

强夯置换中碎石运动机制和成墩过程的数值模拟

郑凌透^{1, 4}, 周风华^{1, 2*}, 谢新宇^{3, 4}

(1. 宁波大学省部共建冲击工程与安全教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;
3. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 4. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 关于强夯置换碎石墩形成机理(特别是碎石运动和动态成墩过程)的数值模拟研究较少。之前的数值模拟研究往往将碎石垫层视为均匀的连续介质进行分析, 偏离了碎石体的物理实质。将碎石分为个体分散接触进行了建模, 对单次夯击和连续多次夯击过程中碎石体的变形成墩过程进行了数值模拟。分析结果表明: 将碎石垫层视为分离的碎石个体进行模拟可展现强夯置换中碎石墩的形成过程及其变形机制; 强夯置换过程按时间顺序可分为夯锤与碎石的能量传递和碎石垫层之间的应力波传播过程、碎石垫层接触软土后的整体变形、夯锤二次冲击碎石结构重分布、稳定结构的碎石与夯锤共同运动 4 个阶段, 并分别阐述了各阶段的具体原因和作用; 从铅垂方向排列碎石的水平运动分析了整体成墩的原因。通过对连续夯击过程的数值模拟, 获得了夯锤运动状态、能量释放时间变化规律, 数值模拟得到的夯锤运动位移、速度、加速度与试验观测结果比较吻合。

关键词: 强夯置换; 冲击动力学; 碎石墩; 碎石体变形; 形成过程; 数值模拟

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)11-2068-08

作者简介: 郑凌透(1989-), 男, 浙江乐清人, 博士研究生, 主要从事冲击动力学、岩土工程方面的研究。E-mail: zhenglingwei@hotmail.com。

Numerical simulation of forming of replacement piers during a dynamic replacement process

ZHENG Ling-wei^{1, 4}, ZHOU Feng-hua^{1, 2}, XIE Xin-yu^{3, 4}

(1. MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Numerical studies on the forming mechanism of replacement piers are scarce, particularly on the kinetic movement of the reinforcement (the stones) and the deformation of the gravel layers. Previous studies tend to treat the stone layer as a continuum, which does not conform to the reality. The numerical simulation is conducted to study the movement of many stones in the soils during the dynamic replacement process. The deformation and forming process of the reinforcement are modeled as the frictionally contacting circular granules. The dynamic replacement process is also simulated under repeated impacts. The numerical results show the forming process of the reinforcement pier. The movement and the distribution of the stones within the soils can be divided into 4 stages. The numerical simulated of repeating tampings agrees reasonably well with the experimental results in terms of hammer velocity, displacement and acceleration.

Key words: dynamic replacement method; impact dynamics; replacement pier; deformation of gravel mass; forming process; numerical simulation

0 引言

强夯^[1]作为一种经济快速的地基处理技术, 在湿陷性黄土、沿海地区软土等大面积处理工程中得到较为广泛的应用。强夯置换法^[2]由强夯法发展改进而来, 由法国 Menard 公司于 20 世纪 80 年代首先投入软弱土的工程处理。具体实施过程是: 利用重锤下落的夯击能将硬质填料挤入软土中, 伴随“夯击—填料—夯

击”的重复工艺, 形成填料-软土复合地基而提供承载力。事实上, 强夯置换是完全不同于强夯的地基加固过程, 填料的加入和碎石墩的形成使得地基加固和

基金项目: 宁波市“近海冲击与安全工程”创新团队项目; 宁波大学王宽诚幸福基金项目

收稿日期: 2013-02-02

*通讯作者

承载性能提高的机理与单纯的强夯地基处理加固机理相比发生了很大的变化。目前关于强夯置换的研究主要集中于复合地基的效果及检测、承载机理和承载力分析^[3]、置换成墩的深度、直径和加固深度等, 而从工程工艺的角度研究强夯置换过程中的填料墩动态形成机理的工作较少。从理论发展上看, 认识碎石墩的动态形成机理不仅关系到工程经济性, 对了解动力固结原理、置换深度、承载机理等都有重要作用, 值得进一步研究。

关于强夯的研究文献较多: Chow 等^[4]基于一维波动方程建立简易模型, 将锤下区域的软土描述为非线性土柱, 而对周围软土使用弹簧和黏壶进行描述, 用此模型解释了强夯中锤与土的相互作用; 孔令伟等^[5]通过结合夯锤刚体运动方程和成层弹性地基传递矩阵法导出了解析式并通过变换获得边界接触应力和夯坑沉降的时程关系; Pan 等^[6]在对松散颗粒土进行强夯模拟时, 使用 Mohr-Coulomb 模型模拟土体, 建立模型后进行了 3 次夯击, 获得了近似正弦曲线的动力时程曲线、质点峰值速度、P 波在土中的传播、软土模量提高等内容; Mostafa 等^[7]使用 Cam-Clay 作为黏土本构, 模拟黏性土在强夯下的动态力学行为, 分析了夯坑深度、最大影响深度、孔隙比等因素同夯击能、夯击次数的变化关系; 田水等^[8]采用动力显式非线性有限元, 并引入人工体积黏性至压力项, 分析了夯锤对地基土碰撞过程中的夯锤撞击力、土体位移、应力-时间关系; 牛志荣等^[9]将强夯冲击载荷简化为三角形加载波, 进行了土体动力特性分析; 刘汉龙等^[10]、高有斌等^[11]将强夯冲击加载简化为正弦波, 计算了土体纵向位移, 参考了工程实例的测量数据并与钱家欢^[12]法进行比较。

围绕强夯置换问题: Lo 等^[2]以砂作为填料对泥炭黏土进行了强夯置换的加固, 置换体形成后对地基承载力的效果进行了评估, 对地面进行了近一年时长的沉降观测; 王保田等^[13]认为可用波动理论阐述碎石成墩过程中的桩土界面变化, 对夯击能在第一击和成柱状态后的一维传播变化过程进行了描述; 罗嗣海等^[14]考虑将碎石墩体视为竖向的一维弹塑性变形圆柱体, 提出一维波动方程理论模型用于估算置换深度。

强夯置换与强夯都包含夯锤的冲击过程, 两者主要区别在于是否有硬质填料参与。强夯置换最终形成填料墩, 成墩形状、填料墩长度等都是强夯置换工程设计所包含的因素。在强夯置换的力学过程研究中, 夯锤的运动状态、填料在软土中的运动与置换、碎石(填料)墩的形成是强夯置换机理的重要组成部分。在工程问题的数值方法选择上, 周健等^[15]、邓益兵等^[16]

曾使用颗粒流模拟以及二维离散-连续耦合共同分析的方法; 通用有限元程序 ABAQUS 也有众多应用实例^[17-18]; 谢新宇等^[19]曾采用土体损伤失效模型, 考虑了冲击下土体失效区域对再次冲击的影响; 同时, 将碎石层整体视为弹塑性材料, 模拟了多次夯击下碎石墩的性状和土体变形过程, 并与模型实验对比。为了探究强夯置换机理, 笔者^[20]设计了强夯置换半模试验箱, 采用冲击动力学的测量手段进行了模型试验, 获得了置换过程中夯锤的动态纵向位移、动态力、力-位移曲线, 碎石运动轨迹等数据, 得到碎石墩形成的关键阶段描述。

本文采用显式动力学数值分析方法, 再现了强夯置换模型试验中软土和碎石的运动, 及碎石墩的形成过程。由于碎石整体的性质相对松散, 其材料特性的定义亦存在一些问题, 且在每次夯击前需重新建立模型划分网格, 人为因素过重, 过去国内外研究主要集中于软土本构模型和变形计算方法, 而对碎石采取连续介质的分析方法。将强夯置换过程中的碎石层视为整体连续介质并不合理, 不仅难以体现夯锤冲击作用下碎石个体的相互挤压、流动, 整体运动变形, 碎石整体复杂多变的性质更增加了参数取值和分析上的困难。为此, 本文在数值模型的建立中使用圆砾个体构成整体的碎石层, 进行了夯锤冲击下碎石体变形及碎石墩形成过程的动态分析。

1 有限元模型及参数

在物理模型试验^[20]的基础上, 建立相应尺寸的二维有限元数值模型进行了动态显式分析。事实上, 强夯置换过程属于三维力学问题, 但包含多个物体接触的精细全三维算法消耗大量计算资源。为节省计算量, 笔者采用二维平面应力模型进行建模和分析, 虽然在面外方向的边界条件与模型试验不全相同, 但二维问题计算成本低, 时间短, 有助于定性揭示碎石个体在面内的运动规律、探索单成墩机理。

数值模型尺寸与物理模型^[20]一致: 碎石层的厚度为 40 mm, 碎石平均粒径约为 10 mm, 软土范围是夯锤直径的 10 倍, 如图 1 所示。将碎石视为多层均布的圆形石砾, 所有的圆砾个体的运动构成碎石层的变形和破坏过程。在物理模型试验工况中, 由于夯击前碎石层对软土的预压作用时间非常短, 排水固结的影响很小, 在本文的数值模拟工作中不考虑碎石层预压效应。对夯锤-碎石-软土之间进行了大量接触对的设置, 其中碎石-碎石之间的接触对造成很大的法向接触力, 在强夯置换过程中为主要接触因数。由于实际

碎石之间的接触情况极为复杂, 参考石-金属间静摩擦系数为 0.3~0.4 的数值, 考虑到同种材料静摩擦系数大于动摩擦系数的情况, 将动摩擦系数近似取为 0.2。尽管所建立的有限元模型在水平方向左右对称, 由于碎石颗粒之间的动态接触和运动条件十分复杂, 最后计算结果显现出左右非对称, 因此未作进一步对称简化。实际建模中, 分别尝试过 32 颗碎石 (长度方向 8 颗×厚度方向 4 颗) 和 96 颗碎石 (长度方向 24 颗×厚度方向 4 颗) 的碎石层情况, 并进行了两者的对比。

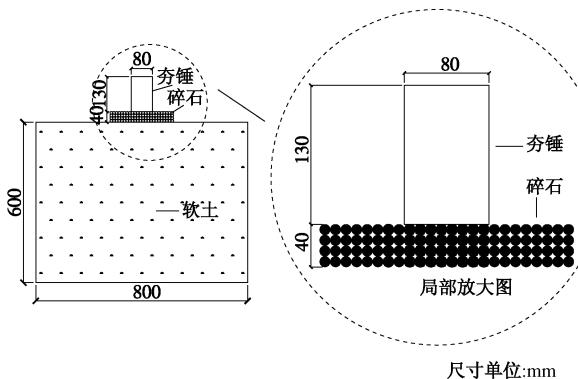


图 1 数值模型示意图

Fig. 1 Numerical model showing initial positions of hammer, stones and soils

1.1 应用于软土的扩展 Drucker-Prager 屈服准则^[21]

经典 Mohr-Coulomb 屈服准则的控制方程为

$$f = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - c\cos\varphi = 0 \quad , \quad (1)$$

式中, σ_1 , σ_2 , σ_3 表示第 1, 2, 3 主应力, φ 为材料的内摩擦角, c 为材料黏聚力。

由于 Mohr-Coulomb 屈服面在偏平面 (π 平面) 上为六角形, 在角点处可能产生不唯一的塑性流动方向, 从而造成计算不收敛。因而采用扩展的 Drucker-Prager 模型 (六角形屈服面的外接圆柱面) 描述软土屈服特性, 用于计算软土的弹塑性变形。不考虑冲击载荷作用下土体的率效应和损伤失效, Drucker-Prager 模型的屈服准则为

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - K = 0 \quad . \quad (2)$$

式中 I_1 为应力张量第一不变量, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; J_2 为应力偏量第二不变量; $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$ 。在子午面 (通过原点与 π 平面垂直的面) 上, 扩展的 D-P 模型屈服面形状为直线时, 通过三轴压缩试验和三轴拉伸试验得出的屈服准则控制方程分别为

$$\sigma_1 - \sigma_3 + \frac{\tan\beta}{2 + \frac{1}{3}\tan\beta}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1 - \frac{1}{3}\tan\beta}{1 + \frac{1}{6}\tan\beta}\sigma_c^0 = 0 \quad , \quad (3)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 + \frac{\tan\beta}{\frac{2}{K} - \frac{1}{3}\tan\beta}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1 - \frac{1}{3}\tan\beta}{K - \frac{1}{6}\tan\beta}\sigma_c^0 = 0 \quad , \quad (4)$$

式中, β , K 和 σ_c^0 为材料参数。为使式 (1)、(3)、(4) 的材料参数等价, 可将试验测得的材料摩擦角和黏聚力参数转换成 Drucker-Prager 模型参数:

$$\tan\beta = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad , \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{1 + \frac{1}{3}\tan\beta} \quad , \quad (6)$$

$$\sigma_c^0 = 2c \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad , \quad (7)$$

式中, $\tan\beta$ 为摩擦角正切值, k 为流动应力率, σ_c^0 为单轴压缩屈服应力。

1.2 材料参数的选取

由于夯锤和碎石的刚度远高于软土, 在强夯置换过程中仅仅发生弹性变形, 为此将两者视为硬质弹性材料, 其弹性系数如表 1 所示。试验用土^[20]为取自宁波市镇海区某基坑 2—2 层的淤泥质粉质黏土重塑而成, 含水率为 46.9%。土性勘察报告显示: 饱和重度 $\gamma = 16.62 \text{ kN/m}^3$, 黏聚力 $c = 11.2 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 9.1^\circ$, 换算成 Drucker-Prager 模型计算参数表 2 中所示。

表 1 夯锤和碎石的材料参数

Table 1 Elastic parameters of hammer and stones

材料	弹性模量/GPa	泊松比 ν	密度 ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
夯锤	210	0.3	7800
碎石	15	0.3	1900

表 2 软土 D-P 模型材料参数

Table 2 Drucker-Prager parameters of soils

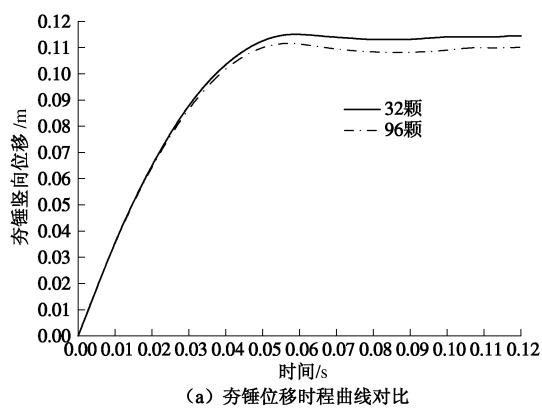
弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	摩擦角 β /($^\circ$)	密度 ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	膨胀角 ψ /($^\circ$)	流动应力率 K	单轴屈服应力 σ_c^0 /kPa
8	0.35	18.3	1662	0	0.9	26.2

2 计算结果及分析

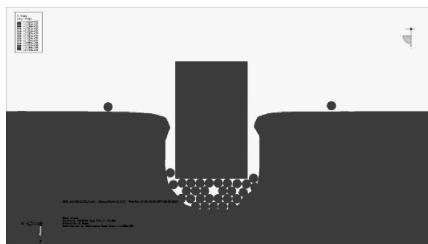
2.1 单次夯击的模拟

首先研究了夯锤下方存在 32 颗和 96 颗碎石的不同碎石层情况, 以作对比分析。图 2 (a) 给出碎石层厚度相同 (4 颗) 但宽度不同时, 计算得到的夯锤压入软土的深度随时间的变化关系, 图 2 (b) 为 2 种碎石层被夯锤压入软土之后的情况。可以看出, 夯锤压

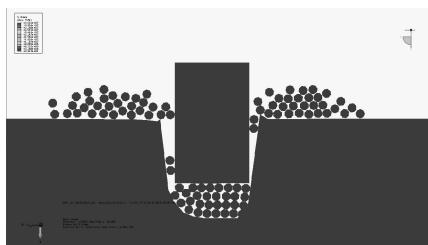
入 96 颗碎石垫层时碎石体嵌入软土的深度略低于 32 颗碎石的情形, 这是由于夯锤向下作用在宽碎石垫层时, 没有受到直接锤击的边缘碎石向外侧飞散, 在运动过程中消耗了部分能量。然而, 两者的夯沉量和夯锤位移时程曲线的差距并不明显, 夯锤的主要能量都由软土变形而吸收。由于 96 颗碎石算例要求设置过多的接触, 计算成本过高, 不利于进一步进行分析, 且 2 种计算结果没有定性差别, 笔者在之后的模拟中, 令碎石垫层的宽度与夯锤宽度相同。边缘碎石颗粒只有侧向约束, 而内部碎石颗粒有双侧约束。这样, 在同样的夯锤作用下, 边缘颗粒与内部颗粒的运动的差异应该比宽垫层的情况更显著, 以此模型分析强夯置换下的碎石墩形成过程。



(a) 夯锤位移时程曲线对比



32颗碎石



96颗碎石

(b) 形成碎石墩的对比

图 2 夯锤撞击下 32 颗碎石与 96 颗碎石的运动情况对比

Fig. 2 Comparison of stone movements in cases of 32-stones and 96-stones

基于以上的模型对比结果, 笔者采取 32 颗碎石作为分析对象并研究了碎石墩形成过程。对夯锤以 4 m/s 的初始冲击速度夯击碎石垫层 - 软土的工况进行了数值模拟。模拟给出每颗碎石的运动和碎石垫层整体的

变形情况, 整个夯击过程持续约 100 ms, 根据夯锤、碎石和软土的运动情况, 可将夯击过程分为 4 个阶段:

(1) 夯锤与碎石的能量传递以及碎石垫层内部的应力波传播过程 (0~60 μ s), 如图 3 所示。夯锤冲击且与初始均匀排布的碎石垫层相互接触之后, 能量在极短时间内传递给碎石, 可以看到冲击产生的应力波逐层传播至碎石垫层的底部并反射回到夯锤 - 碎石界面的过程。该阶段时间极短, 基本上是瞬间完成的, 在此过程中碎石和软土均未发生表观上的变形。

(2) 碎石垫层接触软土后的整体变形 (0.6~5.7 ms), 如图 4 所示。由于碎石刚压入软土时后者的阻力很小, 碎石颗粒 (垫层) 被夯锤击打之后以相对更快的速度脱离夯锤, 挤入软土, 从 0.6 ms (600 μ s) 时刻开始, 可以看到碎石脱离夯锤和碎石垫层整体发生的明显鼓状变形。

(3) 夯锤二次冲击碎石结构重分布 (5.7~13.2 ms), 如图 5 所示。碎石整体脱离夯锤、压入软土后在软土阻尼作用下速度逐渐降低, 此时夯锤继续以稍弱的速度 (相对于初始撞击速度) 追赶碎石垫层, 对碎石形成二次冲击。在二次冲击中碎石个体逐步完成了重新分布的过程, 整体呈现一种相对稳定的结构。该过程完成时间较短, 但对碎石层的整体结构影响最大。

(4) 稳定结构的碎石与夯锤共同运动 (>13.2 ms), 如图 6 所示。碎石继续在夯锤的作用下, 以稳固的整体结构往深度方向运动直至停止。碎石墩的形状和直径基本与上一阶段相同, 主要体现为夯沉量的增长过程。

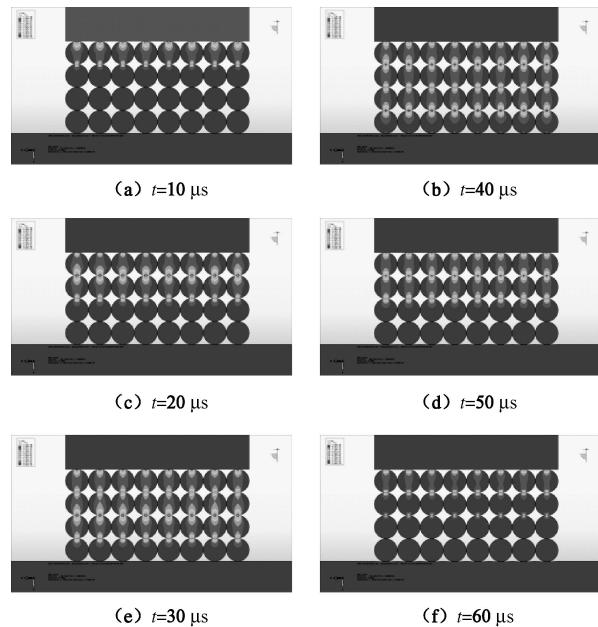


图 3 夯锤与碎石层的能量传递及碎石层中的应力波传播阶段

Fig. 3 Energy transition between hammer and stones, and stress wave propagation in stone layers

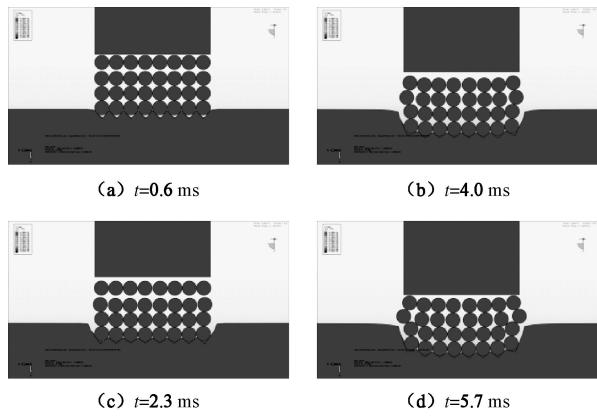


图 4 碎石挤入软土发生整体变形阶段

Fig. 4 Global deformation of stone layer

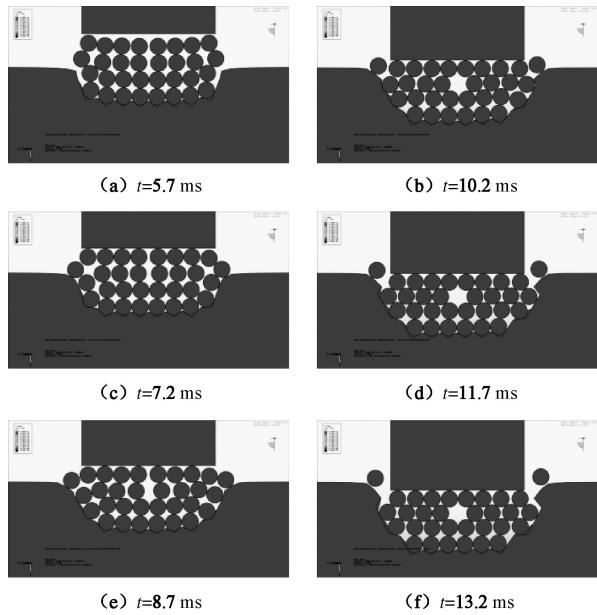


图 5 碎石受到二次冲击及其重分布过程

Fig. 5 Second impact and redistribution of stones in soils

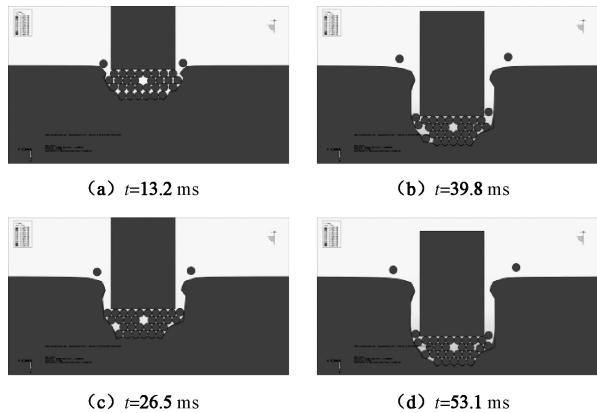


图 6 碎石形成稳定结构并随夯锤向下运动

Fig. 6 Movement of hammer-stone in soils and formation of stable structure of replacement pier

从碎石墩的形成机理上看, 碎石之间的挤密和动态排布是成墩的主要原因。碎石墩整体发生挤压变形

的时候, 碎石个体存在水平方向位移不同的情况; 而在碎石墩整体结构稳定后, 碎石主要体现为整体统一对软土的挤压运动。从碎石的水平方向运动量可判断碎石墩整体的侧向变形情况。在数值模拟中, 左右侧的碎石运动情况基本一致。将碎石按照图 7 (a) 的顺序进行编号, 取竖直方向编号为 #9, #11, #13, #15 的石子作为运动分析对象, 获取各碎石的水平方向位移时程曲线如图 7 (b) 所示, 正值为水平向左, 负值为水平向右。

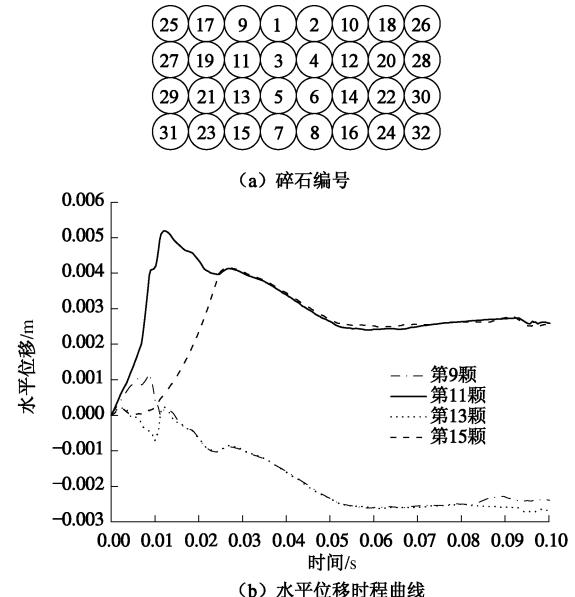


图 7 一列纵向碎石在夯锤冲击下的水平位移时程曲线

Fig. 7 Horizontal displacement-time curves of a column of stones directly impacted by hammer

图 7 (b) 所示碎石的水平位移时程曲线反映出: ① #11 和 #15 碎石处于碎石层的中部, 在整体变形的前段位移相对最大, 碎石整体呈鼓状。25 ms 后 4 颗石子的水平运动即 4 条曲线是一致的, 也即达到碎石整体结构稳定的状态。② #9 和 #13 碎石最终的水平位移基本一致, #11 和 #15 碎石也是如此, 位移值在 0.25 cm 左右。碎石水平向位移远小于铅垂向位移。可以看出, 碎石的水平位移主要是为达到碎石颗粒层的最紧密排列所做的位置调整。③ 相邻两颗碎石的运动方向相反, 而相隔的两颗碎石最后水平运动位移相同并呈上下排列。

以上的工作从碎石的运动方面对成墩的过程进行了描述。同时, 进行了不同冲击速度下的对比, 获取了速度时程曲线、位移时程曲线如图 8 (a)、8 (b) 所示。在其他条件相同的情况下, 夯锤的能量释放时间随冲击速度增加而增加, 在初始撞击速度为 3, 4, 5, 6 m/s 情况下, 夯锤对“碎石 - 软土”的能量释放时间分别为 52.7, 57.6, 67.8, 70.8 ms, 相应夯深分别为 7.94, 11.14, 15.25, 19.34 cm。

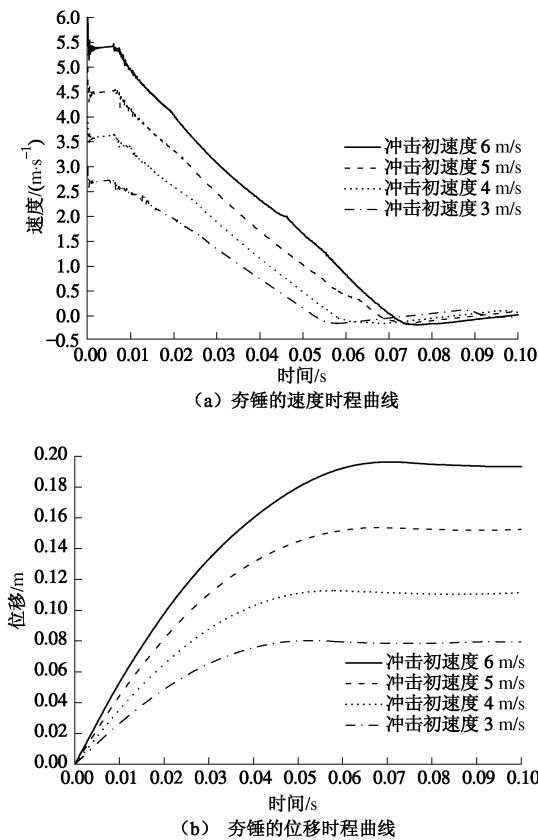


图 8 不同冲击速度下夯锤的速度和位移时程曲线对比

Fig. 8 Velocity-time and displacement-time curves of hammer with different impact velocities

2.2 多次连续夯击的模拟

强夯置换工程中包含夯锤的多次夯击过程, 也包括增加硬质填料的工艺。在数值模拟中, 如何在分析完成后增加填料并且使填料和软土处于合理的初始状态是一个难以解决的问题, 特别是在复杂的结构和边界条件情况, 增加填料的过程尚难以做到。本文中选取强夯置换的前 3 击作为分析对象, 即研究软土和一次填料在连续 3 次夯击下的变形规律, 模拟不包含后续填料工艺。在单次夯击的基础上, 通过设定夯锤的边界条件, 模拟夯锤反复提升至一定高度后自由下落, 对碎石-软土结合体实现连续夯击的加载过程。3 次夯击中夯锤的冲击速度均为 4 m/s。图 9 (a) 为重复 3 击的夯锤速度时程曲线, 可观察到能量释放时间分别是 55.4, 40.5, 36.0 ms, 随击数增加而逐步减小。图 9 (b) 给出 3 次重复夯击的夯深时程曲线, 每次夯击回弹之后夯沉量分别是 10.85, 6.94, 5.77 cm。随着夯击击数的增加, 相对夯沉量变少, 最终的夯锤位移与物理模型实验^[20]的夯沉量符合良好。从图 10 前 3 击夯坑图也能看出, 随着夯击击数的增加, 碎石逐渐变得密实, 体现出处理后的软土地基材料特性变得密实和承载力的提高。同时随着击数增加, 夯锤到达最大位移的时间 (即能量释放时间) 相应减少。

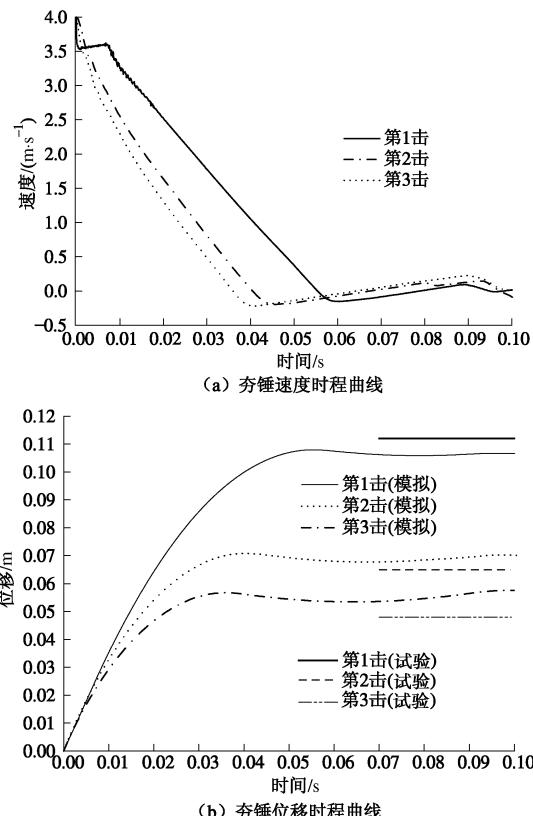
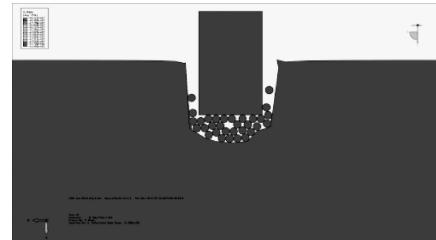
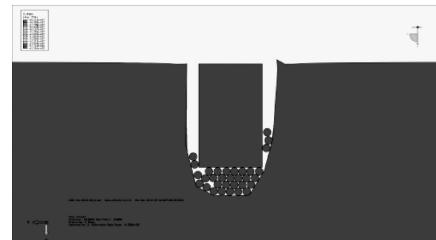


图 9 3 次重复夯击时击夯锤的速度和位移时程曲线

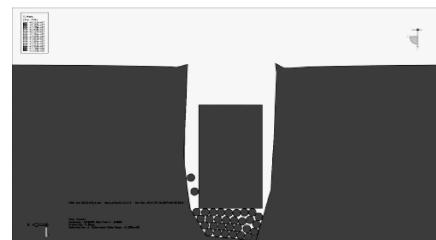
Fig. 9 Longitudinal velocity-time and displacement-time curves of hammer with repeated tampings



(a) 第1击



(b) 第2击



(c) 第3击

图 10 前 3 击的夯沉量

Fig. 10 Tamping settlements of hammer with 3 repeated tampings

夯锤的加速度可直接换算成撞击的动力, 有利于了解夯锤在强夯置换过程中的作用, 因而其加速度曲线也具有研究意义。数值模拟所获得的夯锤加速度曲线(图 11(a))与模型试验的结果(图 11(b))呈现相同的规律。加速度曲线的形状呈马鞍形, 其能量释放时间随着击数增加而减小。表明经过处理的下部软土逐渐变得坚实, 材料特性发生改变。

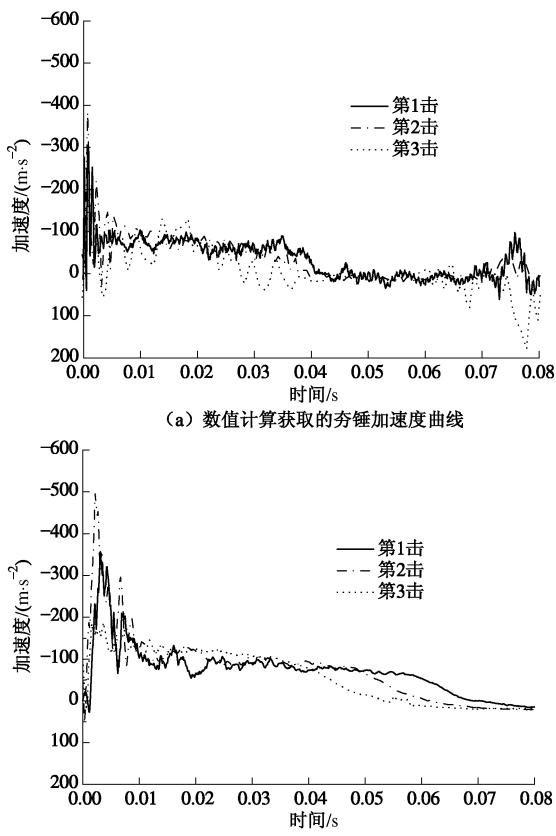


图 11 数值模拟与模型试验中的夯锤加速度曲线对比

Fig. 11 Comparison of acceleration-time curves between numerical simulations and model tests

3 结 论

对于强夯置换的动力过程, 目前国内外尚缺乏细致的分析, 这一方面的理论落后于实践。从目前常用的准静力学观点转到考虑结构惯性、材料动态本构关系、以及多体动力相互作用等机制的冲击动力学分析将对加深了解工程应用的内在机制、发展和改进工艺起到促进作用。本文采用数值模拟方法分析了强夯置换模型试验中的“夯锤-碎石垫层-软土”之间的相互作用过程, 得到以下 2 点结论。

(1) 采用分散的碎石颗粒模拟可以从直观上展现碎石整体的运动变形和成墩过程。相对于将碎石视为连续的整体进行分析, 分散的碎石更接近物理实质, 并能给出碎石墩形成和成墩直径、深度等方面合理的解释。数值分析结果显示, 在夯锤的冲击作用下强夯

置换过程可分为 4 个特征显著的阶段, 依次是: ①夯锤与碎石的能量传递和碎石层之中应力波传播过程; ②碎石与软土接触后的整体运动和变形过程; ③夯锤二次冲击碎石层后碎石结构重分布过程; ④稳定的“碎石-软土”结构与夯锤共同运动及软土塑性变形过程。

(2) 多次强夯冲击的数值模拟表明: 在形成碎石墩的整个过程中, 夯锤二次冲击对碎石结构形成重分布是重要阶段。在此过程后, 碎石形成了稳定的结构, 碎石墩的直径基本保持不变。该阶段所用时间较短, 却对碎石墩的水平方向动态发展起重要作用; 夯锤在一系列等速冲击过程中, 其能量释放时间随击数呈显著的下降趋势。其他条件相同的情况下, 冲击速度越高夯锤的能量释放时间越长。以上模拟结果与试验现象^[20]定性地一致。

本次采用的数值模型为二维, 同时碎石形状设计为均等的圆形并均匀排布, 实际情况中存在着碎石的形状多样性、碎石相互之间的咬合、碎石的颗粒级配、碎石多层排布不均匀等复杂情况。因而, 下一步的工作可在碎石形状、多层排布、填料工艺等情况下展开。尽管如此, 本文初步的数值模拟结果说明, 研究碎石墩形成过程时, 应着重考虑夯锤二次冲击的阶段。由于该阶段所用时间是总时间的一小部分, 在试验方法上应该采用更精密的冲击动力学测试手段研究碎石墩的动态形成过程, 为理论分析和精确的数值模拟研究提供数据。

参 考 文 献:

- [1] MENARD L, BROISE Y. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation[J]. Géotechnique, 1975, **25**(1): 3 - 18.
- [2] LO K W, OOI P L, LEE S L. Dynamic replacement and mixing of organic soils with sand charges[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(10): 35 - 41.
- [3] 张凤文, 周洪彬. 强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(4): 522 - 525. (ZHANG Feng-wen, ZHOU Hong-bin. Testing study on the dynamically formed stone column compound foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(4): 522 - 525. (in Chinese))
- [4] CHOW Y K, YONG D M, LEE S L. Dynamic compaction analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **118**(8): 1141 - 1157.
- [5] 孔令伟, 袁建新. 强夯的边界接触应力与沉降特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(2): 86 - 92. (KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Study on surface contact stress and settlement properties during dynamic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(2):

- 86 - 92. (in Chinese))
- [6] PAN J L, SELBY A R. Simulation of dynamic compaction of loose granular soils[J]. *Advances in Engineering Software*, 2002, **33**: 631 - 640.
- [7] MOSTAFA K F, LIANG Robert Y. Numerical modeling of dynamic compaction in cohesive soils[C]// *Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 Conference*. 2011: 738 - 747.
- [8] 田水, 王钊. 强夯动力性能的显式非线性数值分析[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(6): 1580 - 1584. (TIAN Shui, WANG Zhao. Explicit nonlinear numerical analysis of dynamical performance of dynamic compaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(6): 1580 - 1584. (in Chinese))
- [9] 牛志荣, 杨桂通. 强夯作用下土体动力特性研究[J]. *工程力学*, 2006, **23**(3): 118 - 125. (NIU Zhi-rong, YANG Gui-tong. Dynamic characteristics of soils during and after dynamic consolidation[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, **23**(3): 118 - 125. (in Chinese))
- [10] 刘汉龙, 高有斌, 曹建建, 等. 强夯作用下接触应力与土体纵向位移计算[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(10): 1493 - 1497. (LIU Han-long, GAO You-bin, CAO Jian-jian, et al. Calculation of contact stress and soil vertical displacement under dynamic compaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(10): 1493 - 1497. (in Chinese))
- [11] 高有斌, 刘汉龙, 张敏霞, 等. 强夯加固地基的土体纵向位移计算方法研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(8): 2672 - 2676. (GAO You-bin, LIU Han-long, ZHANG Min-xia, et al. Simplified calculation method of soil vertical displacement under dynamic compaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(8): 2672 - 2676. (in Chinese))
- [12] 钱家欢, 钱学德, 赵维炳, 等. 动力固结的理论与实践[J]. *岩土工程学报*, 1986, **8**(6): 1 - 17. (QIAN Jia-huan, QIAN Xue-de, ZHAO Wei-bing. Theory and practice of dynamic consolidation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, **8**(6): 1 - 17. (in Chinese))
- [13] 王保田, 唐劲柏. 强夯碎石桩的发展及成桩机制分析[J]. *河海大学学报*, 1999, **27**(6): 30 - 34. (WANG Bao-tian, TANG Jin-bai. Development of DRM and analysis of column-formation mechanism[J]. *Journal of Hohai University*, 1999, **27**(6): 30 - 34. (in Chinese))
- [14] 罗嗣海, 潘小青, 黄松华, 等. 置换深度估算的一维波动方程法[J]. *地球科学*, 2002, **27**(1): 115 - 119. (LUO Si-hai, PAN Xiao-qing, HUANG Song-hua, et al. One-dimensional wave equation model for estimating replacement depth of dynamic replacement[J]. *Earth Science*, 2002, **27**(1): 115 - 119. (in Chinese))
- [15] 周健, 邓益兵, 贾敏才, 等. 基于颗粒单元接触的二维离散-连续耦合分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(10): 1479 - 1484. (ZHOU Jian, DENG Yi-bing, JIA Min-cai. Coupling method of two-dimensional discontinuum-continuum based on contact between particle and element[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(10): 1479 - 1484. (in Chinese))
- [16] 邓益兵, 周健, 刘文白, 等. 螺旋挤土桩下旋成孔过程的颗粒流数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(9): 1391 - 1398. (DENG Yi-bing, ZHOU Jian, LIU Wen-bai. PFC numerical simulation of augered piling of soil displacement screw piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(9): 1391 - 1398. (in Chinese))
- [17] 吴勇华, 谢新宇, 叶军, 等. 跨越地铁高层建筑桩筏基础数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(3): 441 - 447. (WU Yong-hua, XIE Xin-yu, YE Jun, et al. Numerical simulation of piled raft foundation of super-tall buildings crossing metro tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(3): 441 - 447. (in Chinese))
- [18] 吴健, 王屹峰, 刘开富, 等. 大面积堆载下地下构筑物性状研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(9): 1343 - 1348. (WU Jian, WANG Yi-feng, LIU Kai-fu, et al. Behavior of underground structures under large area loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(9): 1343 - 1348. (in Chinese))
- [19] 谢新宇, 徐玉胜, 吴健, 等. 软土地基连续强夯置换碎石墩的数值分析[J]. *西北地震学报*, 2011, **33**(3): 249 - 254. (XIE Xin-yu, XU Yu-sheng, WU Jian, et al. Numerical simulation of stone column replacement by consecutive dynamic compaction in soft ground[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2011, **33**(3): 249 - 254. (in Chinese))
- [20] 郑凌透. 软土中强夯置换法形成碎石墩的机理[D]. 宁波: 宁波大学, 2013. (ZHENG Ling-wei. Study on the forming mechanism of the replacement pier under dynamic replacement method[D]. Ningbo: Ningbo University, 2013. (in Chinese))
- [21] 朱向荣, 王金昌. ABAQUS 软件中部分土模型简介及其工程应用[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(增刊 2): 144 - 148. (ZHU Xiang-rong, WANG Jin-chang. Introduction to partly soil models in ABAQUS Software and their application to the geotechnical engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(S2): 144 - 148. (in Chinese))