

荤素搭配咬合桩支护结构受力变形机制的研究

严伟飞¹, 于喆², 杨涛¹, 郭智刚¹, 王理璞²

(1. 浙江省大成建设集团有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 本文以杭州至富阳城际铁路标段隧道工程为研究背景, 对荤素搭配咬合桩支护结构在基坑开挖过程中受力变形机制展开研究。利用有限元分析软件 ABAQUS 建立咬合桩支护结构数值模型, 根据计算结果对支护结构的变形、内力等承载特性进行分析; 进一步对比了荤桩和素桩在不同开挖阶段的应力状态, 对素桩在咬合桩工作过程中对承载性能和抗弯刚度的贡献、素桩和荤桩的协同工作机制等问题进行探讨。研究结果表明, 当咬合桩截面弯矩过大, 素桩受拉区边缘混凝土会开裂并退出工作, 但其受压区混凝土仍能承担一部分弯矩, 咬合桩的实际承载力表现介于钢筋混凝土排桩与等效刚度地下连续墙之间。

关键词: 咬合桩; 支护结构; 基坑开挖; 有限元分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)04-0285-05

Mechanism of stress and deformation of the supporting structure of secant piles composed of the reinforced concrete piles and plain concrete piles

YAN Wei-fei¹, YU Zhe², YANG Tao¹, GUO Zhi-gang¹, WANG Li-pu²

(1. Zhejiang Dacheng Construction Group Co., LTD., Hangzhou 310012, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Based on a tunnel project of Hangzhou-Fuyang intercity railway, this paper studies the stress and deformation mechanism of the supporting structure of secant piles composed of the reinforced concrete piles and plain concrete piles during the excavation of the foundation pit. Finite element analysis software ABAQUS is used to establish the numerical model of the secant piles supporting structure. According to the calculation results, the bearing characteristics such as deformation and internal force of the supporting structure are analyzed. Furthermore, the stress state of reinforced concrete piles and plain concrete piles in different excavation stages is compared. The contribution of plain concrete piles to bearing capacity and flexural rigidity and also the cooperative working mechanism of reinforced concrete piles and plain concrete piles are discussed. The results show that when the section bending moment of the secant piles is too large, the concrete at the edge of the tensile zone of the plain concrete piles will crack and withdraw from the work, but the concrete in the compression zone can still bear part of the bending moment, and the actual bearing capacity of secant piles is between that of reinforced concrete row piles and equivalent stiffness underground diaphragm wall.

Key words: secant piles; supporting structure; excavation of foundation pit; finite element analysis

0 引言

咬合桩是相邻混凝土排桩间部分圆周相嵌的

一种连续挡土围护结构, 通常采用钢筋混凝土桩(工程中常称为“荤桩”)和素混凝土桩(素桩)间隔排列、相互咬合的截面形式, 既能起到良好的止

水作用，相比地下连续墙又减少了项目的材料成本和施工工期，具有广阔的应用前景。

目前已有许多学者针对咬合桩支护结构进行了研究：陈斌等^[1]、杨龙才等^[2]、周顺华等^[3]以南京地铁基坑工程为背景，对咬合桩支护结构的承载性能、抗浮性能等进行了研究，证明了全套管钻孔咬合桩支护结构应用于深基坑工程的经济性和实用性；李文林^[4]、廖少明等^[5]以上海地铁基坑工程为背景，研究了荤桩与素桩咬合面施工的最佳间隔时间、咬合桩抗弯承载力发挥机理以及咬合桩与地下连续墙的转化计算等内容。袁运涛等^[6]认为不同直径的咬合桩、不同厚度的地连墙与支护结构侧向位移之间均呈近似线性关系。

然而，目前对于咬合桩受力变形机理的研究相对比较欠缺，设计与实际情况存在差距。在实际设计和计算过程中，通常采取两种做法进行计算：(1) 不考虑素桩对咬合桩整体抗弯刚度和承载性能的贡献，仅将其作为安全储备和止水结构^[7-8]；(2) 将咬合桩直接等效成等刚度的地下连续墙进行设计计算^[9-13]，未考虑素桩在协同工作过程中的裂缝发育和破坏机理。针对这一问题，本文以杭州市某城际铁路标段为背景，利用有限元分析软件 ABAQUS 对素桩在咬合桩工作过程中对承载性能和抗弯刚度的贡献、素桩和荤桩的协同工作机制，素桩工作状态对咬合桩支护结构受力变形特性的影响等问题展开研究，相关研究结果对咬合桩在基坑支护结构中的推广应用和优化设计具有重要意义。

1 工程概况

杭州至富阳城际铁路标段隧道采用明挖顺作法（局部盖挖顺作法）施工，隧道总长 1 055 m，标准段宽约 31.5 m，最宽处 39.7 m，开挖深度为 1.4~15.17 m。咬合桩长 7~22 m 不等，其中直径 800 mm、桩心距 600 mm 的咬合桩 1 082 根，直径 1 000 mm、桩心距 750 mm 的咬合桩 1 780 根。荤桩和素桩分别采用 C35 和 C20 混凝土，钢筋采用 HPB 300。咬合桩支护结构的材料参数如表 1 所示。标段所在场地的土层参数如表 2 所示。

表 1 咬合桩桩身材料参数
Tab. 1 Material parameters of secant piles

桩类型	混凝土标号	弹性模量/GPa	泊松比
荤桩	C35	31.5	0.20
素桩	C20	25.5	0.20

表 2 场地土层参数

Tab. 2 Parameters of soils

土层	厚度/ m	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ °
1	4	1 850	12	0.38	8	8
2	16	1 950	19	0.30	23	16
3	20	1 950	19	0.30	23	16

2 有限元模型

取桩长为 22 m、桩径为 1 000 mm 的咬合桩进行数值分析，咬合量为 250 mm，如图 1 所示。隧道开挖宽度取 30 m，开挖深度取 15 m。为减小边界效应的干扰，横向取约 20 倍桩径、竖向取约 2 倍桩长为分析范围，完整场地数值模型尺寸为 20 m×70 m×40 m。为模拟基坑开挖的过程，分 4 步对基坑内土体进行开挖，开挖深度分别为 2.0 m、4.0 m、4.0 m、5.0 m，直至达到设计开挖深度。考虑到结构的对称性，选取一半进行分析研究，如图 2 所示。

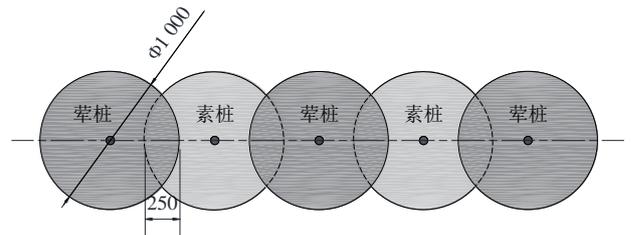


图 1 咬合桩截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of section of secant piles

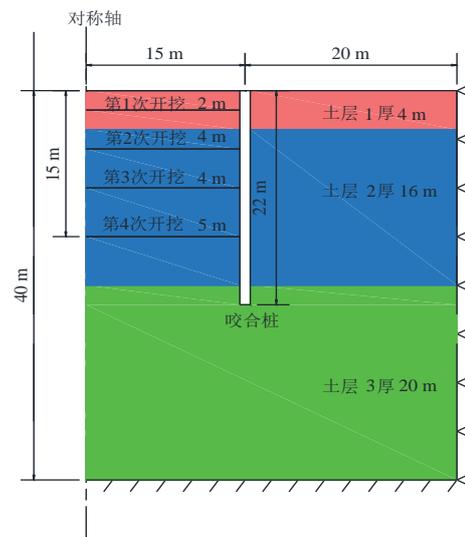


图 2 有限元计算模型及边界条件示意图

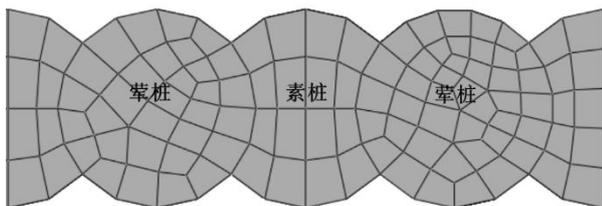
Fig. 2 Schematic diagram of finite element calculation model and boundary conditions

由于荤桩和素桩受力特性的不同,将荤桩定义为线弹性的各向同性材料,素桩则采用混凝土弥散开裂模型(Concrete smeared cracking)进行模拟。桩周土体视作非线性弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。

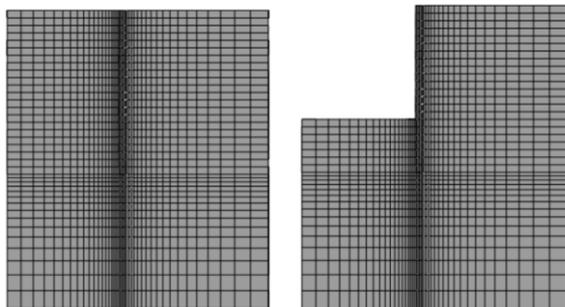
定义两类接触面,包括:(1)荤桩-素桩桩间接触面和桩-土接触面,定义切向罚摩擦(penalty)模型,法向硬(hard)接触模型,以考虑接触面两侧的非协调变形;(2)土层-土层接触面,定义为完全接触、变形协调的绑定约束(tie),来模拟被开挖土体与周围土体的接触关系。

设置场地边界条件,模型四周法线位移为0,模型底部固定,模型上表面自由;值得说明的是,为了更好地展现素桩受拉区开裂、工作状态变化的过程,本例在基坑外地面施加了一定超载以增大咬合桩的内力;

采用三维八节点实体单元(C3D8R)模拟咬合桩以及桩周土,其具体网格划分如图3所示:



(a) 咬合桩截面网格



(b) 周围土体开挖前及开挖后网格

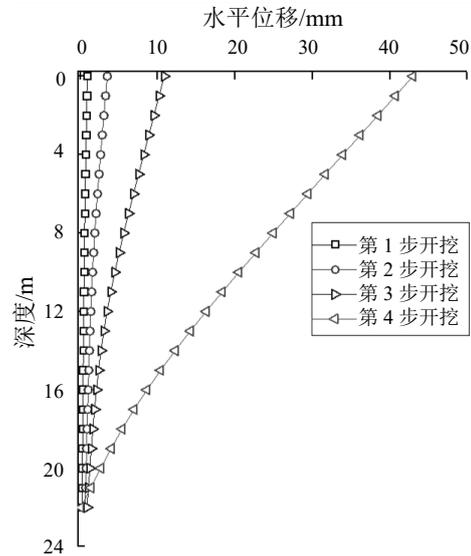
图3 模型网格划分示意图
Fig.3 Model grid division

3 计算结果与分析

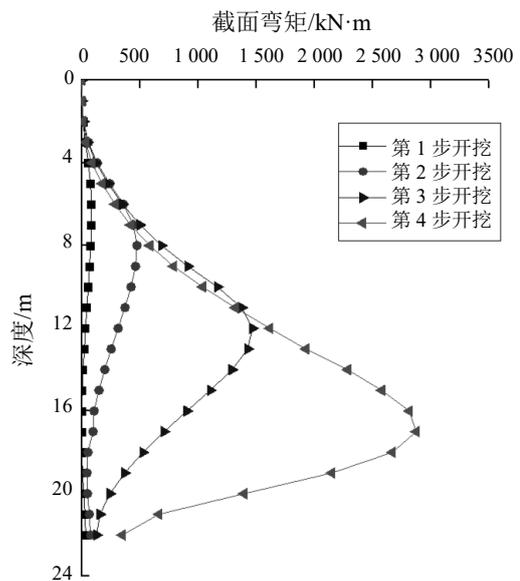
计算并记录各开挖阶段的咬合桩支护结构的变形及内力数据,整理得到图4。

由图4(a)所示的咬合桩支护结构的水平位移沿深度方向变化可知:桩顶变形最大,桩底最小,近似呈线性分布。随着基坑内土体被移走,咬合桩的水平位移逐渐增加,其中第4步开挖土体厚度最

大,开挖后的位移量增加十分显著。图4(b)表示了咬合桩截面弯矩随深度的变化。可以看到,咬合桩截面弯矩在桩顶位置最小,弯矩大小随着开挖深度的增加而增加。同时,最大弯矩值出现的深度也逐渐增加,但基本保持在开挖深度附近。



(a) 水平位移



(b) 截面弯矩

图4 不同开挖阶段咬合桩的水平位移和截面弯矩
Fig.4 Horizontal displacement and bending moment of section of secant piles in different excavation stages

为分析基坑开挖过程中咬合桩的工作机理,取每一步开挖结束后咬合桩截面弯矩最大处的截面应力云图进行分析,如图5所示。第1步和第2步开挖完成后,由于抗弯刚度的不同,荤桩最大拉应力与最大压应力均较素桩略大,但两者的截面应力呈近似线性分布,荤桩和素桩尚处在协同工作的弹

性阶段。随着开挖深度的增加，截面最大拉应力和最大压应力均增大，咬合桩的受拉区高度逐渐增加，中性面逐渐向受压区偏移。从第3步开始，荤桩与素桩的应力分布发生变化，素桩受拉区边缘的混凝土出现开裂，并逐渐退出工作。最后一次开挖结束后，拉应力基本完全由荤桩承担，素桩受压区混凝土仍在协同工作。

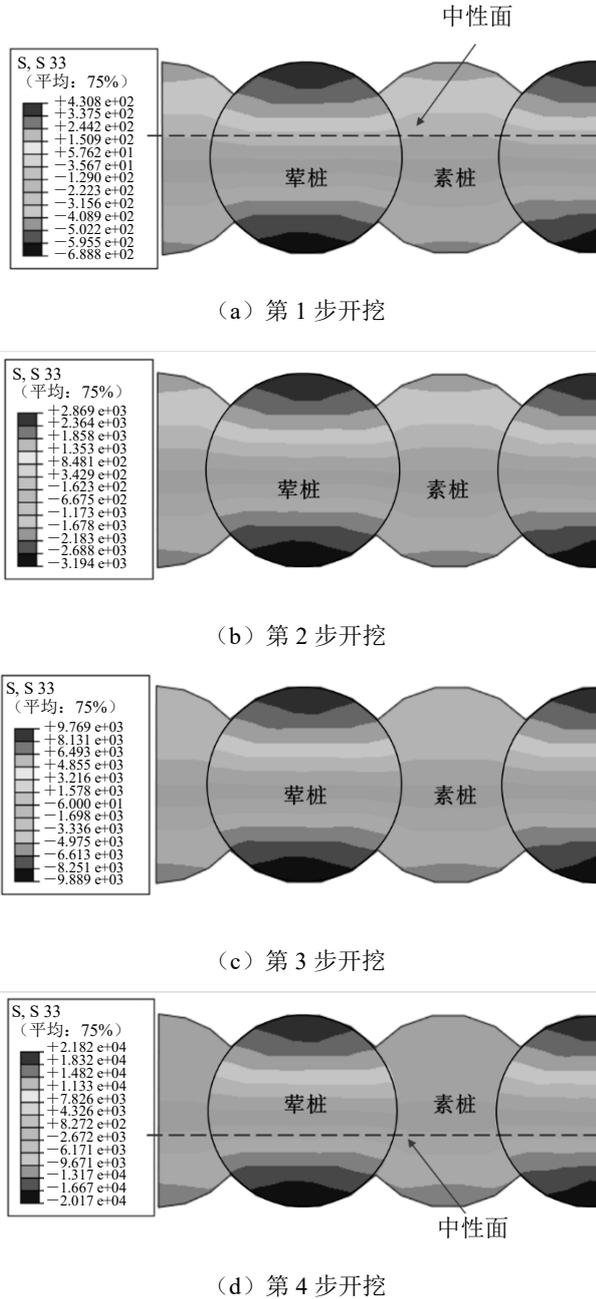


图5 咬合桩截面应力云图

Fig. 5 Section stress nephogram of secant piles

荤桩与素桩的应力分布变化势必会造成两者的内力分担比出现变化，取各开挖阶段的荤、素桩最大弯矩分担情况进行分析，结果如图6所示。第1步和第2步开挖后，截面弯矩较小，荤桩与素桩所承担的弯矩大小基本一致。随着截面弯矩增大，

截面弯矩逐渐由荤桩承担，开挖到设计深度后，荤桩承担了约75%的截面弯矩。可以看到，在这一过程中素桩受拉区混凝土处于严重浪费状态，并不能为支护结构提供有效承载力，这也是图4(a)中第4步开挖后咬合桩水平位移迅速增大的原因之一。

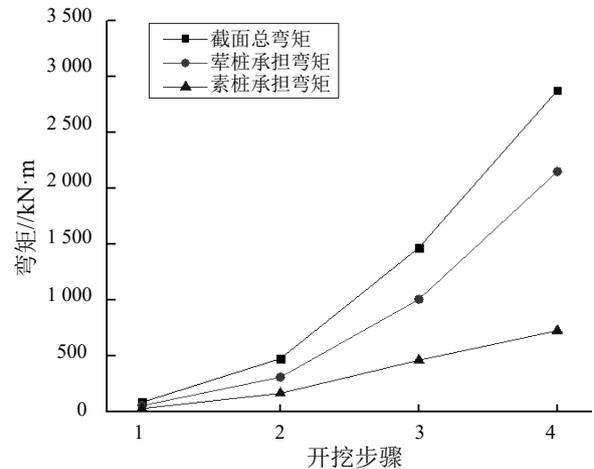


图6 荤桩、素桩弯矩承担情况

Fig. 6 Bending moment of reinforced concrete piles and plain concrete piles

4 结 论

(1) 本文结合基坑工程实例，利用有限元分析软件 ABAQUS 建立了咬合桩支护结构数值模型，对基坑开挖过程中咬合桩的受力变形情况进行分析；

(2) 针对荤、素桩受力特性的不同，分别采用线弹性模型和混凝土弥散开裂模型来模拟荤桩和素桩；

(3) 数值分析结果表明，当截面拉应力处于混凝土抗拉强度范围时，荤桩与素桩应力分布、所承担的截面弯矩基本一致。而随着截面弯矩增大，素桩受拉区逐渐退出工作，荤桩承担起了绝大部分的截面弯矩；

(4) 在各个开挖阶段素桩均能够承担一部分截面弯矩，但作用较有限，咬合桩实际承载力表现介于钢筋混凝土排桩与等效刚度地下连续墙之间；

(5) 由于混凝土材料抗压不抗拉的特性，素桩受拉区混凝土常处于浪费状态，可考虑将素桩位置向受压区偏移以提高材料利用率。

参考文献

[1] 陈斌, 施斌, 林梅. 南京地铁软土地层咬合桩围护结构的技术研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 354-357.

- CHEN Bin, SHI Bin, LIN Hai. A study on the secant pile in soft soil for Nanjing metro project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 354–357.
- [2] 杨龙才, 周顺华. 南京某地铁深基坑围护结构方案的比选研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 453–458.
- YANG Long-cai, ZHOU Shun-hua. Comparison and selection of enclosure structure schemes of certain metro deep foundation pit in Nanjing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 453–458.
- [3] 周顺华, 郑剑升, 何泽刚, 等. 冲淤沉积层中新型咬合桩工法及应用[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 57–61.
- ZHOU Shun-hua, ZHENG Jian-sheng, HE Ze-gang, et al. The construction method and application of new-style secant piles in alluvium[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 57–61.
- [4] 李文林. 软土地层咬合桩挡土结构设计与施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- LI Wen-lin. Study on design and construction technology of secant pile retaining structure in soft clay[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [5] 廖少明, 周学领, 宋博, 等. 咬合桩支护结构的抗弯承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 72–78.
- LIAO Shao-ming, ZHOU Xue-ling, SONG Bo, et al. Study on the bending performance of secant pile retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 72–78.
- [6] 袁运涛, 李苏春, 韩霜, 等. 土体扰动对地铁车站开挖的影响分析[J]. 施工技术, 2019, 48(S): 663–667.
- YUAN Yun-tao, LI Su-chun, HAN Shuang, et al. Study on subway station excavation concerning soil disturbance[J]. Construction Technology, 2019, 48(S): 663–667.
- [7] 赵超. 荤素搭配咬合桩的设计计算[J]. 施工技术, 2009, 38(S1): 161–163.
- ZHAO Chao. Design calculation of secant piles with intercrossing of reinforced concrete pile and plain concrete pile[J]. Construction Technology, 2009, 38(S1): 161–163.
- [8] 刘海涛. 套管咬合桩深基坑围护结构计算方法及应用[J]. 工程技术研究, 2018(10): 95–96.
- [9] SHI M Y, WANG R, LIU E W, et al. Deep reinforcement learning based computation offloading for mobility-aware edge computing[C]//International Conference on Communications and Networking in China, Cham: Springer, 2019: 53–65.
- [10] WANG L W, LIANG Q L. Partial interference alignment for heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 22592–22601.
- [11] 贾洪斌. 钻孔咬合桩的受力机理及在软土地层中的应用[J]. 山西建筑, 2007, 33(4): 110–111.
- JIA Hong-bin. The stress mechanism of bored occluding pile and its application in soft soil stratum[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(4): 110–111.
- [12] 杨虹卫, 杨新伟. 钻孔咬合桩的配筋计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 402–405, 414.
- YANG Hong-wei, YANG Xin-wei. Computational method of reinforcement of the borehole cast-in-place pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3): 402–405, 414.
- [13] 任红林, 吴建忠, 朱正谊. 钻孔咬合桩基坑围护结构设计计算方法探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(9): 29–32, 37.
- REN Hong-lin, WU Jian-zhong, ZHU Zheng-yi. Calculation method of secant pile as excavation retaining structure[J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(9): 29–32, 37.