

明挖地铁隧道基坑围护桩优化方案分析*

赵秀绍^{1,2} 王际凯^{1,2} 侯世磊⁴ 张晗秋³ 石钰锋^{1,2}

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 330013, 南昌; 2. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 330013, 南昌;
3. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌; 4. 中铁十四局集团有限公司, 250101, 济南//第一作者, 副教授)

摘要 为了降低地铁围护结构的工程造价, 以南昌艾溪湖地铁隧道为例, 采用数值模拟结合现场测试的方法, 从围护桩桩长、桩径和短桩配比等方面分析了地铁围护结构长短桩方案的可行性。研究结果表明: 围护桩的水平位移随着其桩长和桩径的减小, 以及短桩数量的增多而逐渐增大, 但总体而言其变化幅度较小; 优化方案的围护桩最大水平位移为 4.59 mm; 参数优化虽然会使原方案的弯矩和位移略有增大, 但其仍在安全系数的变化范围内, 且优化方案较原方案在经济性方面更有优势。根据数值分析结果, 优化方案的参数建议设为: 长桩桩长为 16 m, 桩径为 0.8 m; 短桩桩长为 10 m, 桩径为 0.6 m; 长短桩配比为 一长三短。

关键词 地铁隧道; 基坑; 围护桩

中图分类号 U445.45; TU476⁺.9

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.05.008

Analysis of Retaining Pile Optimization Scheme for Open Excavation Metro Tunnel Foundation Pit

ZHAO Xiushao, WANG Jikai, HOU Shilei, ZHANG Hanqiu, SHI Yufeng

Abstract To reduce the engineering cost of metro retaining structure, taking the Aixihu Metro Tunnel in Nanchang City as an example, using the method of numerical simulation combined with field test results, from the perspective of pile length, pile diameter and short retaining pile ratio, the feasibility of long and short pile scheme for metro retaining structure is discussed. Research results show that: (1) the horizontal displacement of the pile gradually increases with the reduction of pile length and pile diameter and the increase of the number of short piles, but the change amplitude is small in general, the maximum horizontal displacement of the optimized scheme is 4.59 mm; (2) although parameter optimization will make the bending moment and displacement of the original scheme increase slightly, it is still within the variation range of the safety coefficient, while the optimized scheme is more economical

than the original scheme. According to the results of numerical analysis, the optimized scheme is recommended to be: long pile length 16 m and pile diameter 0.8 m; short pile length 10 m and pile diameter 0.6 m. The ratio of long and short piles is one to three.

Key words metro tunnel; foundation pit; retaining pile

First-author's address School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

排桩是以某种桩型按队列式布置组成的基坑支护结构, 因其适用性较强、造价相对较低等优点, 在工程中获得了广泛的应用。在实际工程中, 为了充分保证支护的稳定性, 排桩通常以等长的形式布置。然而, 这种布置形式没有充分利用土质条件和桩土间的相互作用, 每根桩的桩端均嵌入了岩层, 增加了施工工期与工程造价。由弹性地基梁法可知, 在基坑开挖面以下, 围护结构受到被动土体的反向作用力, 桩体下部承受了较小的弯矩, 即桩下部对整体支护性能的影响较小, 因此可以在保证工程安全的前提下, 通过减少桩下部的部分桩长形成长短桩, 以达到减小工程造价的目的。对于长短桩, 国内外学者做了大量研究。文献[1]通过计算模型分析了不同桩长与不同短桩数量情况下, 长短桩围护结构在砂土层的变形特性。文献[2]提出了长短桩支护法, 借助冠梁将支护桩短桩的部分受力传递至临近的加长防护桩上, 实现了短桩的再利用。文献[3]通过计算模型分析了长短桩组合排桩随开挖过程发生的桩身应变规律。文献[4]提出一种长短桩组合排桩共同作用的简化设计方法。但上述大部分研究所假定的地层是砂土地层, 对于长短桩既位于湖底又嵌入中风化泥质粉砂岩地层的这类情况研究较少。

* 国家自然科学基金项目(52068027、51668018)

由于南昌艾溪湖地铁隧道基坑围护结构均嵌入中风化岩层较深,从理论上存在优化的可能性。基于此,本文以南昌艾溪湖隧道为例,借助数值模拟技术,分析不同围护桩桩长、桩径、短桩配比下的围护桩桩身位移与弯矩变化情况,并探讨了长短桩方案成为南昌艾溪湖地铁隧道围护结构的可行性。本文研究可为类似工程的施工提供借鉴与参考。

1 工程概况

南昌艾溪湖隧道为公轨共建的湖底明挖叠合式

隧道,上部公路隧道基坑(外坑)宽为 30.0 m,隧道埋深为 7.8 m;下部地铁隧道基坑(内坑)宽为 16.0 m,隧道埋深为 15.2 m。隧道所穿越的地层主要为砂层,开挖跨度和开挖深度较大且工程地质及水文地质较为复杂。基坑围护横断面示意图如图 1 所示。公路隧道基坑主体围护结构采用宽度为 800 mm,长度为 1 000 mm 的地下连续墙支护,支撑体系包括第 1 道混凝土支撑、第 2 道和第 3 道钢支撑(直径为 609 mm、壁厚为 16 mm)。地铁隧道基坑的开挖深度约为 7.4 m,设计围护结构采用钻孔灌注桩。

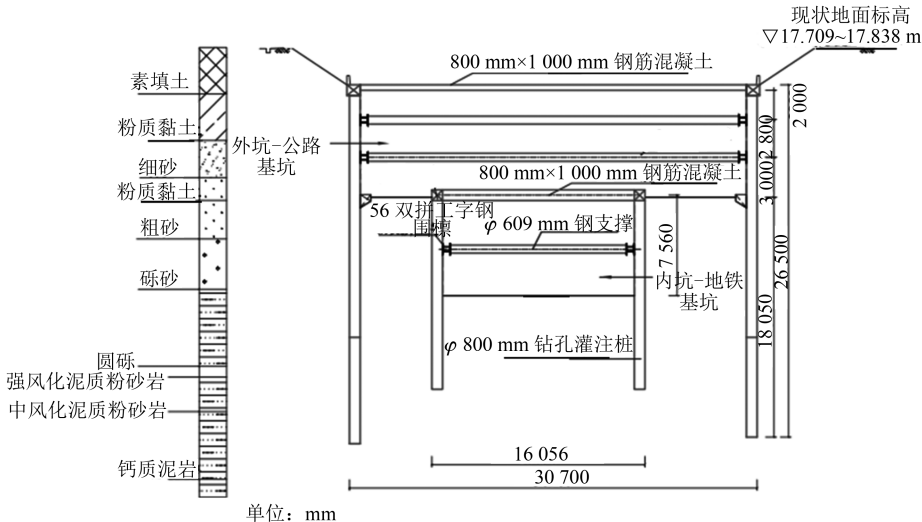


图 1 基坑围护横断面示意图

Fig. 1 Diagram of foundation pit enclosure cross-section

2 建立数值模型

选取南昌艾溪湖隧道中具有代表性的湖西暗埋段,采用 Plaxis3D 有限元软件进行建模分析,如图 2 所示。假定土体和支护结构材料均为各向同

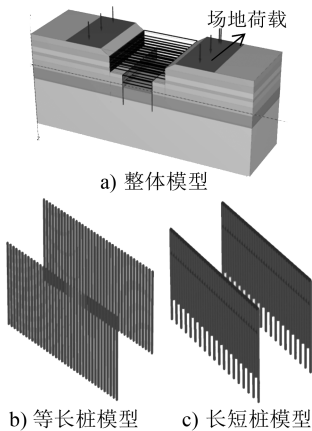


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

性,土体模拟为三维实体单元,地下连续墙模拟为板单元,钢筋混凝土采用水平支撑,水平钢支撑模拟为点对点锚杆,钻孔灌注桩模拟为梁单元。为消除边界效应,深基坑数值模型的几何尺寸一般取基坑开挖深度的 3~5 倍,因此基坑模型的几何尺寸确定为 110 m(长)×36 m(宽)×56 m(高)。此外,为了较好地模拟实际工况,在距基坑 20 m 范围内添加 20 kPa 的场地荷载。

2.1 本构模型及相关参数

HSS(硬化土小应变)本构模型能够反映土体在小应变区域内刚度随应变的非线性变化,是土木工程数值分析中应用较为广泛的本构模型之一。土体采用 HSS 本构模型,地连墙、混凝土支撑、钢支撑和格构柱采用线弹性本构模型。在地勘报告基础上,结合经典文献选取的土层物理学参数如表 1 所示,围护结构物理学参数如表 2 所示。

表 1 土层物理学参数
Tab. 1 Physical parameters of soil layer

名称	泊松比	重度/ (kN/m ³)	三轴排水试验 割线刚度/MPa	侧限压缩试验 切线刚度/MPa	主压密加载试验 切线刚度/MPa	小应变对应参考 剪切模量/MPa	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)
素填土	0.32	18.9	10.0	10.0	30.0	45.00	—	10.00	12.00
粉质黏土	0.32	19.0	10.5	10.5	31.5	47.25	—	49.62	22.63
细砂	0.30	19.1	16.0	16.0	48.0	72.00	—	0	30.00
粉质黏土	0.32	19.0	7.0	7.0	21.0	31.50	—	49.62	22.63
粗砂	0.30	19.6	25.0	25.0	75.0	75.00	—	0	34.00
砾砂	0.30	20.0	32.0	32.0	96.0	115.20	—	0	35.00
圆砾	0.30	20.0	35.0	35.0	105.0	157.50	—	0	36.00
强风化砂岩	0.30	20.1	—	—	—	—	200	30.00	37.00
中风化砂岩	0.29	20.5	—	—	—	—	2 890	200.00	37.00

表 2 围护结构物理学参数

Tab. 2 Physical parameters of retaining structure

支护结构名称	泊松比	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa
混凝土支撑	0.2	24.8	30.0
钢支撑	0.2	78.5	210.0
灌注桩	0.2	24.8	30.0
地连墙	0.2	6.0	31.5
冠梁	0.2	24.8	30.0
腰梁	0.2	78.5	210.0

2.2 数值模拟工序

Plaxis3D 有限元软件可以通过设置施工工况对基坑施工的全过程进行模拟。各工况对应的施工步骤如表 3 所示。

表 3 各工况对应的施工步骤

Tab. 3 Construction steps corresponding to each working condition

工况	施工步骤
工况 1	地应力平衡
工况 2	放坡开挖和施加场地荷载
工况 3	施工外坑地连墙和内坑支护桩
工况 4	开挖外坑第 1 层(-1.0 m),加支撑(-0.5 m)
工况 5	开挖外坑第 2 层(-2.5 m),加支撑(-2.0 m)
工况 6	开挖外坑第 3 层(-5.3 m),加支撑(-4.8 m)
工况 7	开挖外坑第 4 层(-7.8 m)
工况 8	开挖内坑第 1 层(-8.8 m),加支撑(-7.8 m)
工况 9	开挖外坑第 2 层(-11.3 m),加支撑(-11.8 m)
工况 10	开挖外坑第 3 层(-15.2 m)

注：外坑未开挖时地面标高为 0;括号内数字表示标高。

2.3 监测数据与理论计算值对比

对比桩体水平位移监测值与计算值,如图 3 所示。由图 3 可知,水平位移实测值在埋深 5.5 m 处有最大值,为 4.03 mm,而水平位移模拟值在埋深 6.0 m 处有最大值,为 3.70 mm。模拟曲线与实测数据拟合得较好,二者最大差值为 0.72 mm。考虑到实际施工中有不确定因素、场地堆载和监测误差等

因素,可以认为桩体水平位移的模拟计算数据和监测数据总体吻合。

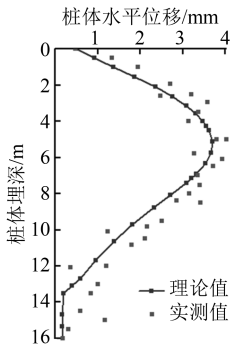


图 3 桩体水平位移监测值与计算值对比

Fig. 3 Comparison between the monitored and calculated values of pile horizontal displacement

3 长短桩参数分析

虽然基坑围护桩的桩体水平位移较小(小于监测预警值 30.00 mm),但与等长桩相比,长短桩用材较少且造价较低,由更换长短桩发生的桩体水平位移也整体可控。因此在满足安全的前提下,从工程经济角度出发,可将等长桩优化为长短桩。

3.1 桩长变化影响

为了研究短桩长度对长短桩组合围护结构的影响,选取 5 种不同的桩长进行分析,并保持桩间距(1 m)、桩径(0.8 m)、长桩桩长(16 m)和长短桩配比(一长一短)不变。短桩桩长与桩端地层组合布置情况如表 4 所示,其中组合 1 为等长桩布置,即原方案布置方式。

3.1.1 桩体水平位移分析

根据数值模型分析结果可以获得开挖至基坑底部时,桩长变化对桩体水平位移的影响规律。不同桩长组合布置方式下,长桩和短桩的水平位移

表 4 短桩桩长与桩端地层组合布置情况

Tab. 4 Combination layout condition of short pile length and pile end stratum

组合布置方式	短桩桩长/m	短桩桩端地层
组合 1	16	中风化粉砂岩
组合 2	13	强风化粉砂岩
组合 3	12	砾砂
组合 4	10	砾砂
组合 5	8	砾砂

对比如图 4 所示。不同桩长组合布置方式下,长桩和短桩的水平位移最大对比如表 5 所示。由图 4 和表 5 可知:①组合 1—组合 5 的变化过程中,长桩和短桩桩体的水平位移在支撑面以上位置变化较小,在第 2 道支撑以下位置变化较大,且随着短桩桩长的减小,长桩和短桩的水平位移变化幅度不断增大,但其在桩底变化不明显;随着短桩桩长的减小,在基坑开挖面附近的长桩桩体最大水平位移不断增大,其变化范围为 3.70~4.17 mm。②组合 1—组合 5 的变化过程中,短桩桩底的水平位移随着桩长的减小不断增大,最终发生“踢脚”现象,其变化

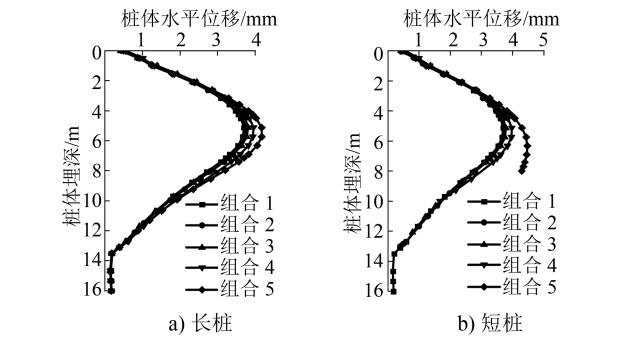


图 4 不同桩长组合下长桩和短桩的水平位移对比

Fig. 4 Comparison of long and short piles horizontal displacement in different pile length combinations

表 5 不同桩长组合下长桩和短桩的水平位移最大值对比

Tab. 5 Comparison of long and short piles maximum horizontal displacement in different pile length combinations

组合布置方式	长桩水平位移最大值/mm	各组合与组合 1 的长桩最大水平位移差值/mm	短桩水平位移最大值/mm	各组合与组合 1 的短桩最大水平位移差值/mm
组合 1	3.70	—	3.70	—
组合 2	3.75	0.05	3.78	0.08
组合 3	3.80	0.10	3.82	0.12
组合 4	3.95	0.25	3.97	0.27
组合 5	4.17	0.47	4.48	0.78

范围为 3.70~4.48 mm。③当短桩桩长由 16 m 减短至 10 m 时,短桩和长桩的水平位移保持一致,且长桩位移稍小于短桩位移;当短桩桩长减短至 8 m 时,短桩和长桩的水平位移变化不协调(长桩和短桩的最大水平位移差距较大),且短桩变化幅度极快地增大,发生“踢脚”破坏。

3.1.2 弯矩分析

根据数值模型分析结果可以获得开挖至基坑底部时,桩长变化对桩体弯矩的影响规律。不同桩长组合布置方式下,长桩和短桩的弯矩对比如图 5 所示。不同桩长组合布置方式下,长桩和短桩的弯矩最大值对比如表 6 所示。由图 5 和表 6 可知:①组合 1—组合 5 的变化过程中,长桩弯矩在基坑底部以上位置呈先增大后减小的趋势,在支撑处长桩弯矩略有减小;在基坑底部以下位置时,长桩弯矩呈先减小后增大再减小的趋势;反弯点在基坑底部附近。②组合 1—组合 5 的变化过程中,短桩弯矩在支撑面以上位置变化较小,在第 2 道支撑以下位置变化较大;不同桩长的短桩在基坑底部弯矩的

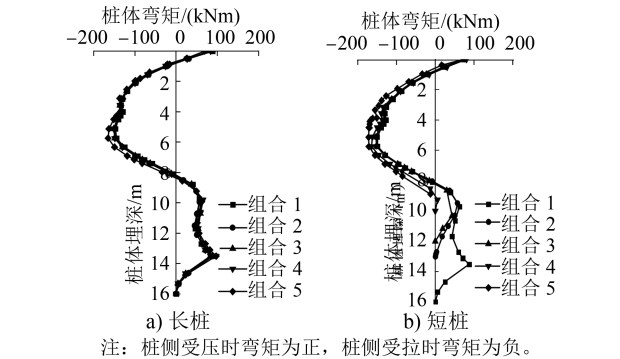


图 5 不同桩长组合下长桩和短桩的弯矩对比

Fig. 5 Comparison of long and short piles bending moment in different pile length combinations

表 6 不同桩长组合布置方式下长桩和短桩的弯矩最大值对比

Tab. 6 Comparison of long and short piles maximum bending moment in different pile length combinations

组合布置方式	长桩弯矩最大值/(kNm)	各组合与组合 1 的长桩最大弯矩差值/(kNm)	短桩弯矩最大值/(kNm)	各组合与组合 1 的短桩最大弯矩差值/(kNm)
组合 1	-147.0	—	-147.0	—
组合 2	-149.1	2.1	-153.0	6.0
组合 3	-150.8	3.8	-157.0	10.0
组合 4	-155.7	8.7	-164.8	17.8
组合 5	-183.9	36.9	-189.3	42.3

变化趋势有所不同,这是由于桩端所处持力层模量相差太大导致的。③在短桩桩长减小的过程中,长桩桩长保持不变,长桩桩身的最大弯矩不断增加,变化范围为 2.1~36.9 kNm;短桩最大弯矩不断增加,变化范围为 6.0~42.3 kNm。

综上所述:当短桩长减小至 10 m 时,基坑长短桩组合支护中的长桩和短桩变形协调一致,且与等长桩相比,其水平位移和弯矩的变化幅度均较小;当短桩长减小至 8 m 时,长桩和短桩的变形不协调(长桩和短桩的最大水平位移差距较大),短桩发生“踢脚现象”。由此可见,长桩桩长为 16 m、短桩桩长为 10 m 的组合布置方式(组合 4)是较为合理的,下文将取该长短桩组合围护结构进行分析。

3.2 桩径变化影响

为了研究桩径变化对长短桩组合围护结构的影响,选取 7 种不同桩径进行分析,桩间距和桩长保持不变,不同长短桩组合布置方式如表 7 所示。

表 7 不同长短桩组合布置方式

Tab.7 Different layout combinations of long and short piles

组合布置方式	长桩桩径/m	短桩桩径/m
组合 4	0.8	0.8
组合 6	0.8	0.7
组合 7	0.8	0.6
组合 8	0.7	0.8
组合 9	0.6	0.8
组合 10	0.7	0.7
组合 11	0.6	0.6

3.2.1 水平位移分析

根据数值模型分析结果可以获得开挖至基坑底部时,长短桩直径变化对桩体水平位移的影响规律。不同长短桩桩径组合下,长桩和短桩的水平位移对比如图 6 所示。不同长短桩桩径组合下,长桩和短桩的水平位移最大值对比如表 8 所示。由图 6

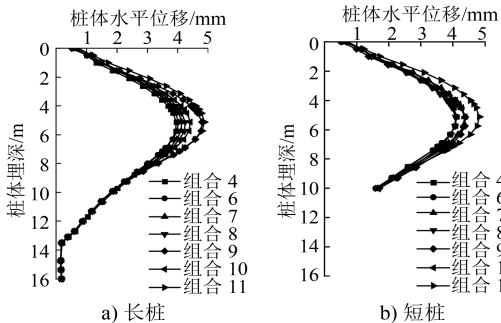


图 6 不同长短桩桩径组合下长桩和短桩的水平位移对比
Fig.6 Comparison of long and short piles horizontal displacement changes in different combinations of long and short pile diameters

和表 8 可知:①在长桩桩径由 0.8 m 减至 0.7 m、0.6 m 的过程中,长桩的水平位移不断增大,变化范围为 0.03~0.93 mm;②在短桩桩径由 0.8 m 减至 0.7 m、0.6 m 的过程中,短桩的水平位移不断增大,变化范围为 0.13~0.85 mm;③长桩桩径和短桩桩径的减小对短桩水平位移的影响相当。

表 8 不同长短桩桩径组合下长桩和短桩的水平位移最大值对比

Tab.8 Comparison of long and short piles maximum horizontal displacement in different combinations of long and short pile diameters

组合布置方式	长桩水平位移最大值/mm	各组合与组合 1 的长桩最大水平位移差值/mm	短桩水平位移最大值/mm	各组合与组合 1 的短桩最大水平位移差值/mm
组合 4	3.95	—	3.97	—
组合 6	3.98	0.03	4.10	0.13
组合 7	4.13	0.18	4.36	0.39
组合 8	4.24	0.29	4.08	0.11
组合 9	4.79	0.84	4.38	0.41
组合 10	4.41	0.46	4.38	0.41
组合 11	4.88	0.93	4.82	0.85

3.2.2 弯矩分析

根据数值模型分析结果可以获得开挖至基坑底部时,长短桩直径变化对弯矩的影响规律。不同长短桩桩径组合下,长桩和短桩的弯矩对比如图 7 所示。不同长短桩桩径组合下,长桩和短桩的弯矩最大值对比如表 9 所示。由图 7 和表 9 可知:①对于长桩而言,其最大弯矩与长桩桩径成正比,与短桩桩径成反比;②对于短桩而言,其最大弯矩与长桩桩径成反比,与短桩桩径成正比;③同时减小长桩和短桩桩径,长桩和短桩弯矩均减小,且二者弯矩较为接近。综上所述,长桩桩径为 0.8 m、短桩

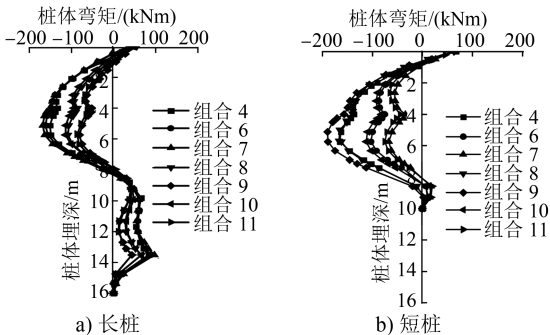


图 7 不同长短桩桩径组合下长桩和短桩的弯矩对比
Fig.7 Comparison of long and short piles bending moment changes in different combinations of long and short pile diameters

表 9 不同长短桩桩径组合下长桩和短桩的弯矩最大值对比

Tab. 9 Comparison of maximum bending moment of long and short piles in different combinations of long and short pile diameters

组合布置方式	长桩弯矩最大值/(kNm)	各组合与组合 1 的长桩最大弯矩差值/(kNm)	短桩弯矩最大值/(kNm)	各组合与组合 1 的短桩最大弯矩差值/(kNm)
组合 4	-155.7	—	-164.8	—
组合 6	-158.0	2.3	-102.5	-62.3
组合 7	-168.0	12.3	-67.2	-97.6
组合 8	-108.4	-47.3	-165.1	0.3
组合 9	-80.8	-74.9	-189.6	24.8
组合 10	-113.9	-41.8	-112.6	-52.2
组合 11	-86.3	-69.3	-74.92	-89.9

桩径为 0.6 m 的组合布置方式(组合 7)时,桩体弯矩和水平位移变化幅度均较小,下文将取该组合的长短桩桩径进行分析。

3.3 短桩数量影响

为了研究不同短桩数量对长短桩组合围护结构的影响,选取 3 种不同短桩配比方案进行分析,如表 10 所示。

表 10 3 种不同长短桩配比方案

Tab. 10 3 different long-short pile ratio schemes

组合布置方式	配比组合描述
组合 7	1 根长桩+1 根短桩
组合 12	1 根长桩+3 根短桩
组合 13	1 根长桩+4 根短桩

3.3.1 水平位移分析

根据数值模型分析结果可以获得开挖至基坑底部时,短桩比对长桩和短桩水平位移的影响规律。不同短桩配比下,长桩和短桩的水平位移对比如图 8 所示。不同短桩配比下,长桩和短桩的水平

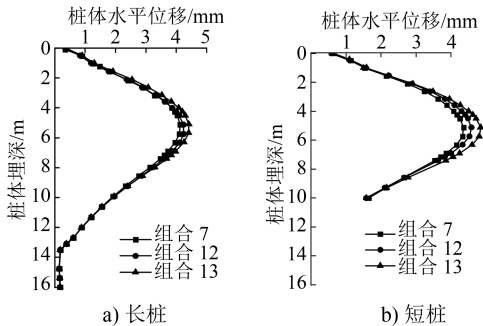


图 8 不同短桩配比下长桩和短桩的水平位移对比

Fig. 8 Comparison of horizontal displacement of long and short piles under different short pile ratios

位移变化最大值对比如表 11 所示。由图 8 和表 11 可知:①随着短桩数量的减少,长桩水平位移不断增大,主要表现在支撑面以下,其变化范围为 0.12~0.17 mm;②随着短桩数量的减少,短桩的水平位移不断增大,主要表现在支撑面以下,其变化范围为 0.23~0.49 mm;③减少短桩数量对短桩水平位移的影响较大,对长桩水平位移的影响较小。

表 11 不同短桩配比下长桩和短桩的水平位移变化最大值对比

Tab. 11 Comparison of maximum horizontal displacement change values of long and short piles under different short pile ratios

组合布置方式	长桩水平位移最大值/mm	各组合与组合 1 的长桩最大水平位移差值/mm	短桩水平位移最大值/mm	各组合与组合 1 的短桩最大水平位移差值/mm
组合 7	4.13	—	4.36	—
组合 12	4.25	0.12	4.59	0.23
组合 13	4.42	0.17	4.85	0.49

3.3.2 弯矩分析

根据数值模型分析结果可以获得开挖至基坑底部时,短桩比对长桩和短桩弯矩的影响规律。不同短桩配比下,长桩和短桩的弯矩变化对比如图 9 所示。不同短桩配比下,长桩和短桩的弯矩变化最大值对比如表 12 所示。由图 9 和表 12 可知:①在短桩数量变化过程中,在支撑面以上时,长桩弯矩的变化幅度并不明显;在支撑面以下时,长桩最大弯矩随着短桩数量的增加而增大,且增加幅度越来越大,范围为 20.8~30.0 kNm;在桩底附近,长桩弯矩几乎没有变化。②在短桩数量变化过程中,在支撑面以上时,短桩弯矩变化幅度不明显;在支撑面以下时,短桩最大弯矩随着短桩数量的增加而增大,且增加幅度越来越大,范围为 8.4~14.0 kNm;在桩

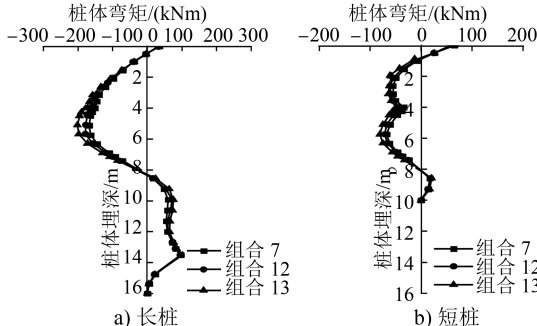


图 9 不同短桩配比下长桩和短桩的弯矩对比

Fig. 9 Comparison of bending moment of long and short piles under different short pile ratios

表 12 不同短桩配比下长桩和短桩的弯矩变化最大值对比
Tab. 12 Comparison of maximum bending moment changes of long and short piles under different short pile ratios

组合布置方式	长桩弯矩最大值/(kNm)	各组合与组合 1 的长桩最大弯矩差值/(kNm)	短桩弯矩最大值/(kNm)	各组合与组合 1 的短桩最大弯矩差值/(kNm)
组合 7	-168.0	—	-67.2	—
组合 12	-178.8	20.8	-75.6	8.4
组合 13	-198.0	30.0	-81.2	14.0

底附近短桩弯矩几乎没有变化。

3.4 不同组合方案对比

取基坑长度为 100 m,将不同组合方案的桩体水平位移与弯矩进行对比分析,如表 13 所示。由表 13 可知,除组合 5 发生“踢脚”破坏不宜采用外,其余组合布置方式均可以采用。在充分保证安全的前提下,为节约工程造价,应该合理考虑材料的用量,故选取组合 11、组合 12 和组合 13。在此基础上,为选出最优组合,在这 3 种组合材料用量相差不大的前提下,综合考虑桩体最大水平位移和最大弯矩的影响,选择组合 12 为最优方案。

表 13 不同组合方案的水平位移与弯矩对比

Tab. 13 Comparison of horizontal displacement and bending moment in different combination schemes

组合布置方式	长桩最大水平位移/mm	短桩最大水平位移/mm	长桩最大弯矩/(kNm)	短桩最大弯矩/(kNm)	材料用量/m ³
组合 1	3.70	3.70	-147.00	-147.00	3 217
组合 2	3.75	3.78	-149.10	-153.00	2 915
组合 3	3.80	3.82	-150.80	-157.00	2 814
组合 4	3.95	3.97	-155.70	-164.80	2 613
组合 5	4.17	4.48	-183.90	-189.30	2 412
组合 6	3.98	4.10	-158.00	-102.50	2 378
组合 7	4.13	4.36	-168.00	-67.20	2 173
组合 8	4.24	4.08	-108.40	-165.10	2 236
组合 9	4.79	4.38	-80.80	-189.60	1 910
组合 10	4.41	4.38	-113.90	-112.60	2 001
组合 11	4.88	4.82	-86.30	-74.92	1 470
组合 12	4.25	4.59	-178.80	-75.60	1 652
组合 13	4.42	4.85	-198.00	-81.20	1 548

4 结语

以南昌艾溪湖公轨共建坑中坑式基坑工程为例,分析将内坑的原支护形式等长桩优化为长短桩的可行性。为确定合适的长短桩参数,通过 Plaxis3D 有限元数值软件模拟不同的桩长、桩径和短桩配比对长短桩水平位移和弯矩的影响。主要获得

以下几个结论:

- 1) 内坑支护桩的水平位移随着桩长和桩径的减小及短桩数量的增多而逐渐增大,但总体而言,其变化幅度较小,优化方案的桩体最大水平位移为 4.59 mm,相较于原方案的桩体最大水平位移(3.70 mm)仅增长了 0.89 mm。
- 2) 长桩最大弯矩随着桩长和短桩桩径的减小而增大,随着长桩桩径和短桩数量的增加而增大。
- 3) 短桩最大弯矩随着桩长和长桩桩径的减小而增大,随着短桩桩径和短桩数量的增加而增大。
- 4) 所提参数优化方案虽然会使原方案的桩体弯矩和桩体水平位移产生变化,但根据数值模拟结果可知,其变化范围较小,仍在安全系数变化范围内。相对于原方案的等长桩而言,优化方案在经济性方面更有优势,以基坑长度为 100 m 为例,该优化方案的材料用量减少了约 48.5%。
- 5) 基于工程项目的实际情况,建议内坑的支护方案采用“长桩桩长为 16 m,桩径为 0.8 m;短桩桩长为 10 m,桩径为 0.6 m;组合为一长三短”的组合方案。

参考文献

[1] 徐力.长短桩组合围护结构受力和变形试验研究[D].南昌:华东交通大学,2018.
XU Li. The mechanism and deformation research on retaining structure with long-short pile combination[D]. Nanchang: East China Jiaotong University,2018.

[2] 赵永清,贺建清,陈春鸣,等. 基坑长短桩支护理论研究及有效应用[J]. 湖南工业大学学报,2013,27(4): 18.
ZHAO Yongqing, HE Jianqing, CHEN Chunming, et al. The theoretical research and effective application of long-short piles in foundation pit support[J]. Journal of Hunan University of Technology,2013,27(4): 18.

[3] 李竹,郑刚,王海旭. 带水平支撑长短桩组合排桩工作性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊 1): 440.
LI Zhu, ZHENG Gang, WANG Haixu. Model tests on work behaviors of retaining piles with different lengths and horizontal support[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(S1): 440.

[4] 陈富强,杨光华,孙树楷,等. 悬臂式长短组合排桩共同作用的简化设计方法探讨[J]. 广东水利水电,2019(7): 1.
CHEN Fuqiang, YANG Guanghua, SUN Shukai, et al. Discussion on simplified design method of cantilever long and short combined row pile[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2019(7): 1.

(收稿日期:2020-12-04)