

# 钻孔咬合桩设计计算方法合理性分析

周谊<sup>1</sup>, 许万忠<sup>1</sup>, 王计华<sup>2</sup>, 谯立家<sup>1</sup>, 谭银龙<sup>1</sup>, 王本栋<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650031; 2. 铁科院(深圳)检测工程有限公司, 深圳 518132)

**摘要:** 钻孔咬合桩在设计计算中, 有两种主要计算方式, 一为忽略素桩, 仅计算荤桩的支护稳定性能, 二为将荤桩与素桩等效为地下连续墙进行支护结构稳定性计算。为研究钻孔咬合桩的设计计算方法的合理性, 使用弹性地基梁法与有限元法分别计算荤桩、等效为地连墙的位移, 用 *correl* 函数将所得数据与实际监测数据进行相关系数计算, 同时, 将计算所得数据与实际监测值的位移差进行分析, 最后得出适合钻孔咬合桩的设计计算方法。即应先使用弹性地基梁法仅计算荤桩; 再使用有限元法, 将咬合桩等效为地下连续墙进行建模分析, 对设计图的变形进行二次评估验算。

**关键词:** 钻孔咬合桩; 计算方法; 等效地连墙; 基坑监测; 数值模拟

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A

## RATIONALITY ANALYSIS OF DESIGN AND CALCULATION METHOD FOR DRILLING OCCLUDE PILE

ZHOU Yi<sup>1</sup>, XU Wan-zhong<sup>1</sup>, WANG Ji-hua<sup>2</sup>, QIAO Li-jia<sup>1</sup>, TAN Yin-long<sup>1</sup>, WANG Ben-dong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China;

2. China Academy of Railway Sciences (Shenzhen) Testing Engineering Co., Ltd, Shenzhen 518132, China)

**Abstract:** Two main calculation methods are used in the design and calculation of the drilling occlude pile, one is to ignore the plain pile and only calculate the support stability performance of the meat pile, and the other is to equivalent the meat pile and the plain pile to the underground diaphragm wall for the stability calculation of the support structure. In order to study the rationality of the design and calculation method of the drilling occlude pile, the elastic foundation beam method and the finite element method are used to calculate the displacement of the meat pile and the equivalent wall respectively. The *correl* function is used to calculate the correlation coefficient between the obtained data and the actual monitoring data. At the same time, the displacement difference between the calculated data and the actual monitoring value is analyzed. Finally, the design and calculation method suitable for the bored interlocking pile is obtained. That is, the elastic foundation beam method should be used to calculate only the meat piles first; Then, the finite element method is used to equivalent the interlocking pile to the underground diaphragm wall for modeling and analysis, and the deformation of the design drawing is evaluated and checked again.

**Key words:** drilling occlude pile; calculation method; equivalent diaphragm wall; foundation pit monitoring; numerical simulation

钻孔咬合桩作为一种新型基坑围护结构,在我国地下工程的施工及技术方面已积累了许多有益经验。平面布置的排桩间相互咬合嵌套,形成无缝的钢筋混凝土连续“桩墙”,与地下连续墙功能基本相似<sup>[1]</sup>。咬合桩通常采用钢筋混凝土桩(荤桩)与素混凝土桩(素桩)相互间隔布置的排列方式,连续施工无施工缝,在降低配筋率的同时也可兼做截水帷幕<sup>[2]</sup>。硬咬合桩是指钢筋混凝土桩与素混凝土桩相咬合,软咬合桩指钢筋混凝土桩与水泥土桩相咬合。咬合桩在我国第一个工程实例是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的基坑维护<sup>[3]</sup>,在此之后钻孔咬合桩在上海、深圳、苏州、南京等多地区的工程中均有应用<sup>[4-7]</sup>。

项目场地西侧为临海大道,南侧为前湾四路,支护结构边线距离道路边线约10~45 m,东侧为规划市政道路。场地北侧为项目国际学校地块。咬合桩沉桩时已随桩身埋设测斜管CX1。

在进行基坑支护的设计计算中,共有两种计算方法<sup>[1,8]</sup>,一为忽略素桩,仅计算荤桩的支护稳定性<sup>[10-11]</sup>,二为将荤桩与素桩等效为地下连续墙进行支护结构稳定性计算<sup>[12-13]</sup>。本文以CX1测点为实测依据,使用Midas GTS进行有限元数值模拟,理正深基坑7.0PB4进行弹性地基梁法计算,共计使用4种方法计算支护结构的稳定性,最后使用correl函数进行相关系数计算,得出最符合咬合桩实际监测值的设计计算方法。

## 1 工程概况

前海合作区前湾十单元学校项目位于深圳市前海深港现代服务业合作区第十开发单元01街坊10-01-11地块及02街坊10-02-02地块(同时包含两地块之间的绿地及城市道路部分),用地总面积约28 816 m<sup>2</sup>,项目用地性质为学校用地。本项目基坑开挖面积约24 005 m<sup>2</sup>,周长626 m。开挖深度约3.0~13.8 m。根据基坑的规模、周边环境等条件,基坑工程安全等级为二级。

CX1测点临近诚信三街,街道与坑边距离6.6 m。测点段基坑开挖深度6.5 m,使用悬臂咬合桩进行支护,荤桩直径1.4 m,使用C30混凝土;素桩直径1.2 m,使用C15混凝土;咬合段长度0.3 m。坑底使用旋喷桩进行加固,加固厚度6.5 m。设计剖面图及咬合桩平面图如图1、图2所示。

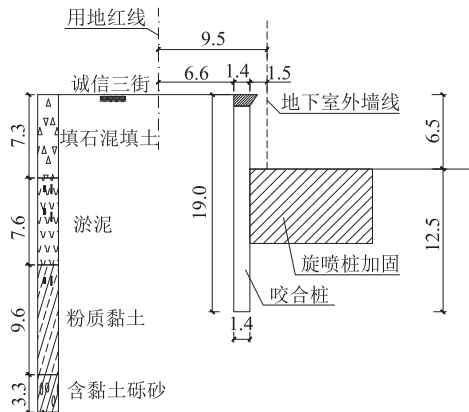


图1 试验点咬合桩设计剖面图

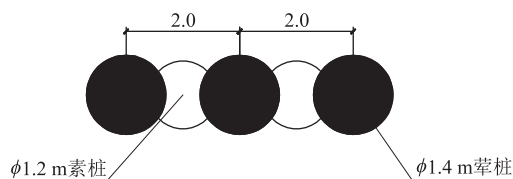


图2 试验点咬合桩设计平面图

## 2 工程地质条件及水文地质条件

### 2.1 工程地质条件

据勘察报告,CX1处在揭露深度内地层自上而下有人工填土层(Q<sup>ml</sup>)、第四系海积层(Q<sup>m</sup>)、第四系冲洪积层(Q<sup>al+pl</sup>)。各岩土层特征详述如下:

#### (1) 人工填土层(Q<sup>ml</sup>)

填石混填土:杂色,松散,主要由花岗岩块和混凝土块回填而成,碎石及块石粒径一般5~30 cm,岩芯采取率约为70%~80%,不均匀。充填粗砾砂及少量黏土,堆积年限约为5 a。

#### (2) 海积层(Q<sup>m</sup>)

2-1 淤泥:深灰、灰黑色,饱和,软塑-流塑,岩芯采取率约为80%~90%。标贯平均2.3击。灵敏度为中等灵敏。

#### (3) 第四系冲洪积层(Q<sup>al+pl</sup>)

3-1 粉质黏土:灰黄、褐红、灰白色,稍湿-湿,可塑-硬塑,岩芯采取率约为80%~90%。标贯试验平均13.7击。

### 2.2 水文地质条件

本场地地下水补给条件较好,地下水主要受大气降水的垂向补给及周边地下水、海水的侧向径流补给。周边沟渠较为完善,雨季时未及时渗透的水体随自然地形向沟渠外排。

场地钻孔均在钻探深度范围内遇地下水,钻探结束隔日测得CX1附近地下水稳定水位埋深为地

面下-2.0 m,地下水受大气降水及河水侧向补给影响而呈动态变化,地下水季节变化幅度1~2 m。

根据勘察报告,土层设计参数如表1所示。

表1 岩土物理力学参数表

岩土体名称	天然重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$
填石混填土	18.0	8.0	12.0	10	0.2
淤泥	19.5	10.0	3.0	3	0.3
粉质粘土	18.5	20	16	20	0.25
人工加固土	20	20	15	120	0.2

### 3 有限元计算

根据现场实测,在 AutoCAD 中画出剖面图,导入 MIDAS GTS/NX 中建立分析 2D 模型。该模型为半无限体模型,按照基坑深度影响范围取水平方向长 64 m,竖直方向长 24.5 m。对模型进行尺寸控制与网格划分,添加水位及止水帷幕,共生成 4 398 个节点和 4 300 个单元。距基坑边缘 5 m 范围外设置 20 kN/m 的施工压力荷载,长度为 20 m。

为避免暴雨天气所带来的监测数据偏差,在设计方法合理性分析时,考虑普通工况,对岩土层及支护结构赋参数值,用摩尔-库伦原理对模型施加自重,模型边界为固定边界,所建模型如图 3 所示。

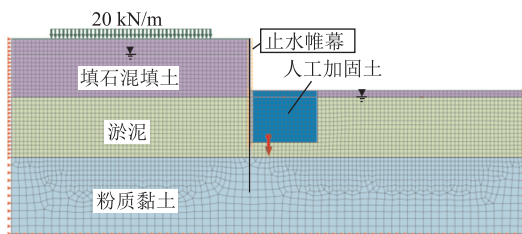


图3 基坑剖面分析模型图

#### 3.1 计算参数

在钻孔咬合桩的计算方法中,一是按照钻孔灌注桩的排桩进行计算,将素桩作为安全储备,二是按照等效抗弯刚度原则将咬合桩支护结构等效为地下连续墙,再进行弯矩和内力的计算。

使用等效刚度原则计算时,使用公式如下:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = E_3 I_3 = E_3 \frac{bh^3}{12}$$

式中, $I_1$  为去掉咬合部分的素桩截面惯性矩; $I_2$  为完整素桩截面惯性矩; $E_1, E_2$  分别为素混凝土和钢筋混凝土的弹性模量; $E_3$  为等效地连墙弹性模量; $b$  为等效地下连续墙长度; $h$  为等效地下连续墙厚度。

忽略钢筋对桩体刚度的影响,求得混凝土等效地下连续墙厚度  $h=1.15$  m。

### 3.2 分析计算结果

#### 3.2.1 有限元法等效地连墙计算结果

按照等效抗弯刚度原则将咬合桩支护结构等效为地下连续墙,进行有限元模拟位移示意如图 4 所示,支护桩顶部最大位移为 44.77 mm。

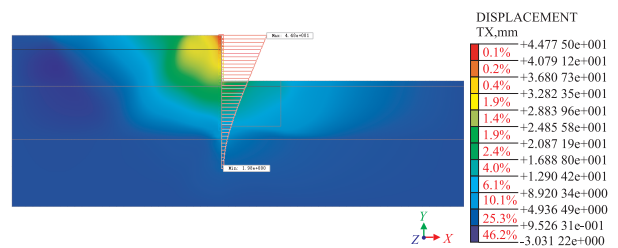


图4 有限元法等效地连墙变形位移图

#### 3.2.2 有限元法仅牵桩计算结果

按照钻孔灌注桩的排桩计算,将素桩作为安全储备,进行有限元模拟位移示意如图 5 所示,支护桩顶部最大位移为 69.20 mm。

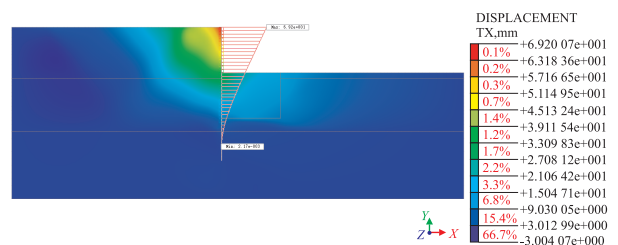


图5 有限元法仅计算牵桩变形位移图

## 4 弹性地基梁法计算

弹性地基梁法是国标《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)规定的基坑内力位移计算方法。

以文克勒地基梁理论为基础的,将结构和岩土介质的相互作用转化为一个个独立的弹簧连接,结构和岩土材料可以通过弹簧达到变形协调。弹簧一般只能受压,不能受拉。理正深基坑中的弹性法一般为弹性支点法,将基坑内侧的支撑(锚固)、坑底土都看做水平方向具有刚度的弹簧,基坑外侧施加计算得来的土压力,支护结构和岩土材料就可以变形协调。

#### 4.1 弹性地基梁法仅牵桩计算结果

使用弹性地基梁法,将咬合桩的素桩作为安全储备不进行计算,牵桩当作混凝土灌注桩排桩,得出支护桩的位移变形如图 6 所示,顶部最大位移为 49.09 mm。

#### 4.2 弹性地基梁法等效地连墙计算结果

使用弹性地基梁法,按照等效抗弯刚度原则将咬合桩支护结构等效为地下连续墙,使用弹性地基

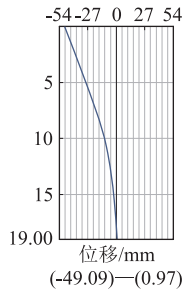


图 6 弹性地基梁法仅计算单桩变形位移图

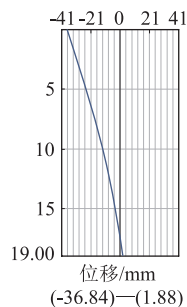


图 7 弹性地基梁法等效地连墙变形位移图

梁法计算,得出支护桩的位移变形如图 7 所示,顶部最大位移为 36.84 mm。

### 5 基坑监测

使用 INDEGEO-IN1000 测斜仪,测斜管固定绑扎于灌注桩钢筋笼上,待桩身混凝土浇筑完成后,凿除桩头混凝土,下放测斜探头,进行监测工作。根据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB50497-2019) 5.2.2,埋在围护墙体内部的测斜管埋设深度宜与围护墙入土深度相同,即测斜管长度为 19 m。

以每开挖 2 m 左右为时间节点,记录监测数据,所得深度-位移曲线图如图 8 所示。

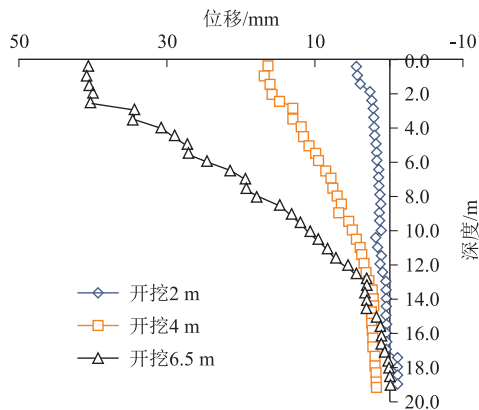


图 8 深层水平位移监测深度-位移曲线图

深层水平位移监测数据符合基坑悬臂支护变化特点,即开挖深度越深,基坑深层水平位移变化越大,

所得监测数据真实有效。

### 6 对比分析与结论

选用基坑开挖到底、基础底板浇筑成型稳定后最后一次监测数据。

4 种计算方法所得数据及实际监测位移数据见图 9。

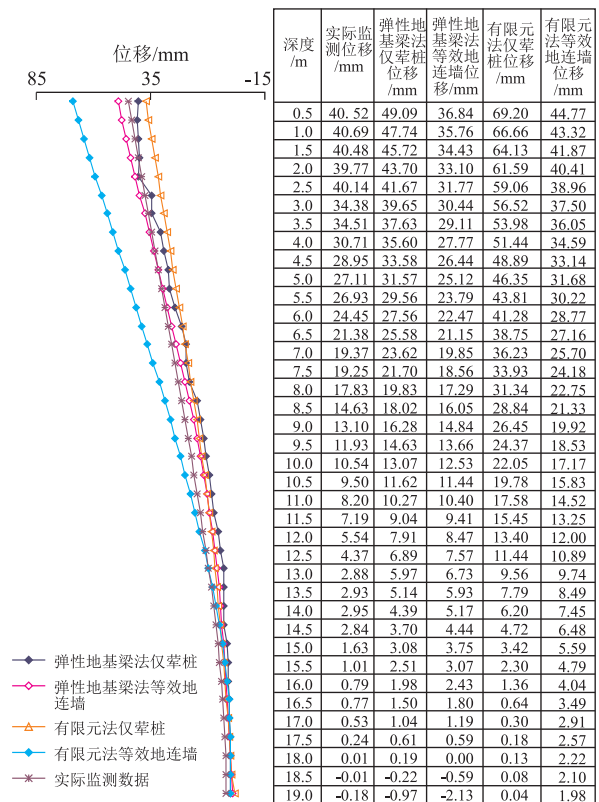


图 9 深度-位移曲线数据图

以实际监测结果为依据,使用 Correl 公式进行数据分析:

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

其中,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  是样本组 X 及 Y 的平均值。

求得咬合桩的各计算方法与实际监测数据的 Correl 公式相关系数如表 2 所示。

表 2 相关系数计算结果

计算方法	弹性地基梁法仅单桩	弹性地基梁法等效地连墙	有限元法仅单桩	有限元法等效地连墙
相关系数	0.997 2	0.991 0	0.993 0	0.993 3

由上表 2 结合深度-位移曲线图可知,弹性地基梁法仅单桩及有限元法等效地连墙与实际监测结果的相关系数更高,较为符合实际监测结果。以上 4 种计算方法与实际监测数据相关系数均在 0.99 以

上,但模拟所得最大位移及与实际监测最大位移相比,在数值及位移图上仍有较大差距。

以基坑开挖深度 6.5 m 为限,分析 4 种计算方法结果与实际监测数据位移差,所得深度-位移差数据图如图 10。

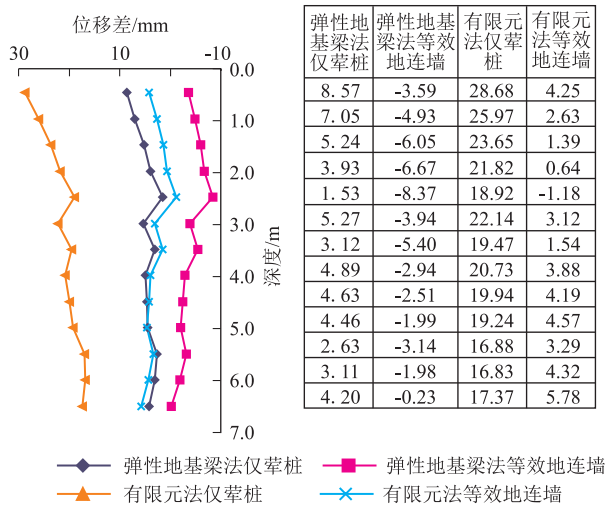


图 10 深度-位移差曲线数据图

由图 10 可知,与实际监测结果位移差最小的为有限元等效地连墙法,其次为弹性地基梁法仅计算桩,使用此 2 种方法进行钻孔咬合桩的设计计算较为合理。在用有限元法仅计算桩时,与实际监测结果相差最大,设计太过保守会造成工程材料的浪费;而在用弹性地基梁等效地连墙法计算咬合桩位移时,与实际监测结果的位移差为负值,可能会造成安全问题,使用此 2 种方法进行钻孔咬合桩的设计计算不够合理。

考虑到基坑支护设计时不仅需要计算支护桩的变形,同时也需要计算灌注桩的配筋,而理正深基坑

软件在设计使用中更为简单方便,因此,在进行咬合桩的设计计算时,应先使用弹性地基梁法,将素桩作为安全储备,仅计算桩,再使用有限元法,将咬合桩等效为地下连续墙进行建模分析,对设计图的变形进行二次评估验算,方能保证基坑支护结构的安全性。

## 参考文献

- [1] 严伟飞,于喆,杨涛,等. 素桩搭配咬合桩支护结构受力变形机制的研究[J]. 地基处理,2020,31(4):285-289.
- [2] 王安龙. 钻孔咬合桩——地铁工程围护结构新形式[J]. 铁道工程学报,2003,(1):53-59.
- [3] 朱斌华,雷崇红. 深圳地铁基坑钻孔咬合桩围护结构施工技术[J]. 铁道建筑,2001,(12):2-4.
- [4] 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.
- [5] 张德富,童立元,刘松玉,等. 苏州地铁 1 号线车站深基坑围护结构变形性状分析[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(S2):1961-1965.
- [6] 张秀勇,刘松玉,姜承滨. 苏州地铁南施街站基坑围护结构的选型与施工[J]. 施工技术,2010,39(S1):88-90.
- [7] 周裕福,陈昌祺. 钻孔咬合桩在上海地铁车站围护结构设计中的应用[J]. 地下工程与隧道,2006,(3):36-38+42+61.
- [8] 罗积胜. 地铁车站咬合桩围护结构设计计算方法及其应用研究[D]. 西南交通大学,2009.
- [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,2008,182(1):72-78.
- [10] 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(S1):663-667.
- [11] 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,2018,26(10):95-96.
- [12] 赵超. 素桩搭配咬合桩的设计计算[J]. 施工技术,2009,38(S1):161-163.

作者简介: 周谊,(1996—),女,昆明理工大学国土资源工程学院地质工程系硕士,主要从事基坑、边坡工程的稳定性及加固研究。

E-mail:358592220@qq.com

通讯作者: 许万忠(1965—),男,博士,教授,就职于昆明理工大学国土资源工程学院,主要从事边坡、基坑、隧道及地质灾害防治的力学分析及加固支护设计等方面的研究工作。E-mail:582647881@qq.com