

倾斜桩支护机理及其研究进展

付旭辉 尹瑞 雷华山 卢琪盛 周柯名 彭楚才^(通讯作者)

湖南理工学院土木建筑工程学院

[摘要] 倾斜桩支护是近年来基坑无支撑支护技术领域的一个研究热点，其能较好地控制桩顶水平位移和桩身弯矩，有效改善桩身变形及受力特性，减少事故的发生。本文介绍了倾斜支护桩的基本结构及其发展历程，并总结了倾斜桩支护技术方面的研究进展。通过分析目前倾斜桩支护技术及其理论的不足，对进一步的研究提出了展望。

[关键词] 倾斜桩支护机理；发展现状；无支撑支护

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-627X.2021.11.938

1 引言

随着我国城市化进程的加速，高层建筑数量越来越多，地下空间的开发和利用越来越深，给基坑支护技术带来了严峻的挑战。排桩支护结构是目前常用的支护结构之一。传统竖直支护桩的桩身容易出现变形过大、承载力不足的情况。近年来，研究人员发现斜桩支护结构能较好地弥补这些不足，其控制土体变形效果要强于同等条件下的竖直桩支护结构，且倾斜桩组合支护结构能较好地减小桩身水平变形与坑外沉降^[1]。因此，倾斜桩支护技术及其机理研究具有很重要的实际应用价值和科学意义。本文基于倾斜桩支护的发展历程，对倾斜桩支护机理及研究进展进行了总结与分析，对进一步的研究提出了展望。

2 倾斜桩的基本概念

倾斜桩支护是将传统的竖直支护桩主动倾斜一个角度而构成。根据桩顶向坑内或坑外倾斜，常见的倾斜桩及其与竖直桩的组合支护结构可分为以下四种：纯倾斜桩支护结构，如图1（a）所示；外斜桩-竖直桩组合支护结构，如图1（b）所示；内斜桩-竖直桩组合支护结构，如图1（c）所示；内斜

桩-外斜桩组合支护结构，如图1（d）所示。目前倾斜桩的工程应用形式还比较单一，相关理论研究还不够成熟，并没有全行业统一的理论设计规范，所以未广泛使用。

3 倾斜桩支护机理的发展

3.1 被动倾斜桩承载特性研究

我国学者对于倾斜桩初探是在二十世纪八十年代，1978年中国建筑科学研究院地基所采用锤击贯入试桩法对天津塘沽新港集装箱库预制桩基工程倾斜桩进行承载力检验，发现斜桩的承载能力与直桩的承载能力很相近^[2]。李坤等^[3]分析了斜桩承载力的影响因素。结果表明：地基反力系数对斜桩承载力影响不大，而土体位移会大幅度降低斜桩的竖向承载能力。吕凡任等^[4]假设地基土体为半无限弹性体，考虑桩身的具体形状，分析了斜桩桩顶受任意平面荷载作用下的受力变形，并建立了积分方程式。但此研究讨论的地基和桩都是弹性的情况，对于地基土体为弹塑性的情况并没有分析。杨宝珠等^[5]对由基坑开挖形成的倾斜桩的竖向承载力进行研究，利用ABAQUS模拟了天津市某工程桩的竖向、水平荷载试验，在此基础上研究基坑开挖引起的倾斜桩的竖向承载力。

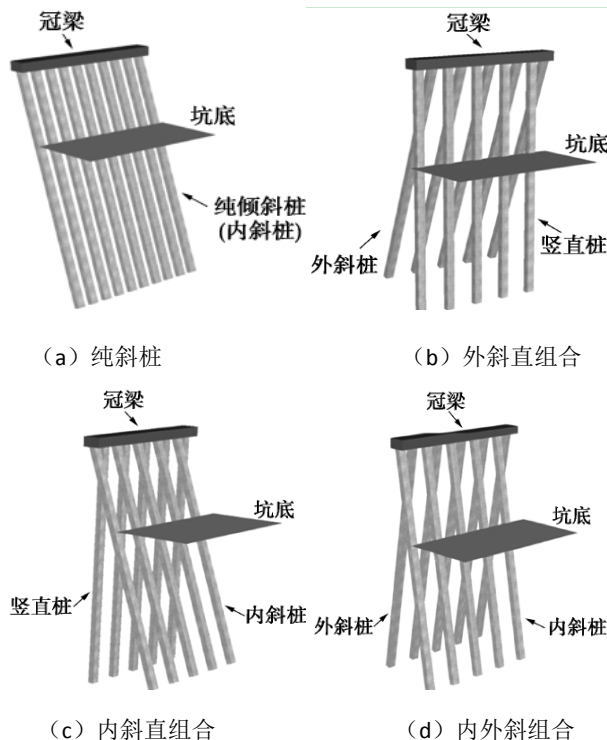


图1 倾斜桩空间布置示意图

并提出在确定倾斜桩的竖向承载力时应该考虑引起桩倾斜的原因,以便对倾斜桩的竖向承载力做出正确的评价。总体来说,早期的倾斜桩研究仅局限于对传统直桩受力被迫成为斜桩的情况下的荷载承受能力研究。这些研究也为随后倾斜桩的主动应用和分析提供了基础。

3.2 主动倾斜桩承载特性及其应用

研究发现倾斜桩在承受横向荷载方面具有其优势,因此逐步从单排倾斜桩的受力作用分析到前排倾斜的双排倾斜桩机理研究,再到倾斜组合桩的多种形式及机理分析,逐步建立起主动倾斜桩支护的机理体系。

3.2.1 倾斜单排桩研究进展

对于单排倾斜桩机理,主要研究桩的承载力以及找到最合适的倾斜角度。用适当角度的倾斜单排桩代替竖直单排桩作为基坑支护结构,可起到减小排桩位移和内力的作用^[6]。王新泉等^[7]通过模型试验研究竖直桩与倾斜不同角度倾斜桩的承载性能,分析倾斜对塑料套管现浇混凝土桩单桩承载力、桩顶沉降、桩身水平位移、桩身弯矩、桩身轴力及侧摩阻力和端阻比的影响。孔德森等通过数值仿真并结合模型试验对深基坑悬臂式倾斜支护桩进行了分析,研究了基坑悬臂式倾斜支护桩的变形与受力规律。并将倾斜悬臂桩作为支护桩应用在实际工程中,证明可以有效减小桩顶位移以及桩身弯矩,改善桩身受力和变形特性。马庆华等采用数值模拟手段分析了不同倾斜程度及倾斜方向下承台一倾斜桩的变形、受力特征、承载力性状,并计算得到了桩身最大弯矩位置、反弯点位置。研究表明桩体倾斜程度对承台一倾斜桩体系承载力的影响存在阈值。基于对单排桩的大量研究,单排倾斜桩支护机理取得了不错的进展,并在渝黔铁路夜郎河大桥、东海大桥风电场等工程中得到了应用。

3.2.2 倾斜双排桩研究进展

倾斜双排桩机理的研究建立在倾斜单排桩机理分析之上。张松波等借鉴重力式挡墙形式,针对提出的多种倾斜双排桩支护结构和常规双排桩支护结构,利用数值仿真分析了这些支护结构的支护效果。研究表明双排桩支护结构控制土体变形效果由强到弱为:前后排桩分别向外倾斜结构>前排桩向外倾斜结构>后排桩向内倾斜结构>后排桩向外倾斜结构>双排竖直桩。并得出前排向外倾斜的双排桩支护结构效果最优。参考武汉某基坑工程地质条件,分析计算不同材料的前桩倾斜 10° 的双排桩的支护效果,得出以下结论:相同桩间距情况下,按照控制土体变形效果强弱桩型排序为:钢管混凝土桩>钢管水泥土桩>钢管桩>混凝土桩>PHC管桩。通过有限元分析发现增大桩长、桩间距或者连梁长度可以减小支护结构变形与内。倾斜双排桩是在排桩的基础上改进的,其结合了倾斜桩与传统双排桩的优点,通过不同的倾斜方向、倾斜角度以及桩间距的调整,能够更加灵活地适用不同的工程需求,具有很好地应用前景。

3.2.3 倾斜组合桩研究进展

倾斜组合桩是在常规单排倾斜桩基础上的一种改进,即

单排桩中同时存在倾斜桩和直桩的组合。郑刚等提出了基坑斜-直交替支护桩刚架效应、斜撑效应和重力效应三个工作机理效应,并以支护结构变形和坑外土体沉降为评价标准,对三项效应进行分析得出刚架效应是斜撑效应发挥的前提。刘永超等结合软土地区基坑工程的斜桩和直桩侧向变形、桩顶的水平位移和竖向位移与地表沉降等实测结果,研究了开挖及超载影响下斜-直交替支护桩的性能,分析了“一直一斜”和“两直两斜”两种布置形式的支护效果。刘畅遥等结合实际工程进行斜直交替支护桩现场监测,并结合数值模拟,对斜桩轴力发挥机理以及斜桩倾斜角度、斜直桩排布形式对斜直交替桩支护性能的影响展开研究。整体而言,对斜直交替组合桩的研究还处于定性分析阶段,其相关机理和规律的认识还不够完善,有待进一步研究。

4 总结与展望

综上所述,倾斜桩支护技术尚未形成一套完整的理论体系,且大部分理论研究建立在数值模拟的基础上,实际工程项目的数据有限,不足以支撑理论体系的建设。因此,可以从以下方向开展进一步的研究工作:1.基于数值仿真所建立起的倾斜桩支护机理,还需要在更多地实际工程中去进行检验。2.与倾斜桩机理相关的模型实验还很缺乏,需要进一步补充模型实验来有针对性地分析桩身受力情况及变形规律。3.土本身的材料力学性能比较复杂,土力学的相关理论还比较粗糙,需要进一步加强岩土材料特性以及新型桩材料的研究,探索桩土相互作用下桩身的变形机理。4.需要从对倾斜桩的失稳判别以及维持稳定的关键控制因素等方面加强桩基稳定性研究。

参考文献

- [1]王恩钰,周海祚,郑刚,等.基坑倾斜桩支护的变形数值分析[J].岩土工程学报,2019,41(S1):73-76.
 - [2]李大展,佟世祥.锤击贯入试桩法在沿海软土地区的工程实践[J].工业建筑,1983(7):23-27.
 - [3]李坤,徐长节,蔡袁强.成层地基中斜桩弯曲性状及其竖向承载力分析[J].工业建筑,2003(9):56-59,86.
 - [4]吕凡任,陈云敏,陈仁朋,等.任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J].浙江大学学报(工学版),2004(2):64-67,121.
 - [5]杨宝珠,王丽,郑刚.基坑开挖引起邻近桩倾斜时竖向承载性状有限元分析[J].岩土工程学报,2008,30(S1):144-150.
 - [6]郑刚,白若虚.倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J].岩土工程学报,2010,32(S1):39-45.
 - [7]王新泉,陈永辉,安永福,等.塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(4):834-842.
- 基金项目:湖南省自然科学基金项目(2020JJ5208);湖南省教育厅项目(18C0638);湖南省大学生创新创业训练计划项目(S20211265809)