

基于位移贯入法的静压沉桩有限元分析

李富荣^{1,2}, 张艳梅³, 杨 斌², 聂军旗²

- (1. 盐城市志远建设工程质量检测有限公司, 江苏 盐城 224055;
2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051;
3. 江苏通州基础工程有限公司, 江苏 南通 226300)

摘要:基于 ADINA 平台, 应用位移贯入法对静压沉桩的连续贯入的全过程进行有限元模拟, 研究了均质土中静压沉桩产生的位移和应力的变化规律, 并与成层土中静压沉桩产生的位移和应力进行了对比分析。有限元分析表明, 在均质土中, 随着径向距离的增加, 土体的水平位移和挤压应力呈对数衰减, 且与桩的贯入深度有关; 在成层土中, 成层土的影响比均质土的影响要大, 主要体现在软硬土体分层处土体位移加大, 土中挤压应力剧变, 出现应力间断。在实际施工过程中, 桩体易开裂、弯折, 由此提出相应的解决方法。

关键词:位移贯入法; 静压沉桩; 有限元; 均质土; 成层土

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5322(2012)04-0053-06

静压桩在沉入过程中会产生挤土效应, 特别是饱和软土地基中, 这也是工程界和学术界长期关注的一个课题。但由于问题的复杂性, 目前的研究基本上都是假定土体为均质的各向同性的弹塑性体, 未涉及成层土中的静压桩挤土效应。因此, 本文在引入位移贯入法的同时, 采用有限元方法, 研究均质土条件下静压沉桩的挤土效应, 并比较分析成层土与均质土条件下静压沉桩挤土效应。

1 位移贯入法的引入

静压沉桩挤土效应相对于其他研究方法, 有限元模拟能够考虑更多的因素, 因而很多学者^[1-6]都致力于此, 具体有 3 种方法来模拟桩的贯入, 分别是力贯入法、圆孔扩张法、位移贯入法, 如图 1 所示。

1.1 力贯入法

在桩顶直接施加压力, 如图 1a 所示, 使桩向下贯入(沉降)某一距离, 但贯入的距离较小且不易预先确定。此种计算相当于将桩的荷载加至破坏、使桩产生贯入的静荷载试验。因假定土体为弹塑性材料, 加荷过大(超过破坏值)会导致计算

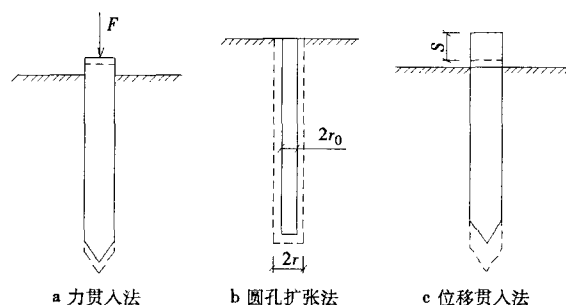


图 1 模拟桩贯入的 3 种方式

Fig. 1 The 3 ways of simulating pile penetration

异常, 而加荷太小又不能产生塑性应变和贯入, 故并不是有限元分析沉桩挤土的最优方法。

1.2 圆孔扩张法

把静压桩的贯入看成圆柱形孔扩张, 如图 1b 所示。这是大多数静压桩挤土有限元计算所采用的图式。把静压桩的贯入看成圆柱形孔扩张。由于打桩过程是从土体表面慢慢的贯入土体的过程, 此方法则假设桩已经全部在土体中, 然后沿着半径方向往外扩张, 实际上忽略了实际情况, 用该方法往往不能测出打桩过程中土体的沉降。

收稿日期: 2012-10-08

基金项目: 住房和城乡建设部科技项目(2010-K3-6)

作者简介: 李富荣(1982-), 男, 江苏盐城人, 讲师、工程师, 硕士, 主要研究方向为桩基工程。

1.3 位移贯入法

在不同深度上直接贯入一定的距离,如图 1c 所示。桩顶不需要施加外力,桩的贯入是依靠对在桩顶施加的位移边界条件实现的。这实质上是使桩产生向下的运动,该运动对桩周土的作用,视为与桩顶施加外力时一样,故可称作“位移贯入法”。桩侧表面与土之间则采用滑动接触摩擦模式,并采用非线性大变形算法。

计算中,将桩预置在一定深度上,然后令其贯入,向下贯入的距离为 10 cm 左右。这样大的距离完成后,桩端周围土的受力状况与桩连续贯入到该深度时相似。

位移贯入法^[1]利用边界位移条件使桩贯入,计算中可采用弹塑性本构关系、考虑大变形和桩-土接触面,力学概念清晰,比较接近静压沉桩实际。本文即采用位移贯入法,利用 ADINA 有限元软件来分析静压沉桩产生的挤土效应。

2 均质土场地上静压沉桩的有限元分析

2.1 基本假定及条件

有限元分析中基本假定及条件有:(1)采用总应力法进行分析计算;(2)根据实际沉桩过程,为简化计算,以二维轴对称问题模拟;(3)钢筋混凝土桩或钢桩为线弹性体;(4)土体为均质连续的弹塑性体,采用 Mohr - Coulomb 模型;(5)桩土界面采用面-面摩擦接触单元,接触面的摩擦类型为库仑摩擦;(6)桩土一旦接触,法向就不再分离,切向可以滑动。

2.2 计算简图

先将桩预置在某一初始位置,再利用位移边界条件使桩体向下贯入一定深度(9 cm)。图 2 为各桩的初始位置示意图,并给出了各桩的贯入深度。计算中,桩直径取 400 mm,桩长为 10 m。土体水平表面,竖直计算区域为 2 倍桩长,即 20 m,水平计算区域为 50 m,土体上表面为自由边界,下表面竖向固定,左右侧面水平固定。采用二维轴对称问题模拟,用位移贯入法模拟静压沉桩。图 3 给出了桩完全贯入时网格划分、变形及边界约束等情况。本计算设置了桩-土边界滑动接触面,接触面的滑动摩擦系数见表 1。

2.3 计算参数

选择某均质土场地作为试验场地,桩、土基本计算参数如表 1 所示。

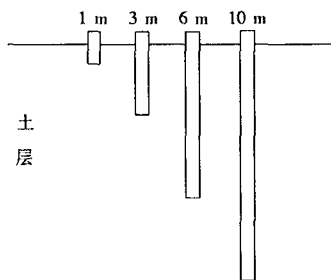


图 2 各桩的初始位置示意图

Fig. 2 The schematic of piles initial position

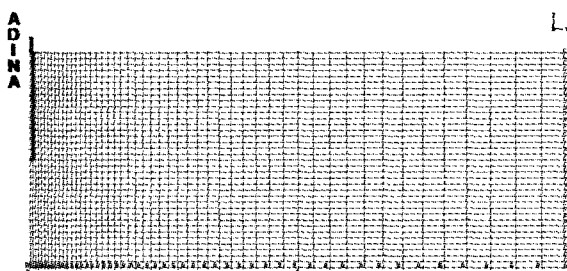


图 3 桩完全贯入时网格划分及边界约束条件

Fig. 3 The meshing and boundary conditions of pile penetrating completely

表 1 桩、土基本计算参数

Table 1 The basic calculation parameters of pile and soil

计算参数	土性	
	粘性土	桩
重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18	25
弹性模量/Mpa	2	2 000
泊松比	0.38	0.3
摩擦系数	0.34	
粘聚力 c/kPa	26	
摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	14.4	

2.4 土体位移分析

图 4 为沉桩过程中地表处土体水平位移变化曲线。可以看出:(1)随着径向距离的增加,水平位移呈对数形式减小;(2)随着桩贯入深度的增加,水平位移会增大。图 5 为沉桩过程中土体深度 1 m 处水平位移的变化曲线。可见,随着桩贯入深度的增加,水平位移继续增大,但水平位移变化量不大,分析认为桩贯入时,对上部土体影响较小。

沉桩过程中土体深度 3 m、6 m 处水平位移的变化曲线如图 6、图 7 所示。可以看出,桩贯入较浅时,土体较深处水平位移变化较小,随着桩贯入深度的增加,水平位移逐渐增大,待桩贯入完成时达到最大,为 9.09 mm。

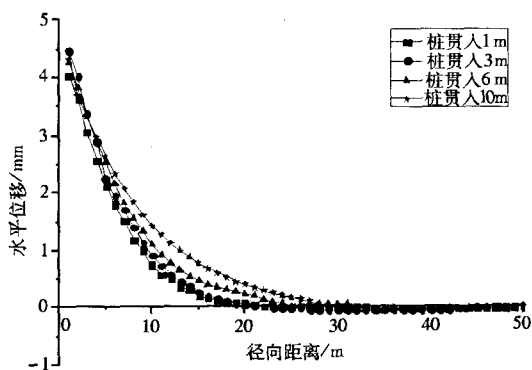
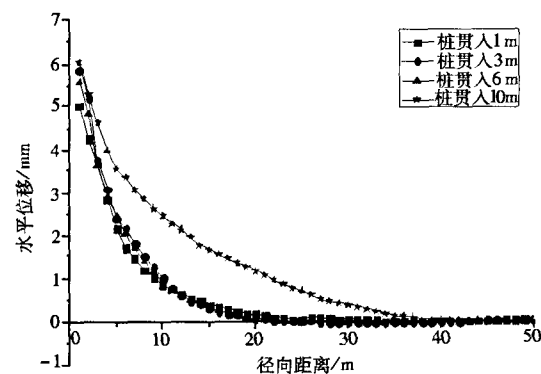
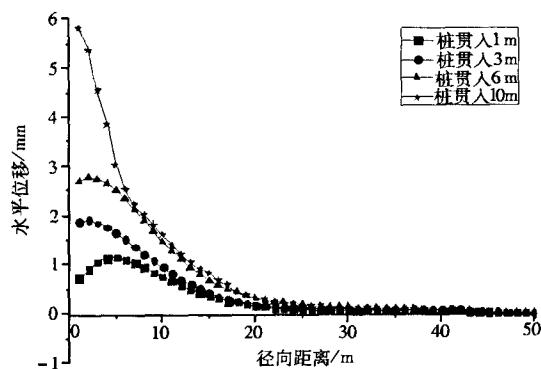
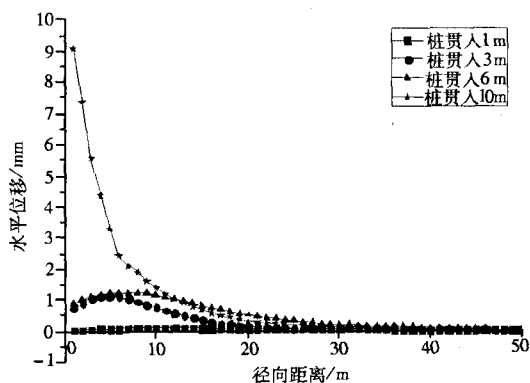
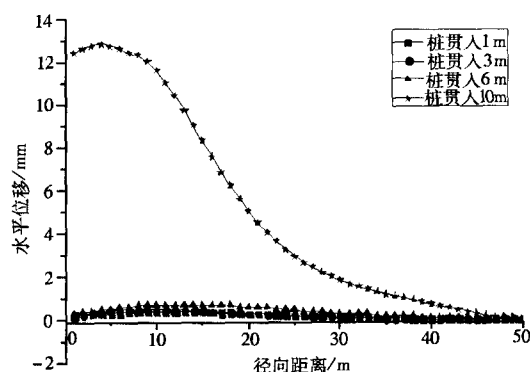
图4 沉桩过程中 $z=0$ 处土体水平位移Fig. 4 Radial displacement at $z=0$ during pile sinking图5 沉桩过程中 $z=1$ m处土体水平位移Fig. 5 Radial displacement at $z=1$ m during pile sinking图6 沉桩过程中 $z=3$ m处土体水平位移Fig. 6 Radial displacement at $z=3$ m during pile sinking

图8为沉桩过程中土体深度10 m处水平位移的变化曲线。分析得出,当桩贯入到6 m时,桩底部土体水平位移很小,最大值不到1.0 mm;而当贯入到6 m时,水平位移变化量也不大,不到1.5 mm;贯入完成时底部土体水平位移显著增大,最大值达到12.9 mm,说明随着桩贯入深度的

图7 沉桩过程中 $z=6$ m处土体水平位移Fig. 7 Radial displacement at $z=6$ m during pile sinking图8 沉桩过程中 $z=10$ m处土体水平位移Fig. 8 Radial displacement at $z=10$ m during pile sinking

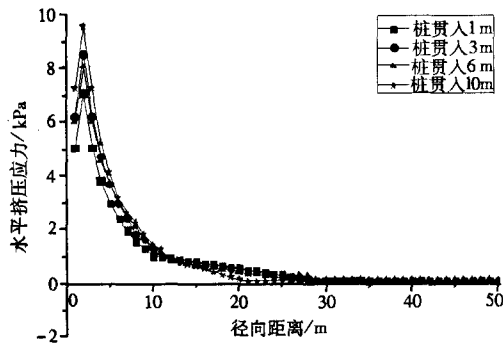
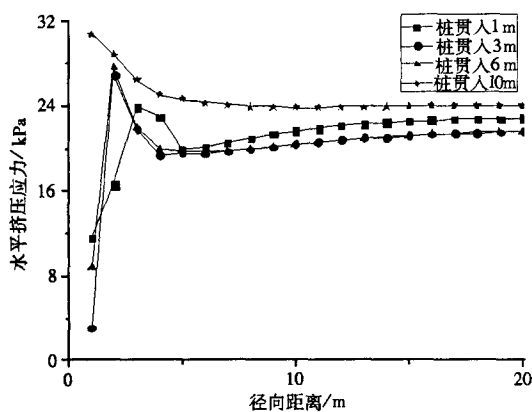
增加,对深部土体的影响明显。

同时,根据有限元模拟结果,桩贯入过程中,水平位移最大值出现于桩端以下大约2 m(5 d)处,桩贯入过程中挤土效应对土体水平位移的影响范围为桩端以下20 d(约8 m处)左右。

2.5 土体应力分析

在静压沉桩过程中,水平挤压应力是产生挤土效应的主要原因,也是导致先沉桩偏位或倾斜、周围地下管线以及建筑物变形甚至破坏的主要原因。为此,这里主要分析沉桩过程中土体受到的水平挤压应力。

图9为 $z=0$ m处土体所受的水平挤压应力。可以看出:(1)随着桩的贯入,紧靠桩边处土体水平挤压应力增加较大,在距桩较远处约2 m处应力值达到最大,达9.55 kPa,此后水平挤压应力沿径向距离呈对数衰减。(2)桩贯入深度越深,桩周地表处水平挤压应力值越大,且随径向距离的

图9 沉桩过程中 $z=0$ 处土体水平挤压应力Fig. 9 Radial compressive stress at $z=0$ during pile sinking图10 沉桩过程中 $z=2\text{ m}(5\text{ d})$ 处土体水平挤压应力Fig. 10 Radial compressive stress at $z=2\text{ m}(5\text{ d})$ during pile sinking

增加衰减现象也越明显。图10为 $z=2\text{ m}(5\text{ d})$ 处土体所受的水平挤压应力。桩在贯入过程中,水平应力均先逐渐增大,而后逐渐衰减。可见,对距离桩较远处土体应力影响较大,最大应力达28 kPa。当桩完全贯入时达到最大,为31 kPa,且随着径向距离的增加而减弱。

3 成层土与均质土下静压沉桩的比较

实际上,土体一般是分层的。静压沉桩时,桩在土体分层处,土体位移变化剧烈,静压桩易在此处开裂、弯折。为此,本文分析了成层土条件下静压沉桩的挤土效应,并与上述均质土条件下的计算结果作比较分析。其中,成层土的有关指标参数如表2所示。

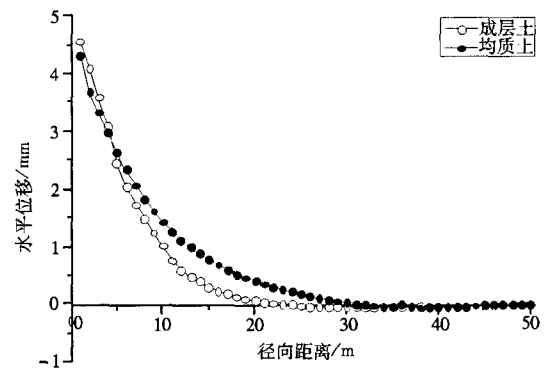
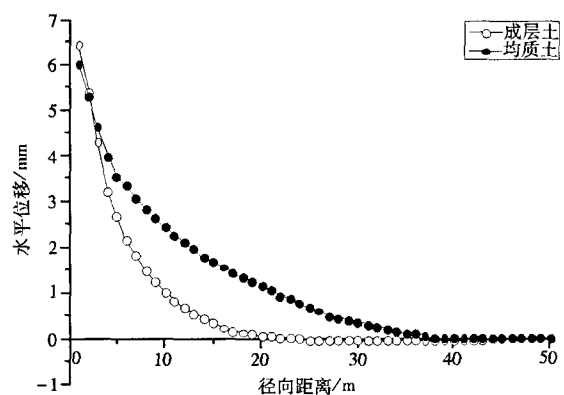
表2 成层土的计算参数

Table 2 The calculate parameters of layer soil

计算参数	土性		
	粘性土	砂土	粘性土
厚度/m	6	4	>12
重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18	20	18
弹性模量/Mpa	2	20	4
泊松比	0.38	0.3	0.38
摩擦系数	0.34	0.7	0.34
粘聚力 c/kPa	26	0	28
摩擦角 $\varphi/(\circ)$	14.4	30	20

3.1 土体位移对比

为便于比较分析,这里给出了成层土和均质土中桩完全贯入($z=10\text{ m}$)时土体位移的变化曲线。图11~13分别为地表处、土体深度1 m和3 m处土体水平位移的变化曲线。可看出,沉桩附近区域成层土体水平位移要稍大于均质土情况,总的来看,两者相差不大,且随着深度的增加,沉桩较远区域的土体位移变化不大,说明成层土对较浅土体位移的影响主要在沉桩附近区域。

图11 $z=0$ 处土体水平位移Fig. 11 Radial displacement at $z=0$ 图12 $z=1\text{ m}$ 处土体水平位移Fig. 12 Radial displacement at $z=1\text{ m}$

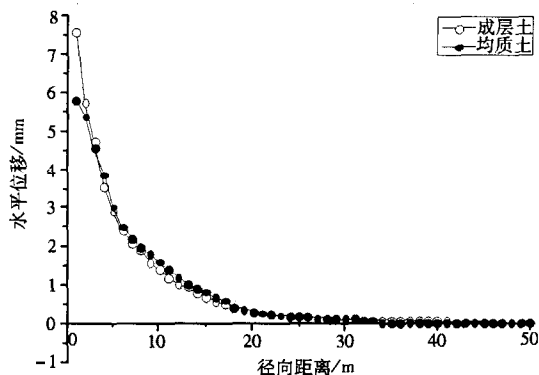
图 13 $z = 3$ m 处土体水平位移Fig. 13 Radial displacement at $z = 3$ m

图 14 为土层交界处($z = 6$ m)水平位移的变化曲线。可以看出,成层土体水平位移要小于均质土的水平位移,距桩较近处两者相差较大,离桩越远两者水平位移急剧衰减,且大小非常接近,这可能是硬土层限制了土体的水平位移,导致位移变化较小。

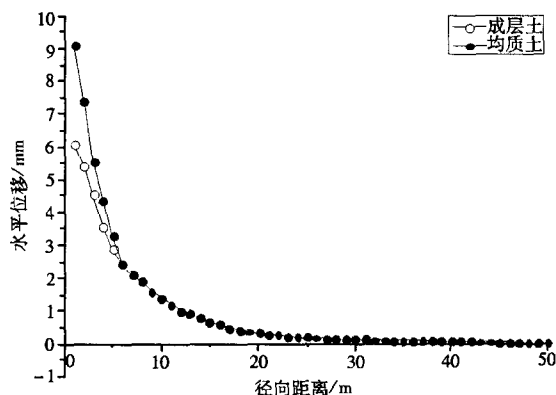
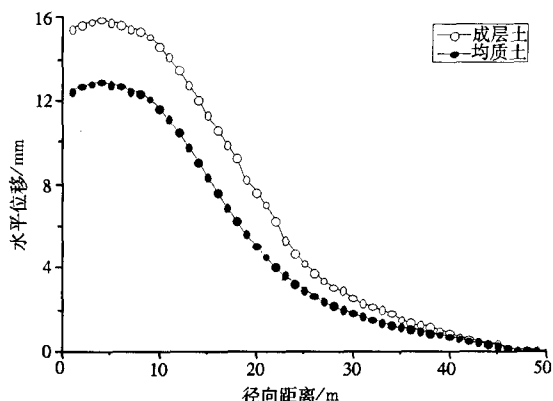
图 14 $z = 6$ m 处土体水平位移Fig. 14 Radial displacement at $z = 6$ m

图 15 为土层深度 10 m(桩底)的水平位移。可以看出,成层土体水平位移显著大于均质土情况,在沉桩较近区域,位移均较大,且随着径向距离的增加,其位移先略有增大然后成对数形式衰减。这主要是因为桩全部贯入时深部土体被挤开,产生正位移,另外砂层与桩的摩阻力较大,随着桩完成贯入硬土被桩向下拖带,硬土被挤压进下层土中,致使成层土体水平位移显著增大。

3.2 土体应力对比

对于距桩 3 d 处土体的水平挤压应力,成层土的水平挤压应力要大于均质土情况,挤压应力的最大值位于硬土层中上部(约 $z = 7$ m 处),两者相差可达到 51 kPa。

图 15 $z = 10$ m 处土体水平位移Fig. 15 Radial displacement at $z = 10$ m

4 防治措施

实际工程中,如遇有土层分布上硬下软或中间夹硬层情况,要引起足够的重视^[7],可采用以下措施加以预防^[8-9]:(1)预钻孔穿透夹硬层,取土以释放压桩时产生的过大的挤压应力;(2)设置排水砂井,消除压桩引起的超静孔隙水应力;(3)加强现场监测,实行动态施工。

5 结语

本文基于有限元方法,采用位移贯入法,研究静压沉桩的挤土效应,得到了一些有益的结论:

(1)对于均质土情况,沉桩过程中,随着径向距离的增加,土体水平位移呈对数衰减;随着桩的每次贯入,水平位移均先增大到一定值后又随着深度的增加而逐渐减小;桩全部贯入时桩底土体水平位移显著增大。

对于土体受到水平挤压应力,距桩较近处(约 5 d 处)土体水平挤压应力最大,此后水平挤压应力沿径向距离呈对数衰减;桩贯入深度越深,桩周地表处水平挤压应力值越大,且随径向距离的增加衰减也越快;桩在贯入过程中,水平应力在桩附近区域较大,待桩完全贯入时,其水平挤压应力随着径向距离的增加呈现减小的趋势。

(2)对于成层土情况,当深度较大时,软硬土层交界处土体水平位移变化剧烈,明显大于均质土情况时产生的水平位移。由于硬土层的存在,土体水平位移受到约束,其上部土体水平影响范围有所减小,下部土体水平影响范围有适当增加。同时,成层土的水平挤压应力要远大于均质土情

况,挤压应力的最大值位于硬土层中上部。

因此,在成层土地基中的软硬土层交界处,由于土体力学性质的差异,静力压桩时土体位移加大,土中水平挤压应力变化剧烈,发生应力间断,

造成已压入桩侧向受力不均。群桩施工时,应力累加,土层交界处易造成桩体弯折、断桩、灌注桩混凝土离析等质量问题。实际工程中,可采用预钻孔等措施加以防治。

参考文献:

- [1] 张明义,邓安福,干腾君. 静力压桩数值模拟的位移贯入法[J]. 岩土力学,2003,24(1):113-117.
- [2] 唐世栋,李阳. 基于 ANSYS 软件模拟桩的挤入过程[J]. 岩土力学,2006,27(6):974-976.
- [3] 龚文标. 剪胀角对静压桩挤土效应的影响分析[J]. 盐城工学院学报:自然科学版,2007,20(4):63-67.
- [4] 梅国雄,宋林辉,宰金珉,等. 静压沉桩挤土机理探讨及有限元分析[J]. 计算力学,2008,25(5):660-664.
- [5] 计宏,卢文晓. 静压桩挤土扩孔的有限元数值模拟研究[J]. 西安科技大学学报,2009,29(6):722-725.
- [6] 毕庆,肖昭然,丁树云,等. 静压桩压入过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2):74-77.
- [7] 龚晓南. 应重视上硬下软多层地基中挤土桩挤土效应的影响[J]. 地基处理,2005,16(3):63-64.
- [8] 李富荣,王照宇. 沉桩挤土效应对工程环境的影响及研究综述[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(2):31-35.
- [9] 王冲,李巨龙,罗开艳,等. 应力释放孔对静压桩沉桩挤土效应的影响研究[J]. 建筑科学,2012,28(5):34-37.

Finite Element Analysis of Static Pressure Pile - Sinking Based on the Displacement Penetration Method

LI Fu-rong^{1,2}, ZHANG Yan-mei³, YANG Bin², NIE Jun-qi²

- (1. Yancheng Zhiyuan Construction Quality Testing Co., Ltd., Yancheng Jiangsu 224055, China;
2. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
3. Jiangsu Tongzhou Foundation Engineering Co., Ltd., Nantong Jiangsu 226300, China)

Abstract: Based on ADINA, using the displacement penetration method, the complete process of successive penetration of static pressure pile - sinking was simulated with finite element method. This paper studied change law of displacement and the stress caused by static pressure pile in homogeneous soil. The paper also comparsen between the displacement and stress caused by static pressure pile in layered soil. The finite element analysis showed that with radial distance increasing, the horizontal displacement the compressive stress of the soil took a logarithmic decay in homogeneous soil, and was related to the depth of penetration of the pile. The effect of layered soil was larger than the homogeneous soil, and the effect was mainly reflected in that the soil's displacement increases. Compression stress changes rapidly and discontinues at the boundary of soft soil and hard soil in layered soil. The pile is easy to crack and bend in practical engineering. At last, the methods for prevention are put forward.

Keywords: displacement penetration method; static pressure pile - sinking; finite element; homogeneous soil; layered soil

(责任编辑:沈建新)