

强夯作用下土体动力特性的数值模拟

向泽华, 胡焕校, 吴高权

(中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 为了更加深入研究在强夯过程中夯锤与地基土的相互作用, 运用有限元法模拟了整个强夯过程。在模拟过程中采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 同时将材料的非线性、大变形等因素考虑到模拟过程中, 得到强夯过程中土体动应力和位移的变化曲线, 并总结其变化规律和分布特征。数值模拟的结果与施工现场的实验数据基本一致, 可以为强夯的设计与施工提供参考依据。

关键词: 弹塑性模型; 强夯; 有限元法; 土体动力特性

中图分类号: TU470.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0207-05

Numerical simulation of dynamic characteristics of soil under role of strong compaction

XIANG Zehua, HU Huanxiao, WU Gaoquan

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: in order to further study the interaction between hammer and soil in the process of dynamic compaction, the paper used the finite element method to simulate the whole process. In the process of simulation, it adopted the finite element software ANSYS/LS-DYNA and thought the factors such as material nonlinear, large deformation and etc. Finally it got the variable curves of dynamic stress and displacement of soil with in the process of dynamic compaction and summarized the variable rule and distributing characteristics. The results of numerical simulation are basically consistent with the experimental data at the construction site. The result can provide reference for the design and construction of dynamic compaction.

Key words: elastic-plastic model; dynamic compaction; finite element method; dynamic characteristics of soil

1 研究背景

强夯法是利用了夯锤的冲击能将土体进行压密以达到加固地基的目的。经过数十年的发展, 强夯法在国内外已经得到广泛的应用。对于强夯的加固机理, 国内外众多专家、学者从多个角度进行研究; 朱建凯等^[1]认为在强夯过程中, 夯锤与土体是共同作用的, 应当把两者看作一整体, 他将土体与夯锤的接触应力、位移和速度的协调等因素考虑到模拟过程中。罗玮^[2]总结了强夯法的加固机理, 并在强夯过程中对加速度进行了分析。不少学者还对强夯参数做了大量研究。郑晓等^[3]和周建等^[4]通过现场试验对强夯夯击影响因素进行了研究, 并对强夯法的设计参数进行了分析, 对土层中孔隙水压力场和位移场等进行了测量和分析。梁雪梅等^[5]结合工程实例, 对强夯参数

的确定进行了研究, 并给出了高能级强夯时夯点间距公式, 对工程实践具有参考价值。刘艳军^[6]研究了夯击点和夯击能对加固效果的影响。

由于土体本身的复杂性和外界因素对其的影响, 地基处理的参数主要依靠经验判断或现场小规模试验来确定。从目前的研究现状来看, 强夯的理论研究大多都基于经典力学中的“小变形”, 而实际强夯过程中土体很大一部分为刚体位移, 所以小应变不能正确反映土体位移。因此, 本文在前人研究的基础上, 在考虑了土体的非线性和大变形等因素的情况下, 建立了有限元模型, 并采用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 对强夯过程进行模拟, 并结合现场试验数据, 研究了在不同夯击能下土体的应力和位移的变化规律, 并进一步分析了土体的压缩模量、孔隙比等参数在不同深度下的响应特性。

收稿日期: 2015-08-20; 修回日期: 2015-09-21

作者简介: 向泽华(1990-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 研究方向为地基与基础工程。

通讯作者: 胡焕校(1968-), 男, 浙江慈溪人, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事勘察与基础工程的教学及研究工作。

2 强夯理论模型的建立

2.1 土体本构模型

由于土体在强夯过程中产生了无法恢复的塑性形变,因此本文采用弹塑性本构模型对强夯过程进行理论分析。其中弹塑性模型的表达式如下:

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}] \{d\varepsilon\} \quad (1)$$

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

式中: $\{d\sigma\}$ 为应力增量; $\{d\varepsilon\}$ 为应变增量; $[D_{ep}]$ 为弹塑性刚度矩阵; $\{d\varepsilon^p\}$ 为塑性应变增量; $\{d\varepsilon^e\}$ 为弹性应变增量。

2.2 边界条件的选定

本文将采用廖振鹏^[7]提出的多次透射边界,该边界的特点是精度高并与能量波的入射角无关,此方法能有效减小误差,多次透射边界的有限元的表达式可写成增量形式:

$$\Delta Z(t + \Delta t, r_1) \approx \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N \cdot S^j \cdot \Delta V \quad (3)$$

式中: $\Delta Z(t + \Delta t, r_1)$ 为边界点 r_1 的位移; C_j^N 为二项式系数; N 为透射阶数; Δt 为时间步; $\Delta V_j = [\Delta Z_{1,j}, \Delta Z_{2,j}, \dots, \Delta Z_{j+1,j}]$, $\Delta Z_{i,j} = \Delta Z(t - (j-1)\Delta t, r_1)$ 为节点 r_1 在 $t + \Delta t$ 时刻之前的位移增量; S 为刚度。

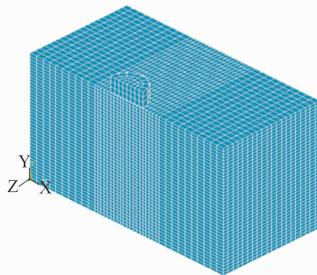
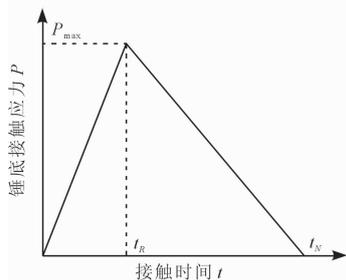
2.3 强夯冲击荷载模式

众多学者对强夯冲击时土体的应力变化规律做了大量的研究,实验结果皆表明夯锤对土体作用的应力波只有一个峰值,并且没有明显的第二个峰值出现,作用时间仅为 0.04 ~ 0.2 s。本文冲荷载简化为三角冲击荷载^[8],如图 1 所示,可用如下表达式:

$$t_N = \pi \sqrt{m/s} \quad (4)$$

$$P_{\max} = \frac{v_0 \sqrt{ms}}{\pi r^2} \quad (5)$$

$$s = 2rE(1 - \mu^2) \quad (6)$$



式中: s 为弹性常数; P_{\max} 为最大压力, MPa; m 为夯锤质量, kg; r 为半径, m; E 为变形模量; μ 为泊松比; v_0 为夯锤接触土体时的速度, m/s。

3 数值计算分析

强夯数值模拟^[9]所研究的问题是,在巨大冲击能量作用下地基土的动态响应问题;由于土体本身的复杂性加大了强夯过程中的分析难度。本次采用 Drucker - Prager 弹塑性模型模拟地基土体,并将大变形、材料的非线性等因素考虑到模拟过程中,边界条件采用廖振鹏提出的多次透射边界;冲击荷载模型为简化的三角形荷载。

地基土体模型的材料参数如表 1 所示。

表 1 土体材料参数

黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	密度 ρ / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	弹性模量 E/MPa
21	13	1600	0.29	3.0

本次研究运用 ANSYS/LS - DYNA 软件建立几何模型并作强夯过程的研究分析,模拟时不用研究夯锤在空中下落的情况,直接定义了夯锤的初速度。多次夯击的模拟过程主要采用了钱家欢等^[10]提出的土体材料弹性模量随夯击次数变化的理论;模型的几何尺寸为:土体模型长 12 m、宽 6 m、高 8 m,夯锤直径 2 m、高 1 m、锤重 20 t,夯锤接触土体时的初速度为 14 m/s,其最终的几何模型如图 2 所示。

数值模拟分两部分进行,第一部分为两能级作用下应力的分析;第二部分为两能级作用下位移的分析。通过数值分析,其结果如下:

3.1 应力结果分析

由数值模拟计算出在不同的夯击次数下夯锤中心位置处的竖向应力的变化曲线,如图 3、4 所示。

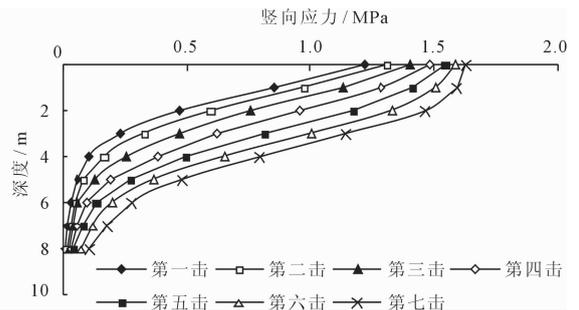


图 1 强夯瞬态荷载简化计算示意图

图 2 数值模拟几何模型图

图 3 200 t·m 能级最大竖向应力随击数变化曲线图

从图 3 和图 4 可以看出,土体在 0 ~ 3 m 的深度范围内,土体的竖向应力之差随着夯击次数的增加

而减小,其表现为曲线斜率在逐渐增加,而在 3 m 以下的土体的竖向应力之差随着夯击次数的增加而减

少,其曲线斜率在逐渐减小,证明土体在经过一定夯击次数后整体都得到了较好的夯实,之后的夯击对土体上部的加固效果逐渐减弱,土体上部竖向应力传递至下部,由于下部土体的改善效果相对于上部较差,下部土体的竖向应力值衰减较快,从图中表现为 3 m 以上土体的竖向应力曲线斜率变大,3 m 以下的曲线斜率变小。土体第 4 次夯击后其竖向应力随深度的变化曲线趋近于 S 型。另外,从图中还可以看出夯击能级越高,同深度位置处的竖向应力值变化越明显,加固效果越好。

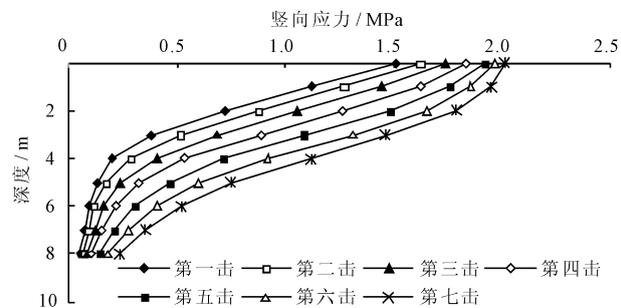


图 4 300 t·m 能级最大竖向应力随击数变化曲线图

通过数值模拟得到了土体分别在两种夯击能级的作用下第七击时的竖向应力变化云图,如图 5、6 所示。

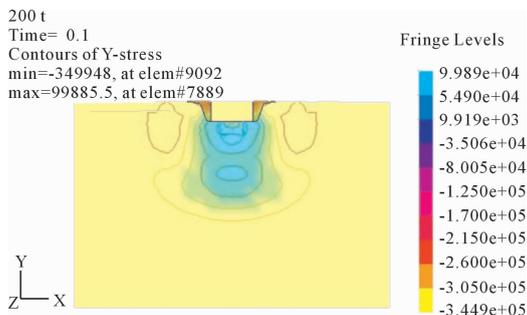


图 5 200 t·m 第七击 0.1s 竖向应力云图(单位:MPa)

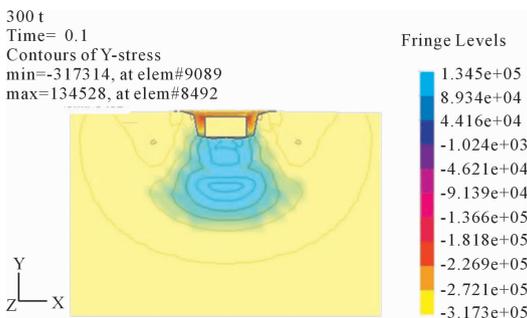


图 6 300 t·m 第七击 0.1s 竖向应力云图(单位:MPa)

根据模拟结果和图 5、6 可看出,夯锤底部土体的竖向应力随着扩散半径的增大呈衰减趋势,并且强夯对土体的影响范围大致趋近于椭圆型,竖向应力的扩散范围与之前学者的实测数据分布相似;对

比两图还可以发现,高能级作用下第七击时竖向动应力的扩散范围要大于低能级,这是由于在 高能级作用下相同深度位置处的土体得到了更好的处理,土体的各项力学特性得到了更好的改善,因此经过高能级夯击处理的土体要比低能级影响范围大。

3.2 位移结果分析

在夯击能的作用下土体会产生塑性变形,土颗粒会发生位移等现象从而使得土体更加密实;通过数值模拟得到了在不同的夯击次数下夯锤中心位置处的竖向位移的变化曲线,如图 7 和 8 所示。

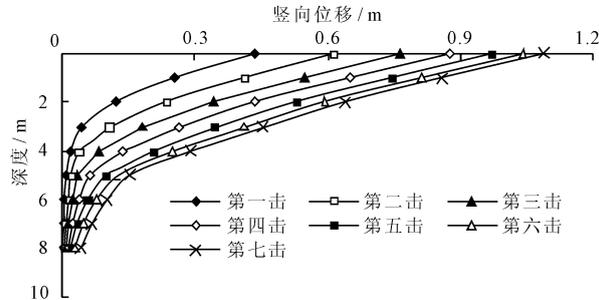


图 7 200 t·m 能级多次夯击竖向位移随深度变化曲线图

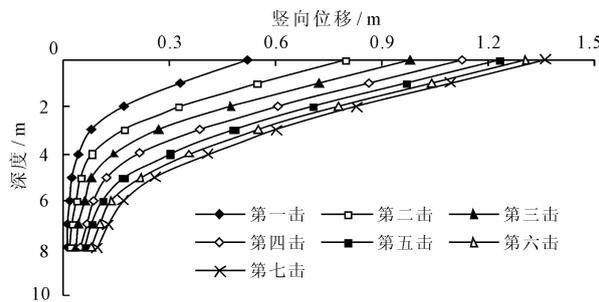


图 8 300 t·m 能级多次夯击竖向位移随深度变化曲线图

从图 7 和 8 可以看出,在两种能级的作用下土体的累计竖向位移曲线的变化规律基本上是一致的,土体上部竖向位移增量逐渐减少,下部竖向位移增量逐渐变大,这与竖向应力的变化规律也大致相同;当夯击达到一定次数后,土体在一定范围内的性质基本稳定,后续的夯击将能量传递到土体深部从而使深部的土体得到改善。

图 9、10 表示第七击时两能级的竖向位移云图。

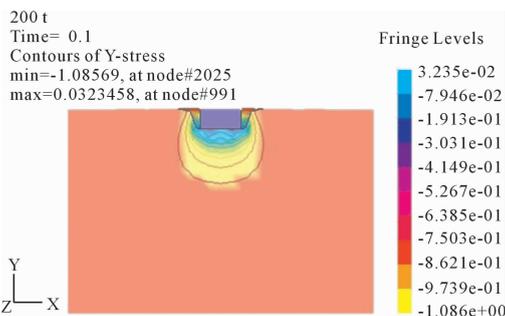


图 9 200 t·m 第七击 0.1s 竖向位移云图(单位:m)



图10 300 t·m 第七击0.1s 竖向位移云图(单位:m)

从图9和10可看出,在两种能级作用下夯锤底部和侧向的土体都得到了较大的改善,且加固的影响范围表现规律呈椭球形,与竖向应力的扩散表现大致相同;结果表明高能级的加固范围要大于低能级,第七击时高能级夯坑的累计沉降量比低能级大了近30 cm,说明高能级加固效果比低能级的更加明显。

4 工程案例与分析

4.1 工程概况

工程所在地位于长沙市望城区,场地属侵蚀剥蚀地貌类型,现场原貌经挖方和填方成平坦地带,并对

填方区进行了强夯处理,场地范围内拟建道路及综合用房,总面积为11万 m^2 。现场经过整平后标高变化范围约在1~2 m内;填土厚度在6 m的范围内,本次研究区域分成I、II不同夯击能的两个区域,填土厚度约为10 m,选取的场地范围在1500 m^2 左右;其中II区夯击能大小为200 t·m,II区夯击能大小为300 t·m。根据现场的地质资料研究区域地层主要为两层:

(1)填土层,褐黄—红褐色,主要成分为黏土、粉质黏土、碎石组成,硬塑—可塑,湿—稍湿,回填时经过分层碾压处理,其密实程度不均,碎石含量在25%左右,工程性状差异较大,厚度约为10 m。

(2)粉质黏土,褐黄色、红褐色,稍湿—湿,可塑—硬塑状,成分以粉粒和黏粒为主,局部含粗砂粒和砾石,具有网状结构,分布深度约在9~16 m。

由上可知,素填土在不经处理的情况下会出现沉降不均的情况同时也不能达到规定地基承载力。本次研究将结合工程实例,研究的对象主要是10 m范围内的素填土,粉质黏土不在研究范围之内。根据现场地质资料,素填土在强夯前的物理力学性质如表2所示。

表2 素填土物理力学性质

含水量/ %	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重	孔隙比	塑性 指数	液性 指数	压缩系数/ MPa^{-1}	压缩模 量/ MPa	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
20.8~27.2	1.42~1.61	2.42~2.64	0.91~1.07	15.6~19.4	0.437~0.706	0.46~0.61	1.35~2.71	19~23	11~16

4.2 检测结果

根据现场的实验结果,回填土地基在受到巨大冲击能的作用下夯点会产生沉降,其沉降量的大小主要与夯击能量的大小、夯击次数和土体性质等有关。本次研究统计了强夯过程中累计沉降量和单次沉降量,统计结果见表3。

夯击次数与沉降量的关系曲线见图11。

由图11可知,夯坑累计夯沉量随着夯击次数的增加而增加,但是从第三击以后,后续几击的单次沉降量逐渐衰减,曲线斜率逐渐减小,由此可以预计夯坑经过一定次数的夯击,其累计沉降量将趋于稳定。

表3 研究区域累计夯沉量统计表 cm

研究区域	第一击	第二击	第三击	第四击	第五击	第六击	第七击
I区	47	69	84	95	104	109	113
II区	55	83	101	114	125	131	136

本次研究还对夯前与夯后的重型动力触探结果及其土工试验结果进行了对比,图12为重型动力触探随深度的变化曲线图。

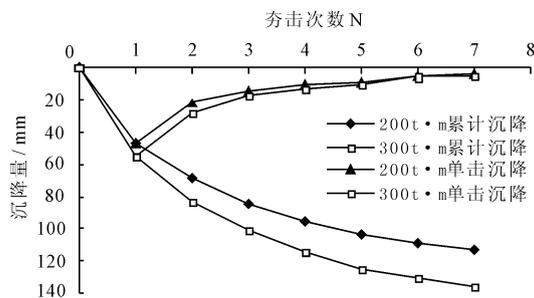


图11 夯击数与夯沉量关系曲线图

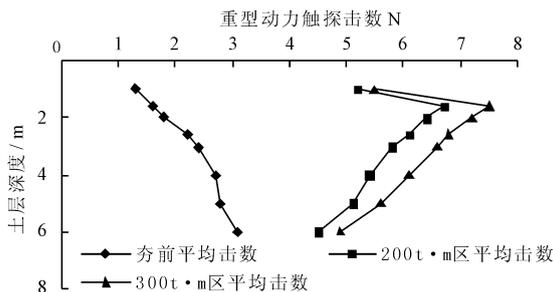


图12 重型动力触探随深度变化关系曲线图

从图12可以看出,土体在1.5~2 m深度范围内,动探击数最大,说明该处土体的物理力学性质改

善效果最为显著。土体在经过强夯后动探击数比强夯前的动探击数要大的多,说明地基土的承载力经过强夯后有了大幅度提高。通过对比可发现,300 t·m强夯区探击数比200 t·m强夯区的探击数要略高的,但是随着深度的增加两能级的动探击数差值逐渐减少,夯击数逐渐接近强夯前的水平,说明高

能级的地基加固效果比低能级的要好。

室内土工试验能更精确的反映出土体物理力学性能随深度的变化规律,本次选取了密度、孔隙比、压缩模量进行了更加深入的研究;根据室内试验的结果将其分别绘制成随深度变化的曲线图,如图13、14、15所示。

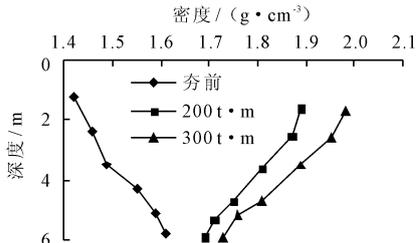


图13 密度随深度变化曲线图

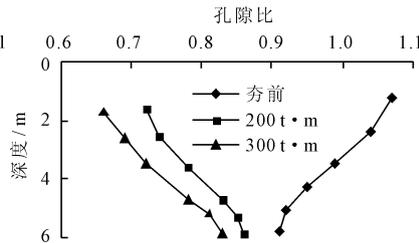


图14 孔隙比随深度变化曲线图

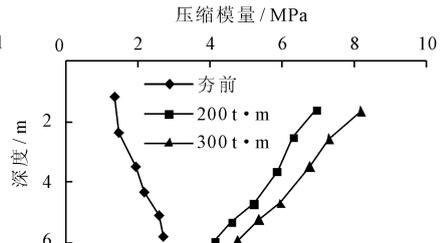


图15 压缩模量随深度变化曲线图

从图13、图14和15可以看出,地基土经过强夯后,其密度、孔隙比、压缩模量随深度的变化曲线趋近于S型,且在高能级作用下的土体的物理力学性能得到改善效果更明显。从曲线的发展趋势可以预测出6m以后土体的各项物理力学性能曲线会有一个交点,说明强夯法加固地基土时有一定的影响范围,能级越高其对土体的影响深度越深,其中200 t·m能级的影响深度约为8m,300 t·m能级的影响深度约为9m。当夯击到一定程度时,一定深度的范围内的土体物理力学性能将不再变化或者变化很小,以至于在后面只起到传递强夯能量的作用,与数值分析中表现出来的变化规律是一致的。

5 结语

(1)能级越高其加固效果越好,随着击数的增加,土体的竖向应力和竖向位移随深度的变化曲线都趋于S型;且高能级作用下第七击时竖向动应力的扩散范围要大于低能级,后续夯击时高能级处理的土体范围要更大。

(2)强夯法的有效加固深度都有一定范围,当超过强夯的影响范围时,土体的各项物理力学性质与夯前基本一致。另外当夯击达到一定次数时,土体力学性质基本也不会发生太大变化,之后的夯击只会将能量传递到土体更深层的位置,使深部土体得到一定改善。

(3)通过对实际工程夯后土体的密度、孔隙比、压缩模量随深度的变化规律研究表明,本次数值模

具有可靠性。

(4)运用ANSYS/LS-DYNA软件模拟强夯过程具有较高的精度,可以根据计算结果绘制云图,从而判断强夯法对土体的影响范围,因此可以作为强夯设计与施工的一种指导手段。

参考文献:

- [1] 朱建凯,陆新.强夯特性的动力有限元分析[J].岩土工程学报,2004,26(4):561-564.
- [2] 罗玮.强夯作用下填土地基的动力特性研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [3] 郑晓,刘胜群.强夯法处理软弱地基工程实例分析[J].铁道建筑,2008(4):59-60.
- [4] 周健,史旦达,贾敏才,等.低能量强夯法加固粉质黏土地基试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2359-2364.
- [5] 梁雪梅,王连军.高能级强夯法在地基加固处理中的应用与探讨[J].山西建筑,2010,36(12):83-85.
- [6] 刘艳军.强夯法在处理大面积杂填土地基中的应用[J].森林工程,2009,25(3):89-91.
- [7] 廖振鹏.局部透射边界的精度[J].地震工程与工程振动,1993,13(3):1-6.
- [8] 李本平.冲击荷载作用下粘土孔隙水压的数值分析[J].爆炸与冲击,2005,25(3):281-284.
- [9] 蒋鹏,李荣强,孔德坊.强夯大变形冲击碰撞数值分析[J].岩土工程学报,2000,22(2):222-226.
- [10] 钱家欢,帅方生.边界元法在地基强夯加固中的应用[J].中国科学(A辑 数学 物理学 天文学 技术科学),1987(3):329-336.