

文章编号: 1000-7598(2012)04-1227-06

基于能量守恒的预制桩施工残余应力模拟

刘俊伟¹, 俞峰², 张忠苗¹, 王宁¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058; 2. 浙江理工大学 建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 预制桩施工阶段形成的残余应力较难由实测获得, 其重要影响鲜受关注。从能量守恒原理出发, 可模拟沉桩引起的桩身残余应力分布。计算模型采用剪切带理想弹塑性荷载传递关系及残余摩阻力折线型分布假定, 以桩身弹性变形能为纽带, 对预制桩沉贯和回弹过程进行能量分析, 建立了施工全过程的能量平衡方程。参数分析显示, 桩长径比与剪切带摩擦性状是影响桩身残余应力的关键因素。该模型能较合理预测某原型试桩的施工残余应力。

关键词: 预制桩; 残余应力; 能量守恒; 模拟

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Simulation of post-installation residual stress in preformed piles based on energy conservation

LIU Jun-wei¹, YU Feng², ZHANG Zhong-miao¹, WANG Ning¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Installation of a preformed pile gives rise to residual stress locked in the pile. Such stress is difficult to be measured in-situ, hence little focus has been paid on its significant effect. Alternatively, a simulation approach is put forward in this study by incorporating the principle of energy conservation. The proposed model adopts assumptions that the load transfer behavior along the pile-soil interface is ideally elastoplastic and the distribution of residual friction resembles a folded line. By looking through the physical process of pile penetration and rebound, the energy equilibrium equation during pile installation is established on a primary consideration of the elastic deformation energy of pile. Parametric studies show that the ratio of pile length to pile diameter and the interface shear friction are two key issues affecting pile residual stress. The rationality of this model is assessed against the measured post-installation residual stress of a full-scale pile.

Key words: preformed pile; residual stress; energy conservation; simulation

1 引言

预制桩沉桩结束后, 桩周土的约束作用使得桩身压缩无法完全恢复, 此时部分应力“内锁”于桩内, 称之为施工残余应力。最早关于残余应力的报道是由 Hunter 等^[1]提出的。俞峰等^[2]通过现场足尺试验发现, 花岗岩残积土中 H 型钢桩静压沉桩后的桩端残余应力高达 57 MPa。可见, 忽略施工残余应力的影响, 会明显误估桩的承载力性状。对于此, 早在 30 年前 Vesic^[3]就已指出施工残余应力的重要性, 但此问题并未得到广泛的关注^[4]。

国外对于残余应力的研究, 主要通过试验观测

和模拟分析两种途径, 但报道文献数量有限。Rieke 等^[5]、Altaee 等^[6]、Paik 等^[7]及 Zhang 等^[8]曾分别针对 H 型钢桩、混凝土方桩和钢管桩进行试验研究。模拟分析主要包括基于标贯参数的简化分析法^[9]、边界元法^[10]和经验关系法^[11]等。

国内对于残余应力的研究开展较晚, 报道文献仅数例。张明义^[12]对持力层为砾砂的混凝土方桩的桩端残余应力进行了试验观测; 张文超^[13]采用有限元法对静压桩的残余应力进行了数值模拟; 刘俊伟^[14]对粉土中 PHC 管桩的桩端残余应力进行了长期观测研究; 俞峰等^[2]根据 H 型钢桩的试验结果提出了残余应力的简化预测模型。

收稿日期: 2011-01-11

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (No. Y1090610); 国家自然科学基金项目 (No. 51078330)。

第一作者简介: 刘俊伟, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事桩基础相关领域的研究工作。E-mail: zjuljw@126.com

通讯作者: 俞峰, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事桩基础方面的教学与研究工作。E-mail: pokfulam@163.com

本文采用能量法对预制桩的施工残余应力展开研究。基于残余摩阻力折线分布模型,建立施工全过程能量平衡方程,进而提出有效的残余应力模拟计算模型;在此基础上进行参数研究,确定计算模型中各参数对残余应力的影响模式,并将计算结果与实测值进行对比,以确定计算模型的有效性。

2 残余应力的能量法求解

2.1 预制桩施工全过程的能量平衡

对于预制桩,施工全过程可细分为两个阶段,如图 1 所示。

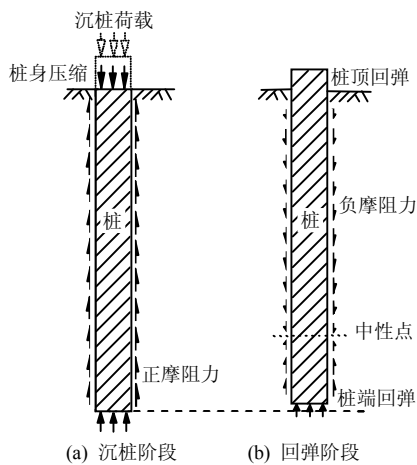


图 1 预制桩施工过程示意图

Fig.1 Sketch of construction process of preformed pile

(1) 沉桩阶段。此阶段,在沉桩荷载、桩侧摩阻力和桩端阻力三者共同作用下,桩身发生压缩,所产生的变形能 U 储存于桩内。

(2) 回弹阶段。沉桩结束时,沉桩荷载移除,桩身发生回弹,部分桩身变形能释放。中性点以上较大的回弹量使摩阻力的方向发生回转,当上部负摩阻力和下部正摩阻力及桩端残余阻力之和相等时,桩身达到平衡状态。回弹过程桩只受到土体的作用(如忽略自重的影响),因此,桩身释放的变形能 U_s 与土体对其所做的功 W_s 是等量的。

回弹结束后,桩体处于平衡状态,此时残留在桩身内的变形能 U_r 即为残余应力的体现。如忽略自重的影响,整个施工过程的能量平衡方程如下:

$$U = W_s + U_r \quad (1)$$

2.2 沉桩阶段的能量方程

假定桩-土界面荷载的传递符合理想线弹塑性模型,即桩侧及桩端阻力达到极值后,在整个桩体贯入过程中保持恒定不变,如图 2、3 所示。其中,

S_u 为发挥极限侧阻所需的桩-土相对位移; f_u 为桩侧极限摩阻力; f_r 为桩侧残余摩阻力; k_f 和 k'_f 分别为加载和回弹过程中桩侧剪切刚度系数; S_f 为桩身回弹量; q_u 为极限桩端阻力; q_r 为桩端残余阻力; k_e 和 k'_e 分别为加载和回弹过程中桩端土刚度系数; S_e 为桩端回弹量; W_f 和 W_e 分别为回弹过程中桩侧土和桩端土对桩所做的功。

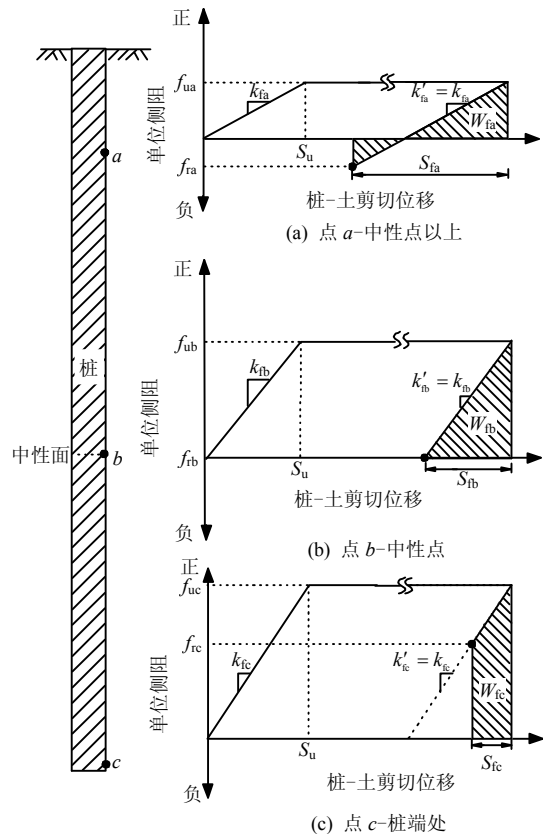


图 2 桩侧摩阻力加载及卸载过程示意图

Fig.2 Sketch of loading and unloading process on pile shaft resistance

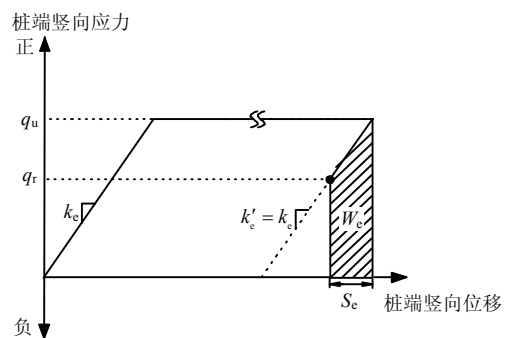


图 3 桩端阻力加载及卸载过程示意图

Fig.3 Sketch of loading and unloading process on pile-tip resistance

沉桩结束时,单位桩侧极限摩阻力 f_u 随深度 z 的分布采用 β 法确定,忽略临界深度的影响,则压

桩结束时摩阻力 f_u 随深度呈线性分布, 如图4所示, 表达式为

$$f_u = K \tan \delta \cdot \sigma'_v = \beta \gamma' z = kz \quad (2)$$

式中: K 为桩侧土压力系数; δ 为桩-土界面摩擦角; σ'_v 为桩侧土竖向有效应力; γ' 为桩侧土有效重度; k 为摩阻力分布系数。

沉桩阶段结束时, 在桩顶荷载释放之前假设桩身只发生了弹性压缩, 此时桩身所储备的变形能量 U 为

$$W = \int_0^{L_p} \frac{N^2(z)}{2E_p A_p} dz = \frac{1}{2E_p A_p} \left(\frac{2}{12} k^2 \zeta_s^2 L_p^5 + \frac{2}{3} q_u A_p k \zeta_s L_p^3 + q_u^2 A_p^2 L_p \right) \quad (3)$$

式中: $N(z)$ 为深度 z 处桩身轴力; E_p 为桩身弹性模量; A_p 为桩身截面积; L_p 为桩埋置深度; ζ_s 为桩截面周长。

极限桩端阻力 q_u 可根据 Schmertman^[15] 提出的经验公式, 采用标贯击数 N 表示为

$$q_u = 342.4N \quad (4)$$

如假定发挥极限端阻所需桩-土相对位移为 10 mm, 且桩端位移在达到此值之前与桩端应力呈线性关系 (如图3所示), 则刚度系数 k_e 为

$$k_e = 34\,240N \quad (5)$$

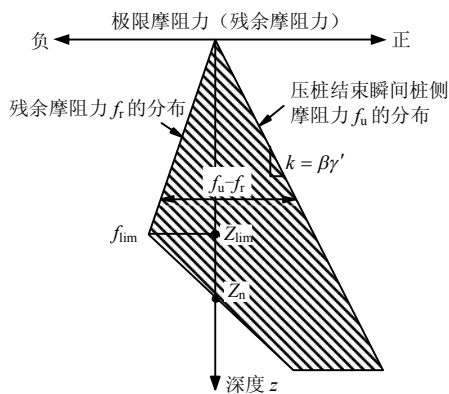


图4 极限摩阻力及残余摩阻力分布

Fig.4 Distribution of ultimate friction and residual friction

2.3 回弹阶段的能量方程

回弹阶段单位侧阻与单位桩端的发展过程如图2、3所示, 此处假定回弹过程中桩端土刚度系数及桩侧剪切刚度系数与加载过程保持一致。桩身的回弹量从下往上逐渐递增 (Alawneh 等^[11]), 不同的回弹量导致不同深度处土对桩所做的功也各不相同, 如图2、3斜线区域所示。回弹过程中土对桩所

做的功 W_s 包括桩侧土所做的功 W_f 和桩端土所做的功 W_e 两部分。

回弹过程中桩侧摩阻力的变化即为极限摩阻力 f_u 与残余摩阻力 f_r 的差值, 如图4所示。残余摩阻力的分布采用折线型模型 (俞峰等^[2]、Alawneh 等^[11]), 表达式如下:

$$f_r = \frac{z}{Z_{lim}} f_{lim}, \quad 0 \leq z \leq Z_{lim} \quad (6)$$

$$f_r = \frac{z - Z_n}{Z_{lim} - Z_n} f_{lim}, \quad Z_{lim} \leq z \leq L_p \quad (7)$$

式中: f_{lim} 为残余负摩阻力极值; Z_{lim} 为与 f_{lim} 对应的深度; Z_n 为中性点的深度。

假定对于同一类型土, 发挥极限侧阻所需桩-土位移 S_u 随深度保持不变, 则桩侧剪切刚度系数 k_f 随深度呈线性变化。回弹过程中, 桩侧土对桩所做的功 $W_f = W_{f1} + W_{f2}$ 。其中 W_{f1} 和 W_{f2} 分别为中性点以上和以下部分桩侧土对桩所做的功, 可分别采用下式计算得出:

$$\begin{aligned} W_{f1} &= \frac{1}{2} \int_0^{Z_n} \frac{f_u^2(z) + f_r^2(z)}{k_f(z)} \zeta_s dz = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{Z_{lim}} \frac{f_u^2(z) + f_r^2(z)}{k_f(z)} \zeta_s dz + \\ &= \frac{1}{2} \int_{Z_{lim}}^{Z_n} \frac{f_u^2(z) + f_r^2(z)}{k_f(z)} \zeta_s dz = \\ &= \frac{1}{4} S_u \zeta_s \left(\frac{f_{lim}^2}{k} + k Z_n^2 \right) + \frac{f_{lim}^2 S_u \zeta_s}{(Z_{lim} - Z_n)^2 k} \cdot \\ &\quad \left[\frac{1}{4} (Z_n^2 - Z_{lim}^2) - Z_n (Z_n - Z_{lim}) + \frac{Z_n^2}{2} \ln \left(\frac{Z_n}{Z_{lim}} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W_{f2} &= \frac{1}{2} \int_{Z_n}^{L_p} \frac{f_u^2(z) - f_r^2(z)}{k_f(z)} \zeta_s dz = \frac{1}{4} k S_u \zeta_s (L_p^2 - Z_n^2) - \\ &= \frac{f_{lim}^2 S_u \zeta_s}{(Z_{lim} - Z_n)^2 k} \left[\frac{1}{4} (L_p^2 - Z_n^2) - Z_n (L_p - Z_n) + \right. \\ &\quad \left. \frac{Z_n^2}{2} \ln \left(\frac{L_p}{Z_n} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

回弹过程中, 桩端土对桩所做的功 W_e 如图3斜线区域所示, 表达式如下:

$$W_e = \frac{1}{2} (q_u + q_r) S_e A_p = A_p S_e q_u - \frac{1}{2} A_p S_e^2 k_e \quad (10)$$

式中: q_u 及 k_e 可分别采用式(4)及式(5)计算得出; S_e 为桩端的回弹量, 可利用桩端处单位侧阻与

桩-土位移的相关关系并结合图 2 及图 4 得出:

$$S_e = \left(1 - \frac{L_p - Z_n}{Z_n - Z_{lim}} \frac{f_{lim}}{kL_p} \right) S_u \quad (11)$$

2.4 残余能量方程

桩身残余应力 σ_r 与桩侧残余摩阻力 f_r 之间存在以下微分关系:

$$\frac{d\sigma_r}{dz} = -\frac{\zeta_s}{A_p} f_r \quad (12)$$

根据残余摩阻力的折线分布模型 (式 (6)、(7)), 所得桩身残余应力、桩身残余变形能分别为

$$\sigma_r = -\frac{\zeta_s z^2}{2A_p Z_{lim}} f_{lim}, \quad 0 \leq z \leq Z_{lim} \quad (13)$$

$$\sigma_r = -\frac{\zeta_s (z^2 - 2Z_n z + Z_n Z_{lim})}{2A_p (Z_{lim} - Z_n)} f_{lim}, \quad Z_{lim} \leq z \leq L_p \quad (14)$$

$$U_r = \frac{1}{2} \int_0^{L_p} \frac{N^2(z)}{E_p A_p} dz = \frac{f_{lim}^2 \zeta_s^2}{8E_p A_p} \left\{ \frac{1}{5} Z_{lim}^3 + \frac{1}{(Z_{lim} - Z_n)^2} \cdot \left[\frac{L_p^5 - Z_{lim}^5}{5} - Z_n (L_p^4 - Z_{lim}^4) + \frac{(L_p^3 - Z_{lim}^3)(4Z_n^2 + 2Z_n Z_{lim})}{3} - 2Z_n^2 Z_{lim} (L_p^2 - Z_{lim}^2) + Z_n^2 Z_{lim}^2 (L_p - Z_{lim}) \right] \right\} \quad (15)$$

3 参数分析

从以上模拟计算可知, 残余负摩阻力极限 f_{lim} 受桩身尺寸及材料、桩侧及桩端土、中性点深度以及 f_{lim} 对应深度等众多因素的影响, 即

$$f_{lim} \sim f(Z_{lim}, Z_n, N, S_u, k, L_p, A_p, \zeta_s, E_p) \quad (16)$$

参数 Z_{lim} 、 Z_n 可根据俞峰等^[2]提出的残余应力简化分布模型, 分别取值为 $0.732L_p$ 和 $0.8L_p$ 。对于粉土和砂土, 参数 S_u 可取值为 $0.01 \text{ m}^{[16]}$ 。参数 $k = K\gamma' \tan \delta$, 其中 K 为桩侧土压力系数, 对于挤土桩和部分挤土桩, 可分别取值为 1.0 和 0.8^[17]。

桩端残余应力 q_r 与残余负摩阻力极限 f_{lim} 存在以下关系:

$$q_r = -\frac{\zeta_s L_p}{9.4A_p} f_{lim} \quad (17)$$

根据模拟计算模型, 以中密砂土中 $\phi 500 \text{ mm}$ 型闭口预应力混凝土管桩的基本参数为基础, 即令 $L_{p0} = 50 \text{ m}$, $E_{p0} = 38 \text{ GPa}$, $\zeta_{s0} = 1.57 \text{ m}$, $N_0 = 30$ 击,

$A_{p0} = 0.19625 \text{ m}^2$, $\delta_0 = 30^\circ$, 进行无量纲化处理。计算得出的参数 $\bar{L}_p$ 、 $\bar{E}_p$ 、 $\bar{A}_p$ 、 $\bar{\zeta}_s$ 、 $\bar{N}$ 及 $\bar{\delta}$ 对桩端残余应力 $\bar{q}_r$ 的影响如图 5~10 所示。

计算结果说明, 随着参数 L_p 、 ζ_s 、 N 、 δ 的增大, 桩端残余应力逐渐增大; 相反, 桩端残余应力随着 E_p 或 A_p 的增大而逐渐减小。对比发现, 参数 δ 和 L_p 对残余应力的影响最大, A_p 和 ζ_s 次之, N 和 E_p 最小。说明桩长径比以及桩-土界面摩擦性状是影响残余应力大小的关键因素, 这与实测的结果较为吻合。

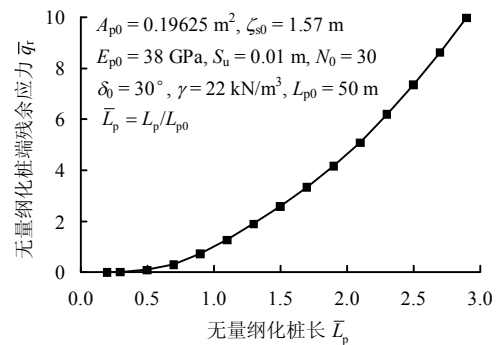


图 5 桩长对桩端残余应力的影响

Fig.5 Influence of pile length on residual stress of pile tip

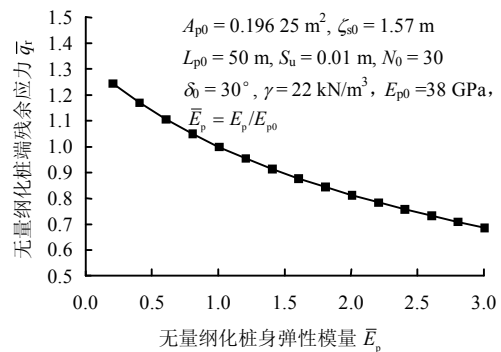


图 6 桩身弹性模量对桩端残余应力的影响

Fig.6 Influence of elastic modulus of pile shaft on residual stress of pile tip

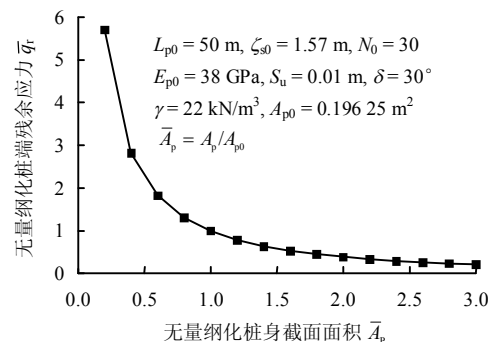


图 7 桩身截面积对桩端残余应力的影响

Fig.7 Influence of pile cross-sectional area on residual stress of pile tip

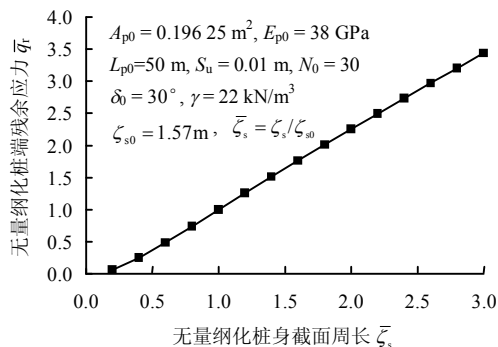


图8 桩身截面周长对桩端残余应力的影响

Fig.8 Influence of pile cross-sectional circumference on residual stress of pile tip

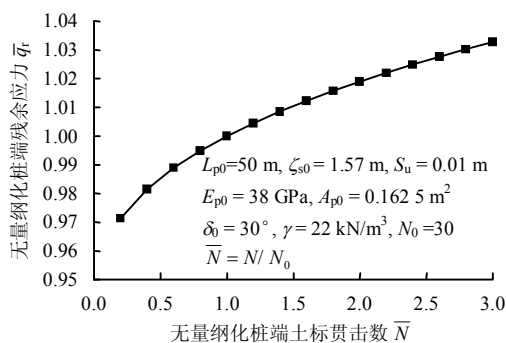


图9 桩端土标贯击数对桩端残余应力的影响

Fig.9 Influence of SPT-N surrounding pile tip on residual stress of pile tip

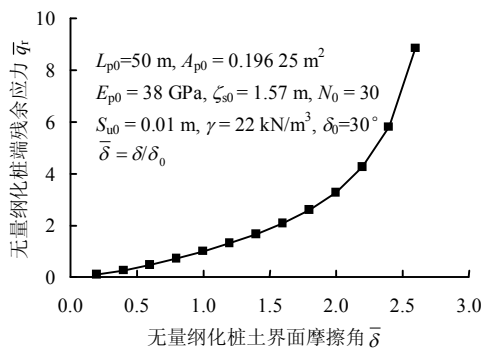


图10 桩-土界面摩擦角对桩端残余应力的影响

Fig.10 Influence of pile-soil interface friction angle on residual stress of pile tip

4 实例对比

试验地点位于香港新界, 场地分布较厚的全风化花岗岩残积土。试验采用 55C 级 H 型钢桩, 腹板和翼板厚度均为 30 mm, 采用静压法沉桩, 终压力为 6 829 kN。基本试验参数如表 1 所示, 具体试验情况参见文献[2]。

桩身残余应力的计算值与实测值如图 11 所示, 可见两者较为吻合。桩身上部计算值略大于实测值, 此差异归因于沉桩对上部土体的扰动较大, 造成此范围内的实际摩阻力 (即土对桩的约束力) 低于理

论值, 因此, 上部应力发生更多的释放。

表1 试验基本参数

Table 1 Basic parameters of test

桩长 L_p / m	桩身弹性 模量 E_p / GPa	截面积 A_p / mm ²	截面 周长 ζ_s / mm	桩端土 标贯击 数 N /击	桩土 摩擦角 δ / (°)	土重度 / (kN/m ³)
25.8	200	22 930	1 884	186	32	20

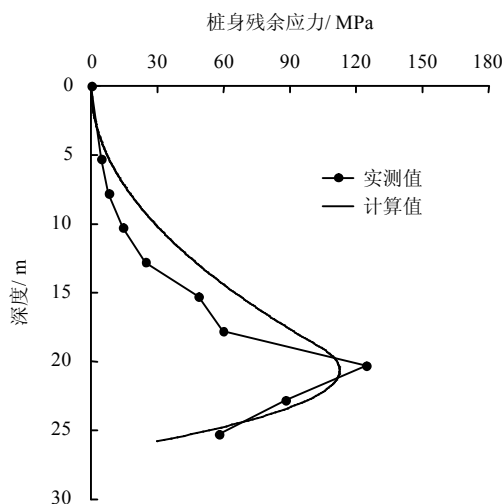


图11 桩身残余应力实测值与计算值比较

Fig.11 Comparison between measured and calculated residual stresses of pile shaft

5 结论

(1) 以桩身弹性压缩变形能为纽带, 对预制桩的沉桩及回弹过程进行能量分析。基于桩-土理想弹塑性荷载传递模型以及残余摩阻力折线分布模型, 建立了施工全过程能量平衡方程, 实现了残余应力的模拟计算解答。

(2) 参数分析发现, 桩长径比和桩侧剪切带摩擦性状是影响桩身残余应力的关键因素。随着桩长、桩身截面周长、桩土摩擦角或桩端土标贯击数的增大, 残余应力随之增大; 随着桩身截面积或桩身弹性模量的增大, 残余应力逐渐减小, 表明长径比越大, 桩土刚度比越小, 则桩身残余应力越大。

(3) 模拟计算结果与粗粒土中 H 型钢桩残余应力的实测值基本吻合, 验证了模拟计算模型的可靠性。

本文所建立的模拟计算模型需进一步完善, 以体现沉桩方法和贯入速率对桩身残余应力的影响。

参考文献

- [1] HUNTER A H, DAVISSON M T. Measurement of Pile Load Transfer[C]//Proceedings of Symposium on Performance of Deep Foundations. San Francisco: ASTM

- Special Technical Publication, 1969: 106—117.
- [2] 俞峰, 谭国焕, 杨峻等. 静压桩残余应力的长期观测性
状[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2318—2324.
YU Feng, THAM Leslie George, YANG Jun, et al.
Observed long-term behavior of the residual stress in
jacked pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8):
2318—2324.
- [3] VESIC A S. On the significance of residual loads for load
response of piles[C]//Proceedings of the 9th International
Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and
Foundation Engineering, 1977: 374—379.
- [4] 史佩栋. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社,
2008.
- [5] RIEKE R D, CROWSER J C. Interpretation of pile load
test considering residual stresses[J]. **Journal of Geo-
technical Engineering**, 1987, 113(4): 320—334.
- [6] ALTAEE A, FELLENIUS B H, EVGIN E. Load transfer
for piles in sand and the critical depth[J]. **Canadian
Geotechnical Journal**, 1993, 30(3): 455—463.
- [7] PAIK K, SALGADO R, LEE J, Kim B. Behavior of
open-and closed-ended piles driven into sands[J]. **Journal
of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**,
2003, 129(4): 296—306.
- [8] ZHANG L M, WANG H. Development of residual forces
in long driven piles in weathered soils[J]. **Journal of
Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**,
2007, 133(10): 1216—1228.
- [9] BRIAUD J L, TUCKER L. Piles in sand: a method
including residual stresses[J]. **Journal of Geotechnical
Engineering**, 1984, 110(11): 1666—1680.
- [10] POULOS H G. Analysis of residual stress effects in
piles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987,
113(3): 216—229.
- [11] ALAWNEH A S, HUSEIN MALKAWI A I. Estimation
of post driving residual stresses along driven piles in
sand[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2000, 23(3): 313
—326.
- [12] 张明义. 静力压入桩的研究与应用[M]. 北京: 中国建
材工业出版社, 2004.
- [13] 张文超. 静压桩残余应力数值模拟及其对桩承载性状
影响分析[硕士学位论文 D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [14] 刘俊伟. 静压开口混凝土管桩施工效应试验及理论研
究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [15] SCHMERTMAN J H. Guidelines for use in the soils
investigation and design of foundations for bridge
structures in the State of Florida[R]. Tallahassee:
Research Report 121-A, Florida Department of
Transportation, 1967.
- [16] VESIC A S. A study of bearing capacity of deep
foundations[R]. Atlanta: Georgia Institute of Technology,
Engineering Experiment Station, 1967.
- [17] American Petroleum Institute. Recommended practice of
planning, designing and constructing fixed offshore
platforms-working stress design[S]. Washington D C:
American Petroleum Institute, 1993: 59—61.

关于申报 2012 年“中国岩石力学与工程学会优秀博士学位论文奖”通知

为鼓励我国岩石力学与工程界博士学位研究生创造高水平的理论研究和工程应用成果, 中国岩石力学与工程学会决定设立“中国岩石力学与工程学会优秀博士学位论文奖”(以下简称“优秀博士学位论文奖”), 有关评审和奖励办法见“中国岩石力学与工程学会优秀博士学位论文奖励条例”。

现将有关 2012 年“优秀博士学位论文奖”申报事宜通知如下: ①凡自 2009 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日期间博士学位获得者的博士学位论文, 均可申报参选 2012 年度“优秀博士学位论文奖”。申请人经 1 名以上常务理事(含 1 名)或 2 名以上博士生导师(含 2 名)推荐即可直接向中国岩石力学与工程学会提出申请参加评选。②申请人(被推荐人)须填写《中国岩石力学与工程学会优秀博士学位论文奖推荐表》, 并亲笔签名对所填内容负责; 表中推荐专家须填写推荐意见并亲笔签名; 学位授予单位须签署推荐意见并加盖单位公章; 连同附件材料一并报送中国岩石力学与工程学会教育工作委员会(见网站公布信息)。③报名截止日期为 2012 年 5 月 30 日(以当日邮戳为准)。④“优秀博士学位论文奖”的评选工作将在 2012 年 6~7 月进行。“优秀博士学位论文奖”颁奖将于 2012 年全国性岩石力学与工程学术会议期间进行。会议具体时间和地点另行通知。

相关材料邮寄地址和评审费汇款帐号详见 <http://www.csrme.com/CN> 网站。

(摘自 中国岩石力学与工程学会 网站)