

DOI: 10.11779/CJGE2021S2038

软土地区倾斜静力压桩法沉桩机理研究及应用

刘永超^{1,2}, 卫超群¹, 陆鸿宇², 李刚²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津建城基业集团有限公司, 天津 300301)

摘要: 专用设备及施工经验的缺乏导致倾斜桩在城市岩土工程中应用较少。首先介绍课题组倾斜静力压桩机的研制历程并与传统设备进行对比, 提出了倾斜静力压桩法的设备选型、桩体强度的考量因素及压桩力的控制公式, 然后对倾斜静力压桩法的沉桩机理进行了研究, 通过现场斜向、竖直两个方向的静力触探试验、压桩力监测结果得出斜向静力触探贯入阻力、压桩力均略大于竖直向, 且规律类似, 最后结合工程实际, 对比传统支护方案表明倾斜静力压桩法具有低成本、高效率、环保等优点, 适用于多数软土地区城市岩土工程。

关键词: 倾斜桩; 静压法; 静力触探; 施工

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0158-04

作者简介: 刘永超(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计与施工技术研究与管理。E-mail: chao96521@vip.sina.com。

Sinking mechanism of inclined static piling method and its application in soft soil areas

LIU Yong-chao^{1,2}, WEI Chao-qun¹, LU Hong-yu², LI Gang²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Jiancheng Foundation Industry Group Co., Ltd., Tianjin 300301, China)

Abstract: Inclined piles are barely applied in urban geotechnical engineering with the absence of professional infrastructures and practice experience. The development process of the inclined static piling equipment of the authers' group is firstly introduced, and a comparison with the traditional static piling equipment is made. The relevant factors for equipment selection and pile strength of the inclined static piling method are put forward, and the control formula for the pile-pressing force is proposed. Secondly, the pile sinking mechanism of the inclined static piling method is investigated by monitoring the inclined and vertical CPT and static piling process. It is obtained that the resistance of CPT and the pile-pressing force in the inclined direction are slightly larger than those in the vertical direction, and the laws are similar. Finally, by combining with engineering practice and comparing with the traditional supporting scheme, the proposed method is more cost-effective, efficient and environmentally friendly to be employed in most urban geotechnical engineering.

Key words: inclined pile; static piling method; CPT; construction

0 引言

在软土地区, 基坑通常采用竖向支护结构加水平支撑的支护形式^[1], 对于大面积基坑及用于建设综合管廊的长条形基坑, 水平支撑的布置会限制施工空间, 支撑的施工和拆除也会增加成本, 延长工期, 造成资源浪费和环境污染。倾斜桩因其具有良好的抵抗水平荷载的能力、可减少成本和污染等优点而广泛应用于港口、桥梁、海上石油开采平台等工程中, 近年来国内外对倾斜桩的基坑支护性能也展开了讨论—Maeda等^[2]将钢板桩倾斜同时利用反压土进行砂土基坑支护, 基坑最大挖深达到9.6 m, 同时开展了基于工程实例的离心机试验, 结果表明斜桩的最大位移比直桩减

小30%, 支护效果良好; Seo等^[3]在海洋黏土中开展了挡土墙结合斜桩支护基坑模型试验, 结果表明斜桩使得支护结构的侧向位移降低约40%; 郑刚等^[4-5]利用Plaxis 3D对斜-直交替支护桩的工作机理进行了研究, 认为刚架效应、斜撑效应、重力效应使该支护方式具备良好抗倾覆和变形控制能力; 实际工程中, 郭建芝等^[6]采用单排倾斜人工挖孔桩对深基坑进行了支护, 结果表明斜桩挡土结构比竖桩挡土结构受力更合理, 能充分发挥材料的性能, 增大桩的悬臂高度, 方便施工, 节约造价; 余地华等^[7]利用钻孔灌注桩形成无支

撑前斜后直倾斜双排桩对深基坑进行支护发现倾斜桩表现出一定斜撑效应，并随开挖深度增大更加明显。由上可知，倾斜桩在基坑支护工程中有很好的应用前景，而静力压桩法因其避免了锤击打桩产生的振动、噪音和污染，施工时对桩无破坏、无冲击力、无污染等优点在城市岩土工程中应用广泛，但专用设备及施工经验的缺乏导致城市岩土工程中倾斜桩静压施工仍应用较少。本文首先介绍课题组倾斜静力压桩设备研制历程，并将其与传统压桩机进行对比，然后对多个倾斜桩项目的施工、勘察资料进行数据归纳梳理，分析了斜向与竖直静力触探、压桩力的关系，较为全面地介绍了倾斜桩静压施工各阶段可能发生的问题和对应解决方案，为倾斜桩静压施工提供经验参考。

1 倾斜静力压桩机的开发和实践

1.1 常规静压桩机的斜压法试验

课题组开发倾斜静力压桩机主要是为在城市岩土工程中实现环保、文明的倾斜桩静压施工。传统静压桩机主要适用于竖直预制桩，在没有适用于倾斜预制桩静压施工的设备的情况下，课题组将常规静力压桩设备移至人工斜坡上并充分利用设备液压支腿的最大极限反向支顶实现了 $0^\circ \sim 11^\circ$ 倾斜静力压桩法的工艺实践。这种方法成功实现了国内首个大吨位倾斜静力压桩法项目施工，基坑开挖后的实测数据验证了斜桩支护的科学性和先进性，但这种施工方法对设备会造成极大损伤，为更大程度地发挥倾斜桩的支护能力，大角度倾斜桩静压施工技术的研发意义重大。

1.2 首台边桩器斜桩机的开发

为实现上述目的，天津大学联合天津建城基业集团、广东力源液压机械有限公司研发了世界上首台竖直、大角度斜桩两用静力压桩机。该设备采用边压法，最大压桩力为 3000 kN ，可完成 $0^\circ \sim 20^\circ$ 多种桩型施工，突破了城市内预制桩静压施工倾角的限制，施工竖直桩时较传统静力压桩机所需工作面更小，但过大的压桩力会导致边桩斜静力压桩机失稳，存在桩沉入困难、浮机错位造成基桩破坏等问题。

1.3 大吨位斜桩机的研制和拓展

为扩大倾斜静力压桩机的适用范围及施工安全性，国内首台大吨位、大倾角倾斜静力压桩机研发落地，该设备采用中压法，可满足 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 多种桩型施工，最大压桩力达 6000 kN ，设备配备角度自动监控系统以实时监测沉桩过程中桩的施工角度。现行静压桩施工技术规程^[8]（后简称规程）中针对常规静压法施工特别提到，对于不同截面的桩应当使用对应的夹持机构以避免夹伤混凝土桩身。因此该压桩机配备了可调节夹桩器，支持多种混凝土或型钢构件的施工。两种静力压桩机相结合可实现90%以上倾斜常用预制

桩和型钢的施工，开发的系列倾斜静力压桩机施工精度高，有效推动了无支撑支护体系的推广和应用。

2 倾斜静力压桩法沉桩机理研究

2.1 倾斜静力压桩法需考虑的设备因素

采用静压法沉桩的场地在施工前必须对压桩力进行估算——沉桩阻力估算过大，选择吨位过大的静压桩机会造成浪费且对场地要求也更加严苛；沉桩阻力估算太小，选择吨位较小的静压桩机会导致竖直桩静压施工中出现桩机被抬起、压碎桩头、承载力小于设计要求等不良现象，对倾斜桩而言除上述病害外，还可能出现桩机侧移引起断桩，影响施工精度及安全性。

两只短船型履靴的重量约占总重的10%，工作时其与长船型履靴不能同时离开地面，无法提供反力，因此直桩压桩机的最大压桩力 P_{\max} 约为机重加配重总量的90%。图1为倾斜桩静压施工的受力示意图，图中 R_{si} 为桩侧阻力， R_p 为桩端阻力， G_p 为悬臂段桩重， T 为地基对桩的反力，下标1, 2代表压桩方向、与之垂直方向，上标V, H代表竖直、水平向。笔者提出了倾斜桩静力沉桩的水平和垂直压桩力应满足：

$$P_{\max}^V < 0.9G \quad , \quad (1)$$

$$P_{\max}^H < (0.9G - P_{\max}^V)\alpha \quad , \quad (2)$$

$$\alpha = 0.9\mu \quad , \quad (3)$$

式中， P 为压桩力， G 为静压桩机总重， α 为抗滑安全系数，下标 pro 代表施工过程， μ 为压桩机与地面的摩擦系数，可取 $0.3 < \mu < 0.8$ ，其余意义同上。

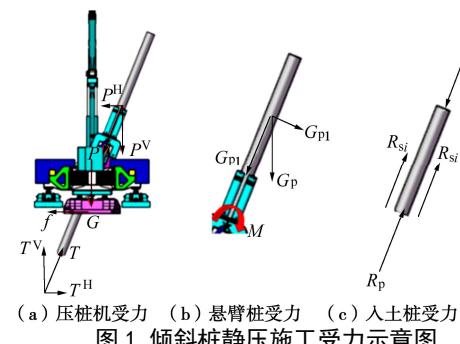


图 1 倾斜桩静压施工受力示意图

Fig. 1 Free body of static pressing piling of inclined pile

2.2 倾斜静力压桩法需考虑的桩体强度因素

施工前除需估算压桩力对静力压桩机进行合理选型外，桩体的强度验算也不可忽视。斜向静力压桩一般采用抱压法施工，如图1所示，在倾斜桩静压施工过程中夹持器以上的桩体处于悬臂状态，桩体自重会形成桩身弯矩，因此桩体除需满足支护设计要求的各项性能（抗弯性能、抗剪性能、抗裂性能等）外，还需考虑施工过程中的桩身弯矩是否影响桩体性能。

表1为常用的5种15 m20° 预制倾斜桩在中压法倾斜静力压桩机施工过程中的弯矩，由表1可知若施工

前不对桩体进行施工阶段桩身弯矩验算,部分桩型在施工阶段可能会产生损伤,影响桩体的支护效果。

表 1 常用规格预应力桩弯矩验算

Table 1 Moment check of common prestressed pile

规格/mm	最小抗裂弯矩 (kN·m)	桩身最大弯矩 (kN·m)
Φ400 圆桩	59	59.6
Φ500 圆桩	121	96.3
Φ600 圆桩	201	125.5
PHR 375*500	132	94.3
CPHR 375*500	136	95.8

与竖直桩施工不同,倾斜桩静压施工时,桩长、倾角、单位长度自重、夹持位置等因素的变化均会引起桩身弯矩、压力等改变继而限制最大压桩力,参照规程的要求,本文对倾斜静力压桩法提出强度折减因子并就压桩过程中的最大压桩力提出:

$$P_{j\max} < \psi_{jc}(f_c - \sigma_r)A_{p1}, \quad (4)$$

式中, $P_{j\max}$ 为抱压最大压桩力(kN), ψ_{jc} 为抱压工艺系数,取 $\psi_{jc}=0.95\sim1.00$, f_c 为桩混凝土轴心抗压强度设计值(kPa), A_{p1} 为桩身横截面面积(m^2), σ_r 为强度折减值(kPa),该值为因桩倾斜造成的夹持断面处的桩身轴向压力,由计算确定。

2.3 倾斜静力压桩法沉桩机理

国内已有的研究成果大都表明压桩阻力由桩端阻力和桩侧摩阻力组成,且与原位测试成果尤其是静力触探试验成果有一定的联系,因此在静压桩施工前应对场地进行静力触探试验,一来可以检测场地是否存在孤石、难以穿透的坚硬黏性土、密实的砂土、碎石土层等不适宜使用静压法进行沉桩的工程地质条件,再者可以对压桩力的估算提供关键指标。斜桩压桩力的估算与倾斜方向的土体工程性质息息相关,受场地、仪器及其它因素限制,倾斜静力触探的实现难度较大,因此总结传统静力触探与倾斜静力触探试验的关系可以实现二者之间的互相转化,为利用常规试验数据估算倾斜桩压桩力提供依据。为此笔者进行了现场试验,对现场实测竖直、倾斜静力触探试验、竖直、倾斜压桩力归纳总结。

图2为天津一工地静力触探试验结果,从图中可以看出,倾斜静力触探试验相较竖直静力触探试验具有滞后性,与倾斜桩到达相同深度需较大贯入长度相对应;除此之外,倾斜静力触探试验的侧阻及端阻大都大于传统静力触探试验,倾斜、竖直静力触探试验的阻力比值大都落在1~1.8范围内。图3为天津两场地斜桩、直桩各10根的压桩力均值,由图可以看出相同深度的倾斜桩的压桩力大都大于竖直桩,斜、直桩压桩力的比值大都落在1~1.9范围内,进一步印证了利用静力触探试验结果估算压桩力的合理性。数据均源于夹持部位的压桩力,桩端阻力有待后期进一步研究。

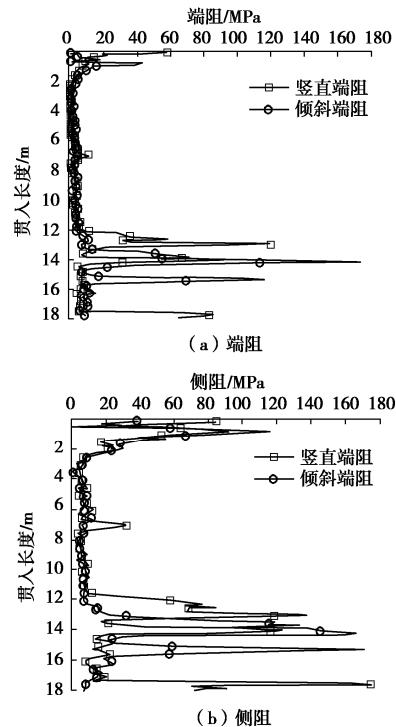


图2 倾斜、竖直静力触探试验结果对比
Fig. 2 Comparison of inclined and vertical CPT

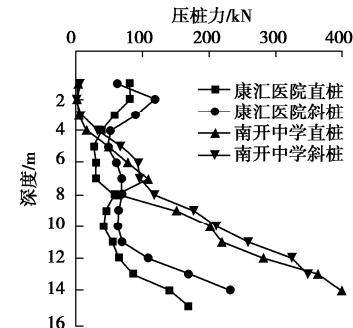


图3 斜、直桩压桩力对比
Fig. 3 Comparison of sinking-resistance between inclined and vertical piles

3 倾斜桩静压施工应用

倾斜静力压桩机在天津已完成项目16个,在建4个,主要分布于天津市区及滨海软土区,基坑开挖深度为4.5~14.7 m,其中3个超过10 m,支护形式大多采用斜直交错支护,其中1个矩形桩支护项目进行了型钢的等强度替换试验,结果表明在较硬土层采用工字钢或型钢替代钢筋混凝土预制桩进行支护,支护效果良好,为绿色回收基坑支护工程提供了参考。

为更好的评价该技术的优势和规律性,笔者对实际工程进行了模拟设计——对基坑开挖深度S为5.5,6.5,7.5 m,基坑面积P为80 m×40 m,120 m×60 m,160 m×80 m,200 m×100 m,支护方案①钻孔桩+支撑,②矩形桩+支撑,③斜直交替矩形桩组合后的36个基坑进行了模拟设计,对基坑的造价、工期和混凝土用量进行了量化分析,对比结果见图4。

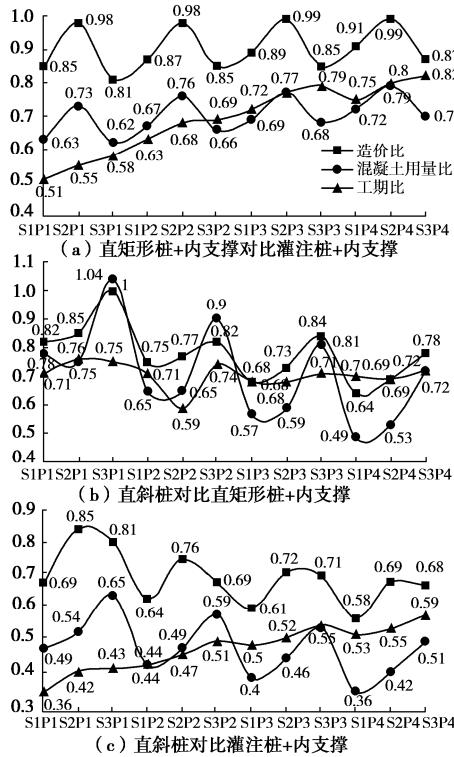


图 4 不同基坑尺寸和支护方式的造价、工期与混凝土用量的对比

Fig. 4 Comparison of cost, construction period and concrete consumption of different pit sizes and methods

图 4 (a) 为方案①与方案②的对比, 以方案①为基准, 对比表明预制化平均可节省投资、工期、混凝土约 10%, 31%, 30%; 图 4 (b) 为方案②与方案③的对比, 以方案②为基准, 对比表明直斜桩技术平均可节省投资、工期、混凝土约 22%, 29%, 29%; 图 4 (c) 为方案①与方案③的对比, 以方案①为基准, 对比表明直斜桩技术平均可节省投资、工期、混凝土约 30%, 51%, 51%。以上对比均未考虑泥浆排放等环境因素, 结果表明桩体预制化可以降低造价、缩减工期、减少混凝土用量; 基坑面积越大, 各方面优势越大; 斜直交替支护桩可以节省大量的材料和能源, 且无泥浆污染, 完美实现绿色施工。

4 结论与展望

(1) 倾角倾斜桩的静压施工可施工大角度倾斜桩外, 还具有施工安全、高效、精度高等优点。

(2) 倾斜静力压桩法在沉桩过程中不允许发生水平移动, 需核验施工阶段不同桩长、倾角、密度、夹持位置等情况下的桩身弯矩是否满足要求, 本文首次提出了设备及桩型选择的控制公式。

(3) 同一土层情况下, 斜向静力触探试验的贯入阻力一般是竖直静力触探试验贯入阻力的 1~2 倍, 斜向与竖直静压沉桩压桩力的规律与之相似。

(4) 倾斜桩组合基坑支护施工可显著节省工程造

价, 提前工期, 无泥浆污染, 实现绿色施工。

由于各地区工程地质条件相差较大, 所得规律的适用性还需进行更多试验加以验证, 为倾斜桩的静压施工提供有力支撑, 进一步推进城市岩土工程发展。

参考文献:

- [1] 朱星彬, 胡学军. 软土地区复杂深基坑支护结构设计与土方开挖[J]. 建筑技术, 2015, 46(9): 837 - 839. (ZHU Xing-bin, HU Xue-jun. Supporting structure selection and earth excavation of foundation pit in soft soil region[J]. Architecture Technology, 2015, 46(9):837 - 839. (in Chinese))
- [2] MAEDA T, SHIMADA Y, TAKAHASHI S, et al. Design and construction of inclined-braceless excavation support applicable to deep excavation[J]. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013, 2013, 3: 2051 - 2054.
- [3] SEO M, IM J C, KIM C, et al. Study on the applicability of a retaining wall using batter piles in clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(8): 1195 - 1212.
- [4] 郑刚, 何晓佩, 周海祚, 等. 基坑斜-直交替支护桩工作机制分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 97 - 100. (ZHENG Gang, HE Xiao-pei, ZHOU Hai-zuo, et al. Working mechanism of inclined-vertical retaining piles in excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 97 - 100. (in Chinese))
- [5] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 倾斜桩支护结构的工作性能和基坑稳定性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(1): 115 - 124. (ZHENG Gang, WANG Yu-ping, CHENG Xue-song, et al. Working performance and stability of excavation retained by inclined retaining structures[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(1): 115 - 124. (in Chinese))
- [6] 郭建芝, 曹华先. 斜桩挡土支护深基坑[J]. 广州建筑, 1997(2): 38 - 41. (GUO Jian-zhi, CAO Hua-xian. Batter pile strutted deep foundation pit[J]. Guangzhou Architecture, 1997(2): 38 - 41. (in Chinese))
- [7] 余地华, 田野, 张涛, 等. 无支撑前斜后直倾斜双排桩支护监测与分析[J]. 施工技术, 2021, 50(1): 57 - 61, 75. (YU Di-hua, TIAN Ye, ZHANG Tao, et al. Monitoring and analysis of inclined double row piles without support[J]. Construction Technology, 2021, 50(1): 57 - 61, 75. (in Chinese))
- [8] 静压桩施工技术规程: PJGJ/T394 — 2016[S]. 2016. (Technical Specification for Method of Press-In Piling: PJGJ/T394—2016 [S]. 2016. (in Chinese))