

参数变化对打桩机沉桩能力的影响

江礼茂

谢小鹏

(中国科学院力学研究所, 江苏南京 210004) (广东石油化工专科学校, 广东茂名 525000)

摘 要 应用 WEAP 程序, 针对我国海洋工程中常用的桩及施工机器和海区地质情况进行波动理论沉桩分析, 得到了各参数变化对沉桩能力影响的关系曲线, 输出了各参数值与实测值的偏差对沉桩能力产生影响的范围值。所有参数中, 土性参数是影响沉桩能力的最重要参数。

关键词 沉桩能力; 参数分析; 系统函数

中图分类号 TU437.1

近海工程中, 大尺度的打入式钢管桩应用非常普遍, 由于施工环境恶劣、地质情况复杂多变, 沉桩能力分析极其重要。

沉桩能力分析是一项极其复杂的工作, 它涉及参数多且这些参数大多不易准确给定, 目前的工作包括两个方面, 一是按已有理论和经验, 以实际的工程进行沉桩能力分析, 用于指导工程设计与施工; 二是根据工程施工记录, 对照沉桩能力分析结果, 反演计算参数, 为改善以后的工程沉桩能力分析提供依据。

沉桩能力分析的通用方法是在给定锤—桩—垫层—土模型及参数的情况下(图 1), 应用波动方程计算程序计算, 给定一条称为反应曲线的单位长度锤击数—极限静阻力曲线(图 2), 而后由估算的极限静阻力求得单位长度上锤击数, 通过桩尖进入不同土层的计算结果, 得到打桩过程单位尺度锤击数与深度的关系曲线。对给定的波动方程计算模型, 可将单位长度锤击数 N 表示为锤—桩—垫层—土参数的函数:

$$N=f(m, S_i, \eta, K, C_R, X, A, \rho, E, R_s, Q_s, J_s, Q_b, J_b, r)$$

其中: m —— 锤的质量系数;	E —— 杨氏模量;
S_i —— 锤的落高;	R_s —— 极限静阻力;
η —— 锤的效率系数;	Q_s —— 桩侧土最大弹性变形值;
K —— 垫层刚度;	J_s —— 桩尖最大弹性变形值;
C_R —— 垫层恢复系数;	Q_b —— 桩下土的最大弹性变形值;
X —— 桩尖贯入深度;	J_b —— 阻尼系数;
A —— 桩身截面积;	r —— 桩侧土阻力值与总阻力之比。
ρ —— 材料密度;	

在沉桩能力分析中, 各个参数变化对沉桩能力的作用如何, 各参数的实际值与计算值的

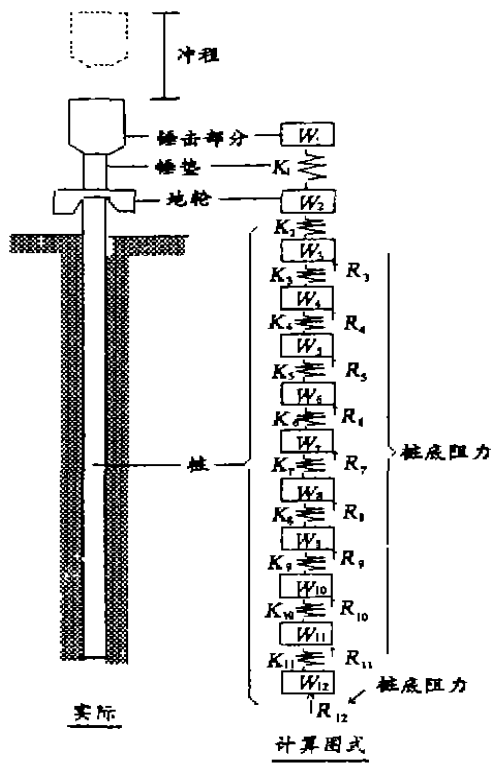


图 1 锤-桩-垫层-土计算模型

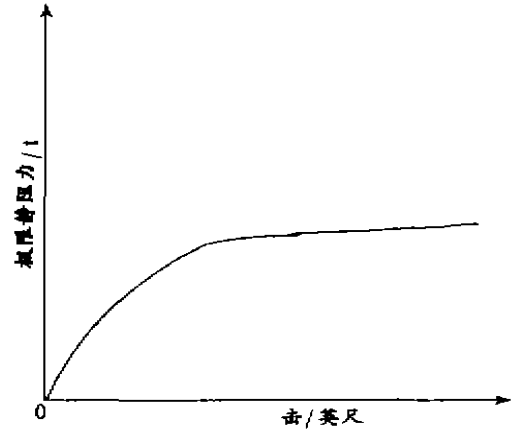


图 2 典型的打桩反应曲线

偏差会对沉桩能力带来多大影响,以及对特定的通用程序,各参数的变化对沉桩能力计算结果影响的规律如何是人们关心和需要研究的课题。这些问题的深入研究,将有助于提高沉桩能力预值的可靠程度,提高工程施工效率,节省工时及费用。

1 参数分析

在锤-桩-垫层-土系统给定以后,对于一个具体工程问题,可将计算参数分为三类。

在沉桩过程中不变的参数: m, A, ρ, E

变化的可测量计算的参数: η, K, C_R, S_t

不可直接测量得到的参数: $R_s, Q_s, J_s, Q_v, J_p, \gamma$

第 1 类参数在沉桩过程中不会改变,而第 2 类参数在沉桩过程中虽具有一定随机性,但可通过测量计算求得,第 3 类参数是,目前的方法所不能准确给定的,在计算中均采用经验值。

桩打入时的极限静阻力一般是将桩的永久承载能力乘以“折减系数”求得。由于静力公式有多种,且涉及参数的数值也会因取样环境、实验条件不同而异,因而极限静阻力计算结果具有极大的差异,另外,桩侧土随着桩的贯入深度的增加,受循环冲击荷载次数的增多,土的强度和弹性常数等参数均会变化,这也会影响沉桩能力分析结果;到目前为止,土的另两个参数 Q 和 J 还没有由实验实测或计算求得,其值的选取完全靠经验,甚至一点不变地引用 30 年前 Smith 发表论文时建议的值。根据 M.M.Soars^[1] 等人收集的资料可以看出,不同作者在波动理论计算中采取参数值差别很大, Q 从 0.1 ~ 2.0cm, J 从 0.0 ~ 3.3s/m,毫无疑问,不同作者所采用计算模型的不同及工程地质环境的差异是导致土性参数值高

散较大的一个原因,另一方面也反映了在波动理论计算中各位作者对土性参数选取上认识的差异及事实上的土性参数值的离散性。目前在海洋工程分析中进行沉桩能力分析时,一般 Q 的取值为 $0.254 \sim 0.508 \text{cm}$, J 为 $0.328 \sim 0.656 \text{s/m}^2$ 。

锤-垫层参数对沉桩能力的影响主要是改变递送到桩身的能量和作用力时,一般桩锤的效率系数为 $0.4 \sim 0.9$,垫层的恢复系数在 $0.5 \sim 0.8^{[1]}$,垫层的刚度则随着锤击次数的增加变化更大,但垫层刚度在常用范围内变化一般只会改变打桩应力,对沉桩能力影响不大,下面的计算结果就充分说明了这一点。

2 各参数变化对沉桩能力的影响

针对目前我国海洋工程平台桩基可能采用的 $\Phi 1.219 \text{m} \times 0.051 \text{m} (\Phi 48 \text{m} \times 2.0 \text{m})$ 钢管桩及施工常用的 Vulcan560 锤,假定桩尖入土深度为 61m ,土阻力简化为三角形分布,锤-垫层参数取为:

锤心重 28350kg ; 桩帽重 19050kg ; 锤击能量 432062J ;

锤垫弹性系数 $1.018 \times 10^7 \text{kg/m}$; 锤的效率 0.7 ; 锤垫恢复系数 0.66 。

2.1 锤的参数变化对沉桩能力的影响

对特定的锤,其可变参数为落高和效率,两者均改变锤的冲击速度,进而影响传递给桩身的能量 (ENTHRU),计算结果表明,ENTHRU 与锤的落高和效率系数成线性关系,这和锤的冲击能量与 S_i 及 η 成正比是一致的;另一方面,锤的落高和效率的变化对沉桩能力的影响为非线性关系, S_i 和 η 越小,其参数相同的偏差对沉桩能力的影响越大。它是锤的冲击速度与 S_i 及 η 的变化关系

$$\Delta v_0 = \frac{v_0}{2} \left(\frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta S_i}{S_i} \right) \quad (1)$$

是相似的,可以认为,锤的冲击速度对沉桩能力的影响是比 ENTHRU 对沉桩能力的影响更敏感的因素。图 3 为计算所得到的锤击数 N 在不同土阻力下与效率 η 的关系的关系曲线,直线为传递给桩身的能量 (ENTHRU) 与效率 η 的关系曲线。图 4 为不同土阻力下的锤击数与落高 S_i 的曲线关系,直线为落高与能量的关系。

根据工程经验,一般 Vulcan560 锤的效率系数变化在 $0.6 \sim 0.8$ 之间,由计算结果可知,在一定范围(约 150 击/英尺)内,沉桩能力的变化可达 25% 左右。

2.2 垫层参数对沉桩能力的影响

垫层的作用对打桩应力的影响已有诸多研究,通常人们认为垫层

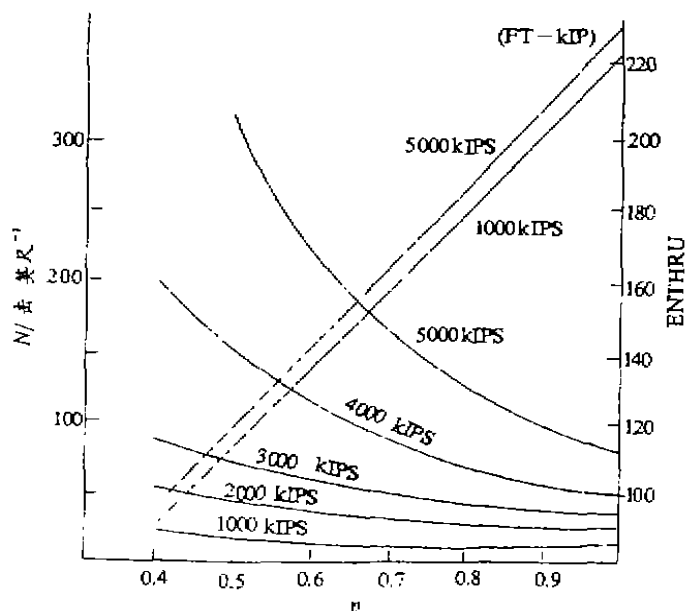


图 3 不同土阻力下的 $N-\eta$ 曲线和 ENTHRU- η 曲线

的作用主要在于减小打桩应力, 保证机具不致损坏, 从本文的计算结果可以看出, 垫层刚度的作用主要在于改变打桩应力, 对沉桩能力及传递给桩的能量没有什么影响; 但是, 垫层的恢复系数对传递给桩的能量进而对桩的沉桩能力产生极大的影响, 其原因在于恢复系数决定了锤的冲击能量通过垫层传递给桩的大小和作用时间。根据工程记录, 恢复系数的实测值与理论计算所取值的最大偏差在 15% 左右, 在这一范围内, 沉桩能力的变化最大可达 15%, 从计算结果还可看出, 恢复系数越小, 其相同的偏差对沉桩能力的影响越大, 且恢复系数与锤击数/英尺近似于线性关系。图 5 为不同土阻力下的锤击数与垫层参数 C_R 及能量与 C_R 的关系曲线。图 5 为不同土阻力下锤击数 N 与垫层参数 K 及能量与 K 的关系。图 4 和图 5 是计算结果描绘的曲线。

2.3 土性参数变化的影响

土性参数是沉桩能力分析中最难于确定的参数。桩打入时极限静阻力随着计算方法的不同及是否考虑“土塞效应”等因素而变化, 因此, 桩打入时的极限静阻力的计算值与实际值的偏差具有较大的随机性。

对于一个确定的锤—桩—垫层—土系统, 其打桩反应曲线在其形状上有相似性, 这是由锤—桩—垫层—土计算模型相同所决定的。从计算结果可以看出, 随着极限静阻力低于 2000kIPS 时, 所有参数的变化对沉桩能力均不会带来多大的影响, 随着极限阻力的增大, 计算参数变化对沉桩能力的影响越大。在锤击数超过标准 (150 击/英尺) 时, 土阻力的微小变化将极大地影响沉桩能力。

对于 Q 值, 已知不同的作者应用波动方程时取值离散性很大, 在海洋工程中, 根据工程经验, 在沉桩能力分析时, Q 的取值范围为 0.1 ~ 0.2 英寸, 在这一范围内, Q 值的变化对沉桩能力的影响达 40% 左右。

Q 值的变化在于改变桩—土界面的弹性应变能, Q 值的增加将导致桩—土界面的弹性能的增大, 使锤击能量的更大部分消耗于桩的振动, 减小使桩产生贯入度的能量。

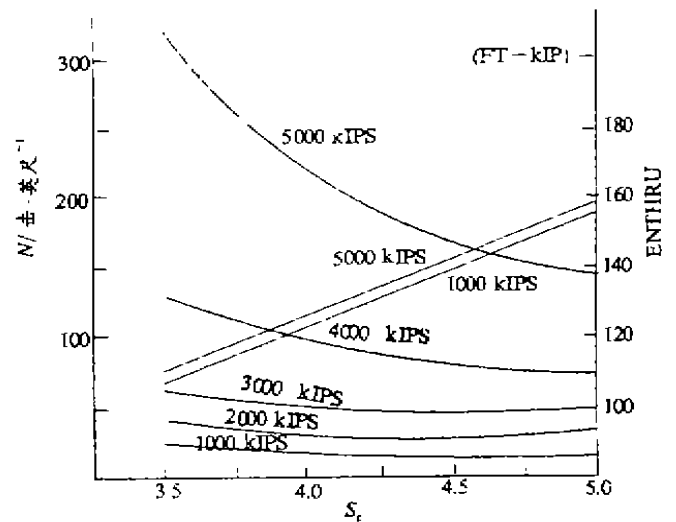


图 4 不同土阻力下的 $N-S_t$ 曲线和 ENTHRU- S_t 曲线

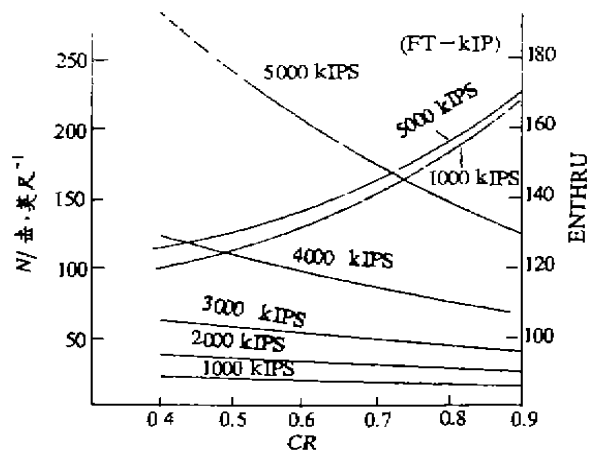


图 5 不同土阻力下的 $N-C_R$ 曲线及 ENTHRU- C_R 曲线

阻尼系数 J 是另一个复杂因素,不同的研究人员所采用的值也具有极大的离散性,在海洋工程分析中,土阻尼系数 J_p 取为 0.15 ~ 0.2 秒/英寸, $J_s = 0.03 \sim 0.11$ 秒/英寸,分析结果表明,土阻尼系数这一变化在一定范围内可使沉桩能力的变化达 50% 以上。

图 7、图 8、图 9 都是计算结果描绘的曲线。它们与本文所述是一致的。

阻尼系数的作用在于改变桩的打入时动阻力,是桩贯入时能量消耗的一部分,它和 Q 值及极限静阻力一起决定了桩的能量的消耗,是影响沉桩能力的重要因素。

2.4 土阻力比变化对沉桩能力的影响

桩侧土阻力与总阻力之比值会随着桩型的变化及桩尖埋深的不同而改变,尤其是土层变化情况复杂的海洋工程,土阻力比的变化随着桩的贯入深度的变化更为明显,这一变化对沉桩能力的影响还不为人们所熟悉。本文的计算结果表明,单位长度锤击数与阻力比的关系曲线(图10)是一条上凸的曲线,即阻力比在 0.5 ~ 0.7 之间的锤击数最大,桩最难打,随着阻力比增加或减小,锤击数却会逐渐减小,在一定范围内,土阻力比的变化可使单位尺度锤击数变化 45% 左右,土阻力比变化会影响沉桩能力这正是波动理论有别于把桩看成刚体运动的结果,这一现象可应用能量消耗的

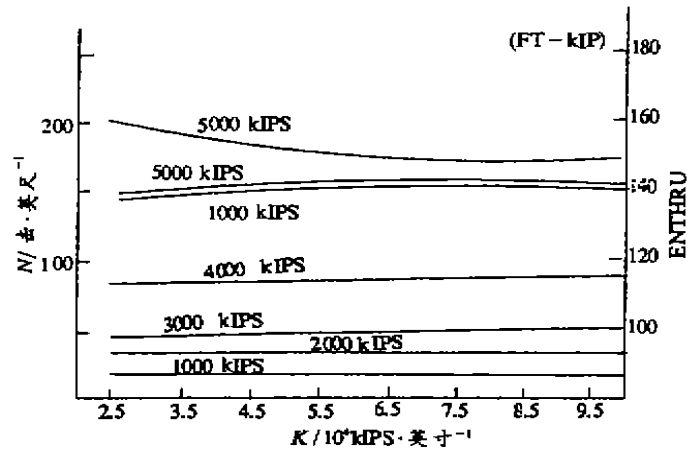


图 6 不同土阻力下的 $N-K$ 曲线及 ENTHRU- K 曲线

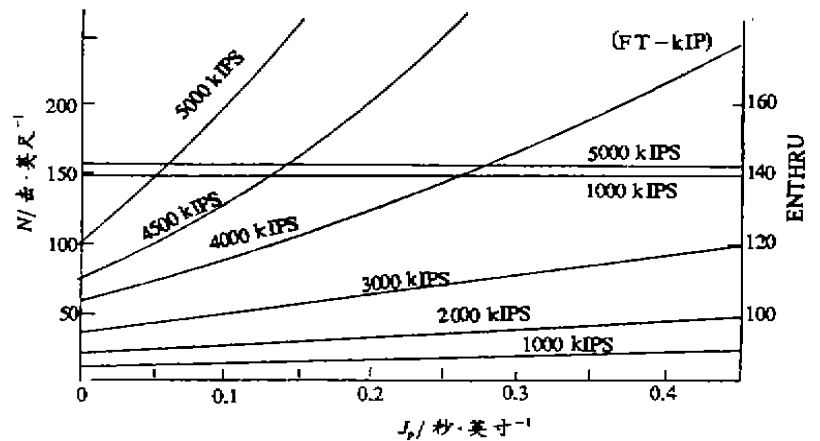


图 7 不同土阻力下的 $N-J_p$ 曲线及 ENTHRU- J_p 曲线

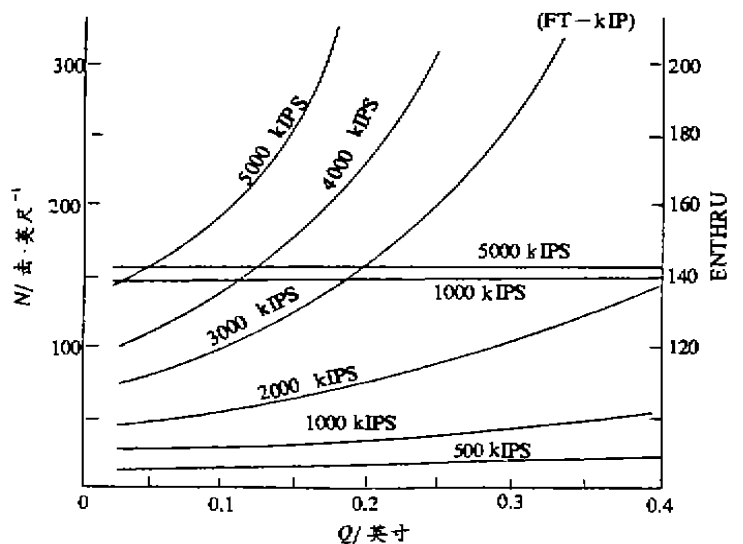


图 8 不同土阻力下的 $N-Q$ 曲线及 ENTHRU- Q 曲线

观点及应力波传播的规律加以解释。在打桩过程中, 考虑到桩的弹性变形及桩侧土阻力的作用, 桩头位移比桩身位移小, 另一方面, 桩侧土阻力对桩中应力波的作用既有向上的压缩波也有向下的拉伸波。所有土阻力的作用均改变桩中的内力、速度及位移。在相同贯入度的情况下, 当土阻力比变小时, 从能量消耗的角度看有利于桩的贯入而从应力波传播的角度看正相反, 当土阻力比变大时, 从应力波传播的角度看有利于桩的贯入, 而从能量消耗的观点看则相反。因此, 只有在某一个确定的土阻力比时, 桩侧土阻力与桩底土阻力相匹配, 均得以充分发挥, 此时桩最难打, 可以预见这个比值会随着土阻力的大小及分布的不同而变化, 但曲线上凸的形状将不会改变。

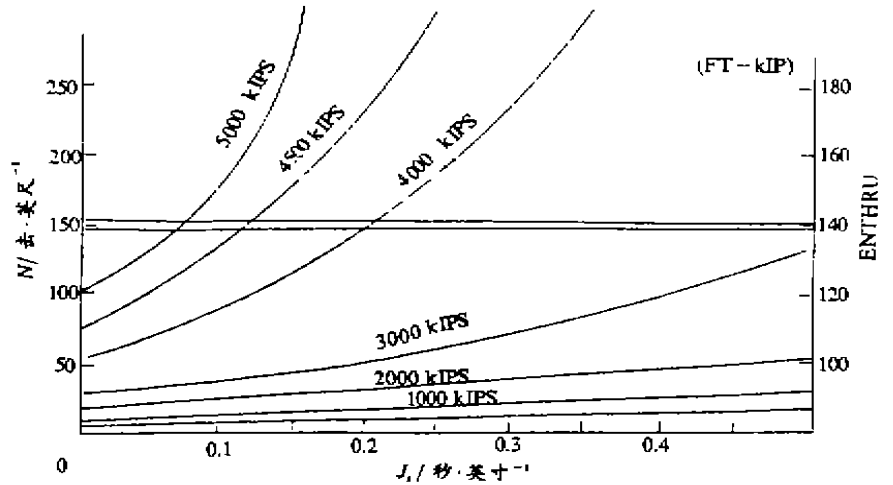


图 9 不同土阻力下的 $N-J$ 曲线及 $ENTHRU-J$ 曲线

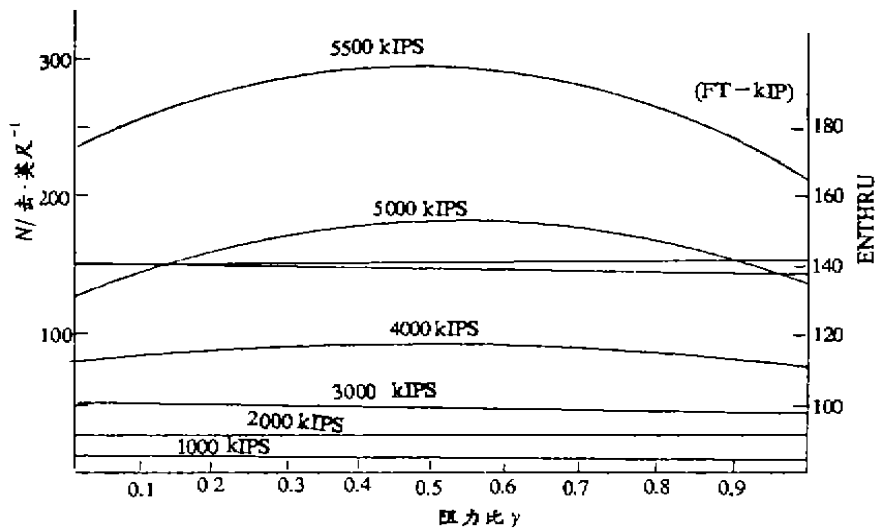


图 10 不同土阻力下的 $N-\gamma$ 曲线和 $ENTHRU-\gamma$ 曲线

3 结论与讨论

a. 土性参数是对沉桩能力影响最大的因素。对本文所给锤—桩—垫层—土系统, 当土阻力小于 9000kN 时, 各参数的变化对沉桩能力没有多大的影响, 这足以说明, 对于很短的桩, 波动理论分析并无很大优越性, 而在接近桩锤时, 参数的微小变化都极大地改变锤击数。此外, 阻尼系数 J 及最大弹性变形值及土阻力比的变化均极大影响沉桩能力。

b. 垫层的作用既改变打桩应力, 也影响沉桩能力。垫层刚度的变化主要改变打桩应力, 但恢复系数的改变对沉桩能力有很大影响, 在打桩过程中, 垫层的性质会随着锤击数的增加而变化。研制新的垫层材料并掌握其性质, 在沉桩困难时及时更换垫层, 是改善

沉桩能力的有益步骤。

c. 土阻力比的改变在桩难打时对沉桩能力有较大的影响。在极限静阻力较大、沉桩困难时,土阻力比的变化对沉桩能力产生较大影响。在土的层次变化较多,桩的形状有所变异时考虑这一因素,对于钢管桩,“土塞效应”不但改变极限静力值,也极大地改变土阻力比,是沉桩能力分析时应充分考虑的因素。

d. 反演参数时,必须考虑各参数的共同作用。现有的沉桩能力分析,土性参数均为经验值,近年来随着测量技术及计算方法的改进和发展,人们应用工程记录对土性参数进行反演以求得到土性参数的实际值,鉴于沉桩能力受各个参数的共同影响,在分析时必须考虑到各个参数的共同作用。采用桩顶实测力、速度及位移的反演土性参数可消除桩顶上部系统参数的影响,但要得到各参数的准确值,找出 R_s 、 Q 、 J 三者之间的耦合关系对桩顶实测值及计算值的影响是一条可行的解决办法,也是我们进一步研究的课题。

参 考 文 献

- 1 Soare M M 等. 沉桩能力的研究及其量测,见:应力波理论在桩基工程中应用论文集,甘肃省建筑科学研究所译,1986,175 ~ 183
- 2 Goble G G, Rausche F. Wave Equation Analysis of Pile Foundations —— WEAP 86 Program. In: Report to U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 1986
- 3 Smith E A L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation. J. of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE. 1960

The Effect of Parameter Variation on the Capacity of Pile Driving Machine

Jiang Limao

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences, Jiangsu Nanjing 210004)

Xie Xiaopeng

(Guangdon College of Petrochemical Technology, Guangdong Maoming 525000)

Abstract By using WEAP program some relative curves regarding the effect of parameter variation on the capacity of pile driving are obtained through the wave theory analysis of pile driving based on the ordinary piles and equipment used in the domestic marine construction and the geological condition in the sea area. Meanwhile a range is drawn out that demonstrates the effect of the deviation between the parameters and the real data on.

Keywords Pile driving capacity; Parameters analysis; System function