

基于 GRLWEAP 的桩基可打入性影响因素研究

张志鹏, 刘 润

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 桩基的可打入性分析对桩的设计十分重要。实际工程中精确的可打入性分析可以避免由于未能将桩打入设计入土深度而导致的截桩和桩头损坏等事故, 也能避免在桩的贯入深度已经超过设计贯入深度时仍不能满足设计承载力的情况发生。为精确桩基的可打入性分析, 研究了影响桩基可打入性的多种敏感因素, 采用正交实验法设计了 32 组试验, 由 GRLWEAP 软件完成试验, 得出打桩分析结果。结合渤海某油田平台工程实例得出桩基可打入性影响因素敏感度规律, 即桩基可打入性影响因素敏感度由大到小依次是打桩能量、桩径、地质条件、桩长、垫层厚度、桩壁厚、停锤时间、停锤位置、桩段数量。

关 键 词: 桩基; 可打入性; 影响因素; GRLWEAP 软件; 敏感度

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2015) 增 1—0634—05

Study of factors influencing pile foundation driveability based on GRLWEAP

ZHANG Zhi-peng, LIU Run

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Pile foundation driveability analysis is very important for pile design. In actual projects, precise pile driveability analyses would prevent the pile from being cut off or damaged when the pile couldn't drive into the given depth, and could also keep pile bearing capacity not less than design capacity when penetration depth is deeper than the design depth. In order to analyze the pile foundation driveability accurately, this paper studies the sensitive factors which could affect pile foundation driveability analysis. 32 experiments are designed with orthogonal experiment and completed by GRLWEAP; the pile driving analysis results are obtained afterwards. Through the case study of Bohai sea oil field platform project, same conclusions can be drawn on the sensitivity regularity of pile foundation driveability influencing factors. The sensitivity of the factors that influencing pile foundation drivability from large to small is in this particular order: piling energy, geological conditions, pile diameter, pile length, cushion thickness, pile wall thickness, stop-driving time, stop-driving location and the pile section numbers.

Keywords: pile foundation; driveability; influencing factors; GRLWEAP soft; sensitivity

1 引 言

准确的可打入性分析对于桩基施工具有十分重要的意义。影响可打入性分析准确性的因素有土阻力模型的选择^[1]、打桩参数的选择、锤型的选择和地质参数的准确性等^[2-3]。

最早的打桩分析通过打桩公式进行, 如Hiley公式等^[4]。1931年Isaacs提出了将古典波动方程引入反映桩周土阻力的参数项 R 的方法, 但解该方程相当复杂, 故没有进入实用阶段。1960年, Smith提出了锤-桩-土离散化单元计算模型, 用差分法将整个系

统按结构动力学问题分析, 求得较精确的数值解, 同时还给出了桩锤、桩垫、桩帽、锤垫以及土在模拟中涉及到的参数, 得到广泛应用^[5]。

国内学者也对打桩分析问题展开了深入的研究, 刘润等^[6]改进了一维波动方程, 使其适用于进行大直径超长桩的可打入性分析。傅铁铭^[7]研究了不同桩锤对打桩分析的影响, 但只是分析了各类型桩锤打桩的优劣性, 未给出具体锤型或桩锤能量对打桩分析的影响程度。区秉光^[8]研究了桩长对打桩公式的影响, 提出了新的打桩公式, 能更精确地给出长桩承载力, 但未就桩长度对打桩分析的影响做进

一步研究。沈慧荣等^[9]对垫层材料的力学特性进行了研究, 但垫层材料以及打桩规模的变化巨大, 故其结论仅可作为定性研究考虑。朱合华等^[10]针对桩锤、桩帽、锤垫、桩垫组成的锤击系统, 提出一种新的解析模型, 得出合理的垫层材料参数, 可供工程实践参考。

综上所述, 国内外的研究集中于理论分析^[11]及打桩参数、材料性质的定性研究, 对桩基可打入性影响因素的定量研究较少。本文结合实际工程, 确定对可打入性产生重要影响的若干因素, 定量地研究了影响因素的敏感度, 便于更好地进行设计和施工。

2 GRLWEAP 打桩分析的理论基础

2.1 打桩分析的理论

Isaacs 将反映桩周土阻力的参数项 R 引入古典的波动方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + R \quad (1)$$

式中: x 为桩截面位置坐标; u 为 x 处桩截面的质点位移; t 为时间; R 为桩身土阻力; C 为弹性应力波波速, $C = \sqrt{E/\rho}$, E 、 ρ 分别为模量和密度。

Smith 首先提出应用差分法求解波动方程, 将整个打桩系统抽象化为由许多分离的单元所组成, 桩锤、桩帽、锤垫、桩垫及桩身的弹性由无质量弹簧模拟, 而各部分的质量由不可压缩的刚性质块代表。桩周土的弹性、塑性动阻力与静阻力也分别用弹簧、摩擦键及缓冲壶来反映。在计算中将一次锤击的历时分割成若干个时间段 Δt , Δt 的选取应相当短, 使得弹性应力波在一个单元中的传播时间小于 Δt , t_{cr} 为临界时间间隔, 一般取 $0.5t_{cr} < \Delta t < t_{cr}$ 。

因此, 任一桩单元 i 在时刻 t 时的平衡方程式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{G(i)}{g} \frac{\partial^2 u(i,t)}{\partial t^2} &= EP(i-1)D(i-1,t-\Delta t) - \\ &EP(i)D(i,t-\Delta t) - R(i,t) + G(i) \\ D(i-1,t-\Delta t) &= u(i-1,t-\Delta t) - u(i,t-\Delta t) \\ D(i,t-\Delta t) &= u(i,t-\Delta t) - u(i+1,t-\Delta t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $EP(i)$ 为桩单元 i 的弹簧常数; $EP(i-1)$ 为单元 $(i-1)$ 的弹簧常数; $u(i, t-\Delta t)$ 为 $(t-\Delta t)$ 时刻单元 i 的位移; $D(i, t-\Delta t)$ 桩单元 i 在时刻 $(t-\Delta t)$ 的弹簧压缩量; $D(i-1, t-\Delta t)$ 为单元 $(i-1)$ 在时刻 $(t-\Delta t)$ 的弹簧压缩量; $R(i, t)$ 为桩单元 i 所受的桩周土阻力, 外露单

元此项设为 0; $R(i)$ 为桩单元 i 的重量。

采用向后差分, 可得

$$\frac{\partial^2 u(i,t)}{\partial t^2} = \frac{u(i,t) - 2u(i,t-\Delta t) + u(i,t-2\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (3)$$

则由式 (2)、(3) 可得单元 i 的位移:

$$u(i,t) = \frac{g\Delta t^2}{G(i)} [EP(i-1)D(i-1,t-\Delta t) - EP(i)D(i,t-\Delta t) - R(i,t) + G(i)] + 2u(i,t-\Delta t) - u(i,t-2\Delta t) \quad (4)$$

单元 i 的在 t 时刻的变形:

$$D(i,t) = u(i,t) - u(i+1,t) \quad (5)$$

单元 i 的在 t 时刻的受力:

$$F(i,t) = D(i,t)EP(i) \quad (6)$$

单元 i 在 t 时刻的速度:

$$V(i,t) = V(i,t-\Delta t) + [F(i-1,t) - F(i,t) - R(i,t) + G(i)] \frac{g\Delta t}{G(i)} \quad (7)$$

式 (7) 可用于计算下一个 Δt 的位移, 即

$$u(i,t+\Delta t) = u(i,t) + V(i,t)\Delta t \quad (8)$$

令计算的初始时间为打桩锤锤心撞击垫层的接触瞬间, 即 $t = 0$, 在此之前, 整个桩-土系统处于静止状态, 桩单元的弹簧弹力、桩周土阻力及其位移、速度和加速度均是 0。仅以桩锤锤心的锤击初速度作为已知的边界条件, 开始第一个时间间隔 Δt 内应力波在桩锤-桩-土系统内传播的计算分析。锤心在 Δt 内产生的位移即锤心弹簧的变形量, 从而可以计算作用在下一个单元上的外力。该力使得锤心速度减小, 同时锤心下面的单元产生加速度及获得新的速度。如此在每个 Δt 时间段内逐个单元的的计算迭代, 直到满足以下的 2 个条件时就可以结束运算: (1) 桩单元的位移不再增加; (2) 各单元的速度均已为 0 或者为负值。

有些情况是以迭代运算进行所预定的次数而自动停止, 通过上述的运算即可以得到打桩过程中桩基在一次锤击中的性状^[12]。

2.2 可打入性分析的程序实现

GRLWEA 打桩波动方程分析程序是基于 Smith 模型工作的打桩分析软件, 程序分桩模型、锤模型、土体模型以及打桩系统模型等几个模块, 由用户给出各个模型计算所需参数, 然后进行分析。

(1) 锤模型: 锤芯是最简单亦最重要的锤组件, 采用一个简单的质量单元代表。

(2) 桩模型: 桩模型包括弹簧、质量单元和阻尼器。

(3) 打桩系统模型: 打桩系统包括撞击板、锤垫、替打和桩垫 (对于混凝土桩而言)。

(4) 土模型: GRLWEAP 的土模型基本上采用了 Smith 方法, 即包括一个弹簧和一个阻尼器。

(5) 分析步骤: 首先预计时间 j 时的桩变量, 给定单元上的力, 需采用外部阻力 R_{sij} 和 R_{dij} (为上一个时间步长结束时的值) 和桩重力加速度 g_p , 计算在时间步 j 时桩单元 i 的加速度。然后进入修正循环阶段, 力、加速度和位移的计算过程可以在同一个时间步长内重复计算, 由新计算的 a_{ij} 、 v_{ij} 和 u_{ij} 代替以前的值, 分析结束。

3 桩基可打入性的影响因素

3.1 确定正交试验方案

本文采用了正交实验法确定各因素的敏感度。设计了 9 因素 4 水平的正交试验方案。9 因素为桩径 d 、桩长 l 、壁厚 wt 、垫层厚 ct 、间歇时间 t 、停锤位置 sl 、打桩能量 HE 、桩段数 N 、地质条件 s 。各因素的 4 个水平见表 1。

表 1 因素水平
Table 1 Values of influencing factors

水平	d /mm	l /m	wt /mm	ct /mm	t /h	sl /m	HE /kJ	N /次	s
1	2 000	60	50	100	2	30	500	1	砂土
2	2 500	90	65	200	6	50	800	2	黏土
3	4 000	120	100	300	24	70	1 200	3	上黏下砂
4	6 000	150	180	400	168	120	1 800	4	上砂下黏

共 32 组试验, 使用 GRLWEAP 进行模拟, 软件模拟模型如图 1 所示。

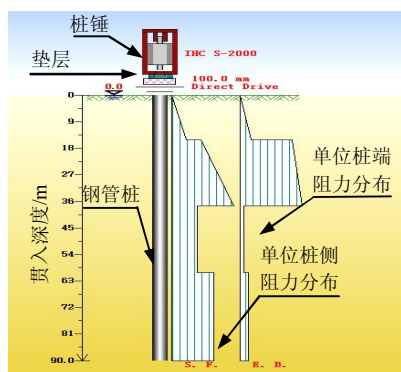


图 1 数值模拟模型图

Fig.1 Numerical simulation model in GRLWEAP

3.2 因素敏感度分析结果

分析整理试验数据, 32 组试验中有 31 组桩达

到设计贯入深度, 1 组发生拒锤, 根据 GRLWEAP 分析得出的锤击数, 计算每个因素的均值和极差, 由极差值确定各因素对锤击数影响程度大小, 具体结果见表 2。

表 2 影响因素
Table 2 Influencing factors

敏感度	对锤击数影响因素
高	HE
较高	d 、 s 、 l
中	ct 、 wt
低	t 、 sl 、 N

从表 2 可以看出, 对于动力沉桩, 锤击数主要受打桩能量 HE 、桩径 d 、地质条件 s 、桩长 l 的影响, 垫层厚度 ct 和桩身壁厚 wt 的影响程度居中, 停锤时间 t 停锤位置 sl 和桩段数 N 的影响最低。对排在一列的因素进行直观分析, 得出的极差较接近, 即影响程度近似。

本次分析中桩径较大, 均属于大直径桩, 用 GRLWEAP 进行试验时均考虑未发生完全闭塞, 故该分析结果适用于不易发生完全闭塞的桩基的可打入性分析。

4 工程中的因素敏感度

4.1 工程概况

渤海某油田平台基础采用 6 根钢管桩, 桩长 117.7 m, 设计入泥深度为 80 m。桩的轴向承载力设计参数见表 3, 桩参数见表 4。表中, E 为弹性模量; ρ 为密度; A 为截面面积, 选用 MHU-800S 型液压打桩锤, 无桩垫, 参数见表 5。

表 3 土层参数
Table 3 Soil parameters

层号	土质描述	底层深度 /m	有效重度 /(kN/m ³)	单位表面 摩擦力/kPa	单位桩端 承载力/MPa
①	粉质黏土	3.4	8.4	16	0.30
②	粉砂	5.2	9.5	10	0.37
③	粉质黏土	6.9	9.2	45	0.93
④	粉砂	8.9	9.6	23	0.97
⑤	细砂	18.0	9.1	61	3.27
⑥	砂质粉砂	27.2	9.3	67	2.90
⑦	细砂	41.6	9.2	96	9.60
⑧	粉质黏土	47.9	9.5	122	1.22
⑨	粉砂	50.9	9.8	67	2.90
⑩	粉质黏土	58.2	9.3	149	1.49
⑪	黏土粉砂	66.6	9.1	96	1.80
⑫	细砂	70.2	8.9	96	9.60
⑬	粉质黏土	72.0	8.9	142	1.28
⑭	粉砂质细砂	89.7	8.8	96	9.60

表 4 钢管桩的参数
Table 4 Steel pipe pile parameters

桩段	l /m	d /mm	wt /mm	E /MPa	ρ /(kg/m ³)	A /cm ²
1	26.6	1 676	38	210 000	7 850	1 955.5
2	34.1	1 676	50	210 000	7 850	2 554.0
3	57.0	1 676	32	210 000	7 850	1 653.0

表 5 锤的基本参数
Table 5 Hammer parameters

锤的名称	额定能量 /kJ	锤的重量 /kN	锤效 /%	最大冲程 /m
MHU800S	799.79	444.692	90	1.8

4.2 可打性研究

通过该工程实例验证以上确定的敏感因素规律。按照给定的地质条件, 本文只分析验证影响程度较大的打桩能量、桩径和桩长 3 个因素。3 个因素的水平见表 6。

表 6 因素水平
Table 6 Values of influencing factors

水平	因素		
	HE / kJ	d / mm	l / m
1	600	1 300	112.7
2	660	1 500	114.7
3	770	1 600	117.7
4	800	1 676	120.7
5	1 000	1 800	122.7
6	1 200	1 900	125.7
7	1 500	2 000	127.7
8	1 700	2 134	130.7
9	1 900		133.7

每次验证只改变一个因素, 进行该因素不同水平下的打桩分析, 拟合锤击数及桩身最大应力随各因素变化趋势线分析影响因素的敏感度规律, 如图 2~7 所示。

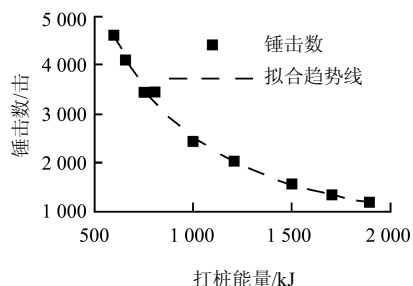


图 2 锤击数随打桩能量变化趋势线
Fig.2 Trend curves of blow counts varying with hammer energy

从图 2 可以看出, 打桩能量不同时, 锤击数的

变化呈减小趋势, 但不是线性变化。从图 3 可知, 对应打桩能量的桩身最大应力呈持续增长的趋势。由此可见, 当打桩能量小于 1 000 kJ 时, 锤击数的变化受打桩能量影响变化很大, 当打桩能量大于 1 000 kJ 后, 锤击数的变化趋势变缓, 但是桩身最大应力呈阶梯状增加。

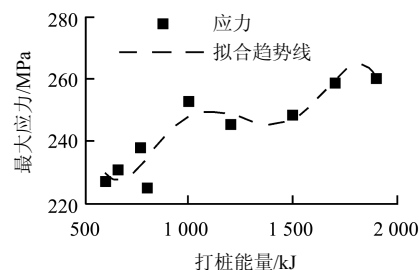


图 3 最大应力随打桩能量变化趋势线
Fig.3 Trend curves of max-stress varying with energy

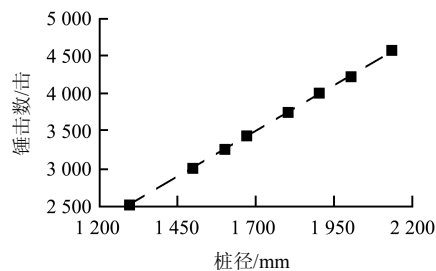


图 4 锤击数随桩径变化趋势线
Fig.4 Trend curves of blow counts varying with pile diameter

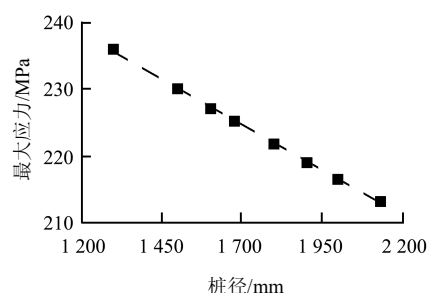


图 5 最大应力随桩径变化趋势线
Fig.5 Trend curves of max-stress varying with pile diameter

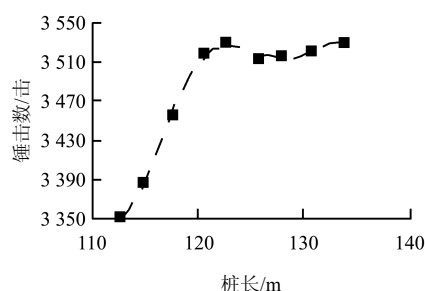


图 6 锤击数随桩长变化趋势线
Fig.6 Trend curves of blow counts varying with pile length

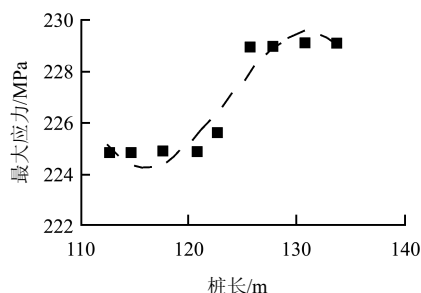


图 7 最大应力随桩长变化趋势线

Fig.7 Trend curves of max-stress varying with pile length

从图 4 可以看出, 桩径不同时, 锤击数的变化呈线性增大的。由图 5 可知, 对应的桩身最大应力呈线性减小趋势。从图 6 可以看出, 桩长不同时锤击数的变化是先呈线性变化, 达到某一峰值后趋于平缓的。当桩长增加, 锤击数呈先增加后平缓的趋势, 桩身最大应力变化微小。

对比纵轴相同的曲线的变化率可知, 打桩能量的变化引起的锤击数和桩身最大应力的变化是 3 个因素中最敏感的, 桩径次之, 桩长影响最小, 这也验证了正交实验直观分析所得的结果是正确的。

5 结 论

(1) 运用正交实验方法, 研究了影响桩基可打入性的 9 个因素, 得出敏感度前 4 位由大到小依次为打桩能量、桩径、地质条件、桩长。垫层厚度、桩身壁厚、间歇时间、停锤位置、桩段数的影响程度远小于上述 4 个因素。

(2) 针对渤海某实际工程, 只改变单一因素, 得出不同水平下的锤击数与桩身最大应力, 拟合锤击数与桩身应力随各因素变化趋势线, 通过锤击数变化率验证了影响因素敏感度规律。

(3) 给定的地质条件下打桩能量的变化引起的锤击数和桩身最大应力的变化是最敏感的, 桩径次之, 桩长影响最小。

参 考 文 献

- [1] 陈波. 海洋桩基平台大直径超长桩的可打入性研究[博士学位论文 D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [2] 赵亮. 海洋石油平台大直径超长桩贯入特性及原位测试研究[博士学位论文 D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [3] 董伟. 海洋采油平台大直径超长桩动力沉桩分析方法研究[博士学位论文 D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [4] 徐攸在. 桩的动测新技术(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [5] 江礼茂, 寇绍全, 陆岳屏. 应力波理论在桩基工程中的应用[J]. 力学进展, 1990, 20(1): 47—56.
JIANG Li-mao, KOU Shao-quan, LU Yue-ping. The application of stress-wave theory to pile engineering[J]. *Advances In Mechanics*, 1990, 20(1): 47—56.
- [6] 刘润, 闫澍旺, 嵇瑞花, 等. 动力打桩一维波动方程的改进及其工程应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 383—387.
LIU Run, YAN Shu-wang, ZHUO Rui-hua, et al. Apply of improved wave equation method to practical ocean piling engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp.): 383—387.
- [7] 傅铁铭. 打桩中的桩锤及其与桩的相互作用[J]. 土工基础, 1993, 7(2): 41—47.
FU Tie-ming. Analysis of hammer and hammer-pile interaction in pile-driving process[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 1993, 7(2): 41—47.
- [8] 区秉光. 考虑桩长影响的打桩公式[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 264—267.
OU Bing-guagn. Pile length influences on piling formula[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(3): 264—267.
- [9] 沈慧荣, 于志淳, 唐念慈. 新型打桩垫层材料的室内静力试验研究[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 13—23.
SHEN Hui-rong, YU Zhi-chun, TANG Nian-ci. Laboratory static test of some new piling cushion materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 8(2): 13—23.
- [10] 朱合华, 谢永健, 王怀忠. 打桩锤击解析模型及垫层材料参数的优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 841—845.
ZHU He-hua, XIE Yong-jian, WANG Huai-zhong. Analytical solution for pile hammer impact and application of optimum design technique for determining cushion parameters[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2004, 32(7): 841—845.
- [11] LIKINS G E, FELLENIUS B H, HOLTZ R D. Pile driving formulas—past and present[C]//Proceedings of the ASCE GeoInstitute Geo-Congress, State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. Oakland: Geotechnical Special Publication, 2012.: 737—753.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.