振夯荷载的关系

(59.9~60.0 s)

不同激振力作用下竖向应力沿深度分布情况表明抛石基床应力沿深度成线性变化, 见图10。最大激振力为100、150、200 kPa的稳定状态下, 抛石基床密度拟合值依次为1.890、1.904、1.936 t/m<sup>3</sup>, 可见基床密度随激振力的增大而增大, 说明基床密实程度与激振力呈正相关关系。

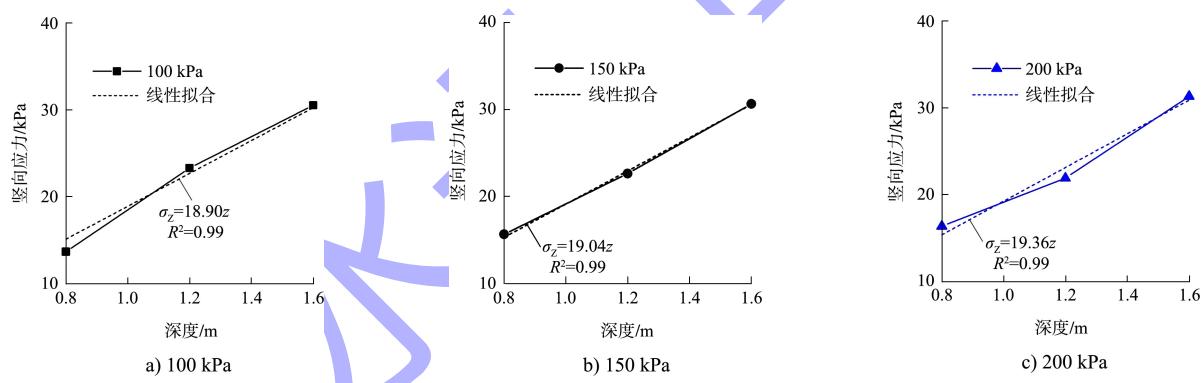


图10 不同最大激振力条件下抛石基床稳定状态竖向应力沿深度分布

结合图9可知, 竖向应力最大值对应的振夯荷载大小可反映出基床应力传递速度变化关系: 振夯荷载越大, 应力最大值出现时间越早, 应力传递速率越快。竖向应力最大值对应的振夯荷载时程曲线的线性拟合结果见图11, 可知受振夯夯后抛石基床应力传递速率不断加快, 且在同一激振力条件下, 深度越大应力最大值出现越滞后。此外, 最大激振力为100、150、200 kPa时, 深度为0.8 m对应的线性拟合斜率依次为0.20、0.72、

0.66 kN/s, 深度为1.2 m对应的线性拟合斜率依次为0.66、0.93、1.23 kN/s, 深度为1.6 m对应的线性拟合斜率依次为0.88、1.07、1.43 kN/s。由此可知, 随着振动锤提供的最大激振力不断增大, 抛石基床深层竖向应力传递速率不断增大, 而基床浅层竖向应力传递速率则呈现先增大后减小的变化过程, 这表明基床深层振动密实效果随激振力增大而增大, 而大小适中的激振力(即150 kPa)能够有效提升基床浅层振动密实效果。

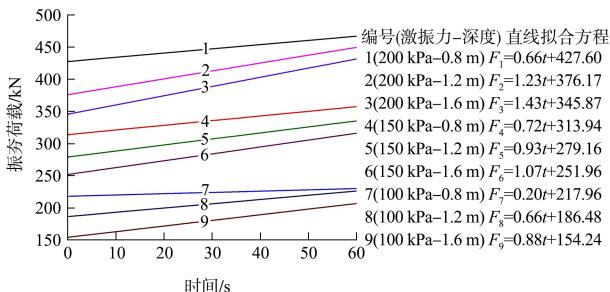


图 11 抛石基床不同位置处竖向应力峰值对应的振夯荷载时程拟合直线

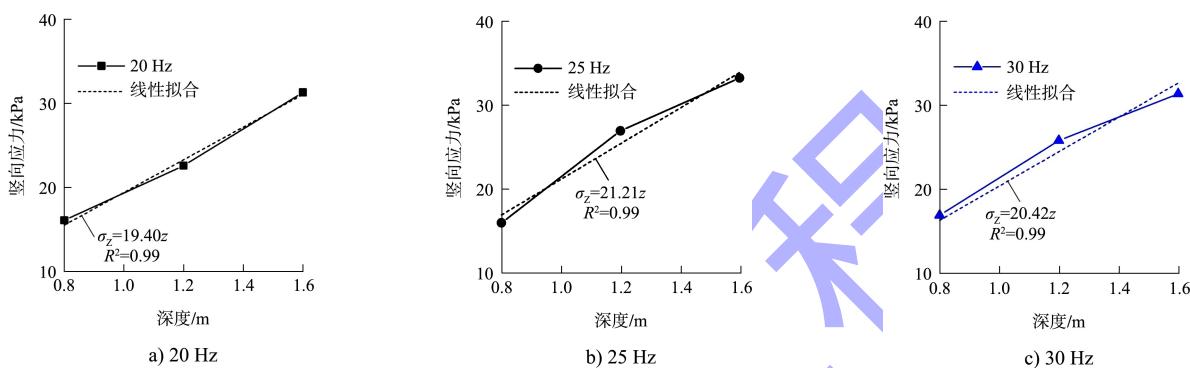


图 12 不同振动频率条件下抛石基床稳定状态竖向应力沿深度分布

### 3 结论

1) 抛石基床夯沉量模拟结果与试验实测结果相近, 表明离散元数值模型能够模拟振动夯实荷载作用下抛石基床夯沉变化过程。

2) 夯沉量呈现初始阶段急剧增大、随后逐渐趋于平缓的变化过程。振动锤的最大激振力越大, 基床夯沉量越大; 振动锤的振动频率适中时, 基床夯沉量较大。振动夯实作用下, 基床块石竖向位移云图呈现为近半圆形。

3) 抛石基床在振夯作用下会发生压密, 且孔隙比变化率呈现沿深度增大而减小的变化趋势, 基床浅层深度处孔隙比的急剧减小态势较深层明显。

4) 振动夯实作用使得抛石基床竖向应力沿深度呈线性变化, 且振夯板中间下方基床的竖向应力大于振夯板两侧下方基床的竖向应力。在选定参数条件下, 激振力过大或过小均难以达到较好的振动密实效果 (150 kPa 效果较好), 而对于基床深层块石, 激振力越大, 振动密实效果越好

考虑到不同激振力条件下均有相近的规律, 本文仅展示最大激振力为 213.5 kPa 时的结果, 由振动频率与抛石基床不同深度关系 (图 12) 可知, 基床密度随振动频率的增大呈现先增大后减小的变化趋势, 频率为 25 Hz 时的基床密度拟合值最大, 说明 25 Hz 条件下基床密实程度较大。

(200 kPa 效果较好); 对于基床不同深度处的块石, 振动频率过大或过小均难以达到较好的振动密实效果 (25 Hz 效果较好)。

5) 随着深度不断增大, 基床块石间应力峰值的出现会滞后, 并随着振夯作用持续进行, 同一位置处的基床块石应力传递速率逐渐加快, 应力滞后现象得到削弱, 同时距离振夯作用点较远处的应力滞后削弱效果会越加显著。

### 参考文献:

- [1] 冀晋, 张怡戈, 靳胜. 液压振动锤夯实块石基床效果验证与分析[J]. 公路, 2018, 63(8): 17-21.
- [2] 王翔, 冯甲鑫, 鞠鹏. 海上抛石基床振动密实试验研究[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(8): 50-53.
- [3] 蒋晓燕, 曲唐春. 抛石基床振夯工艺在重力式码头施工中的应用[J]. 水运工程, 2019 (9): 339-342.
- [4] 席俊杰. 大型沉管隧道管节基础振密块石层陆地工艺试验分析[J]. 公路, 2020, 65(10): 334-341.

(下转第 182 页)