

螺旋挤土桩钻头优化分析

李志毅^{1,2}, 刘 钟^{1,2}, 赵琰飞^{1,2}, 张慧东^{1,2}

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 首先基于通用非线性有限元软件 ADINA 对螺旋挤土桩钻头进行钻进成孔过程的三维有限元建模, 研究钻头型式、螺距、土体等参数在同等条件下对钻机动力头输出扭矩的影响, 然后通过模型钻头的钻进成孔模拟试验对螺旋挤土桩钻头进行进一步分析, 以期得到所需成孔扭矩最小的优化钻头, 最后通过短螺旋挤土灌注桩的现场成孔试验验证了数值仿真和模型试验结果的正确性. 所得结论为螺旋挤土桩钻头的优化设计提供依据.

关键词: 螺旋挤土桩; 螺旋挤土桩钻头; ADINA 软件; 优化分析

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Optimization Analysis on Drill Auger of Soil Displacement Screw Pile

LI Zhiyi^{1,2}, LIU Zhong^{1,2}, ZHAO Yanfei^{1,2}, ZHANG Huidong^{1,2}

(1. Central Research Institute of Building Construction, MCC Group Co. Ltd., Beijing 100088, China; 2. China Jingye Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Based on ADINA, a 3D auger-soil FEM model was developed to study the impact of pattern of the drill auger, screw-pitch and the soil parameter on the required torque. Secondly, the model tests of auger squeezing into cement-soil mixture were done to get the optimized drill auger with least torque. At last, on-site test result of drill auger squeezed into ground verified the correctness of the numerical analysis and model test. The conclusions in this paper can provide a basis for optimal design of drill auger.

Key words: soil displacement screw pile; drill auger; ADINA software; optimization analysis.

短螺旋挤土灌注桩(soil displacement screw pile, SDS 桩)是通过螺旋挤土桩钻机施加扭矩及竖

向力, 利用特制的螺旋挤土桩钻头将桩孔中的土体完全挤入桩周, 并向挤扩后的桩孔中压灌混凝土, 最终形成圆柱形桩^[1]. 这种挤土灌注桩具有技术、环保、成本方面的优势, 已在国外工程界广泛应用^[2].

在螺旋挤土灌注桩领域, 20 世纪中期西欧开发了 Fundex 桩和 Atlas 桩^[3]; 在螺旋挤土预制桩领域, 德国开发了 Europile^[4], 日本开发了 AJ Pile 并将其投入工程应用^[2]. 到 20 世纪 90 年代, 出现了新一代短螺旋挤土灌注桩, 其中较为著名的有比利时的 Ω Pile 和 Dewaal Pile^[5], 英国的 TSD System^[6], 美国的 DD Pile^[7]、澳大利亚的 V-pile^[8] 和法国的 T pile 等. 近年来, 德国宝峨、意大利土力也先后开发出性能更加优越的用于螺旋挤土桩施工的桩工钻机^[9].

目前, 国内还没有成功的完全挤土型 SDS 桩的工程实例. 为此, 中冶建筑研究总院有限公司于 2006 年在国家财政部及住房和城乡建设部的资助下开展了短螺旋挤土灌注桩新技术的研究, 完成了具有自主知识产权的 SDS 桩工法、特种钻具和钻机设备^[10-11].

实施 SDS 桩的螺旋挤土桩钻头是螺旋挤土桩工法的关键所在, 该钻头由中空钻体及外围螺旋叶片组成^[11], 施工时, 由钻机对钻头施加足够的扭矩和轴向压力使其旋转向下直到设计深度. 因此, 钻机输出扭矩是 SDS 桩施工中的关键指标, 在相同深度、相同地质条件下, 所需成孔扭矩最小的螺旋挤土桩钻头最优.

本文采用数值模拟与模型试验相结合的方法对螺旋挤土桩钻头进行优化, 以期得到所需成孔扭矩最小的最优钻头. 首先基于通用非线性有限元软件 ADINA, 建立螺旋挤土桩钻头钻进成孔的三维有限元模型, 对不同型式的钻头进行优化分析, 研究钻头型式、螺距、钻进土体性质等因素对钻机输出扭矩的影响; 然后, 采用模型钻头的钻进成孔模拟试验进一步对螺旋挤土桩钻头进行优化分析; 最后通过现场

收稿日期: 2010-05-18

基金项目: 国家财政部施工新技术研究与开发项目(财企【2006】376 号); 住房和城乡建设部科学技术项目(2008-K2-40)

第一作者: 李志毅(1977—), 女, 高级工程师, 工学博士, 主要研究方向为桩基及土动力学. E-mail: zhiyili1@sohu.com

短螺旋挤土灌注桩的成孔试验验证了数值分析和模型试验的正确性. 所得结论为螺旋挤土桩钻头的设计提供了理论依据.

1 螺旋挤土桩钻头有限元优化分析

1.1 有限元建模

为研究不同的钻头型式及其几何参数对成孔扭矩的影响,在 ADINA 环境下建立螺旋挤土桩钻头钻进成孔过程的三维有限元模型. ADINA 是强大的动力非线性有限元分析软件,但前处理功能较弱,为此,首先在 Solid Works 环境下形成螺旋挤土桩钻头几何体,通过连接端口导入 ADINA 系统,在 ADINA 工作环境施加材料属性,并建立钻头-土体接触模型(见图 1),进行计算分析.为简化计算,考虑模型的对称性,土体取 1/4 模型.这样,计算扭矩的 4 倍即可近似为钻头钻入某深度所需的成孔扭矩.由于钻头的刚度远大于土体,建模时对钻头施加刚性约束,作为无位移的刚体处理.钻头采用壳单元,土体采用 8 节点立方体单元,局部细化.桩土界面采用库伦摩擦接触单元模拟桩土的相对滑动特性.摩擦系数及摩擦特性在接触组中设置.

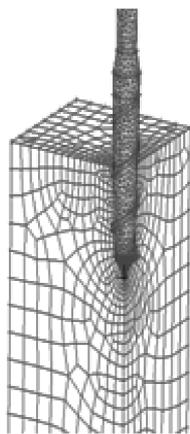


图 1 钻头-土体模型
Fig.1 Auger - soil model

对钻头下旋贯入成孔过程中所需的扭矩通过位移贯入法施加,即通过对钻头施加绕 z 轴旋转的角度位移实现钻头的下旋贯入过程,角度位移荷载分级施加于钻头.

由于螺旋挤土桩钻头的下旋钻入过程属于大变形成态问题,而有限元方法是基于连续介质的有限变形理论,难以模拟螺旋挤土桩钻头的连续钻进过程.为此,需对螺旋挤土桩钻头的下旋贯入过程实施简

化,采用考虑桩土相互作用及位移贯入的有限单元法,分段模拟钻头的下旋贯入过程,具体方法为:为求得钻头钻入土体 5 m 时的成孔扭矩,首先假定钻头已处在土体 5 m 深度位置,建立此状态的有限元模型,然后给钻头施加一定的旋转角度位移荷载,使钻头向下钻进一定深度,并以钻头钻进某深度时的扭矩为钻头钻入土体 5 m 处的成孔扭矩.其他深度的成孔扭矩均由此法求得.

1.2 计算结果分析

1.2.1 钻头基本型式对成孔扭矩的影响

为讨论钻头型式对成孔扭矩的影响,对图 2 所示的 3 种钻型进行数值模拟,土体、钻头计算参数及钻头详细尺寸分别见表 1~2. 建立模型时,土体取 1/4 模型,水平计算范围取 $4.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$,深度取 15.0 m.

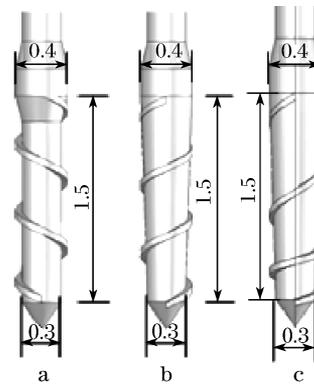


图 2 3 种螺旋挤土桩钻头型式 (单位: m)

Fig. Three auger types of soil displacement screw pile (unit:m)

表 1 有限元模型计算参数

Tab.1 Calculation parameters of Finite Element Model

对象	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
土体	20	0.300	1 850
钻头	200 000	0.167	7 800

表 2 不同钻头的几何参数及成孔直径

Tab.2 Geometric parameters and piles diameters of augers

编号	芯管形式	螺距/mm	成孔直径/mm
a	圆柱	500	400
b	倒圆台	500	400
c	倒圆台	300,500,700	400

图 3 为 3 种钻头在匀质土体条件下的成孔扭矩-钻深曲线,由图可以看出,a,b,c 3 种钻型在钻头的挤扩部分全部进入土体前,所需成孔扭矩随钻入深度的增加近似呈线性增大;当钻头挤扩部分全部进入土体后,所需成孔扭矩随钻深增加的幅度不再明显.在地层条件、成桩直径、钻深相同的情况下,a,

b,c 钻头的成孔扭矩依次增大,也即在等螺距条件下,圆柱形芯管钻头的成孔扭矩小于倒圆台形芯管钻头的成孔扭矩;在芯管形状相同条件下,等螺距钻头的成孔扭矩小于变螺距钻头的成孔扭矩。

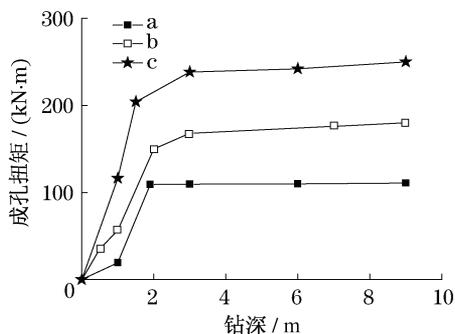


图3 计算的成孔扭矩-钻深关系

Fig.3 Computed pore-forming torque curves with drilling depth

1.2.2 钻头螺距变化对成孔扭矩的影响

除钻头型式外,钻头螺距也对成孔扭矩具有较大影响.这里以 b 型钻头为例,考虑不同土层条件下螺距变化对成孔扭矩的影响,钻头计算参数见表 2.

土体弹性模量分别取 10,20,30 MPa,其余计算参数取表 1 所示数据、钻深为 9 m 时的成孔扭矩随螺距的变化曲线如图 4.从图可以看出,钻头所需成孔扭矩与螺距大小有密切关系,当螺距接近成孔直径时,所需成孔扭矩趋于最小,螺距较优.此外,成孔扭矩随螺距的变化规律也与土体性质有关,对于高弹性模量土层,成孔扭矩随螺距变化更为敏感,在螺距等于 450 mm,即约 1.1 倍成孔直径时,成孔扭矩最小.对于低弹性模量土层,成孔扭矩随螺距变化影响不明显,在螺距为 350~450 mm 范围内,即约为 0.9~1.1 倍成孔直径时,成孔扭矩达到最小值,也即在低弹性模量土层中,所需成孔扭矩较小的螺距范围较大.但总体上,螺距范围在成孔直径附近时,所需成孔扭矩最小.从图 4 还可看出,在同样成桩直径、成桩深度时,土层越硬所需成孔扭矩越大.

1.2.3 钻头螺旋段长度对成孔扭矩的影响

为研究螺旋挤土桩钻头螺旋段长度对成孔扭矩的影响,这里以 b 类等螺距短螺旋钻型为例,钻头螺旋段长度分别取 1.0,1.5,2.0 和 2.5 m,其余尺寸不变,螺距取 300 mm,螺旋圈数随螺旋段长度的增加而增加,土体参数见表 1.图 5 为钻头钻深 9.0 m、成孔直径 400 mm 时成孔扭矩随钻头螺旋段长度的变化曲线.可以看出,成孔扭矩随钻头螺旋段长度的增加逐步增加.因此,在短螺旋挤扩钻头设计时应针对

头螺旋段长度加以限制.但考虑螺旋挤土桩钻头的成桩工艺、成桩机理及挤土效应,钻头的螺旋段长度要保持一定量值.

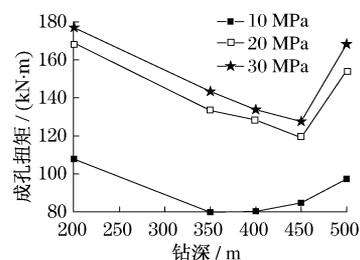


图4 计算的成孔扭矩-螺距变化
Fig.4 Computed pore-forming torque curves with pitch

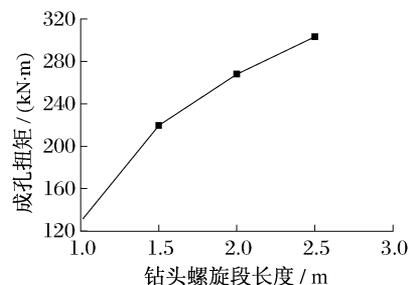


图5 计算的成孔扭矩-钻头螺旋长度关系
Fig.5 Computed pore-forming torque curves with screw length of drill auger

2 螺旋挤土桩钻头优化模型试验

2.1 模型试验方案

为进一步优化螺旋挤土桩钻头并验证数值仿真结果,设计加工了不同型式的模型钻头进行钻进成孔试验.部分钻头型式如图 6 所示,模型钻头成孔直径均为 30 mm,螺距在 10~20 mm 之间,叶片有矩形和梯形 2 种形式,中心轴采用圆柱形和倒圆台形 2 种.

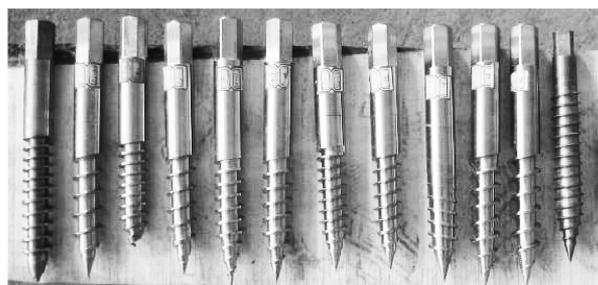


图6 模型钻头型式
Fig.6 Types of model auger

为得到合适的钻入介质,曾选择塑料、橡胶、木

材、水泥拌合土作为钻入介质进行螺旋挤土桩钻头的钻入成孔试验. 试验发现, 掺入质量分数为 15% 水泥的粉质粘土拌合物既能实现钻头钻入成孔、挤扩效果, 且拌合土表面没有明显裂缝, 是比较合适的钻入介质. 图 7 为钻头在水泥拌合土介质中的钻进试验照片.



图 7 模型钻头钻入水泥土介质试验照片
Fig. 7 Photo of model auger drilling into cement-soil mixture

2.2 模型试验结果分析

2.2.1 钻型分析

为研究钻型与成孔扭矩之间的关系, 选取表 3 所示的 3 种模型钻头在水泥土介质中进行钻进成孔试验. 其中, A, B 型钻型芯管为圆柱体, C 型钻型芯管从下到上为圆台体, 圆台体上、下直径分别为 30, 14 mm. 从图 8 的钻进深度-成孔扭矩曲线可以看出, 3 种螺旋挤土桩钻头在螺旋段全部进入土体前, 成孔扭矩与钻深呈明显的递增趋势; 在螺旋段全部进入土体后(螺旋段长 110 mm), 递增趋势减缓. 其中 C 钻头的成孔扭矩大于 A, B 钻头的成孔扭矩, 也即相同成孔条件下, 圆台形芯管钻头的成孔扭矩大于圆柱形芯管钻头的成孔扭矩.

表 3 模型钻头几何尺寸

Tab. 3 Geometric parameters of model augers

编号	芯管型式	芯管直径/mm	叶片型式	螺距
A	圆柱	16	矩形	14
B	圆柱	16	梯形	14
C	倒圆台	14~30	梯形	14

2.2.2 螺距分析

为研究螺距对钻头成孔扭矩的影响, 选取表 4 所列的螺距为 10, 12, 14, 16, 18 mm 的 5 种模型钻头进行钻入成孔试验. 图 9 为 4 种钻型的钻进深度-成孔扭矩曲线, 图 10 为 5 种钻型在钻深为 450 mm 时的成孔扭矩随螺距的变化曲线. 从图 9 和图 10 的

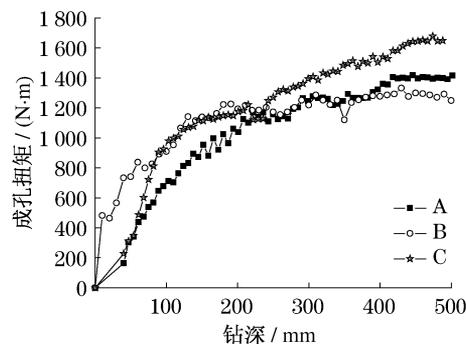


图 8 不同钻型的成孔扭矩-钻深

Fig. 8 Relationship between pore-forming torque curves with drilling depth for different augers

表 4 模型钻头几何尺寸

Tab. 4 Geometric parameters of model auger

编号	芯管型式	芯管直径/mm	叶片形式	螺距/mm
1	圆柱	16	梯形	10
2	圆柱	16	梯形	12
3	圆柱	16	梯形	14
4	圆柱	16	梯形	16
5	圆柱	16	梯形	18

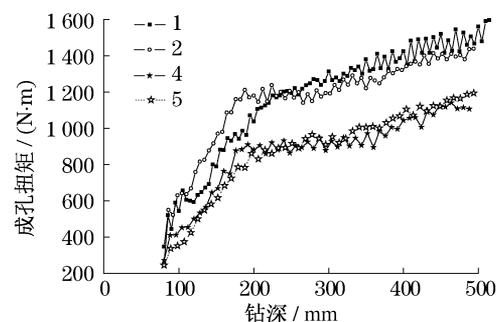


图 9 不同螺距钻型的成孔扭矩-钻进深度

Fig. 9 Relationship between pore-forming torque curves with drilling depth of augers with different pitches

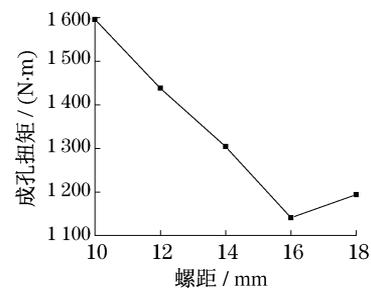


图 10 钻深 450mm 时的成孔扭矩-螺距

Fig. 10 Relationship between pore-forming torque curves with pitch at 450mm drilling depth

曲线可以看出, 螺距变化对钻头所需成孔扭矩有较大影响, 但螺距对扭矩的影响并不是单纯的递增或递减, 而是呈现近似抛物线, 该趋势与前述数值分析的结果较为吻合. 从图 10 可以看出, 在这 5 种钻型

中,螺距为 16 mm 的钻头在钻进过程中的成孔扭矩最小,该螺距为成孔直径的 0.53 倍,这与数值分析结果有差别,究其原因可能是模型试验的几何、物理相似条件造成的。

3 螺旋挤土桩钻头现场钻进成孔试验

为校核数值计算和模型试验的正确性,在北京某工地进行了螺旋挤土桩钻头现场成孔试验.试验场地地表下 14.0 m 深度内土层较为均匀,为粉质粘土.钻进成孔过程中,钻头基本保持匀速下钻.图 11 为现场成孔扭矩-钻深试验曲线,从图可以看出,在螺旋挤土桩钻头的挤扩部分全部进入土体前(钻尖到挤扩体上部共 2.3 m),所需成孔扭矩随钻入深度的增加近似线性增大,当钻头挤扩部分全部进入土体后,所需成孔扭矩随钻深增加的幅度不再明显.该曲线与数值计算及模型试验得到的成孔扭矩-钻深曲线比较吻合,在一定程度上证明了数值计算与模型试验的正确性。

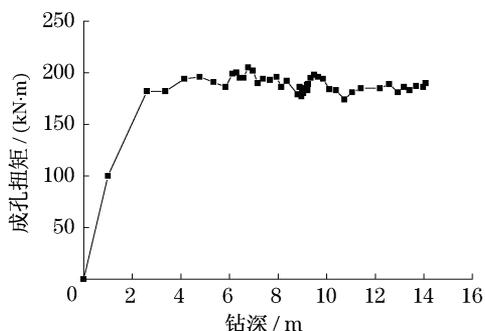


图 11 现场成孔扭矩-钻深试验

Fig.11 Field test curves of pore-forming torque with pitch

4 结论

采用数值模拟与模型试验相结合的手段对影响螺旋挤土桩钻头成孔扭矩的因素进行分析,为螺旋挤土桩钻头的优化设计提供了依据.通过现场短螺旋挤土灌注桩的钻进成孔试验验证了数值仿真与模型试验的正确性,得到如下结论:

(1) 螺旋挤土桩钻头全部进入土体前,所需成孔扭矩随钻入深度的增加近似线性增大,当钻头全部进入土体后,所需成孔扭矩随钻深增加的幅度不再明显。

(2) 螺距大小对钻头所需成孔扭矩有重要影响,且螺距范围在成孔直径附近时所需成孔扭矩最小。

(3) 相同钻进成孔条件下,圆台形芯管钻头的成孔扭矩大于圆柱形芯管钻头的成孔扭矩。

(4) 在成桩直径、钻深相同的情况下,钻头螺旋段越小,所需成孔扭矩越小.综合考虑螺旋挤土桩工法的挤土效果,钻头螺旋段长度选择 1.5~2.0 m 较为适宜。

参考文献:

- [1] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1995.
Pile Foundation Engineering Handbook Committee. Pile foundation engineering handbook [M]. Beijing: China Building Industry Press,1995.
- [2] 沈保汉. 桩基与深基坑支护技术进展[M]. 北京: 知识产权出版社,2006.
SHEN Baohan. Pile and deep foundation pit of technological advances[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2006.
- [3] De Cock F, Imbo R. Atlas screw pile: a vibration-free, full displacement, cast-in-place pile [J]. Transportation Research Record,1994,1447(10): 49.
- [4] Dirk Verstoep B V. Europile, technical information [R]. [S.l.]:Pfleiderer Verkehrstechnik GmbH & Co. KG,1997.
- [5] Bottiau M, Cortvrintd G. Recent experience with the Omega-pile [C]//5th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations. Bruges:[s. n.],1994:111 - 117.
- [6] Felix Cheng, Peter Mitchell, Slav Tchepak. Performance of non-displacement and displacement piling, Adelaide convention centre, south Australia [C]// Proceedings of 9th International Conference on Piling and Deep Foundations. Nice: [s. n.], 2002:383 - 386.
- [7] Morgan Nesmith W, Burton P, McDonnell. Use of displacement piles in fine-grained soils [C]// Conference Proceedings of 3rd Annual and 11th International Conference on Deep Foundations. New York:[s. n.],2008:344 - 344.
- [8] Brettmann T, Nesmith W. Advances in auger pressure grouted piles: design, construction and testing [C]// Proceedings of Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress. Austin:[s. n.], 2005:262 - 274.
- [9] Brown Dan A, Dapp Steven D. Design and construction of continuous flight auger piles [R]. Columbia: GeoSyntec Consultants,2007.
- [10] 刘钟,张义,李志毅,等. 新型螺旋挤土桩(SDSP)技术[C]//第十届全国地基处理学术讨论会论文集. 南京:东南大学出版社,2008:131 - 136.
LIU Zhong, ZHANG Yi, LI Zhiyi, et al. A new pile technology of soil displacement screw pile (SDSP) [C]// Tenth National Symposium Proceedings of Foundation Treatment. Nanjing: Southeast University Press,2008:131 - 136.
- [11] 刘钟,李志毅,卢璟春. 短螺旋挤土灌注桩(SDS桩)施工新技术[C]//第九届全国桩基工程学术会议论文集. 北京:中国建筑工业出版社,2009:491 - 499.
LIU Zhong, LI Zhiyi, LU Jingchun. A new construction technology of short soil displacement screw pile(SDSP)[C]// Proceedings of the 9th National Symposium on Pile Foundation. Beijing: China Architecture and Building Industry Press,2009:491 - 499.