

复合地层嵌岩咬合桩合理嵌入深度研究

彭 麟

(江苏联合职业技术学院 南京分院,江苏 南京 210019)

摘要:目前,对于复合地层基坑工程中不同嵌岩深度的咬合桩及非嵌岩桩的整体变形受力特性研究仍旧较少。为提供经济合理的支护设计建议,本文以南京地铁5号线盐仓桥站基坑工程为例,通过采用FLAC^{3D}数值模拟软件分析不同嵌入深度的咬合桩的基坑支护效果,选取最优嵌岩深度。结果表明:1)复合地层中,咬合桩的桩身水平位移最大值、支撑轴力最大值、桩身弯矩最大值、坑外土体位移最大值等考察指标均与嵌入深度成反比,但随着嵌入深度的增加,各考察指标的变化幅度逐渐减小,到某一深度后则不再变化。2)结合上述变化规律与场地渗流条件,综合考虑工期和经济指标,建议最优嵌岩深度取2 m。本文成果可为长三角地区相似工程地质条件下的地铁车站及城市高层建筑的基坑支护设计提供借鉴。

关键词:复合地层;嵌岩咬合桩;嵌入深度;FLAC^{3D};长三角地区

中图分类号:TU753.3

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)01-0029-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.01.006

In-depth research on reasonable embedding of rock-socketed occlusive piles in composite strata

PENG Lin

(Nanjing Branch of Jiangsu Union Technical Institute, Nanjing 210019, Jiangsu, China)

Abstract: At present, there are still few studies on the overall deformation and mechanical characteristics of occlusive piles and non-rock-socketed piles with different rock-socketing depths in composite strata foundation pit engineering. In order to provide economic and reasonable support design suggestions, the foundation pit engineer of Yancangqiao Station of Nanjing Metro Line 5 is taken as an example, and the FLAC^{3D} numerical simulation software is used to analyze the foundation pit support effect of occlusive piles with different embedding depths, and the optimal rock-socketed depth is selected. The results show that: 1) In the composite strata, the maximum horizontal displacement, maximum support axial force, maximum bending moment and maximum displacement of soil outside the pit are inversely proportional to the embedding depth. However, with the increase of embedding depth, the variation range of each index gradually decreases, and it does not change after a certain depth. 2) Combined with the above variation law and site seepage conditions, considering the construction period and economic indicators, it is recommended that the optimal rock socketing depth should be 2 m. The results can provide a certain reference for the foundation pit support design of subway stations and urban high-rise buildings under similar geological engineering conditions in the Yangtze River Delta region.

Key words: composite strata; rock-socketed occlusive piles; depth of embedding; FLAC^{3D}; Yangtze River Delta region

咬合桩是指平面布置的排桩间相邻桩相互咬合(桩周围相嵌)而成的钢筋混“桩墙”,它用作构筑物的深基坑支护结构^[1-2]。在土岩复合地层

中,咬合桩成桩方式以旋挖钻联合与其配套的全套管钻进技术为主^[3]。这种基坑围护结构垂直度高、桩间咬合止水效果好、成孔时无塌孔、震动

收稿日期:2023-02-20

作者简介:彭 麟(1980—),男,讲师,从事土木工程方向研究。

小、对周边影响小、造价也相对较低,有良好的经济效益。

对于支护结构为多支点的基坑工程,其围护结构的嵌固深度多按圆弧滑动简单条分法确定,即最小嵌固深度至少为 0.2 倍基坑开挖深度^[4]。对于插入比的选取,上海、南京及苏州等地区围护结构的插入比一般为 0.6~1.2^[2]。但对于上土下岩的地层情况,如果简单套用以往的插入比数值,往往会造成嵌入深度过大,引起施工困难及材料浪费等状况;或者未嵌入岩体中,引起基坑结构失稳等。当基岩埋置深度较浅时,将涉及桩体的嵌入深度问题。罗海燕等^[4]通过对太原市地铁 2 号线中心街西站基坑稳定性的分析,得出黏土及粉土地区深基坑工程地连墙插入比宜取 0.7~0.8;陈震等^[5]通过理论计算和数值模拟手段对山东省会文化艺术中心深基坑进行研究,结果表明土层质量参数与插入比存在线性关系;李四维等^[6]利用数值模拟与监测数据的对比分析,得出基坑桩体的嵌固深度对基坑变形规律的影响;马康等^[7]推导了对应 3 种临界深度的支护桩嵌岩深度,并研究出一套相对智能而高效的适宜嵌岩深度计算方法;POH 等^[8]利用 EXCAV 有限元软件研究了不同插入比对桩墙变形受力的影响。

目前,对于复合地层基坑工程中嵌岩咬合桩嵌入深度问题的研究相对较少。本文以南京地铁 5 号线盐仓桥车站工程为研究实例,利用数值模拟手段,研究不同地层条件下各种嵌岩深度时咬合桩的整体受力变形特性,从而得出在保证基坑工程安全稳定的情况下,不同基岩埋深下嵌岩咬合桩最佳嵌入深度临界值,以期为相似工程在施工安全与保护方面积累工程经验。

1 工程概况

1.1 工程背景

南京地铁 5 号线盐仓桥站位于中山北路与盐仓桥路交汇路口处,沿中山北路东西向设置。车站周边建筑物较为密集,车站主体与中国石化集团江苏石油大厦地下室、大桥南路高架、南京长江油运公司最小净距分别约为 6.0、9.3、28.9 m。基坑呈近长方形,长度约为 200 m,宽度约为

21 m。基坑开挖深度范围为 17.25~18.10。

1.2 工程地质

场地地貌类型为秦淮河漫滩区,地表普遍分布①-1 层杂填土、局部①-2 层素填土、①-3 层淤泥质填土,往下依次:②-1b₂₊₃层粉质黏土加粉土、②-1d₃层粉砂、②-2c₃层粉土、②-2b₃层粉质黏土夹粉土、②-3d₂层粉砂、③-3b₁₊₂层粉质黏土、K_{2p-2}强风化含砾砂岩、K_{2p-3}中风化含砾砂岩。站址范围内岩面起伏较大,基岩面高差约为 17 m。

1.3 工程措施

车站主体采用半盖明挖顺作法施工,基坑共分三部分分部施工,支护体系采用钻孔灌注桩(钻孔咬合桩)+水平内支撑。钻孔灌注桩采用 $\varnothing 1\,000\text{ mm}@1\,200\text{ mm}$,咬合桩外侧施作三轴搅拌桩止水帷幕,灌注桩进入中风化岩深度为 2.5 m,止水帷幕进入坑底 2 m。车站小里程端中风化碎裂带岩层范围采用 $\varnothing 1\,000\text{ mm}@800(700)\text{ mm}$ 钻孔咬合桩,最大进入中风化深度约为 18 m。车站标准段采用四道支撑,其中第一道采用钢筋混凝土支撑,其余 3 道采用钢支撑。

2 数值模拟分析

2.1 计算模型建立

根据工程概况及重点分析内容,数值计算模型尺寸:深度方向为 60 m,水平方向为 61.5 m,垂直方向厚度为 1.6 m,其中基坑开挖深度为 18 m,开挖宽度为 10.5 m。模型尺寸示意如图 1 所示。数值模型中土体、冠梁、支撑及桩体结构均采用实体单元,单元类型为六面体单元为主;桩中主筋采用 beam 单元模拟;立柱桩采用 pile 单元模拟。模型总计 407 212 个节点,640 969 个单元。咬合桩数值计算模型如图 2 所示。

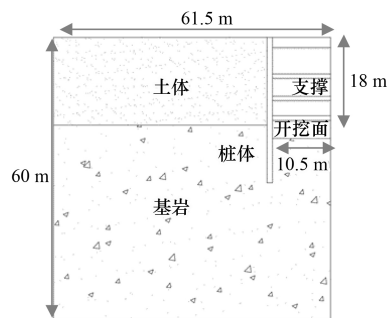


图 1 模型尺寸示意

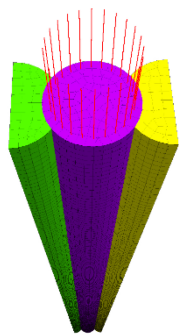


图 2 咬合桩模型示意

2.2 模型计算参数

土体采用摩尔库伦模型，其他实体单元采用

表 1 土层物理力学参数

土层名称	泊松比	弹性模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	重度/(kg·m ⁻³)
填土	0.30	12.04	8.1	9.8	19.0
粉质黏土夹粉土	0.33	7.04	3.8	11.3	19.7
粉砂夹粉土	0.27	32.22	29.4	7.6	19.4
粉质黏土	0.26	29.00	12.5	51.4	20.0
强风化含砾砂岩	0.35	119.00	31.0	100.0	25.0
中风化含砾砂岩	0.32	2425.00	38.0	800.0	25.4

表 2 模拟工况

工况	基坑底部与基岩面距离	嵌岩深度
1	8	-6、-4、-2、0、2、4、6、8
2	6	-4、-2、0、2、4、6、8
3	4	-2、0、2、4、6、8
4	2	0、2、4、6、8
5	0	2、4、6、8

注：嵌岩深度为负数表示桩底离基岩面的距离。

3 计算结果分析

3.1 围护深层水平位移分析

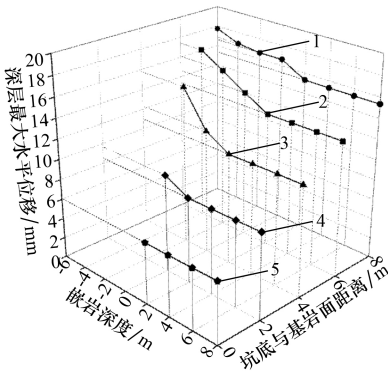
基坑围护结构变形最主要的监测项目之一为咬合桩深层水平位移。图 3 为所有模拟工况下咬合桩的最大深层水平位移随嵌岩深度变化及坑底距基岩面距离变化的情况。由图 3 可知：随着坑底与基岩面距离的增加，咬合桩的最大深层水平位移逐渐加大，由坑底距基岩面 0 m 工况下的 6.1 mm 增加到坑底距基岩面 8m 工况下的 17.8 mm。这表明：当坑底与基岩面距离为 0 时，咬合桩嵌岩深度对深层最大水平位移及最大位移出现的位置基本没有影响，深层最大水平位移基本为 6.1 mm，位置为距离坑底 7.2 m 左右，此时继续增加嵌岩深度并不会影

弹性本构模型，相应参数如表 1 所示。冠梁、牵桩及立柱桩采用 C35 混凝土，弹性模量为 31.5 GPa；素桩采用 C20 混凝土，弹性模量为 25.5 GPa；牵桩中主筋为 HRB400 级钢筋，弹性模量为 200 GPa；上述结构的泊松比均取 0.22。

2.3 模拟工况

根据实际工程地质情况及不同嵌入深度，计算分为 5 个大工况，每个大工况下含有不同数量的小工况。所有工况均按照实际设计开挖方案进行开挖。具体模拟工况如表 2 所示。

响桩身水平位移的变化。对于本工程而言，综合工期和经济指标，建议最优嵌岩深度取 2 m。此外，当坑底与基岩面距离为 4 m 时，咬合桩由嵌岩到非嵌岩条件下深层最大水平位移的变化范围最大；当坑底与基岩面距离为 0、8 m 时，咬合桩由嵌岩到非嵌岩条件下深层最大水平位移的变化范围最小。

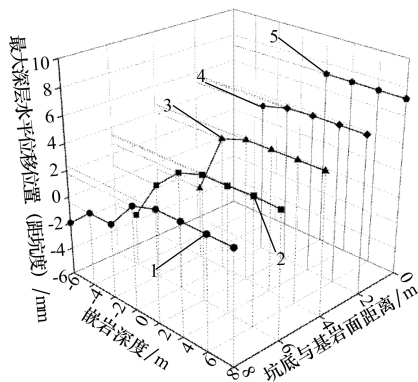


距离/m：1—8；2—6；3—4；4—2；5—0。

图 3 不同工况下咬合桩深层水平位移最大值

图 4 为所有模拟工况下咬合桩的最大深层水平位移出现位置随嵌岩深度变化及坑底距基岩面距离变化的情况。由图 4 可知：随着坑底与基岩面距离的增加，咬合桩出现最大深层水平位移的位置逐渐降低。这表明，坑底与基岩面距离为 0 m

的工况条件下,最大深层水平位移发生的位置在坑底以上8 m左右;坑底距基岩面范围为2~8 m的工况条件下,最大深层水平位移发生在坑底以上2~6 m范围内(咬合桩嵌岩)或咬合桩的底端(咬合桩非嵌岩)。



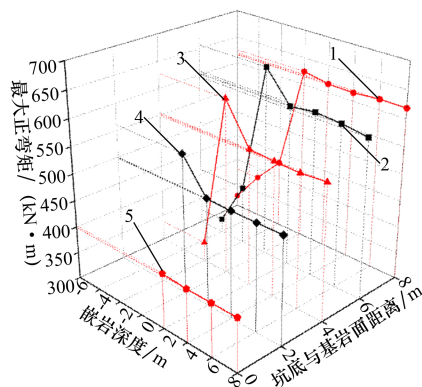
距离/m: 1—8; 2—6; 3—4; 4—2; 5—0。

图4 不同工况下咬合桩最大深层水平位移出现位置

咬合桩最大水平位移值及出现位置随着坑底与基岩面距离的变化而变化。这主要是由于随着基岩面与坑底距离的加大,基坑外侧土体发生塑性变形的区域相应加大,即随着基坑开挖周边土体应力释放的范围加大,故导致围护结构位移加大及位置下移。此外,在相同坑底与基岩面距离条件下,嵌岩深度超过2 m后,嵌岩深度的变化不会引起深层最大水平位移及其位置的变化,即咬合桩嵌岩深度为2 m及超过2 m时,坑外土体的塑性变形区域范围不再变化。

3.2 最大弯矩分析

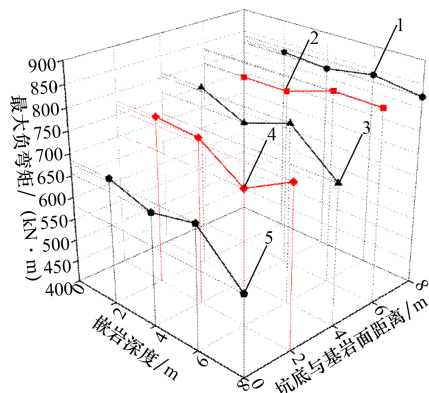
图5为基坑开挖过程中所有工况下咬合桩的桩身最大正弯矩值。由图5可知:桩身最大弯矩值随着坑底与基岩面距离的增大而增大;同时,在坑底与基岩面距离相同的条件下,嵌岩深度超过2 m后,嵌岩深度的变化对桩身最大弯矩基本没有影响,这与前面深层水平位移的分析结果相吻合。在各种工况下,当嵌岩深度为0 m时,桩身最大弯矩值达到最大,并随着咬合桩桩长的减小而迅速减小。这主要是由于当桩身全部处于土体中时,整体位移表现为“下踢脚”型;嵌岩深度为0 m及更大时,桩身整体表现为“鼓肚子”型,即桩身下部的位移决定了桩身最大弯矩的大小。



距离/m: 1—8; 2—6; 3—4; 4—2; 5—0。

图5 不同工况下咬合桩最大正弯矩值

本次模拟中,所有嵌岩桩都出现了两个反弯点,由于上部反弯点之上的桩身弯矩较小,故本次模拟只统计了下部反弯点以下的负弯矩。根据模拟数据统计,下部最大负弯矩基本出现在基岩面附近。图6为基坑开挖过程中所有工况下嵌岩咬合桩的桩身最大负弯矩值。由图6可知:桩身最大负弯矩值随着坑底与基岩面距离的增大而增大,且桩身负弯矩基本大于桩身正弯矩。此外,在坑底与基岩面距离相同的条件下,咬合桩嵌岩深度超过2 m后,嵌岩深度的变化基本对桩身最大负弯矩值没有明显的影响。



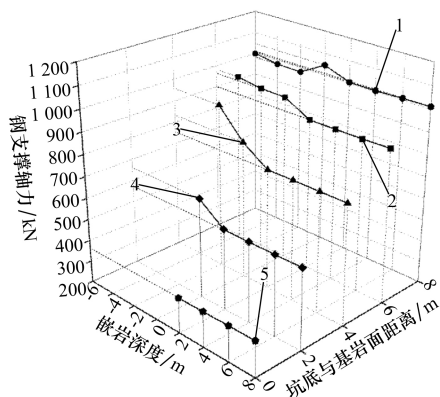
距离/m: 1—8; 2—6; 3—4; 4—2; 5—0。

图6 不同工况下咬合桩最大负弯矩值

3.3 钢支撑轴力分析

随着基坑开挖的进行,固定深度的钢支撑轴力会产生变化。为了更好地统计不同工况下钢支撑轴力的大小,拟对3道钢支撑轴力的叠加值进行分析。图7为所有模拟工况下钢支撑轴力随嵌岩深度变化及坑底距基岩面距离变化的情况。由图7可知:钢支撑轴力变化规律与咬合桩最大深层水平位移相似,即随着坑底与基岩面距离的增

加, 钢支撑轴力逐渐加大, 由坑底距基岩面 0 m 工况下的 365 kN 增加到坑底距基岩面 8 m 工况下的 1 010 kN。此外, 当坑底与基岩面距离为 4 m 时, 咬合桩由嵌岩到非嵌岩条件下钢支撑轴力的变化范围最大; 当坑底与基岩面距离为 0、8 m 时, 咬合桩由嵌岩到非嵌岩条件下深层最大水平位移的变化范围最小。同时, 在相同坑底与基岩面距离条件下, 嵌岩深度超过 2 m 后, 嵌岩深度的变化基本不会引起钢支撑轴力的变化。



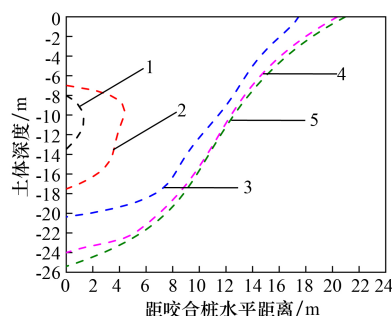
距离/m: 1—8; 2—6; 3—4; 4—2; 5—0。

图 7 不同工况下钢支撑轴力值

3.4 土体深层水平位移分析

随着坑底与基岩面距离的增加, 基坑外侧土体发生塑性变形的区域相应加大, 进而引起咬合桩的最大深层水平位移逐渐加大。图 8 为在不同坑底与基岩面距离的工况(基坑底部以下桩长均为 2 m)下, 基坑外侧土体发生 5 mm 水平位移的等值线。由图 8 可知: 随着坑底与基岩面距离的增大, 土体 5 mm 水平位移等值线的范围也相应变大。当坑底与基岩面距离为 0、2 m 时, 土体 5 mm 水平位移等值线呈闭环状; 当坑底与基岩面距离为 4 m 及以上时, 土体 5 mm 水平位移等值线延伸到了地面; 当坑底与基岩面距离为 6 m 及以上时, 土体 5 mm 水平位移等值线范围基本一致。

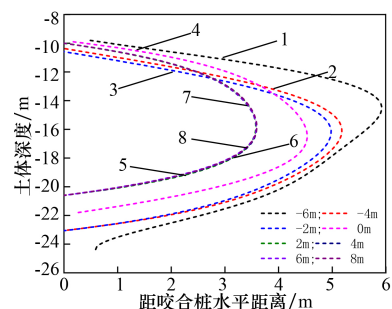
图 9 为当坑底与基岩面距离为 8 m 时, 不同嵌岩深度工况下的基坑外侧土体 8 mm 水平位移等值线。由图 9 可知: 随着嵌岩深度的减小, 土体 8 mm 水平位移等值线的范围相应变大, 出现位移最大值的深度相应减小。当嵌岩深度为 2 m 及以上时, 基坑外侧土体 8 mm 水平位移等值线基本一致; 当咬合桩为非嵌岩状态下, 土体深层水平位移等值



距离/m: 1—0; 2—2; 3—4; 4—6; 5—8。

图 8 坑底与基岩面不同距离工况下土体水平位移等值线示意

线范围随着坑底以下咬合桩长度的增加而减小。



深度/m: 1—6; 2—4; 3—2; 4—0; 5—2; 6—4; 7—6; 8—8。

图 9 坑底与基岩面距离为 8 m 工况下土体水平位移等值线示意

4 结 论

(1) 随着坑底与基岩面距离的增加, 咬合桩的最大深层水平位移、最大正负弯矩及钢支撑轴力逐渐加大, 最大深层水平位移出现的位置逐渐降低。

(2) 咬合桩嵌岩深度的大小基本对桩身最大负弯矩值没有明显的影响。

(3) 对于本工程而言, 综合工期和经济指标, 建议最优嵌岩深度取 2 m。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 高新南, 王占生, 童立元, 等. 咬合桩在苏州地铁南施街站中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 463-466.

(下转第 50 页)

5 结 语

CT 高精砌块作为一种新型的装配式环保建材,运用于本项目同类工程中,更能突出体现砌筑墙体坚固稳定、施工高效、对环境温度适应能力强和降低后期饰面层出现空鼓开裂风险的优势。CT 高精砌块生产原材料来源广泛,生产工艺简单,设备配套先进,设计施工技术完善,产品质量稳定可靠。它不仅可以改善建筑施工的传统模式,还为产业结构调整 and 新型建材产业的发展提供了新的机遇。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 关于大力发展装配式建筑的指导意见[EB/OL]. (2016-09-27)[2016-09-30]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5120699.htm.
- [2] 李玲燕,赵月溪,高伯洋. 基于知识图谱的国际和国内装配式建筑文献对比[J]. 土木工程与管理学报, 2020,37(2):50-58.
- [3] 惠方春. 绿色装配式建筑的施工技术探讨[J]. 佛山陶瓷,2023,33(8):51-53.
- [4] 刘凯,王鑫,薛俊柏,等. 国内外装配式建筑发展现状对比及对策研究[J]. 工程建设,2021,53(7):19-24.
- [5] 安强,王洪飞,付茂强,等. 复式榫槽轻质模块装配式墙体力学性能研究[J]. 山东建筑大学学报,2018,33(5):54-59;78.
- [6] 王永一,李长江,郭赢,等. CG 高精度石膏模块装配墙体施工技术[J]. 建筑技术开发,2021,48(23):47-48.
- [7] 危秀旺,李云. 快装式高精度脱硫石膏轻质砌块装配式墙体优势分析[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1055-1057.
- [8] 曹杰. 填充墙砌体电气预埋施工工艺创新技术探讨[J]. 科技与创新,2023(12):138-140.
- (上接第 33 页)
- [3] 王召磊,吴旭君,彭帅,等. 旋挖咬合灌注桩在基坑支护工程中的应用[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2): 1192-1195.
- [4] 罗海燕,杨双锁,王磊,等. 地连墙插入比对深基坑稳定性影响的数值模拟研究[J]. 太原理工大学学报, 2016,47(4):455-459.
- [5] 陈震,王国富,路林海,等. 黄河冲积互层深基坑围护桩插入比优化分析[J]. 长江科学院院报,2018, 35(4):97-103.
- [6] 李四维,高华东,杨铁灯. 深基坑开挖现场监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 291-298.
- [7] 马康,刘辉,李维滨. 土岩组合地质条件下适宜嵌岩深度分析[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(4): 846-852.
- [8] POH T Y, WONG I H, CHANDRASEKARAN B. Performance of two propped diaphragm walls in stiff residual soils [J]. J Perform Constr Fac, 1997, 11(4):190-199.