

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1580-05

强夯动力性能的显式非线性数值分析

田 水^{1,2}, 王 钊²

(1. 武汉理工大学 土木与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 充分考虑碰撞中出现的材料非线性、几何非线性、接触非线性、运动非线性以及它们之间相互耦合的特性, 利用显式瞬态非线性有限元分析技术分析了强夯对地基土的冲击碰撞过程, 得到了夯锤与土体之间的撞击力时间历程、土体位移、应力的时间历程, 并得到了落距、夯锤重量、夯锤底面积与强夯加固深度之间的相互关系, 分析结果表明: 土体位移滞后于土体应力, 再现了夯锤与土体碰撞的整个过程, 反映了强夯过程中的一般现象和基本规律。

关 键 词: 强夯; 有限元法; 大变形; 动力接触

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Explicit nonlinear numerical analysis of dynamical performance of dynamic compaction

TIAN Shui^{1,2}, WANG Zhao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Nonlinear FEM based on explicit time integration is applied to simulating the collision process of dynamic compaction. Many characters are taken into account, such as material nonlinearity, geometric nonlinearity, contact nonlinearity, movement nonlinearity and coupling characters of them, etc. The variation processes of collision force of hammer and deformation and stress of soil have been obtained at different heights, weights and areas of hammer. The analysis results indicate that the displacement of soil lags behind the stress of soil. The collision's entire process of hammer and soil and the common phenomenon in the dynamic compaction's process has been reappeared.

Key words: dynamic compaction; finite element method; large deformation; dynamic contact

1 引 言

强夯是地基土在夯锤巨大冲击力作用下的动态响应问题。由于土体本身的复杂性, 强夯加固效果的评价、加固机制、加固设计参数、夯点的合理布置等问题至今仍然未得到完全解决^[1]。

强夯是在很短时间和巨大冲击载荷作用下的一种复杂的非线性动态响应过程, 它具有非常明显的动力特性, 而且碰撞区土体迅速超越弹性阶段而进入塑性流动阶段, 并有可能出现撕裂等各种形式的破坏, 所以用准静态的方法来分析强夯显然是欠精确的。

已有的强夯有限元分析中, 锤底荷载需要人为给定, 与实际情况存在差异。本文通过建立动力接触的显式有限元分析模型, 并引入大变形问题的分

析方法进行夯锤对地基土的冲击碰撞全过程分析, 锤底接触力通过接触条件直接求得, 不需要引入给定已知量, 对计算过程中网格畸变和翻转问题, 采用了侵蚀技术, 有力地消除了网络失稳现象, 克服了现有有限元分析的不足^[2]。

本文采用动力显式非线性有限元对强夯进行分析, 得到强夯过程中夯锤对土体的撞击力以及土体的变形、应力等方面的时序结果, 研究了落距、夯锤重量及夯锤底面积对强夯加固深度的影响。

2 强夯碰撞数值分析理论

2.1 强夯体系的运动方程及求解方法

在强夯的非线性动态分析过程中, 时间间隔为 Δt 的各个离散时间点 $t_i (i = 0, 1, 2, 3 \dots)$ 都能满足运动方程, 则碰撞运动方程在时间点 t_i 上可写为^[3]

收稿日期: 2006-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50279036)。

作者简介: 田水, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 主要从事特殊土与非饱和土方面的研究。E-mail: tshuiwh@yahoo.com.cn

$$[m]\ddot{\mathbf{x}}_i + [c]_i \dot{\mathbf{x}}_i + [k]_i \mathbf{x}_i = \mathbf{P}_i \quad (1)$$

式中: $[c]_i$, $[k]_i$ 分别为时间点 t_i 上的切线阻尼和切线刚度; $\mathbf{P}_i$, $\mathbf{x}_i$ 分别为时间点 t_i 上的外力向量和位移矢量^[3]。

本文首先对非线性运动方程组式(1)进行空间离散和时间离散, 然后采用显式中心差分算法求解运动方程。

2.2 土体的本构关系

分析时土体采用帽子模型^[4-7], 土体的总应变增量可以表示为弹性应变和塑性应变之和, 即

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

在弹性范围内, 材料的特性可以由弹性关系来描述, 即

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{dI_1}{9K\sigma_{mn}}\delta_{ij} + \frac{1}{2G\sigma_{mn}}d\mathbf{S}_{ij} \quad (3)$$

式中: I_1 为应力张量的第1不变量, $I_1 = \sigma_{kk}$; $\mathbf{S}_{ij}$ 为应力偏张量, $\mathbf{S}_{ij} = \sigma_{ij} - (I_1/3)\delta_{ij}$; δ_{ij} 为克朗纳克尔 δ ; K , G 分别为体积弹性模量和剪切弹性模量。

此帽子模型的加载函数由三部分组成, 即极限破坏面、应变硬化面和拉裂面, 如图1所示。

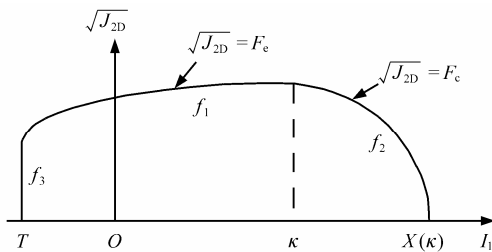


图1 帽子模型的屈服面

Fig.1 The yield surface of the cap model

加载函数的极限破坏面、应变硬化面和拉裂面可以分别表示为

$$f_1 = \sqrt{J_2} - (\alpha + \beta I_1) \quad (4)$$

$$f_2 = \sqrt{J_2} - \sqrt{[X(\kappa) - L(\kappa)]^2 - [I_1 - L(\kappa)]^2} / R \quad (5)$$

$$f_3 = T - I_1 \quad (6)$$

硬化参数 κ 是塑性体积应变的函数, 即

$$\boldsymbol{\varepsilon}_v^p = W \left\{ 1 - \exp \left[-D(X(k) - X_0) \right] \right\} \quad (7)$$

塑性应变只有在当 $d\mathbf{f} > 0$ 或 $f = 0$ 时发生。当卸载及中性变载或 $f < 0$ 时, 材料是弹性的。

塑性应变增量的表达式为

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (8)$$

式中: f 由式(4)~(6)确定; $d\lambda$ 为比例系数。

3 强夯碰撞计算模型

强夯过程的物理现象比较复杂, 土体经过与运动着的夯锤相互接触和摩擦滑动, 产生弹性变形、屈服和塑性变形, 以改善土体的力学性能。

根据以上方法, 本文对强夯过程进行模拟计算。在建立强夯碰撞的非线性有限元模型时假设:

(1) 采用刚体模拟夯锤, 不考虑夯锤的变形;

(2) 不考虑夯锤碰撞土体时5倍夯锤直径外的土体的动力响应对能量的吸收、转换影响^[8,9]。在以上假设的基础上对强夯的动力性能进行分析。

分析中土体采用块单元, 夯锤采用质量块单元。有限元计算网格采用修正的拉格朗日网格, 图2为强夯碰撞分析有限元模型, 由于对称性, 模型仅取1/4。对土体的两对称边界面按对称条件约束水平位移和相应的转角。

为了模拟真实状态下土体的半无限状况, 消除边界面的波反射对分析结果的影响, 在外边界上采用无反射边界。采用对称罚函数法计算夯锤与土体的接触力。

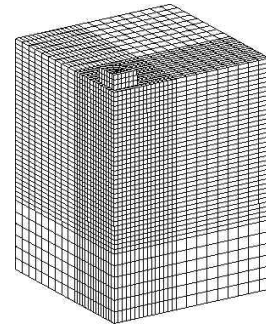


图2 强夯分析的有限元模型

Fig.2 Finite element model for simulating dynamic compaction

强夯时土体内部将产生应力波, 形成压力、密度、质点加速度和能量的跳跃, 这种强间断给动力学微分方程的求解带来困难, 本文将人工体积黏性引入到压力项, 使应力波的强间断模糊成在相当狭窄区域内急剧连续变化, 以利于动力学微分方程的求解。

土体的本构关系采用考虑动力刚化的帽盖模型, 有限元计算中采用的土体物理力学指标见表1。

表 1 强夯参数

Table 1 Parameters for dynamic compaction

密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	凝聚力 / Pa	摩擦角 / $(^\circ)$	泊松比	干密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙比	饱和度	压缩指数	回弹指数
1.722	1.5×10^4	20	0.375	1.50	0.80	0.50	0.115 4	0.034 1

4 数值计算结果及其分析

4.1 夯锤冲击力分析

图 3 为夯锤重 250 kN、锤底面积为 3.87 m²、落距为 20 m 的强夯夯击过程中夯锤冲击力的时程曲线。从图中可以看出, 冲击力曲线具有很强的非线性特征。夯锤与土体刚开始接触时土的受力变形只发生在接触点附近的区域, 塑性变形吸收的夯锤动能还较小, 因此, 冲击力数值比较小; 在应力-应变波向整个土体传播的过程中, 影响区内的土体都被压缩, 此时土体对夯锤冲击的抵抗作用最为明显; 随后为土体的振动阶段, 由于土体的摩擦及应力波的扩散, 土体的振动将逐渐衰减, 此时夯锤的速度很小, 夯锤对土体的撞击也相应降低, 此时夯锤的速度很小, 夯锤对土体的冲击力也相应降低。

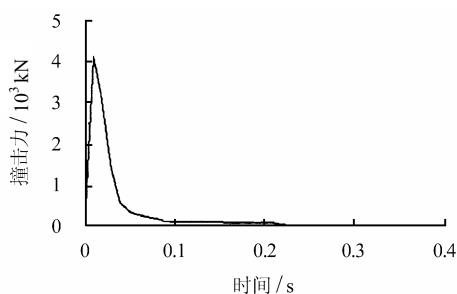


图 3 夯锤冲击力的时程曲线

Fig. 3 Process curve of collision force of hammer

由夯锤冲击力-时程曲线看到, 在强夯过程中, 夯锤和土体之间的冲击力无明显的跳跃现象, 夯锤冲击力-时程曲线为单峰型。

表 2 列出了不同能级的强夯在夯击过程中夯锤与土体间的冲击力值, 从表中可以看出: 夯锤冲击力的变化幅度非常大, 且随着能级的增大而增大。

表 2 夯锤在碰撞中的冲击力比较

Table 2 Comparison of collision force of hammers

夯锤重量/ kN	落距/ m	能级/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	最大冲击力/ kN
100	17	1 700	2 586
160	17	2 720	3 137
200	17	3 400	3 347
250	10	2 500	2 378
250	13	3 250	2 811
250	17	4 250	3 601
250	20	5 000	4 152
250	24	6 000	4 741
300	17	5 100	3 771

表 2 中锤重为 250 kN 的强夯与落距为 17 m 的强夯的最大冲击力与强夯能级的曲线关系如图 4 所示。

由图可见, 若保持夯锤重量不变 (250 kN), 最大冲击力随着落距的增大而增大; 若落距保持 (17 m) 不变时, 最大冲击力随着锤重的增大而增大。夯锤重量对最大冲击力的影响大于落距对最大冲击力的影响。

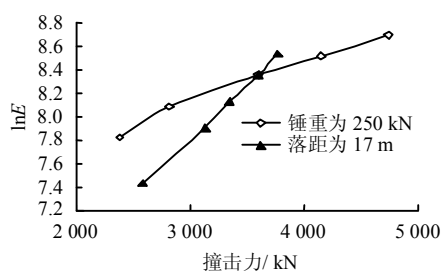


图 4 最大冲击力和强夯能级的关系

Fig. 4 Relationship between maximum collision force and energy of hammer

4.2 土体位移、应力-时程分析

图 5、图 6 为强夯过程中夯锤下 2 m 深度处土体的位移、应力与时程曲线。

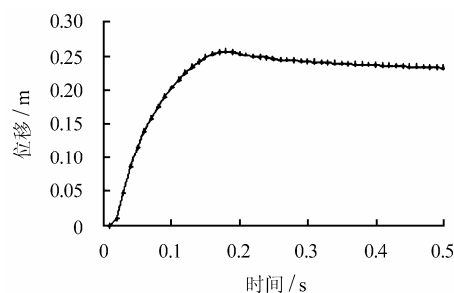


图 5 土体位移-时程曲线

Fig. 5 History curve of displacement of soil

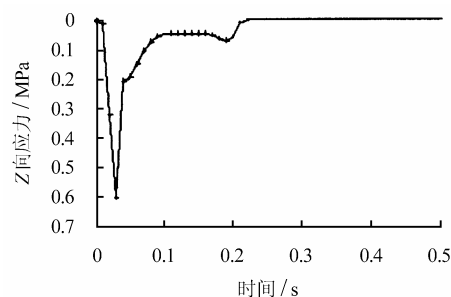


图 6 土体应力-时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of stress of soil

从图 5 中可以看出: 土体位移最大值发生在 0.17 s, 之后产生弹性回弹; 而从图 6 中可以看出: 土体竖向应力最大值发生在 0.03 s, 之后竖向应力急剧降低; 对比可见, 土体中的最大位移与最大应力并不同步, 即位移滞后于应力。

4.3 土体密度分析

强夯过程中不同时刻土体的密度改变等值线如图 7 所示, 它们反映了土体压密随时间的变化。由图可见, 强夯主要加固夯坑下的土体, 有效加固范围可视为以夯锤中轴线为长轴的空间椭球。

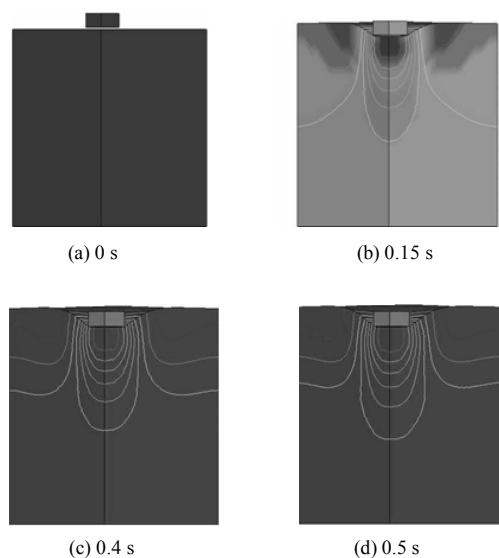


图7 土体密度随时间变化关系

Fig.7 Relationship between density of soil and time

4.4 落距对加固深度的影响分析

在相同的土性参数下, 分别取落距为 10, 13, 17, 20, 24 m, 得到落距与强夯加固深度的关系如图 8 所示。

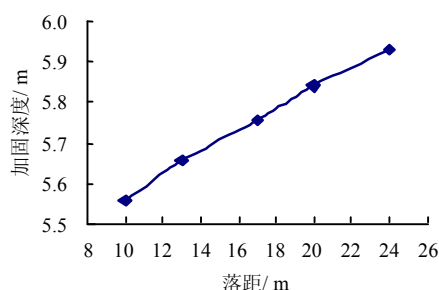


图8 落距-加固深度关系曲线

Fig.8 Relationship between drop height and improvement depth

由图可见, 随着落距的增大强夯的加固深度在不断增大, 它们的关系基本是线性关系。

4.5 夯锤重量对加固深度的影响分析

在相同的土性参数下, 分别取夯锤重量为 100, 160, 200, 250, 300 kN, 得到夯锤重量与强夯加固深度的关系如图 9 所示。

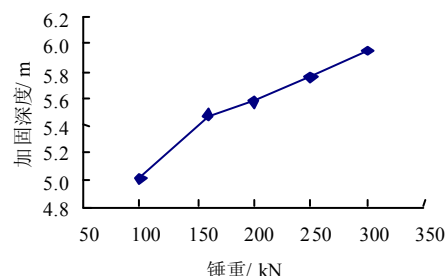


图9 锤重-加固深度关系曲线

Fig.9 Relationship between hammer's weight and improvement depth

由图可见, 随着夯锤重量的增大, 强夯的加固深度在不断增大, 但它们的关系不是线性关系。随着夯锤重量的增加, 强夯加固深度的增加幅度逐渐减小。

4.6 夯锤底面积对加固深度的影响分析

图 10 给出了相同的土性参数和夯击能量(4 250 kN·m)下夯锤半径与强夯加固深度的关系曲线, 由图可知, 在相同的土性参数和夯击能作用下, 随着夯锤半径的变化, 强夯加固深度存在着最大值, 在表 1 土体物理力学指标下当夯锤半径在 1.0~1.2 m 之间时强夯的加固深度达到其最大值, 若增大或减小夯锤半径, 则强夯加固深度均降低, 故在强夯施工时应根据场地土的土性进行夯锤半径的优化, 以达到最好的加固效果。

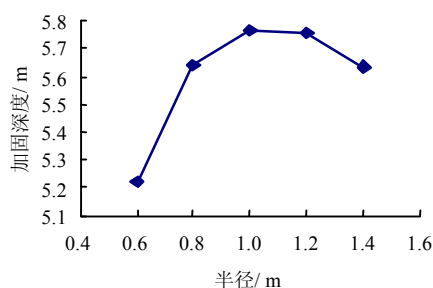


图10 夯锤半径-加固深度关系曲线

Fig.10 Relationship between hammer's radius and improvement depth

5 结 论

(1) 采用显式瞬态非线性有限元分析技术对强夯过程进行分析, 分析结果反映了强夯过程中的一

般现象和基本规律, 夯锤与土体碰撞的整个时间历程得以全面、细致的再现, 这是当前解析方法或试验方法难以实现的。

(2) 此方法可以考虑各种因素在强夯碰撞过程中的作用, 是一种精确评价强夯加固性能的方法。

(3) 与以往的计算方法不同, 夯击力没有根据前人由室内模型试验或基于一定的理论推导所得出的经验公式来获得夯击的接触时间以及夯击力与时间的变化关系, 而是根据夯锤与土体在强夯过程中各种特征量的相互协调来完成强夯过程的分析计算, 在计算过程中直接求取锤底接触力和接触位移, 不需要再引入其他人为已知量的简化假定, 符合强夯加固实质。

(4) 考虑了几何非线性、材料非线性和状态非线性等多重非线性, 采用了大变形描述, 在力学度量上更趋合理。

(5) 通过比较位移-时程曲线和应力-时程曲线, 可以发现两者并不同步, 即位移滞后于应力。

参考文献

- [1] 孔令伟, 袁建新. 强夯时地基土的应力场分布特征及应用[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 13—23.
KONG Ling-wei, YUAN Jian-xin. Stress field distribution characteristics of foundation during dynamic consolidation and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(3): 13—23.
- [2] 蒋鹏, 李荣强, 孔德坊. 强夯振动影响的数值分析[J]. 地下空间, 2001, 21(5): 544—548.
JIANG Peng, LI Rong-qiang, KONG De-fang. Numerical analysis of effect of vibration from dynamic compaction[J]. **Underground Space**, 2001, 21(5): 544—548.
- [3] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1998: 424—474.
- [4] 赵隆茂, 杨桂通. LS-DYNA3D等非线性结构动力响应分析程序的局限性[J]. 计算力学学报, 2001, 18(4): 473—477.
ZHAO Long-mao, YANG Gui-tong. Potential limitations of numerical procedures in using nonlinear analysis codes have needed to be highlighted[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2001, 18(4): 473—477.
- [5] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [6] 孙雨明, 高广运, 邱畅, 等. 帽子模型在强夯动应力计算中的应用[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 147—152.
SUN Yu-ming, GAO Guang-yun, QIU Chang, et al. Application of cap model in dynamic stress calculation for dynamic compaction[J]. **Underground Space**, 2003, 23(2): 147—152.
- [7] CHEN W F, BALADI G Y. Soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier Science. Publishers, 1985.
- [8] CHOW Y K, YONG D M, YONG Y, et al. Dynamic compaction analysis[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 1992, 118(8): 1141—1157.
- [9] 费香泽, 王钊, 周正兵. 黄土强夯的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 437—441.
FEI Xiang-ze, WANG Zhao, ZHOU Zheng-bing. Experimental research of dynamic compaction of loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 437—441.

书讯

土工细观模型实验与数值模拟

建筑科学类, 周健著, 16 开, 550 千字, 419 页, 精装, 估价: 70.00 元, 2008 年 6 月出版, ISBN: 978-7-03-020241-3
在数字信息技术高速发展的背景下, 作为对土工试验技术的一种补充, 开展土工试验的数值仿真研究是有一定意义的, 颗粒流理论实际应用的可行性研究对岩土材料室内试验结果的数值仿真是一个必不可少的前期基础性研究。本书结合作者多年从事的有关研究, 简要介绍了颗粒流数值仿真在岩土工程研究中已开展的部分工作。

读者对象: 土建、水利、交通等部门科技人员, 高等院校相关专业本科生和研究生。

(摘自 新华书目报·科技新书目)