

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.001

# 咬合桩在邻近高填土基坑中的工程应用与实测分析

陈海兵<sup>1</sup>, 梁发云<sup>1</sup>, 何招智<sup>2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海地矿工程勘察有限公司, 上海 200072)

**摘要:**针对某采用咬合桩围护方案的邻近高填土基坑工程进行分析,当咬合桩作为围护桩时,可采用等效刚度法计算围护桩的桩身变形;作为隔离桩使用时,忽略素混凝土桩的作用,仅考虑钢筋混凝土桩的抗弯能力。现场实测表明,邻近高填土基坑工程在开挖时,咬合桩明显地降低了基坑开挖对紧邻高填土的扰动,满足了高填土自身的稳定,保证基坑工程在高填土作用下的安全。而咬合桩作为一种新型排桩围护结构,也能够起到很好的应力隔离作用,有效地分担了邻近超载的影响,确保了高填土的稳定和基坑工程安全。

**关键词:**咬合桩;基坑工程;高填土;隔离桩

**中图分类号:**TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0001-05

## Application of Secant Piles in Excavation Pit Adjacent to the High-filling Surcharge Loads and In-situ Measurements

Chen Haibing<sup>1</sup>, Liang Fayun<sup>1</sup>, He Zhaozhi<sup>2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Shanghai Geological & Mineral Engineering Investigation Co., Ltd., Shanghai 200072, P. R. China)

**Abstract:** To analyze an excavation engineering adjacent to high-filling surcharge loads, an equivalent stiffness method was applied to calculate the deformation of secant piles which were used as the retaining structure of foundation pit. And only the flexural capacity of reinforced concrete piles was taken into account when the secant piles were considered as the isolation piles. In the second case, the flexural capacity of plain concrete piles was ignored. The in-situ measurements revealed that both stability of the filling soil and safety of the foundation pit were satisfied in the excavation engineering adjacent to the high-filling surcharge load. Secant piles, as a new kind of retaining structure, are suitable for isolating the stress caused by the adjacent overloading, ensuring the stability of landfill soil and the safety of excavation engineering.

**Key words:** secant pile; excavation engineering; high-filling surcharge loads; isolation pile

由于建设场地限制或景观设计要求,紧邻高填土进行基坑开挖的情况越来越多。在此情况下,既要满足填土自身的稳定,也需要保证基坑围护结构在填土作用下的变形。由于桩墙式结构可以承受较大的变形,工程实践中广泛地采用此结构形式进行

应力或振动隔离设计<sup>[1]</sup>。在大面积堆载条件下,软土地基可采用隔离桩进行应力隔离,以减少基坑开挖对邻近建筑的不利影响<sup>[2]</sup>。隔离桩穿过土体滑动区嵌入下部土层,提高土体滑移面的抗剪性能,并可抵抗基坑开挖引起的侧向土压力,提高周边土体的

收稿日期:2013-12-01

基金项目:国家自然科学基金(50708078);上海市教委科研创新重点项目(10ZZ24)

作者简介:陈海兵(1984-),男,博士生,主要从事桩基础、深基坑工程研究,(E-mail) 3hbchen@tongji.edu.cn。

梁发云(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail) fylang@tongji.edu.cn。

抗隆起稳定性<sup>[3-4]</sup>。软土地区隔离桩通常选择分离式的排桩或地下连续墙等形式,与地下连续墙相比,同等条件下分离式的排桩造价较为便宜,但其墙体刚度则相对较弱。作为一种新型的排桩围护结构,咬合桩兼有地下连续墙和分离式排桩的优点,施工速度快,对周围环境扰动较小,自身刚度和隔水效果较好,在深基坑支护、易发地质灾害地段的挡土防护和铁路桥梁基础冲刷防护等都有较多的应用<sup>[5-8]</sup>。

咬合桩由钢筋混凝土桩与素混凝土桩(下称素桩)相互重叠形成连续桩墙。咬合桩的抗弯承载性能与分离式的排桩不同,主要是由于素桩对钢筋混凝土桩刚度的有利影响。尽管咬合桩在工程中得到了广泛应用,但关于咬合桩的计算分析理论仍不够完善,有一些文献通过理论、试验或实测方法研究咬合桩的抗弯性能<sup>[9-12]</sup>。

目前针对邻近高填土基坑工程设计的隔离桩大多采用分离式排桩进行计算,隔离桩不作为围护结构。本文结合某邻近高填土基坑的工程实例,对比分析传统设计与咬合桩作为隔离桩及围护结构的设计方法,通过现场监测数据分析咬合桩作为围护结构和隔离桩的工程实践效果,可为类似堆载或开挖条件下的隔离桩设计提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑及工程地质概况

该工程位于上海浦东新区,基坑普遍开挖深度为 4.9 m,邻近堆填土侧的深坑区域开挖深度为 5.9 m,工程桩采用 0.4 m×0.4 m 的预应力方桩,桩长 26.0 m。该工程针对基坑东侧高达 9.4 m 的景观填土,提出采用咬合桩方案进行围护设计,填土与基坑的位置关系如图 1 所示。

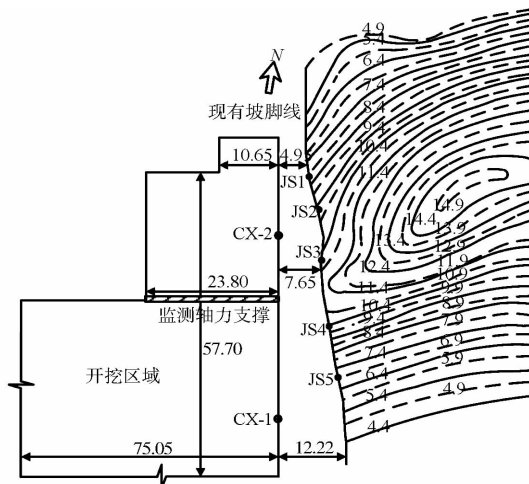


图 1 堆土与基坑开挖的关系(单位: m)

景观填土的位置原先为软弱地基,经振冲碎石桩地基处理后,堆载填土后形成景观,该工程场地需要利用部分的填土区域。由于高填土上种植有大量需要保护的绿化树木,场地整平时对景观填土采取了土钉护坡措施,填土坡角约为 60 度,基坑开挖前,现场监测表明填土坡体处于稳定状态。高填土的坡脚与基坑边线距离约 7.2 m,围护桩位于碎石桩加固处理的区域内,地质条件复杂,地下有 3.6~5.6 m 厚的杂填土障碍区。杂填土松散,含灰渣、碎石、碎砖等,局部以碎砖和砼块等建筑垃圾为主。

浅部土层地下水属于潜水类型,静止水位埋深在 0.6~1.1 m 之间。主要设计参数如图 2 所示,其中重度为  $\gamma$ ,直剪固快峰值粘聚力  $c$ ,内摩擦角  $\varphi$ , $k$  为渗透系数。

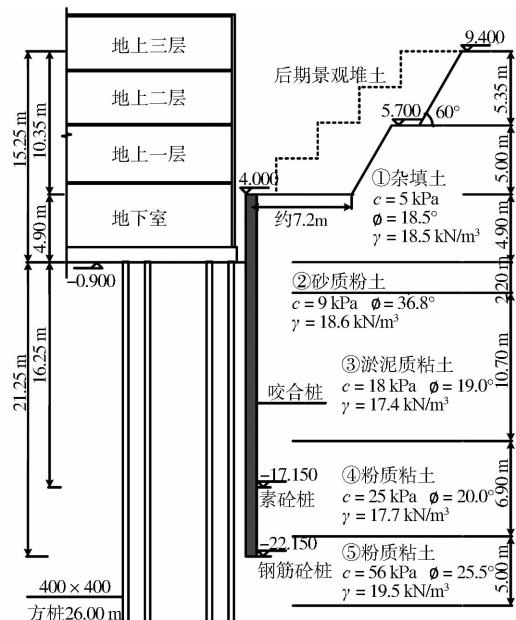


图 2 东侧堆土与建筑的关系

### 1.2 基坑围护方案分析

基坑东侧有较高的堆填土,场地内杂填土厚度大,成分复杂。整个场地地下水丰富,基坑底部为渗透性较强的砂质粉土层。由于围护区域内地下障碍物大量存在,常规的桩基施工方法难以按设计要求完成。若进行清障处理则会影响到景观填土的稳定。

在拟建建筑完成后,后期东侧仍需要施工挡土墙和回填土体以满足建筑景观设计要求,每延米大约需要回填 51.6 m<sup>3</sup> 的土方。因此,拟建建筑物的地下结构顶、底板和侧墙亦要有较大刚度与之匹配。

针对该基坑东侧场地内的地质和水文条件、周边堆载及后期景观修建等情况,围护结构采用旋挖机施工灌注桩组成咬合桩排列形式,坑内辅以钢管对撑结合 H 型钢立柱。同时,东侧围护墙边有多个集水井

存在,采用高压旋喷桩对该区域进行坑边加固,加固深度为坑底以下4.0 m。咬合桩既是基坑开挖时的围护挡墙和隔水帷幕,也分担结构外墙和桩基受到的邻近堆载,在安全和可靠性上有较大优势。

在成孔和灌注阶段采用套管护壁,可以解决本工程地质条件无法采用常规工法成桩的难题<sup>[13-14]</sup>。咬合桩施工采用冲抓履带吊机套管搓管成孔,履带吊机操纵冲抓斗冲抓取土。套管护壁至设计深度后在套管内成灌注桩,同时搓管钻机搓动起拔套管,边起拔边灌注,直至灌注完毕并起拔出套管,此时成孔和灌注成桩一次完成。

## 2 设计思路及计算

### 2.1 设计方法对比分析

设计采用的排桩围护结构与地下水、地质条件以及围护结构的整体刚度等密切相关。在排桩围护结构中仅咬合式排桩兼具止水和抗弯的能力,其它类型的排桩围护结构需要加设水泥搅拌桩等辅助止水措施。当场地达不到辅助止水措施的施工条件时,咬合桩围护形式就成为较优设计方案。

咬合桩由钢筋混凝土桩与素桩相互咬合排列形成(图3)。首先施工素桩,在混凝土初凝之前完成切割,施工钢筋混凝土桩,形成具有止水功能的咬合式连续桩墙。由于咬合桩中的素桩增加了钢筋混凝土桩的抗弯刚度,设计时是否要考虑此部分贡献,需要结合实际具体分析,特别是相关工程经验的积累。已有的工程实践和相关研究<sup>[8-10]</sup>建议可以根据设计要求合理考虑素桩的作用,但是素桩出现裂缝时,其对整体刚度的贡献就显著下降。当需要考虑工程的安全时,特别是针对钢筋混凝土桩的配筋时,采用偏于安全的分离式排桩计算配筋,更易设计人员所接受。

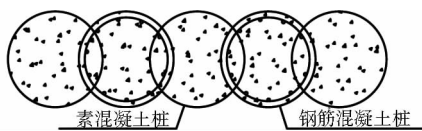


图3 咬合桩示意图

### 2.2 咬合桩等效刚度

该工程是在堆载条件下在坡脚进行基坑开挖,设置隔离桩以控制基坑开挖对邻近高填土的扰动,并考虑高填土的长期稳定性问题。廖少明等<sup>[9]</sup>根据抗弯试验结果,将咬合桩的弯曲破坏过程分为弹性变形、弹塑性变形、塑性破坏等3个阶段,随着素混凝土桩裂缝的出现,咬合桩的抗弯刚度随着素桩裂

缝的发展而较快地降低,为保证素桩与钢筋混凝土桩的共同作用,应将咬合桩的受力状态控制在弹性变形阶段以内。此时,可按抗弯刚度等效原则计算咬合桩的等效桩墙厚度<sup>[9]</sup>。

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = \frac{E_3 (4R - 2a) h_0^3}{12} \quad (1)$$

$$I_1 = I_2 - 4I_3 \quad (2)$$

其中  $I_2 = \pi R^4 / 4$ ;

$$I_3 = \frac{y_1 \sqrt{R^2 - y_1^2} (2y_1^2 - R^2)}{8} + \frac{R^4}{8} \arcsin \frac{y_1}{R} - \left(R - \frac{a}{2}\right) \frac{y_1^3}{3} \quad 0 < y_1 \leq R.$$

式中:  $E_1, E_2$  分别为素桩、钢筋混凝土桩的弹性模量;  $E_3$  为等效桩墙的弹性模量;  $R$  为咬合桩的桩径;  $a$  为咬合量;  $h_0$  为等效桩墙的厚度;  $I_1$  为单桩减去咬合部分后截面的惯性矩;  $I_2$  为单桩截面的惯性矩;  $I_3$  为单桩咬合部分的  $1/4$  截面所对应的惯性矩;  $y_1$  为咬合面宽度的一半。

由于采用灌注桩组成咬合桩,目前旋挖机可以施工的灌注桩最小直径为800 mm,设计采用咬合厚度为200 mm,结合式和计算得到等效桩墙的厚度  $h_0$  为0.732 m。

### 2.3 咬合桩计算参数

高填土堆载产生的累积土体侧移对工程桩产生不利影响<sup>[15]</sup>,考虑到了周边堆载较大,可能会对邻近的工程桩产生不利作用,同时约10.0 m厚的软弱粘土可能形成类似于文献[6]提出的潜在滑移影响。因此,在满足抗渗流稳定性验算的条件下,咬合桩的插入比除了满足基坑稳定性计算要求外,主要是发挥钢筋混凝土桩的隔离作用,以保护工程桩的安全和整个建筑场地的稳定。钢筋混凝土桩的桩端进入第⑤层粉质粘土层以提高围护结构的阻滑作用。

若素桩与钢筋混凝土桩同样长度,势必会增加工程量,提高工程造价,因此可以优化减少素混凝土桩的长度。如图2所示,高填土顶面至基坑底面的高差  $H = 15.25$  m,考虑咬合桩的插入深度为  $H_d = 16.25$  m。对于圆弧滑面的整体稳定安全系数采用瑞典条分法,土条宽度取为0.5 m,滑动面绕过咬合桩墙,采用总应力法进行计算,整体稳定性安全系数为1.90,而基坑抗倾覆系数为1.14。这样,在减少工程量的同时,优化后的咬合桩仍具有较大的安全储备。

### 2.4 内力和变形计算

按照其高度折算成等效的均布荷载160 kPa考

虑,采用弹性地基梁法计算等效桩墙的内力和变形。

在基坑开挖到坑底时,在一道钢支撑作用下,图 4 所示为采用咬合桩的等效刚度和仅考虑钢筋混凝土排桩的计算结果对比。从图 4(a)中可看出,两种等效桩墙的位移在深度范围为 3.0~9.0 m 时都较大,说明高填土对此范围的坑内土体产生了较大的侧向变形影响。图 4(b)所示两种等效桩墙得到的桩身弯矩较为接近,由于咬合桩受素桩开裂的影响刚度降低较快,发挥隔离桩作用的主要是钢筋混凝土桩。因此,咬合桩在发挥隔离作用时,出于安全考虑,应不考虑素桩的抗弯承载作用。

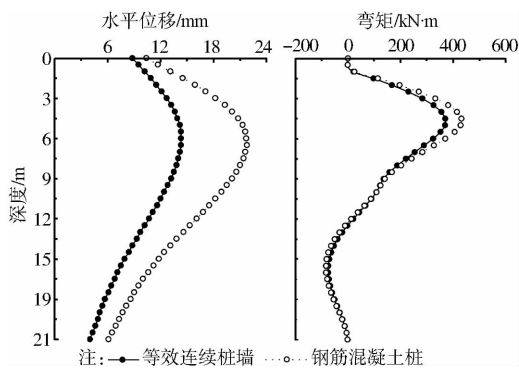


图 4 咬合桩位移和弯矩分布

### 3 实测结果分析

对整个基坑的施工全过程进行监测,东侧测点布置如图 1 所示。CX-1 和 CX-2 为围护墙的侧移,JS1 至 JS5 为堆土坡脚的竖直位移监测点。

图 5 为高填土坡角的累积沉降实测数据,在整个基坑施工期间,堆土累积沉降不断增加,但增加的幅度较小。这表明咬合桩提供了较大的整体刚度,显著减少了对高填土的影响,有利于堆填土体的稳定。

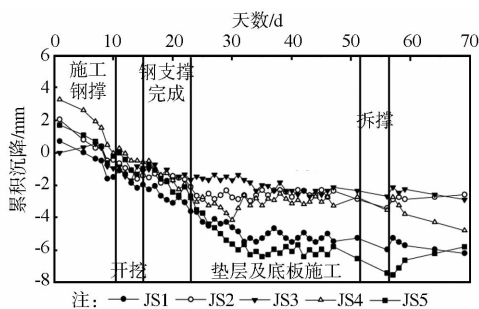


图 5 堆土坡脚累积沉降实测数据

图 6 是典型施工工况的墙身测斜情况,实测位移在深度 2.0~6.0 m 范围内墙体侧移较大,这与图 4(a)采用咬合桩的等效刚度理论计算方法得到的最

终位移趋势是一致的,验证了本文计算方法的合理性。

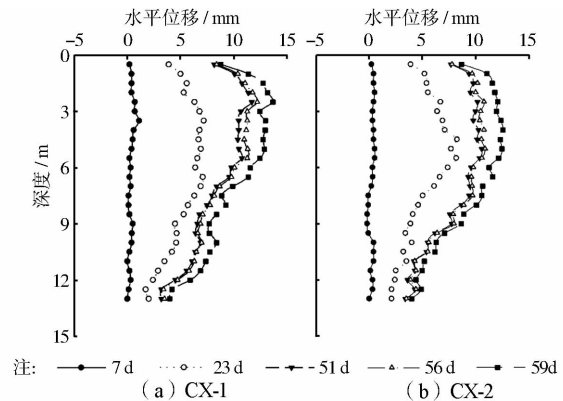


图 6 墙身测斜

监测轴力的支撑位于堆填土最高值与基坑阳角对应位置,如图 1 所示。若东侧高填土对整个基坑区域产生附加荷载,易使得基坑产生偏移。从第 43 d 到 51 d 拆撑阶段,图 7 为实测钢支撑轴力分布基本稳定。这表明由于咬合桩桩墙整体刚度较大,高堆土的作用绝大部分作用在咬合桩墙上。该工程采用咬合桩作为隔离桩,除了考虑止水效果外,也利用了咬合桩墙刚度较大的特点。

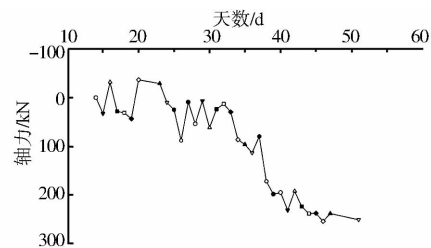


图 7 支撑轴力实测数据

### 4 结论

结合邻近基坑周边有高堆填土,采用咬合桩作为围护结构和隔离桩的实例设计分析,咬合桩结构可以提供较大的安全储备。若咬合桩作为临时围护结构时,设计将素混凝土桩的裂缝发展控制在可接受范围内,达到基坑设计安全和经济,仍需要不断积累工程经验。

工程主要考虑在弹塑性阶段,采用等效刚度法计算咬合桩的变形。由于要求控制堆填土体的稳定和保护工程桩,咬合桩设置发挥隔水帷幕和隔离桩作用。实测表明,在周边有高堆载的条件下,咬合桩一方面作为围护墙体,可以减少基坑开挖引起的堆填土的扰动,另一方面咬合桩中钢筋混凝土桩可作为永久隔离桩分担超载的影响,确保堆填土的稳

定和工程基桩的安全。

#### 参考文献:

- [1] Tan Y, Lu Y, Peng F L, et al. Isolation of DDC impact to sheet pile walls by open trenches [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2012, 138(1): 110-114.
- [2] 刘毓斌, 陈福全, 左广州. 大面积堆载下软土地基的应力隔离与加固实例分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 846-848.  
Liu Y C, Chen F Q, Zuo G Z. Case study of synthetic method of stress isolation and ground reinforcement to handle soft ground problem induced by adjacent surcharge load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 846-848.
- [3] 费伟. 隔离桩在紧邻浅基础建筑的深基坑工程变形控制中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(Sup 1): 265-270.  
Fei W. Application of isolation piles to deformation control of deep foundation pits close to buildings with shallow foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup 1): 265-270.
- [4] 翟杰群, 贾坚, 谢小林. 隔离桩在深基坑开挖保护相邻建筑中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 162-166.  
Zhai J Q, Jia J, Xie X L. Practice of partition wall in the building protection projects near deep excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 162-166.
- [5] Anderson T C. Secant piles support access shafts for tunnel crossing in difficult geologic conditions [C]// Geo-Support 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems, Orlando, Florida, 2004, GSP124: 299-308.
- [6] Finno R J, Bryson L S. Response of building adjacent to stiff excavation support system in soft clay [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2002, 16(1): 10-20.
- [7] 王军生. 咬合桩在既有有线桥梁基础冲刷防护中的应用[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(3): 30-33.  
Wang J S. Application of secant piles in scour protection of bridge foundation on existing railway line [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(3): 30-33.
- [8] 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 B, Shi B, Lin H. A study on the secant pile in soft soil for Nanjing metro project [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 354-357.
- [9] 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 S M, Zhou X L, Song B, et al. Study on the bending performance of secant pile retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 72-78.
- [10] 胡琦, 陈彧, 柯瀚, 等. 深基坑工程中的咬合桩受力变形分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2144-2148.  
Hu Q, Chen Y, Ke H, et al. Analysis of bearing and deforming behavior of secant piles of deep foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2144-2148.
- [11] Chen J H, Su M C, Huang D Y. Application of a SOM-based optimization algorithm in minimizing construction time for secant pile wall [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(11): 1189-1195.
- [12] Mohamad H, Soga K, Pellew A, et al. Performance monitoring of a secant-piled wall using distributed fiber optic strain sensing [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, 137(12): 1236-1243.
- [13] 卜林, 曾华健, 吴传清. 全套管钻孔咬合桩防渗支护结构在深基坑工程中的应用[J]. 土工基础, 2010, 24(4): 10-13.  
Bu L, Zeng H J, Wu C Q. Application of all casing drill and interlocking pile in impervious retaining structure for soft soil deep excavation project in the pearl river delta [J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(4): 10-13.
- [14] 宋志彬, 冯起赠, 王年友, 等. CG型全套管冲抓成孔设备及施工工艺[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2007, (9): 48-52.  
Song Z B, Feng Q Z, Wang N Y, et al. CG percussive grabbing boring equipment with casing and construction technology [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, (9): 48-52.
- [15] Poulos H G. Ground movements-A hidden source of loading on deep foundations [J]. DFI Journal, 2007, 1(1): 37-53.

(编辑 胡玲)