

文章编号: 1000-4750(2013)07-0105-08

深厚砂土地基共振致密机理

陈福全¹, 姚金梅¹, 李西斌², 陈伟丽¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建, 福州 350108; 2. 浙江农林大学园林学院, 浙江, 临安 311300)

摘 要: 利用颗粒离散元对深厚砂性土地基进行共振致密模拟与机理分析, 详细地研究了高频共振致密过程中, 土体内部孔隙率、位移、孔隙水压力的变化情况, 以及振动杆杆端及杆周土体的力学特性; 对振动频率、振幅及颗粒级配对共振致密效果的影响进行了分析。结果表明: 高频共振致密能很好地用于处理深厚粉砂土地基, 振动结束后, 土体的孔隙率明显减小, 表层位移明显, 振动杆杆端及杆周的土体力学特性也发生较大变化; 共振致密的效果受振动杆振幅、频率及土体级配状况等因素的影响, 振幅和频率过大或过小都无法获得最佳致密效果。在实际工程中, 应根据土体的特性确定最佳的振幅和频率。

关键词: 颗粒离散元; 共振致密; 粉砂土; 颗粒级配; 地基处理

中图分类号: TU443 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.02.0123

EFFECT OF RESONANCE-COMPACTION MECHANISM ON DEEP SANDY SOIL GROUND

CHEN Fu-quan¹, YAO Jin-mei¹, LI Xi-bin², CHEN Wei-li¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. School of Landscape Architecture Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

Abstract: The resonance compaction of deep silty sand ground was simulated using a particle discrete element method. The behaviors of properties of the porosity, displacement and pore pressure in soil were analyzed during the process of resonance compaction, and the mechanical characters of soils around a vibrio-rod were researched. Simultaneously, the effects of the vibration frequency and amplitude and particles gradation on soil compaction were also investigated. The results show that the high frequency resonance compaction method is most suitable for the deep sandy ground improvement. During the construction process of resonance compaction, soil porosities decrease dramatically and the surface displacement is obvious. The mechanical characters of soil around the vibrio-rod are also changed greatly. The vibration frequency, amplitude of a vibrio-rod and the grain composition of soil can affect the dense degree of the ground. It can obtain the densest degree under the resonant vibration frequency and appropriate amplitude according to the characteristics of soil in a construction project.

Key words: particles discrete element method; resonance compaction method; sandy soils; grain composition; ground improvement

为使深厚砂性土地基密实, 最有效的方法就是在土层深度处引入击实能量。其中深层共振致密法(Resonance Compaction Method, MRC)就是一种高效的砂土地基致密处理方法。该法运用共振振动效

果放大原理, 由液压高频振动锤产生激振力, 能量通过振动探板传递至土体, 产生共振后, 使砂性土的振动致密的效率得到提高^[1], 如图 1 所示。振动频率可调的振动锤固定在振动探板上端, 板以较高

收稿日期: 2012-02-23; 修改日期: 2012-09-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40972200)

通讯作者: 陈福全(1971), 男, 福建漳平人, 教授, 博士, 主要从事岩土与地下结构工程的教学与科研工作(E-mail: phdchen@fzu.edu.cn).

作者简介: 姚金梅(1986), 女, 四川绵阳人, 助教, 硕士, 主要从事岩土工程数值模拟方面研究(E-mail: 497206067@qq.com);

李西斌(1977), 男, 山东冠县人, 副教授, 博士, 主要从事软弱地基处理方面研究(E-mail: ytulxb@126.com);

陈伟丽(1983-), 女, 山东临沂人, 助理工程师, 硕士, 主要从事岩土工程数值模拟方面研究(E-mail: 443985677@qq.com).

频率贯入到土层中,以减少和克服土体沿探杆轴身侧壁向上的摩阻力,当探杆底端贯入到要求的深度时,振动频率调节到振动锤与土体的共振频率,以增强土层的振动。振动板竖向振动,振动能量沿着整个板长传递到周围的土体中,土层与振动板同步(同相)振动。土体与振动杆之间的相对位移很小,振动能量能有效地从振动锤传递到探杆,再传递到周围的土层中。共振的频率取决于振动锤的动能和质量、土层条件、振动杆的质量及其动力参数,一般为10Hz~20Hz。到达共振时,所需的压实能量降低。振动板可设计成Y形或双Y形截面,降低振动杆的刚性,能进一步增强能量传递效果。



图1 砂性土深层竖向共振致密(Massarsch, 1991)
(右为振动杆,杆顶为激振力大且轻便的高频振动锤)

Fig.1 Schematic of deep resonance compaction method in the sandy soils

深层高频竖向共振致密的地基处理方法优点明显,在国外得到了很好的应用。但是致密效果取决于振动锤的动能和质量,振动杆的质量及其动力参数,以及土层的条件。目前国外的相关理论研究很少,滞后于工程实践的发展;而国内尚未见相关研究报道。采用颗粒离散元分析技术,本文研究饱和砂土竖向高频共振致密过程宏观上的力学响应,并从细观上研究竖向高频振动致密下饱和土体的变形、孔隙率的变化、孔隙水压力消散以及它们之间相互作用的机理。

1 分析模型

采用颗粒离散元软件 PFC3D 进行分析。PFC2D&3D 软件可以有效模拟土体颗粒集合体的无限大变形问题、动力冲击和密实问题(如打桩、振冲、强夯、地震和爆炸等),以解决有限元不能分析的问题。Evgin^[2]对土体-结构界面处的液化现象进行了试验研究和颗粒离散元模拟。Holt^[3]对土体现

场碾压密实进行了室内模型试验研究和颗粒离散元分析。国内周健教授及其课题组应用 PFC2D 软件,对土工的许多问题进行了深入的研究,包括振冲法的颗粒离散元分析^[4]。这些文献表明了颗粒离散元可作为本文研究的手段。

这里只介绍颗粒离散元分析中主要的问题,其他分析的技术细节,如流固耦合分析模型中关于液相的流动方程及其在 PFC3D 软件中计算流程与处理方法,测量圈和 cell 流体矩形空间网格的布置建立等,可参考相关文献和软件说明手册。

1.1 模型的相似性与数值模型试样的生成

利用相似定理来对试验模型进行相应的缩小从而节省了大量的计算时间。因土颗粒介质本身粒径大小的特殊性,不能根据相似关系得到严格的满足,Fuglsang 等^[5]和 Gui 等^[6]的研究发现,当模型的尺寸与模型中颗粒的平均粒径值 d_{50} 的比值达到 30 或者大于 30 时,可以忽略颗粒粒径的大小对模型试验所造成的尺寸效应的影响。因此在不影响分析结果的情况下将粒径放大 10 倍,如图 2 为砂土颗粒粒径质量级配分布曲线。

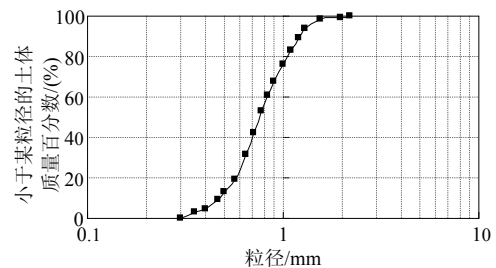


图2 颗粒级配曲线

Fig.2 Particles grading curve

考虑到后续振动过程中波的传播特性以及边界条件对波吸收的均匀性,采用柔性边界刚性墙。模型相似比尺为 1:200,原型的土层厚 18.0m,振动杆贯入长度 9.0m, Y 形 3 个板宽 0.8m。分析结果均采用相似律换算成实际原型对应的数据。

1.2 颗粒体的生成及其参数

采用圆形颗粒球体并在一定的粒径范围之内,通过调整各个力学性质参数使模型的颗粒集合体反映出与真实情形下相同的土工颗粒,分析调整各个不同参数对模拟结果的影响,验证分析得到细观参数对宏观特性的影响。PFC3D 中颗粒生成算法和参数标定方法参看相关文献^[4]。表 1 为砂土颗粒细观参数。

表 1 砂土颗粒细观参数

Table 1 The mesoscopic parameters of sandy particles

孔隙率	颗粒初始 摩擦系数	颗粒密度/ (kg/m ³)	法向刚度/ (N/m)	切向刚度/ (N/m)	颗粒粒径 放大倍数
0.5	0.7	2600	5.0×10 ³	1.0×10 ³	1.85

1.3 模型边界条件

模型在振动过程中采用颗粒墙来替代开始砂箱容器生成时的刚性墙边界条件，颗粒墙不仅可以吸收振动过程中产生的波而且还可以防止砂箱中的土颗粒出现的逃逸现象。针对内部颗粒墙对于振动杆在高频振动时产生的振动波，采用 Te Kamp 等^[7]的经验方法进行确定处理。

1.4 振动板的模拟

振动板由 3 片杆翼叶瓣组成，每片杆翼叶瓣均是由一系列颗粒组合成一个整体而构成，组构振动杆的颗粒均大小相同，颗粒参数性质亦相同。板的组成粒径应适当，避免因粒径过大而使组成板的颗粒之间的粘结处有过大的空隙造成一个拉力从而在振动过程中带动土颗粒，也不会由于过小需要设置一个较大的刚度参数从而造成模型计算的时步过小而让模型计算的时间过长。分析模型与 Y 形振动板模型如图 3 所示，其细观参数如表 2。

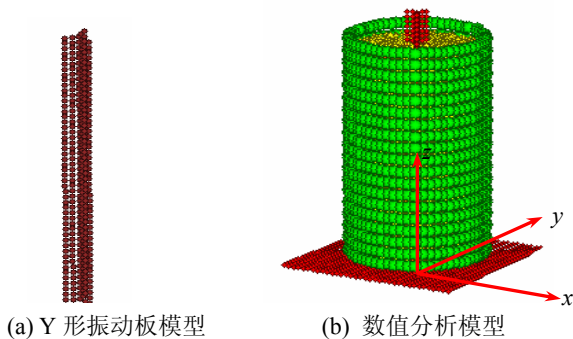


图 3 砂性土深层竖向振动致密分析模型
Fig.3 Analysis model

表 2 振动板颗粒细观参数

Table 2 The mesoscopic parameters of vibro-rod particles

颗粒密度/ (kg/m ³)	摩擦 系数	等效颗粒 半径/mm	线性接触 法向刚度/ (N/m)	线性接触 切向刚度/ (N/m)
3000	0.7	1.0	6×10 ⁶	6×10 ⁵
平行粘结 法向刚度/ (N/m ³)	平行粘结 切向刚度/ (N/m ³)	平行粘结法向 接触强度/ (N/m ²)	平行粘结切向 接触强度/ (N/m ²)	平行粘结 半径乘子
6×10 ⁶	6×10 ⁵	6×10 ⁸	6×10 ⁸	1.0

1.5 振动荷载的施加

振动荷载一般由静定荷载 F_0 和激振力 F_v 两部分组成。在深层振动致密模型中，认为只存在一个

振动部分的正弦竖向激振力，而静定荷载认为是零，这样土体的振动致密效果就完全取决于激振力的大小。但当静定荷载为零时，随着程序的运行，振动杆会在重力的作用下发生向下的贯入运动，因此为了克服重力的影响，将对振动杆施加一个大小等于重力的向上的静载力。

在 PFC3D 软件的模拟过程中，振动杆荷载由正弦竖向激振力和向上的静荷载组成。正弦竖向激振力的频率为 f ，初始激振力大小为 b ，向上的静载力大小为 a ，则振动杆荷载 F 可表示为：

$$F = -a - b \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (1)$$

2 砂性土深层竖向共振致密机理

分析过程与实际施工工艺一致，经过大量的分析研究表明，砂性土在 12Hz~18Hz 的频率振动作用下致密效果较佳(视土层条件而定)。取初始激振力 80kN，向上的静荷载为 0.8kN，振动频率为 18Hz，振动周期约为 0.056s 时的初始孔隙率为 0.5 的土体响应变化进行分析。

2.1 土体孔隙率的变化分析

图 4 显示的是振动杆在深层土体中原位振动致密时的振幅变化情况。

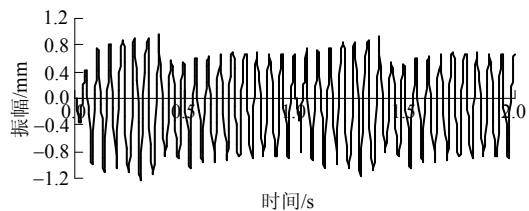


图 4 振动过程中振动板振幅变化情况

Fig.4 Amplitude variation of vibro-rod during vibrating

振动杆长时间的振动过程中，各个位置处的孔隙率都有不同程度的减小。在开始的几个振动周期内，距振源中心 0.8m 靠近振动杆周围的各处土体均受到明显的压缩致密，孔隙率发生很大的降低。不同的深度处，达到最密实状态所需要的振动时间有所差别，在深度较浅处土体短时间内就可以致密，而随着深度的增加，所需要的时间也会有所延长。随着离振源距离的增加，孔隙率的变化幅值也越来越小，表明振动杆的振动有一个振动影响范围。

随着振动的持续，深度 13.5m 以上土体的孔隙率先迅速减小后稍有增大，并趋向于一个稳定值，而在 13.5m 以下，孔隙率变化值相对要小，但是各个位置处的土体却呈现密实状态。因为长时间的振

动, 深度 13.5m 以上的土体处于扰动状态, 上部土体与振动杆出现了共振从而扰动了这部分土体初始的致密状态。而在上覆重力的作用下, 深度 13.5m 以下的土体却没有发生扰动现象, 土体只有振动致密。同时浅层土体发生了液化现象, 一定程度上影响了该部分土体振动致密的效果。Massarsch^[1]认为振动过程中, 振动杆的很大一部分能量集中于振动杆的底端, 促使在振动杆底端周围的土体发生振动致密的效果更加明显, 本文振动杆底端(土体深度 9m)的区域范围内都得到了压实致密, 与 Massarsch 关于振动杆加固致密土体的研究结果一致。

图 5 表明, 在竖向剪切波的影响下, 振动杆下方土体的孔隙率亦发生相应变化。在杆端下部 1.2m 范围内, 土体受到振动杆的振动致密效果较明显, 但孔隙率随着振动杆的上下反复振动呈现很大的波动状态, 原因在于杆端存在着很大的能量, 从而带动振动杆底端周围的土体随着振动杆的振动而运动。随着深度的增加以及波的影响范围的限制, 在振源中心下 5.4m 处, 孔隙率值呈现一个先增大后缓慢减小的情况, 最后趋近于一个与初始状态大小相近的稳定值, 没有发生太大的变化, 表明振动杆对杆底土体的影响范围在 5m 之内。

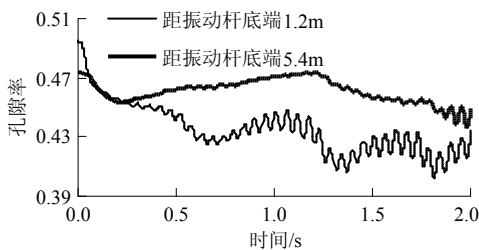


图 5 振动杆底端孔隙率变化曲线

Fig.5 Porosity variation below the end of vibro-rod

2.2 孔隙水压力变化

根据 EI Shamy 等^[8]及 Slocomebe 等^[9]对液化状况的试验和数值模拟的分析, 认为当土体某处孔隙水压力与该处上覆土体有效重量的比值大于 1 时, 土体就会发生液化现象。

图 6 表明, 在离振动杆中心 2.0m 处, 随着振动杆的上下反复振动, 表层下 1m 范围内的土体, 在振动到 0.6s 左右, 开始出现孔隙水压力超过初始有效应力的现象, 并且持续了 0.2s 左右, 该区域内的土体生产液化, 但其他部位并未出现液化现象。因为土体上部上覆自重较小, 且与振动杆有一定的距离, 孔隙水压力消散较慢。整个孔隙水压力的变化趋势是振动开始的较短时间内累积到最大值, 随

后趋于稳定值并有不同程度的消散, 且越靠近上部土体孔隙水压力越小。李飒等^[10]研究表明粉砂在振动荷载作用下的孔压累积具有一定的规律性, 在振动的初始阶段, 孔压累积的上升速度很快, 但当孔压达到一定值后逐渐趋于稳定, 且此时即使继续振动, 累积孔压也不会增长。Ghassemi 等^[11]认为, 饱和颗粒土体的振动压实初期(小于 1s), 土体无足够的时间排水, 在体应力波的传播下表现出不排水性即孔压急剧累积增大。

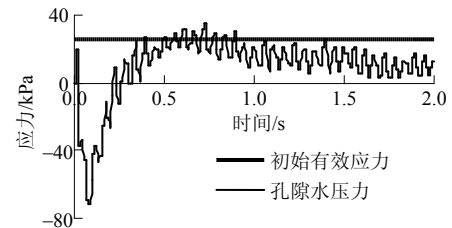


图 6 孔隙水压力曲线图(距振动杆 2.0m 处深度 17.0m)

Fig.6 Pore pressure variation

对于振动杆中心下砂土体的孔隙水压力变化情况如图 7, 未发生明显的液化现象。在杆端处孔隙水压力达到初始有效应力的临界状态, 但这并不意味着这一区域的土体都发生了液化现象, 此时只是孔隙水压力的最大值达到了初始有效应力。但随着振动杆的振动, 孔隙水压力会出现回落并逐渐减小。尽管松砂在循环荷载下易发生液化现象, 但分析结果表明这些液化未发生, 土颗粒间的孔隙较大, 孔隙水易排出, 累积的孔隙水压力未达到初始有效应力的水平, 施加的振动能量未能足够大, 杆端底部土体获得的能量不够大。Rodger 等^[12]对振动打桩引起的孔隙水压力变化进行了类似的研究。

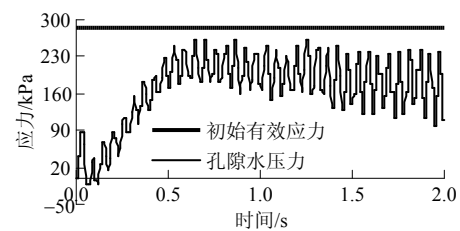


图 7 距振动杆端 2m 处孔隙水压力曲线图

Fig.7 Pore pressure variation far from the end of vibro-rod

2.3 振动杆底端所受阻力及土体内部应力变化情况

在振动杆的反复振动过程中, 振动杆底端会受到土颗粒给振动杆一个反作用力作用以阻止振动杆振动的变化。为了解在振动致密过程中, 振动杆底端所受到的阻力的变化, 在振动过程中, 对振动杆底端的某个颗粒所受到的阻力进行了跟踪。图 8 即为振动杆底端所受阻力和杆侧阻力随着振动杆

振动时的变化曲线。通过与图 4 振幅曲线图的比较发现,随着振动的进行,杆端阻力的变化曲线与振幅的曲线呈现相反的状态。在振动过程中,振动杆的杆端阻力相对较小,激振力主要由振动杆的侧摩阻力来承担。产生的摩阻力使振动杆与土体一起振动,从而导致土体产生振动致密。

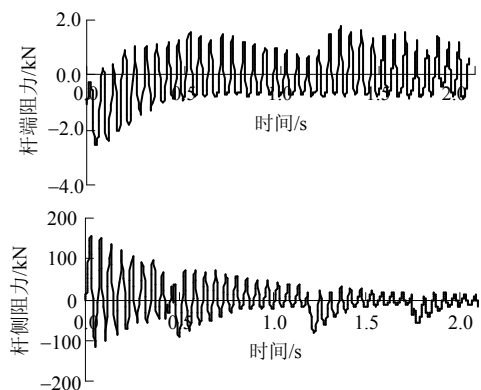


图 8 振动杆杆端及杆侧阻力曲线图

Fig.8 Bottom and flank resistance of vibro-rod

上覆压力的增大在一定程度上阻止了振动杆对土体扰动的影响和液化现象的发生。由于振动杆振动致密的作用和液化作用的影响,在土体表层和振动杆底端位置处土体的剪应力都呈现了一定的减小,土体的抗剪强度呈现了一定量的丧失但并没有完全丧失,宏观表现为土体并未呈现出颗粒完全脱离的悬浮状态,而处于一种亚稳定状态。

2.4 振动板周围土体接触应力场和位移场的变化

由图 9 可知,在 0.5s 时刻,土体上部各处的接触应力较下部稍大,振动杆周围的应力较大。随着振动的持续,土颗粒逐渐趋于密实,土体内部的接触应力逐渐增大。在模型底部,自重应力较大,且墙体对颗粒有较大的反作用力,故底部的接触应力较大,表明振动也使底部土体密实。

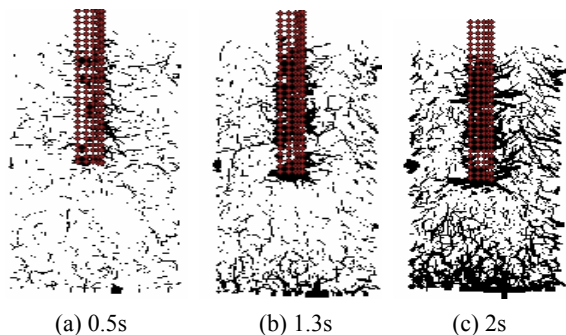


图 9 不同时刻模型的接触应力场分布图

Fig.9 Contact stress field at different time

图 10 表明,在振动初始阶段,土颗粒受到振动杆振动的影响开始运动,随着振动的进行,土颗

粒整体向下运动并致密土层,印证了图 9 中土颗粒间接触应力集中现象的发生。在图 10(c)中可以清晰地看见,振动杆周围土体的位移运动更加明显。振动杆的振动过程中,存在着土体与振动杆的摩擦作用和振动杆垂直运动的剪切波,使振动杆周围土体的产生运动。

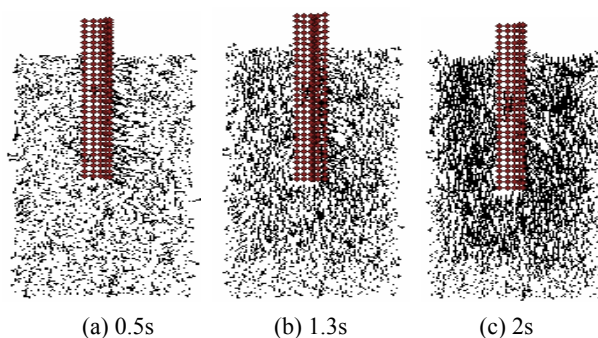


图 10 不同时刻模型的位移场分布图

Fig.10 Scattergram of displacement field at different time

2.5 振动过程中剪切波速及能量的变化

分析表明,随着振动的持续,剪切波速不断增大,且处于波动状态,杆端附近的剪切波速最大。在振动杆下部,随着与杆端距离的增大,剪切波速急剧减少,杆端聚集了大量能量,且这些能量在土体压实过程中被大量消耗。随着振动时间的持续,剪切波速有增大的趋势,土体颗粒逐渐被压实。Massarch^[13]在研究土体压实时指出,对于松散的砂性土,压实后剪切波速为 200m/s~300m/s。但振动结束后剪切波速远小于该范围,说明致密松散粉砂土需要更长的振动时间或更大的激振力。图 11 表明,在表层附近,距离振动杆越近剪切波速越大,表层以下则相反,距离振源较近的颗粒振动需消耗较多能量,而距离振动杆适当距离的土颗粒,接受到的振动能量相对较大部分消耗于土体致密。

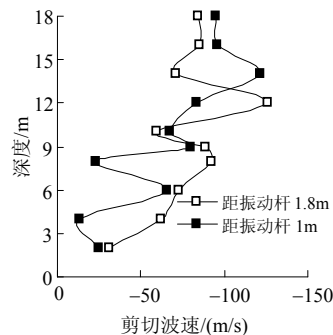


图 11 振动过程中不同位置的剪切波速分布图

Fig.11 Shear wave velocity in different position

在振动过程中,土体内部的微观能量变化十分复杂,PFC3D 输入的能量是主要包括边界能、体能

和流体阻力能, 消散的能量主要包括摩擦能、动能、应变能以阻尼能。分析表明, 随着振动的持续, 输入的体能、边界能和流体阻力能不断增加, 摩擦能消散最多且不断增加, 其次是重力势能和动能, 接触应变能和粘结能的消散相对较小。说明致密过程中, 能量的消散主要来自颗粒内部间的滑动摩擦。

3 砂性土深层竖向共振致密影响因素

3.1 初始孔隙率

由图 12 可知, 孔隙率越大, 振动致密的效果越明显, 但对孔隙率较大的土体, 则需更长的振动时间才能获得最佳密实状态。松散的颗粒在振动过程中重新排列, 需要更多时间来寻求较为稳定的位置或更大的振动能量来重组排列, 且松砂在振动荷载下易于液化或濒临液化, 一定程度上影响颗粒的重新排列稳定。从能量角度也可解释这一现象, El Shamy 等^[14]在研究地震荷载下颗粒土体的能量耗散机制时指出, 振动荷载作用下, 土颗粒液化前的能量主要用于克服颗粒内部间的摩擦, 时间越长消耗的能量就越多。较密实的土体颗粒克服摩擦而运动消耗的能量自然会较同状况下的松散土体多, 致密效果明显不如松散土体。

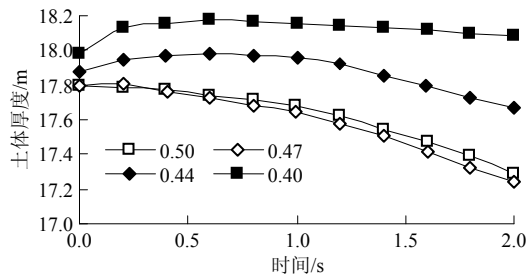


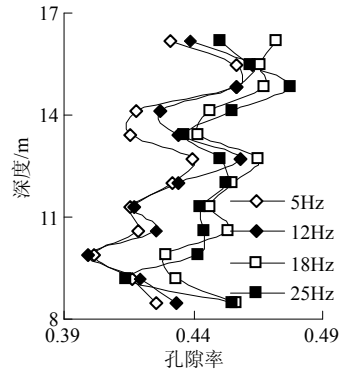
图 12 不同初始孔隙率下表层位移曲线图

Fig.12 Surface displacements varied with initial soil porosity

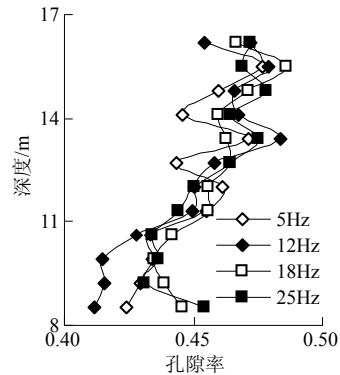
3.2 振动频率、振幅及振动时间

相同情况下, 无论从振后土体的密实程度还是致密范围来说, 共振频率范围内的致密效果优于其他振动频率。如图 13, 在距振动杆 1m 处, 粉砂土松散条件下振动频率为 5Hz 和 12Hz 的致密效果明显优于 25Hz, 而在距振动杆 1.8m 处, 振动频率为 12Hz 的致密效果最好。因此对于初始孔隙率为 0.5 的饱和粉砂土, 当振动频率为 12Hz 左右时, 土体的振动致密效果最好。对于砂土, 曹琪君^[15]得出的最佳振动致密频率为 18Hz。初始状态较松散的土体和级配较好的达到共振所需的能量较少。研究表明, 土体在发生共振时会使表层土体的振动速率加

快, 使土体表层的阻尼减小从而更易于土体的振动致密。当振动频率大大超出共振频率范围时, 如振动杆在高频下振动则可能使振动杆脱离土体振动或使土颗粒在振动松弛时跳跃, 如振动杆在低频下振动则会因为振动能量不足而无法抵抗土颗粒内部的力或打破土颗粒间的连接, 这两种情况均不利于振动致密。振动频率对距离振动杆较近的区域及振动杆下部区域的影响较明显, 因为振动杆垂直振动产生的垂直方向的能量大于水平方向的能量。



(a) 距振动杆 1m 处



(b) 距振动杆 1.8m 处

图 13 不同振动频率下孔隙率曲线图

Fig.13 Porosities varied with vibration frequency

由图 14 可知, 振幅为 1mm 时表层土体沉降 0.4m, 振幅为 3mm 时表层土体沉降为 0.6m, 振幅为 6mm 时表层土体沉降仅为 0.3m, 而振幅为 10mm 时表层土体整体呈隆起趋势, 几乎没有沉降。表明频率一定时, 振动后压实密度随着振幅的增加而增大, 当振幅超过某一值后则减小, 甚至出现隆起现象。振幅较大, 振动杆能产生更多的能量传递至土体, 有利于土颗粒挣脱相互间粘聚力的束缚而重新紧密排列, 达到良好的致密效果。但振幅过大则需功率更大的动力装置, 振动杆的振动将消耗很大一部分能量, 土颗粒所获得的能量也有相当大的一部分用于随振动杆的振动而振动, 无法取得良好的致

密效果。文献[14]认为无论荷载作用的方向、地震激励的类型(周期或随机的)、输入信号的幅值和频率如何,总沉降量的最大值和最小值变化只有 18% 左右。而本文表层土体沉降的最大值和最小值变化却大于 18%, 差异的原因在于振动能量传递方式和效率不同, 频率和振激影响的方式也不同。

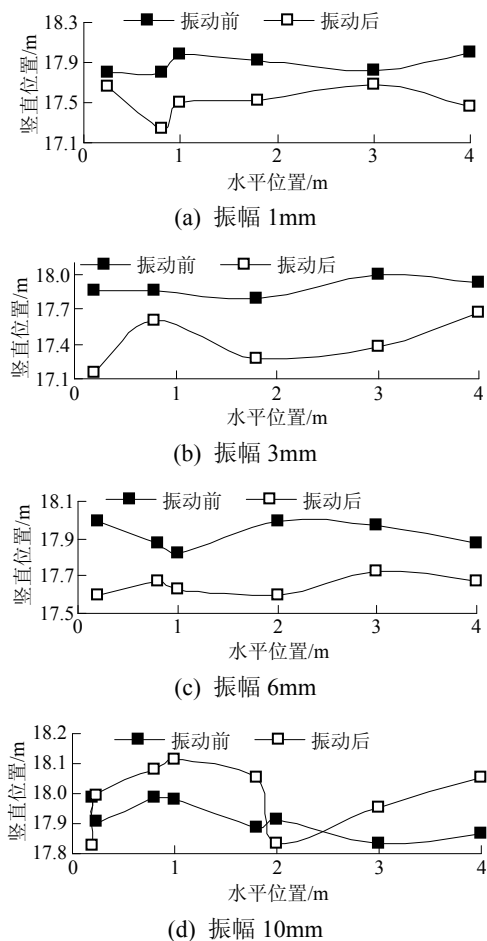


图 14 不同振幅下表层位移曲线图

Fig.14 Surface displacements varied with amplitude

振动时间对致密效果也有影响, 振动时间越长致密效果越好, 振动时间过长则适得其反, 增加振动时间能使土体获得更多能量, 从而利于土体的致密。但振动至一定时间后再继续振动则会使得已经密实的土体重新变松散, 犹如初始孔隙率对致密的影响, 当土体已具备一定的密实度, 再进行振动致密则会出现隆起现象。实际工程中, 在增加振动时间的同时还可考虑适当增加激振力, 并采用连续振动, 以便节约工期和成本。

3.3 颗粒级配

对图 15 所示的土体粒组的分析可知, 随着粒径的增大以及粘粒和粉粒含量的增多, 表层位移越来越小。对粒组 3 和粒组 5, 振动结束后表层土体

无明显位移, 仅在振动杆附近较小范围内有一定的效果。振动致密的效果受粗细颗粒含量的影响。含有砾石的粗砂, 由于其不具有粘性, 粒间粘聚力几乎为零, 粒间摩擦的接触面积远小于细粒土, 振动过程中, 通过振动杆传入的能量多用于颗粒的跳动, 而起着致密作用的颗粒滑动摩擦消耗的能量则很少, 故振动致密效果不佳。但一定的粗粒含量有助于振动致密, 粗颗粒的存在使土体形成了良好级配, 也使振动时细颗粒填满骨架的孔隙, 相互间挤压最紧密。当粗粒含量超过某一限度时, 细粒数量不足以填满粗粒间的孔隙, 处于孔隙中的细粒则不能得到充分压实。已有试验表明, 当粗颗粒含量为 30%~40%时, 压实效果主要取决于细颗粒的颗粒组成和性质; 当粗颗粒含量为 40%~70%时, 粗、细颗粒相互填充, 共同起着骨架作用, 压实效果主要取决于粗、细颗粒两者的性质和相互填充的效果; 当粗颗粒含量大于 70%以后, 压实效果主要取决于粗颗粒的颗粒组成和性质。在实际工程中, 含有砾类的粗砂、胶结砂或地下水位过深, 将大大降低振动杆的贯入速率, 且其加固的范围较小, 需要增加致密次数。

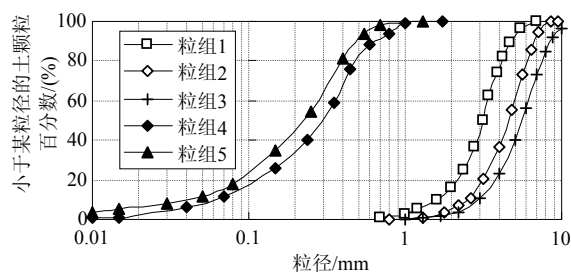


图 15 拟分析粒组级配曲线

Fig.15 Gradation curves of grain group

根据《土的分类标准》(GBJ145-90)的规定, 粉粒粒径为 0.075mm~0.005mm, 粘粒粒径小于 0.005mm。但在 PFC3D 中, 考虑模型尺寸及计算机配置等要求, 常将颗粒粒径进行缩放, 故无法按照既定标准来分析粒径成分。从模型尺寸及颗粒粒径缩放比例考虑, 将 0.075mm 作为粘粒的分界粒径。粒组 4 和粒组 5 的粘粒含量分别为 12%和 18%, 通过大量试算分析, 粘粒含量小于 12%的土体, 其表层最大沉降均大于 0.1m, 而粘粒含量大于 12%的土体, 仅在较小范围出现明显沉降。分析表明, 粘粒含量小于 12%的松散饱和地基采用振动致密法来处理效果较佳。

3.4 振动杆柔度及其他因素

振动杆柔度也是振动致密效果的影响因素之

一, 不可忽视。研究表明, 振动杆的弹性模量越小产生的振幅就越大, 振动结束后土体孔隙率越小, 这种趋势在致密范围内表现得最为明显。振动杆在具有较大的柔性, 在振动过程中能产生较大的振幅, 与土体达到或更接近共振, 从而有利于振动致密。从振动致密范围来说, 柔度较大时致密范围就越大, 这对工程实际应用也大有裨益, 将振动杆设计成开口状或在振动板上开孔, 通过减小振动杆的刚度来提高致密效果的办法是可行的。另外振动杆柔度对松砂的振动致密影响明显, 而对密砂的影响较弱。

除此之外, 含水量、初始应力状态及土颗粒形状等也对致密效果有一定的影响。在实际工程中, 应综合考虑以上因素, 制定最佳的振动致密方案。

4 结论

通过对深厚粉砂土地基进行共振致密模拟, 研究了其振动致密机理及振动频率、振幅和土体级配状况对致密效果的影响。采用高频液压振动锤的共振致密适用于深厚砂性土地基处理, 且效果良好, 工效高。共振致密结束后, 土体的孔隙率显著减小, 表层位移十分明显, 振动杆下部及四周一定范围内的土体致密效果最佳。在振动过程中, 土体内部的力学特性也显著变化。

共振致密的效果易受振动频率、振幅及颗粒级配情况的影响。振动频率和振幅过大或过小均无法获得理想的致密效果, 且粘粒及粉粒含量超过 12% 的土体采用共振致密处理的效果不佳。

参考文献:

- [1] Massarsch K R. Effects of vibratory compaction [C]. Proceedings of Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Louvain-la-Neuve, Lisse: Swets & Zeitlinger, 2002: 33—42.
- [2] Evgin E. An experimental study and numerical simulation of liquefaction at a soil-structure interface [C]. Proceedings of the 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal: Canadian Geotechnical Society 2000: 1075—1082.
- [3] Holt R M. Particle vs. laboratory modeling of in situ compaction [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A, 2001, 26(1/2): 89—93.
- [4] 贾敏才. 砂土地基振冲加固的试验研究及颗粒流模拟 [D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [5] Fuglsang L D, Ovesen N K. The application of the theory of the theory of modelling to centrifuge studies [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988: 119—138.
- [6] Gui M W, Bolton M D. Geometry and scale effects in CPT and pile design [C]. Proceedings of the 1st International Conference on Site Characterization, Atlanta, Rotterdam: A. A. Balkema, 1998: 63—71.
- [7] Te Kamp L, Konietzky H, Guerin F. Modeling of the Chagan underground nuclear test with the distinct element method [J]. International Journal of Blasting and Fragmentation, 1998, 1(1): 295—312.
- [8] El Shamy U, Zeghal M. A micro-mechanical investigation of the dynamic response and liquefaction of saturated granular soils [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(8): 712—729.
- [9] Slocombe B C, Bell A L, Baez J I. The densification of granular soils using vibro methods [J]. Geotechnique, 2000, 50(6): 715—725.
- [10] 李飒, 孙兴松, 要明伦. 混黏土的粉土、粉砂室内试验液化判别标准的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 360—364.
Li Sa, Sun Xingsong, Yao Minglun. Study of liquefaction evaluation used in indoor test of silt, silt sand mixed clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 360—364. (in Chinese)
- [11] Ghassemi A, Pak A, Shahir H. Numerical study of the coupled hydro-mechanical effects in dynamic compaction of saturated granular soils [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1): 10—24.
- [12] Rodger A A, Littlejohn G S. A study of vibratory driving in granular soils [J]. Geotechnique, 1980, 30(3): 269—293.
- [13] Massarch K R. Static and dynamic soil displacements caused by pile driving [C]. Proceedings of the 4th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Netherlands, Rotterdam: A. A. Balkema, 1992: 15—25.
- [14] El Shamy U, Denissen C. Microscale characterization of energy dissipation mechanisms in liquefiable granular soils [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7): 846—857.
- [15] 曹琪君. 饱和砂性土地基深层竖向高频振动致密机理的颗粒离散元模拟[D]. 福州: 福州大学, 2010.
Cao Qijun. Discrete element modeling of mechanisms of saturated sandy soils due to deep vertical high frequency vibratory compaction [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010. (in Chinese)