

# 苏州地铁车站咬合桩围护结构的关键施工控制技术

张明童<sup>1</sup>, 陈学军<sup>2</sup>, 张秀勇<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南京禄口国际机场二期工程建设指挥部, 江苏 南京 211100; 3. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 以苏州地铁南施街站咬合桩围护结构应用为例, 分析了咬合桩施工过程中咬合桩桩位控制、超缓凝混凝土的缓凝时间、桩内“混凝土管涌”的控制、“拔桩”的控制、分段施工节点连接控制等关键技术, 开展了不同施工阶段下的基坑测斜变形观测研究。监测结果表明, 围护墙体两端变形小、中间变形大, 最大侧移点深度随着开挖不断下移, 且最大侧向位移监测值始终在警戒值范围内, 施工一直处于安全可控状态。

**关键词:** 地铁车站; 围护结构; 咬合桩; 关键技术; 工程监测

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)02—0007—05

## Key Technologies of Construction and Control for Retaining Structure of BCP in Suzhou Subway Station

ZHANG Ming-tong<sup>1</sup>, CHEN Xue-jun<sup>2</sup>, ZHANG Xiu-yong<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Second-phase Engineering Construction Headquarters of Nanjing Lukou International Airport, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**Abstract:** Here, taking the application of BCP in the foundation excavation project of Nanshi Street Station of Suzhou subway for example, the key techniques of BCP construction are demonstrated in detail, including the precise control of BCP position, the setting time of super delaying concrete, the piping effect of the concrete in pile hole, the pile pulling operation and the sand pile connecting in segmented construction, etc., and the observation for the lateral displacement of BCP retaining wall is made in different process. The results indicate that the lateral displacement of the retaining wall would be dominant at the center, while small at the ends, in the meanwhile, the largest height of the lateral displacement would be declined with the depth of excavation increased, and the largest displacement would still be under the trigger level, i. e., the construction would be under safety and control.

**Keywords:** subway station; retaining structure; bore-hole cast-in-place pile (BCP); key technology; engineering monitoring

## 0 引言

咬合桩作为一种新型支护结构施工工法, 具有防渗能力强、无需泥浆护壁、扩孔(充盈)系数小、配筋率低、止水效果好、工程造价低等优点, 在国外城市的地铁建设中得到了很多成功的应用<sup>[1-3]</sup>。但在国内的应用才刚刚起步, 地下工程围护结构中属于

新技术、新工法、新工艺。1999年深圳地铁一期工程会展中心站至购物公园站区间隧道明挖段的基坑支护设计首次采用钻孔咬合桩, 取得了成功, 随后该工法在南京、上海、天津、杭州、香港等城市地铁建设中得到了成功应用<sup>[4-8]</sup>, 并在施工工艺和技术方面积累了一些经验, 但鉴于岩土工程的地域性差别较大, 该工法还不能在全国范围内直接推广应用。

苏州地铁一号线南施街站咬合桩支护结构是该工法在苏州地区的首次应用,承载着探索苏州软土地基咬合桩设计和施工经验的任务。本文结合南施街站咬合桩的成功施工经验,分析该工法在苏州软土地地区施工过程中的关键控制技术。

## 1 工程概况

### 1.1 工程介绍

苏州地铁一号线南施街站位于苏州市南北向的主干道南施街与东西向的次干道翠园路的交叉路口,长约 122.0 m,宽约 18.7 m 的双层台岛式车站,主体位于翠园路地下十米处,其布置为东西向,沿翠园路路中跨南施街。

车站西南侧有一苏州电信大楼,其他方向地面周边目前均为空地。车站采用双层双跨、双层三跨箱形钢筋混凝土框架结构,施工方式为明挖法。车站东西两端的盾构区间分别为始发井(41.5 m × 36.5 m)和始发接收井(21.2 m × 12.7 m)。

车站主体围护结构采用  $\phi 1000 @ 800$  钻孔咬合桩,分三种桩型:A 型咬合桩,应用于端头井深部,桩长 31.2 m;B 型咬合桩,用于标准段,桩长 27.2 m;C 型咬合桩,应用于端头井浅部,桩长 28.2 m,以上三种桩型均采用“荤素”搭配。拐角等关键部位选用旋喷桩作止水帷幕。围护桩在使用期间通过压顶梁(桩顶冠梁)参与车站抗浮。基坑竖向设置一道 800 mm × 700 mm 的钢筋混凝土支撑以及三道  $\Phi 609 \times 16$  钢支撑,车站标准段基坑埋深 15.5 m,端头盾构井基坑埋深 17.0 m。

### 1.2 工程地质和水文地质条件

南施街站地段地势平坦,地面高程为 5.8 m ~ 7.1 m,太湖冲积平原区,地表水系发育,属第四系(Q)沉积地层。根据地质勘察资料,南施街站地基土层特征情况为:上部土层基本稳定,下部土层变化较大。

该区域土层的含水层分孔隙潜水含水层、微承压含水层和承压含水层。潜水含水层主要由填土层组成,历年最高潜水位标高 2.63 m、最低潜水位标高 0.21 m。微承压含水层由晚更新统沉积成因的土层组成,主要为③<sub>2</sub>粉土夹粉质黏土、④<sub>1</sub>粉土,埋深通常为 4.6 m ~ 10.0 m。该含水层的补给来源主要为潜水和地表水,微承压水头埋深在 1.0 m ~ 2.0 m 左右。承压含水层由⑦粉质黏土、粉土层组成,埋深在 -31.50 m 以下,厚度 3.0 m ~ 7.0 m,深承压水

头标高 -6.68 m。承压水对本工程施工及运营影响不大。

基坑底板主要位于⑤粉质黏土层,该土层局部夹淤泥质粉质黏土及薄层状粉土和可塑性的粉质黏土,以软塑~流塑为主,强度低、变形大,以该土层作为持力层,地基承载力标准值为 70 kPa ~ 90 kPa。底板所在土层水平渗透系数为  $7.1 \times 10^{-6}$  cm/s,垂直渗透系数为  $5.0 \times 10^{-6}$  cm/s。

## 2 咬合桩的施工工艺与效果分析

### 2.1 咬合桩施工原理

咬合桩是指平面布置的排桩间相互咬合排列,即桩圆周相嵌的连续挡土并具备防渗作用的基坑围护结构<sup>[4]</sup>。它既可全部采用钢筋混凝土桩(“荤荤”搭配),也可采用素混凝土桩与钢筋混凝土桩相隔布置(“荤素”搭配)。本项目以“荤素”搭配咬合桩为例,将素混凝土桩(A 桩,  $\Phi 1000$  mm)和钢筋混凝土桩(B 桩,  $\Phi 1000$  mm)以咬合桩的排列方式间隔布置,咬合宽度 200 mm。施工顺序为 A 桩后 B 桩。A 桩混凝土采用超缓凝型混凝土,要求必须在 A 桩混凝土初凝之前完成 B 桩的施工;B 桩施工时,利用套管桩机的切割能力切割掉相邻 A 桩相交部分的混凝土,实现两相邻混凝土桩的咬合<sup>[9]</sup>。施工顺序<sup>[5-6]</sup>为:A1—A2—B1—A3—B2—A4—B3……,(如图 1 所示)

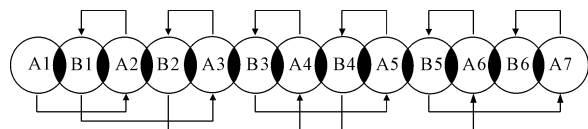


图 1 钻孔咬合桩施工流程图

### 2.2 施工设备

南施街咬合桩主要施工设备为液压摇头式套管桩机 MZ1000,该桩机有两个液压卡盘,上卡盘可升降转动,能旋转、提升及下压套管,在成孔时发挥磨进作用,成桩时起提升套管的作用。施工中还配套使用履带吊机,其行走机构与套管桩机相互连接成为整体,可整体行走、定位、移动,履带吊机在成孔时提降抓斗,抓出套管内土方,成桩时吊装钢筋笼、提升导管。

### 2.3 施工工艺流程

目前国内还没有关于咬合桩的统一施工技术标准,总的原则是,先施工 A 桩,后施工 B 桩(如图 1)。南施街站咬合桩围护结构的现场施工流程如图 2 所示,其施工质量控制措施见图 3。

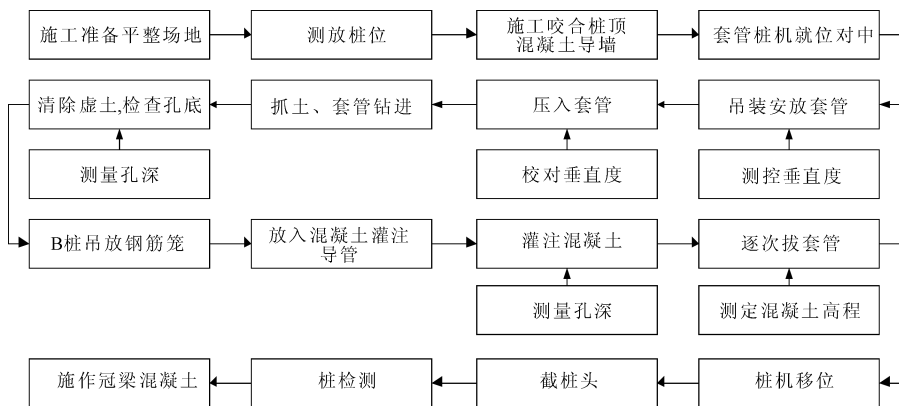


图 2 咬合桩施工工艺流程图



图 3 咬合桩的施工效果图

## 2.4 施工效果

苏州地铁一号线南施街站所处的南施街与翠园路两侧的地下管线十分密集,在南施街站围护结构咬合桩施工期间,因相应管线没有完成迁改,造成了砂桩现象的出现。为进行补救,在完成管线改移后,采取二次成孔的方式进行施工,并在砂桩冷缝外侧施工旋喷桩止水。

南施街站主体围护结构共施工 449 根咬合桩,在施工过程中发现有四处砂桩冷缝处出现渗漏,施工单位及时采用双快水泥或堵漏王进行封堵注浆处理,同时用水泥-水玻璃双液浆进行注浆。经处理后渗漏问题得到了有效地控制。

2008 年 10 月 8 日南施街站基坑土方开始进行开挖,2008 年 11 月 9 日第一段结构底板浇筑,2009 年 7 月 15 日主体结构施工全部完成。除上述因管线影响未连续施工所引起的渗漏外,整个施工过程中未发生一起安全事故,基坑施工一直处于安全受控状态,基坑开挖后可见咬合桩咬合充分,桩身垂直度好,外观整齐光洁,整体防渗止水效果良好(如图 3 所示)。从本工程的实际效果看,咬合桩在南施街站基坑工程中的应用是非常成功的,咬合桩作为基坑围护结构,适合于苏州软土高地下水地质条件。

## 3 咬合桩的关键施工控制技术

咬合桩具有施工噪音低、无泥浆污染、造价低、止水效果好等优点,但对施工精度、工艺和混凝土配比等均有严格要求,对施工人员的要求也相应较高。结合南施街站成功施工的实例,分析咬合桩在软土地区施工过程中的关键控制技术<sup>[7]</sup>。

### 3.1 咬合桩桩位控制技术

孔口定位偏差控制一般是利用定位导墙精确安放第一节套管来控制孔口成孔精度,导墙上定位孔的直径一般比桩径大 20 mm~40 mm。桩机就位后,将第一节套管插入定位孔并检查调整,使孔口定位误差控制在  $\pm 10$  mm。为保证咬合桩底部有足够厚度的咬合量,除对其孔口定位误差严格控制外,成孔过程中需要对套管的顺直度和桩的垂直度进行监测和检查,套管顺直度偏差一般控制在 0.1%~0.2%。如发现垂直度偏差过大,必须及时进行纠偏,纠偏的具体措施见文献<sup>[8]</sup>。

### 3.2 超缓凝混凝土的缓凝时间控制

灌注桩的施工中,先施工被切割的 A 桩身混凝土均要求凝结时间在 60 h 以上,由于该混凝土比一般缓凝混凝土凝结时间还长两倍以上,故将其称为超缓凝混凝土。本工程中配制和生产该混凝土的关键,一要确保素桩混凝土缓凝时间不小于 60 h;二要求混凝土坍落度为  $16 \pm 2$  cm;三要求混凝土各龄期强度须满足设计施工需要。即先施工桩的桩身混凝土凝结时间要长,混凝土的 3 d 强度不大于 3 MPa,以保证能被后施工桩的钻机套管下沉时切割,同时混凝土的 28 d 强度能达到设计强度等级<sup>[9]</sup>。南施街站咬合桩中的素桩采用 C20 超缓凝混凝土,荤桩为 C30 钢筋混凝土桩,通过试验确定的配合比如表 1 所示。

表 1 咬合桩超缓凝混凝土配合比

原材料	品种、规格	用量/(kg·m <sup>-3</sup> )
水	饮用水	170
水泥	P. O42.5	200
砂	中砂	765
石	5-31.5 碎石	1100
粉煤灰	II 级灰	55
矿粉	S95	60
外加剂	HLC-NAF2 超缓凝剂	5.04

### 3.3 桩内“混凝土管涌”的控制技术

在 B 桩切割两侧 A 桩成孔过程中,由于 A 桩混凝土尚未凝固,还处于流塑状态,因此 A 桩混凝土可能从 A、B 桩相交处涌入 B 桩孔内,称为“混凝土管涌”。南施街站施工过程中出现过轻微涌砂现象,及时采取了以下措施防止了“混凝土管涌”的再次发生:

(1) 控制 A 桩混凝土的坍落度,不宜超过 18 cm,以便于降低混凝土的流动性;

(2) 加大 B 桩套管下沉深度,B 桩套管埋深应始终超前开挖面 2.5 m 以上,终挖时 B 桩套管至少超过孔深 1.5 m 以上;

(3) 采取压水措施,即向 B 桩套管内注入一定量的水,使其保持一定的反压力来平衡 A 桩混凝土的压力,阻止“混凝土管涌”的发生;

(4) B 桩成孔过程中应注意观察相邻两侧 A 桩混凝土顶面,如发现 A 桩混凝土下陷应立即停止 B 桩开挖,并一边将 B 桩套管尽量下压,一边向 B 桩内填土或注水,直到完全制止住“管涌”为止。

### 3.4 “拔桩”的控制技术

根据南施街站现场施工情况,主要采取了如下预防措施:

(1) 严格控制缓凝混凝土的配合比,保证其和易性良好,在控制整桩的总体灌注时间的前提下,不得拖延每次灌注的间隔时间;

(2) 混凝土初灌后,即开始提拔外套管,且在灌注过程中随着灌注混凝土顶面的提高,连续提拔外套管,外套管在混凝土中的埋深不大于 2 m;

(3) 钢筋笼的加工尺寸应确保精确,在转运、吊装过程中采取可靠措施防止钢筋笼扭曲变形;

(4) 在钢筋笼底部加焊一块比钢筋笼略小的薄钢板,增加其抗浮能力,或在钢筋笼底部设置抗浮块,且与钢筋笼连接可靠。

### 3.5 分段施工节点连接的控制技术

节点连接一般采用砂桩过渡的方法,即在先施

工桩的端头设置一个砂桩(成孔后用砂灌满,见图 4)用以在相邻的 A 桩预留出咬合口,待后施工段到此节点时在砂桩桩位重新成孔挖出砂并灌上混凝土即可。

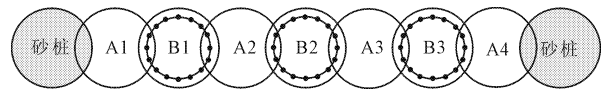


图 4 分段施工接头预设砂桩示意图

### 3.6 事故桩的处理措施

事故桩的处理主要分以下几种情况<sup>[10]</sup>:

(1) 平移桩位单侧咬合。B1 桩切割咬合施工时,A1 桩的混凝土已经凝固,使钻机不能按正常施工条件切割咬合 A1、A2 桩完成 B1 桩。在这种情况下,宜向 A2 桩方向平移 B1 桩桩位,使钻机单侧切割 A2 桩,并在 A1 与 B1 桩外侧另增加一根旋喷桩作为防水处理。

(2) 背桩补强。B1 桩成孔施工时,其两侧的 A1、A2 桩混凝土均已凝固,在这种情况下,则放弃 B1 桩的施工,调整桩序继续后面咬合桩的施工,以后在 B1 桩的外侧增加一根咬合桩及两根旋喷桩作为补强、防水处理。

(3) 预留咬合企口。在 B1 桩成孔施工中发现 A1 桩混凝土已有早凝倾向但还未完全凝固时,如继续按正常顺序施工则会更多的造成事故桩,应及时在 A1 桩右侧施工一砂桩以预留出咬合企口,待调整完成后再继续后面桩的施工。

(4) 用后压浆技术、旋喷补强技术等方法处理咬合桩之间的其它缺陷。

## 4 咬合桩的监测变形分析

本基坑施工中监测内容设有围护结构水平位移、支撑轴力、地表和周围建筑物沉降等,其中最具有直接检验效果的是围护结构的侧向位移,南施街站主体基坑每 40 m 左右至少有一组测斜孔的监测点,共布设 14 个测斜孔,本文选取车站基坑标准段中部测斜孔 CX4 的侧向位移监测数据进行分析,根据基坑标准段在 9 种施工工况下 CX4 孔的侧向位移监测数据进行整理,图 5 给出了 CX4 点处咬合桩桩体水平侧向位移随工况的发展情况,图中“位移差”代表相邻两种工况下围护结构侧向位移的变化量,位移差越大表示在两种工况施工期间施工风险越大。

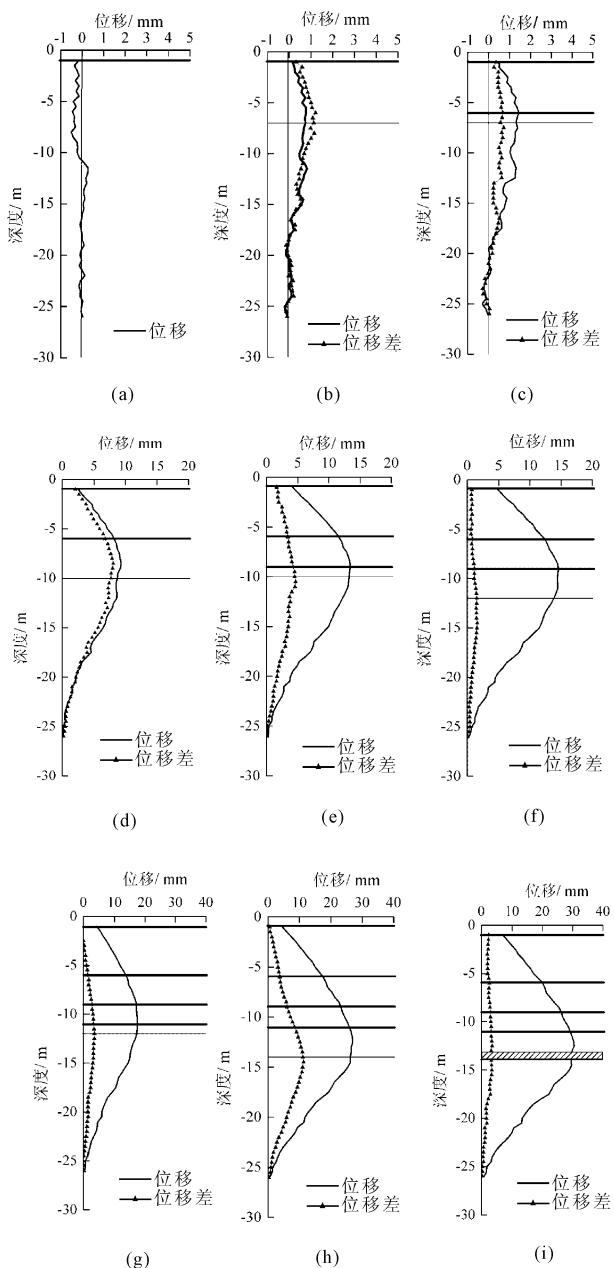


图 5 咬合桩的水平侧向位移随施工进度的变化

(1) 图 5(a)为开挖表层土并浇筑首道混凝土支撑后咬合桩的水平侧向位移。从图中可以看出,由于开挖深度很浅,且设置了刚度较大的钢筋混凝土支撑,桩体基本没有变形。

(2) 图 5(b)为开挖深度至 7 m 时咬合桩的水平侧向位移。分析表明,开挖初期在墙顶位置设置支撑能够有效的限制墙顶水平位移。

(3) 图 5(c)为设置第二道钢支撑并施加预加轴力后咬合桩的水平侧向位移。

(4) 图 5(d)为开挖深度至 10 m 时咬合桩的水平侧向位移。从图中可以看出,随着开挖深度增加,

咬合桩最大水平侧向位移迅速增大到 10 mm,桩体位移形态开始表现出桩体两端位移量小,中间位移量大的“大肚状”,是典型的多支撑咬合桩坑内的变形形态。

(5) 图 5(e)为设置第三道钢支撑并施加预加轴力后咬合桩的水平侧向位移。

(6) 图 5(f)为开挖深度至 12 m 时咬合桩的水平侧向位移。从图中可以看出,基坑向下开挖 3 m,咬合桩的水平侧向位移仅仅增加了 1 mm,这是因为基坑开挖到相对较硬的土层,在一定程度上限制了桩体水平侧向位移的发展。

(7) 图 5(g)为设置第三道钢支撑并施加预加轴力后咬合桩的水平侧向位移。

(8) 图 5(h)为开挖深度至 14 m 时咬合桩的水平侧向位移。从图中可以看出,随着基坑开挖到基底位置,咬合桩最大水平侧向位移迅速增大到 28 mm,此时是基坑开挖的最危险阶段,应避免坑底暴露时间过长,以免引起坑底隆起量和桩体水平侧向位移过大,造成安全隐患。

(9) 图 5(i)为浇筑底板后咬合桩的水平侧向位移。从图中可以看出,随着底板的浇筑,基坑基本稳定,咬合桩的水平侧向位移速率明显减低。

通过以上分析,可以看出,随着基坑开挖深度增加,咬合桩水平侧向位移不断增大,且水平侧向位移最大值的位置随开挖深度增加而降低,基本维持在开挖面附近;首道钢筋混凝土支撑的设置能够有效的限制桩顶水平位移的发展,对基坑的稳定起到很重要的作用;设置钢支撑并施加合理大小的预应力能够更好的约束咬合桩的水平侧向位移。在施工过程中应避免施加过大或过小的预应力,以免造成桩体破坏或者过大变形;由于土体的蠕变现象,在基坑停止开挖后,咬合桩仍会继续变形,因此在基坑开挖至基底后应尽快浇筑底板。

## 5 结 语

(1) 南施街站的工程实践证明:咬合桩围护结构适用于苏州地区软土高地下水水位地层。

(2) 不同施工工况下的测斜监测数据分析表明:围护墙体两端变形小、中间变形大,最大侧移点深度随着开挖不断下移,且最大侧向位移监测值始终在警戒值范围内,施工一直处于安全受控状态。另外,深基坑首道支撑采用混凝土支撑,对保证基坑开挖安全,有效防止围护桩墙内外位移起到了重要作用。  
(下转第 16 页)