

锤击打入桩与土的共同作用分析

雷国辉 赵维炳 施建勇

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 用有限元法对单桩的锤击贯入过程进行了数值模拟 , 得到沉桩引起的土体动应力反应峰值 , 并以此作为土的前期固结应力 , 进行使用期桩土共同作用分析 , 得到桩基的承载特性 . 初步实现了在桩土共同作用分析中对沉桩影响的真正考虑 . 计算结果与实测结果的较好吻合验证了本文锤击沉桩数值模拟及考虑沉桩影响的桩土共同作用分析方法的可行性 .
关键词 锤击沉桩 ; 桩土共同作用 ; 应力历史 ; 桩基贯入过程 ; 有限元法
中图号 TU411

在桩基础使用期桩土共同作用分析中 , 土的应力历史对计算结果有着显著的影响 . 沉桩过程会引起土体相当大的固结应力 , 若在计算中考虑了其影响 , 对土体处于弹性状态还是塑性加载状态作出判别 , 可使计算结果更符合实际 . 而当前的桩土共同作用非线性有限元分析中 , 多数以自重应力作为土体的初始应力状态 , 采用修改土体弹性模量或在某级加载前采用回弹模量的方法 , 近似地考虑土的应力历史中受沉桩所引起的固结应力的影响 , 以改善计算结果 . 因此 , 正确地模拟沉桩过程 , 推求沉桩引起的土体动力反应 , 是桩基础使用期桩土共同作用分析中很重要的前期工作^[1] .

锤击沉桩过程是一个包括桩锤-桩体-地基系统的复杂的动力反应问题 , 其计算简图如图 1 所示 . 严格的沉桩数值模拟必须能够解决下述问题 (a) 桩锤与桩头部间的非嵌入的接触-撞击过程的分析 (b) 桩身与地基土之间的接触与滑移过程的模拟 (c) 桩端挤土效应的分析 (d) 连续贯入过程的模拟 , 包括分析各次锤击残留应力对后续锤击振动反应的影响 .

通过沉桩数值模拟技术进行沉桩分析 , 得到沉桩所引起土体的动应力反应峰值 , 作为土体的前期固结应力 , 可以在使用期桩土共同作用的非线性分析中用来判别土体加荷模量或回弹模量的选取 , 真正意义上实现对沉桩影响的考虑 .

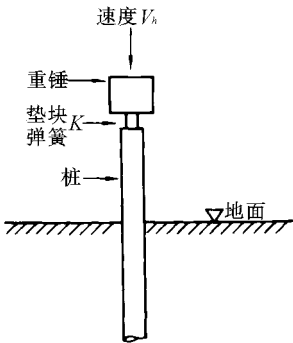


图 1 沉桩分析简图

Fig.1 Diagram of pile driving

1 锤击沉桩的数值模拟

1.1 桩顶锤击冲击荷载

假定桩为各向同性的弹性介质体 , 采用结构动力学的理论分析成果可以得到桩顶的冲击力公式 , 作为各次锤击作用产生的冲击荷载施加于桩顶进行沉桩振动分析 . 因此 , 桩顶锤击的冲击荷载^[2]

$$P_t = \frac{KV_h}{\omega_D} e^{-\xi\omega t} \sin\omega_D t \tag{1}$$

式中各符号含义参见文献 [2] .

由文献 [2] 可知 , 式 (1) 只是在桩锤接触垫块到应力波从桩的另一端反射回来之前这段时间中 , 解答才是正确的 , 即式 (1) 的适用条件为 : $t \leq \frac{\pi}{\omega_D}$ 且 $t \leq \frac{2L}{C}$ (L 为桩长) . 这是因为桩顶及桩身应力会受到从桩端反射回来的应力波的影响的缘故 . 而在本文的分析中 , 式 (1) 是作为系统的外荷载来推求系统的动力反应的 , 而不是作为振动反应下桩顶打桩力的解答 , 因此 , 适用条件应该是

$$t \leq \frac{\pi}{\omega_D} \tag{2}$$

1.2 三维轴对称动力问题的有限元描述

根据问题的几何与力学对称性, 沉桩动力反应可按三维轴对称动力问题进行分析. 为求得轴对称动力问题的数值解答, 利用动力问题的变分原理, 可导出动力平衡方程

$$K\delta + C\dot{\delta} + M\ddot{\delta} = F \quad (3)$$

式中: K ——总体刚度矩阵; C ——瑞利阻尼矩阵; M ——集中质量矩阵; $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}, F$ ——结点的位移、速度、加速度、动力等效荷载列阵.

1.3 计算方法、计算模型及接触面处理

在有限元动力计算中用环状四结点等参单元将桩与地基土体进行离散, 采用 Wilson- θ 法 ($\theta = 1.4$) 按总应力逐步积分, 求解有限元动力平衡方程 (3), 得到锤击沉桩的动力反应. 土体的计算模型采用 Hardin-Drnevich 模型^[3]. 计算中, 在桩与土之间设置无厚度的 Goodman 接触面单元, 接触面模型为文献 4 提出的双曲线模型. 接触面的等效阻尼比取相邻土体的等效阻尼比.

1.4 桩基连续贯入过程的模拟

对于桩基的连续贯入过程, 仅在桩的几何行进方面进行模拟, 假定各次锤击作用下计算所得的桩顶竖向位移为其锤击贯入度. 对于力学方面, 忽略了各次锤击残留应力对后续锤击动力反应的影响. 图 2 可用来说明桩基连续贯入过程的模拟方法, 设桩在 n 次锤击作用下已贯入到由结点 i, j, m, p 组成的单元 Q 内, Q 单元在 z 方向的长度为 h , 桩端嵌入该单元的深度为 h_0 , 由此, Q 单元由两部分组成, $ijm'p'$ 为桩体部分, $m'p'mp$ 为土体部分.

在第 $n+1$ 次锤击的有限元计算中, 假定 Q 单元为弹性体单元, Q 单元的弹性模量 E^Q 根据串联刚度等效的原则来推求.

设 Q 单元等效刚度为 K' , 桩体部分的刚度为 K_p , 土体部分的刚度为 K_s , 则

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{K'} &= \frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_s} & K' &= \frac{E^Q A}{h} \\ K_p &= \frac{E_p A}{h_0} & K_s &= \frac{E_s A}{h - h_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: E_p, E_s ——桩、土的弹性模量; A ——单元截面积.

由式 (4) 即可推得

$$\frac{1}{E^Q} = \frac{h_0}{h} \cdot \frac{1}{E_p} + \frac{h - h_0}{h} \cdot \frac{1}{E_s} \quad (5)$$

按式 (5) 计算得 Q 单元的弹性模量 E^Q , 再进行第 $n+1$ 次锤击动力反应的计算分析, 推求其贯入深度 Δh , 并以 $h_0 + \Delta h$ 代替式中的 h_0 进行第 $n+2$ 次锤击动力反应的计算分析, 以此递推实现桩基连续贯入过程的模拟. 对每次锤击后的桩顶标高 Z_p 进行修正, 即减去各次计算的贯入深度 Δh , 得到新的桩顶标高值, 当计算的桩顶标高与设计标高相等时, 终止计算.

在计算中, 比较各次锤击作用下土体的动应力大小, 即可得到整个打桩过程中土体的振动反应应力峰值. 另外, 通过沉桩模拟技术进行沉桩分析, 还可得到桩身应力、土体的振动反应位移、桩在各次锤击作用下的贯入度、沉桩的总锤击次数等数据, 以此可以预测沉桩能力.

1.5 计算及成果分析

按照沉桩数值模拟方法, 对文献 5 中的模型试验进行计算和分析. 试验在长方形砂坑内进行, 只打入一根试桩. 砂坑平面尺寸为 $2.7 \text{ m} \times 1.7 \text{ m}$, 深 1.7 m , 坑底为粘土层, 试坑内所填砂料为一般建筑用砂, 经晾晒并筛去 2 mm 以上砾石. 填砂之前在砂坑底部先回填 20 cm 厚的砂砾石, 填砂的相对密度控制在 0.33 左右. 砂料及粘土的物理力学指标见表 1. 试验用桩为自制的钢筋混凝土预制方桩, 混凝土标号为 C25, 截面尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 桩长 160 cm , 桩端加焊 10 cm 高的梭锥形桩靴. 桩的弹性模量为 $3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$. 试验所用打桩机具的锤重为 500 N , 落距 0.5 m , 垫块组合弹簧系数为 $1.0 \times 10^4 \text{ kN/m}$.

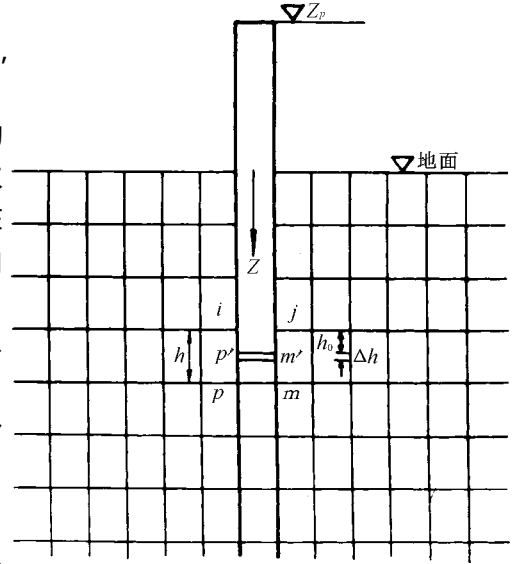


图 2 桩基连续贯入模拟分析简图

Fig.2 Simulated analysis diagram of continuous course of pile penetration

由材料试验可以得到材料的计算参数如表 2 所示(表中 $D_{\max}$ 为最大阻尼比).在有限元计算中,土体分为两层,上层为砂,层厚 1.7 m;下层为粘土,层厚 0.5 m.桩长取为 1.7 m,桩径按等截面积折算为圆桩桩径 11.2 cm.桩与土的接触面力学参数指标^[4] $C = 6.0 \times 10^4$, $c_a = 0.0$, $\varphi_a = 40.0^\circ$.

表 1 砂料及粘土的物理力学性质指标

Table 1 Physical-mechanical characters of sand and clay				
指标	含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$
粘土试验	21.81	1.84	30.80	13.50
指标	干密度 $\rho_{dmin}/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e_{max}	干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e_{min}
砂料试验	1.41	0.87	1.73	0.53

表 2 试验材料的计算参数

Table 2 Calculate parameter of test materials							
参数	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	孔隙比 e	泊松比 μ	阻尼比 D_{max}	层厚/m
砂料	14.76	0.00	30.00	0.76	0.20	0.20	1.70
粘土	18.03	30.40	13.50	0.82	0.35	0.20	0.50
桩	24.00				0.18	0.02	

自编锤击沉桩动力分析程序 PDA 对模型试验打桩过程进行数值模拟,计算得到桩贯入深度为 122 cm 时距桩心 15 cm,不同埋深处土体的挤压应力峰值分布曲线如图 3 所示.与实测曲线比较可知,对于埋深在 1 m 以下的土体,计算结果与实测结果基本吻合;对于埋深在 1 m 以上的土体,计算结果较实测值偏小,并且随着距地面距离的减小,与实测值的偏差逐渐增大.

产生计算上的局部误差的原因可能在于,计算分析中没有考虑桩端挤土效应的影响.当桩贯入到埋深较浅的部位时,一次锤击作用下的贯入度较大,浅层桩周土体的沉桩动力反应主要受桩端挤土效应的影响,并随着桩的贯入,浅层桩周土体的沉桩动力反应能够因土体挤密而残留下来;当桩贯入较深时,一次锤击作用下的贯入度较小,深层桩周土体由于其本身强度以及上覆土体自重的作用,沉桩动力反应主要受锤击振动波的影响.而在本文的计算中,没有考虑桩端的挤土效应,由此导致浅层土体沉桩动力反应的计算值较实测值偏小.

对于实际沉桩过程,其桩长远比模型桩长要大得多,因此,相对于实际沉桩的桩长,上述的浅层(1 m 左右)土体动应力反应峰值的计算误差应该是允许的,对后续静力计算不会产生较大的影响.所以,采用本文的沉桩数值模拟方法推求实际沉桩过程土体的动应力反应峰值是可行的.

2 考虑沉桩影响的桩土共同作用分析

2.1 桩土共同作用分析的有限元描述

由问题的几何与力学对称性,单桩与土在垂直荷载作用下的共同作用分析可按三维轴对称静力问题进行求解.利用虚功原理或变分原理,可导出有限单元分析支配方程

$$K\delta = F$$

式中: K ——整体劲度矩阵; δ , F ——结点的位移、静力等效荷载列阵.

2.2 计算方法、计算模型及接触面处理

在有限元计算中,采用环状四结点等参单元将桩与地基离散,假定桩为各向同性的弹性体,采用中点增量法求解有限元支配方程,得到垂直荷载作用下桩土共同作用的计算结果.

土体的非线性计算模型采用邓肯-张模型^[3].

计算中,在桩与土的接触面之间设置无厚度的 Goodman 接触面单元,接触面模型采用克拉夫和邓肯提出的双曲线模型^[3].

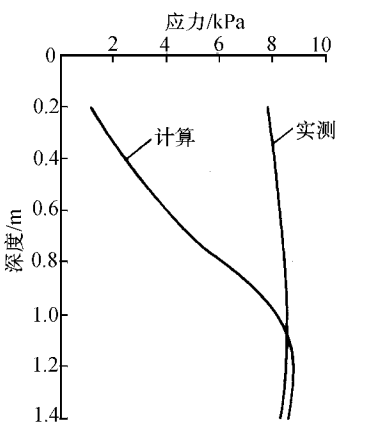


图 3 不同埋深处桩周土挤压应力分布曲线
Fig.3 Stress distribution curve of pile stem in different pile penetration

2.3 沉桩影响的考虑

将沉桩分析所得到的土体的峰值应力水平 S_0 、偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 、小主应力 $(\sigma_3)_0$ 分别假定为桩周土体历史上曾经达到的最高应力水平、最大偏应力和最大固结应力。在桩土共同作用非线性分析中,荷载是逐级施加于桩顶的,设某级荷载作用下土体的应力水平为 S ,偏应力为 $(\sigma_1 - \sigma_3)$,固结应力为 σ_3 。由此,邓肯-张土体计算模型中加荷模量或回弹模量的判取标准为^[6]:

- a. 当 $\sigma_3 < (\sigma_3)_0$, $S < S_0$ 且 $\sigma_1 - \sigma_3 < (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 时,用前期固结应力 $(\sigma_3)_0$ 推求回弹模量;
 - b. 当 $\sigma_3 \geq (\sigma_3)_0$, $S < S_0$ 且 $\sigma_1 - \sigma_3 < (\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 时,用当前固结应力 σ_3 推求回弹模量;
 - c. 当 $\sigma_3 < (\sigma_3)_0$ 时,用前期固结应力 $(\sigma_3)_0$ 推求加荷模量。
- 若某级荷载作用下土体的 S ($\sigma_1 - \sigma_3$) 或 σ_3 超过了 S_0 ($\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 或 $(\sigma_3)_0$ 时,则以当前的计算结果作为土体的前期应力历史。

2.4 计算及成果分析

对上海普陀区一相当松散的粉质土层中的打入桩进行计算和分析^[7]。混凝土预制桩截面尺寸为 400 mm × 400 mm,桩长 8.5 m,混凝土标号为 C40,桩身弹性模量为 3.25×10^4 MPa。地面以下 4 m 为粉质粘土层,平均圆锥探头阻力为 2.0 MPa;其下为粉砂层,圆锥探头阻力沿深度在 4.0 ~ 7.0 MPa 之间变化。打桩机具的落锤重力 50 kN,落距 1.0 m,锤垫为硬木,桩垫采用松木,厚 10 cm,垫块的组合弹簧系数为 1.7987×10^5 kN/m。

在有限元计算中,将地基土作为均质材料处理,其沉桩动力分析的材料计算参数如表 3 所示。桩与土的接触面动力力学指标 $C = 6.0 \times 10^4$, $c_a = 6.0$ kPa, $\varphi_a = 16^\circ$ 。桩土共同作用分析中土体邓肯-张模型的其它计算参数为: $K = 54.1$, $n = 0.41$, $G = 0.33$, $F = 0.0$, $D = 0.0$, $R_f = 0.80$, $K_{ur} = 162.3$, $m = 0.41$;桩与土的接触面静力力学参数 $K_1 = 7500.0$, $n^* = 0.437$, $R_f^* = 0.86$, $c^* = 1.0$ kPa, $\varphi^* = 25.6^\circ$ 。

表 3 材料计算参数

Table 3 Calculated parameters of materials

参数	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /($^\circ$)	e	I_p	μ	$D_{\max}$	层厚/m
土	18.0	9.81	18.0	0.95	12.5	0.33	0.20	17.0
桩	24.0					0.18	0.02	

采用沉桩数值模拟技术,对沉桩过程进行计算分析,得到桩不同贯入深度时的锤击贯入度如图 4 所示。由图可知,随着桩贯入深度的增加,贯入度呈线性递减,且桩在最后一击的贯入度为 3.1 cm,说明本工程设计的桩长是合理的。另外,通过沉桩分析还发现,距桩中心轴线 2 倍桩径和桩底以下 1 m 深度范围内的土体因桩的锤击贯入而破坏,在静置期,这部分土体的强度会有较大的恢复和提高,为使用期桩基础提供较大的侧壁摩阻力和端阻力。所以,上述工程中的桩基础的合理桩距宜为 4 倍的等效桩直径。

通过计算,得到土体在沉桩过程中的动应力反应峰值。然后依据本文所述的方法,采用自编程序 PSA,对桩基承载时的反应进行计算,得到桩的荷载沉降($P \sim S$)关系曲线如图 5 所示。

图中曲线 1 代表的是未考虑沉桩影响的计算结果。对比分析曲线 1 与实测 $P \sim S$ 曲线的线形可知,曲线 1 的计算沉降结果均大于实测结果,桩顶荷载 P 在大于 378 kN 之后,曲线 1 的后半段与实测曲线的后半段基本平行,其斜率相等。由此说明,土体的计算模型能够较真实地反映实际土体的应力应变关系,曲线 1 的后半段沉降计算结果大于实测结果的现象并不是由土体的计算模型引起的,而是因为在桩顶荷载 P 小于 378 kN 之前的计算沉降即大于实测沉降,由计算方法(中点增量法)累加而产生的结果。因此,导致计算沉降均大于实测沉降的根本原因在于,未考虑沉桩的影响。

图中曲线 2 为考虑沉桩影响后的计算结果。曲线 2 与实测曲线基本吻合,由此说明在桩土共同作用分析中,考虑沉桩引起的土体固结应力历史的影响是必要的、合理的;同时,计算结果的良好吻合也验证了本文的沉桩数值模拟技术是可行的。

通过计算,得到桩顶荷载为 270 kN 时,桩端土的端阻力为 437.5 kPa,桩周土的侧壁摩阻力沿桩身的分布如图 6 所示。由图 6 可知,桩周土的侧壁摩阻力从桩顶到桩端呈线性增大,这是计算中将地基土作为均质材

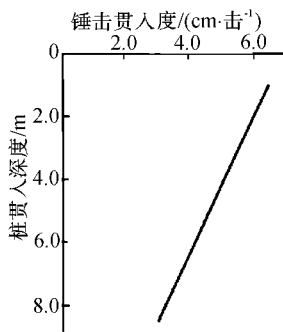


图 4 桩不同贯入深度下的锤击贯入度

Fig.4 Penetration depth varied with pile driving couse

料处理后的合理结果.

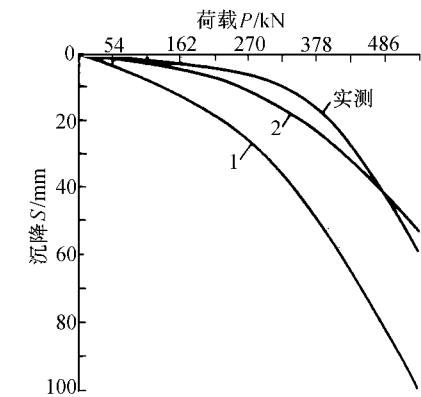


图 5 计算与实测 $P \sim S$ 曲线对比

Fig.5 Comparison of calculated and measured $P \sim S$ curves

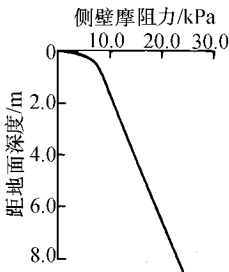


图 6 侧壁摩阻力沿桩身的分布

Fig.6 Distribution of lateral friction resistance along pile stem

3 结 语

用有限元法初步实现了对锤击沉桩过程的数值模拟 ,并为在使用期桩土共同作用的分析中考虑沉桩的影响提供了条件.计算结果与实测值的良好吻合验证了本文技术路线的可行性.分析结果表明 (a)在桩土共同作用分析中 ,考虑沉桩的影响是必要的、合理的 (b)不考虑沉桩的影响 ,采用有限单元法进行桩土共同作用分析时 ,在荷载较小的情况下 ,计算沉降比实测沉降要大 ,由此导致桩在全部荷载作用下的沉降计算结果均较实测值大 (c)沉桩数值模拟技术和考虑沉桩影响的桩土共同作用分析方法 ,可以确定出合理的桩长和桩距 ,预测沉桩能力 ,得到桩基础的承载特性 ,为打入桩基础的可靠设计提供依据.

参 考 文 献

1 雷国辉 赵维炳 施建勇.沉桩分析研究的现状.水利水电科技进展 ,1996 ,16(2) :10 ~ 13
2 Clough R W , Penzien J. 结构动力学.王光远译.北京 :科学出版社 ,1981.69 ~ 81
3 钱家欢 殷宗泽.土工原理与计算.第 2 版.北京 :水利电力出版社 ,1994.44 ~ 89 510 ~ 523
4 吴军帅 姜朴.土与混凝土接触面的动力剪切特性.岩土工程学报 ,1992 ,14(2) :61 ~ 66
5 聂庆科 俞季民.打入桩对邻桩挤压影响的试验研究.见 朱向荣主编.首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集.杭州 :浙江大学出版社 ,1990.453 ~ 456
6 钱家欢 殷宗泽.土工数值分析.北京 :中国铁道出版社 ,1991
7 Cheung Y K , Lee P K K , Zhao W B. Elastoplastic analysis of soil-pile interaction. Computers and Geotechnics , 1991 , 12(2) :115 ~ 132

Analysis of Interaction between Driven Pile and Soil

Lei Guohui Zhao Weibing Shi Jianyong

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Abstract In this paper ,the finite element method is used to simulate the course of pile penetration ,and the peak dynamic stress in the soil is obtained. With the peak value as the early stage soil consolidation stress ,the bearing behavior of pile during operation can be obtained from the analysis of pile-soil interaction. The influence of pile driving is considered for the first time in the analysis of pile-soil interaction. The calculated results and the measured results are in good agreement ,indicating the feasibility of the method of numerical simulation of pile driving and the method of analysis of pile-soil interaction.

Key words pile driving ;pile-soil interaction ;stress history ;course of pile penetration ;FEM