

文章编号: 1007-2993(2026)03-0328-08

上海地区基坑前撑式注浆钢管优化设计研究

张 宁

(上海山南勘测设计有限公司, 上海 201206)

【摘要】 通过对比分析上海地区不同地质条件下前撑式注浆钢管围护体系的规范计算和实测变形特性, 提出了提高承载力和围护桩变形控制的优化设计方法及措施, 并通过数值模拟进行了验证。研究表明: (1) 对于基坑底和前撑桩底土质均不佳的基坑工程, 围护体系实测变形显著大于规范计算值, 前撑桩最优水平夹角为 45°, 施工过程中采用分区挖土, 增设预制垫层等方式, 可以减小围护桩 10% 左右的总变形, 通过减小单次开挖面积可以进一步控制围护桩变形; (2) 对于基坑坑底土质不佳, 前撑桩底土质较好的基坑工程, 围护桩实测变形稍大于规范计算值, 可以加大前撑桩的水平夹角至 50°~55°, 在水平承载力不变的前提下可减短前撑桩桩长, 提升经济性, 并通过分区挖土及设置垫层的方式控制变形, 同时需关注围护桩与围檩间的抗剪设计; (3) 对于基坑坑底及前撑桩底土质均较好的基坑工程, 围护桩实测变形与规范计算值较为接近, 可以减小前撑桩水平夹角至 30°~35°, 在水平承载力不变的前提下减短前撑桩长度, 控制围护桩桩顶变形, 同时提升经济性。

【关键词】 上海地区; 前撑式注浆钢管; 基坑工程; 优化设计

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0002

Optimum design of front-braced grouting steel pipe system in the foundation pit engineering in Shanghai

ZHANG Ning

(Shanghai Shannan Investigation and Design Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

【Abstract】 Through comparative analysis of the code-calculated and measured deformation characteristics of the front-braced grouting steel pipe system under different geological conditions in Shanghai, optimized design methods and measures for improving bearing capacity and controlling the deformation of retaining piles are proposed and verified by numerical simulation. The results show that: (1) For foundation pits with poor soil conditions at both the pit bottom and the front-braced pile bottom, the measured deformation of the retaining system is significantly larger than the code-calculated value. The optimal horizontal angle of the front-braced piles is 45°. Zoned excavation and the addition of precast cushions during construction can reduce the total deformation of retaining piles by approximately 10%. Further deformation control can be achieved by reducing the single excavation area. (2) For foundation pits with poor soil at the pit bottom but good soil at the front-braced pile bottom, the measured deformation of retaining piles is slightly larger than the code-calculated value. The horizontal angle of front-braced piles can be increased to 50°~55°, which shortens the pile length while maintaining the same horizontal bearing capacity, thus improving economic efficiency. Deformation can be controlled via zoned excavation and cushion installation, and attention should be paid to the shear design between retaining piles and wales. (3) For foundation pits with good soil at both the pit bottom and the front-braced pile bottom, the measured deformation of retaining piles is close to the code-calculated value. The horizontal angle of front-braced piles can be reduced to 30°~35°, which shortens the pile length under constant horizontal bearing capacity, controls the deformation of the pile top, and also improves economic efficiency.

【Key words】 Shanghai district; front-braced grouting steel pipe; foundation pit; optimum design

0 引言

前撑式注浆钢管(简称前撑桩)工艺是指在基坑开挖前将钢管以一定角度压入坑内土体, 结合注浆工艺形成基坑的内支撑结构^[1-2]。在上海软土地区, 通

常采用后注浆^[3-5]或设置囊袋封闭注浆^[6-8]等方式提高前撑桩的承载力, 以提高该工艺在软土地区的适用性。

魏建华等^[9]、窦红瑞^[10]及海明雷等^[11]从工期、经

济性等方面对水平支撑与前撑式注浆钢管支撑方案进行了比选,结果表明,对于大面积基坑,前撑式注浆钢管的优势明显。李明等^[12]、张文荣^[13]和倪浩群^[14]详细介绍了前撑式注浆钢管的施工及检测工艺及关键控制点。霍红伟等^[15]通过文献梳理和实地调研得出前撑式注浆钢管支撑体系在基坑施工中能够有效提高施工效率的结论。多个项目的实施效果表明,当开挖深度小于7 m时,可采用单排围护桩+前撑式注浆钢管支撑的围护形式^[16];当深度继续增加时,可采用双排围护桩+前撑式注浆钢管的围护形式^[16-18]。目前关于前撑式注浆钢管的研究多集中在工程案例的描述,而有针对性的优化设计研究尚未见相关报道,如不同地质

条件下钢管的入土角度问题以及软土基坑工程应用前撑式注浆钢管的变形控制措施等问题。

本文通过分析上海地区不同地质条件下前撑式注浆钢管围护体系变形监测数据的不同特点,提出不同地质条件下前撑式注浆钢管的优化设计方法,并采用数值分析方法进行验证,为该工艺的优化设计及施工提供参考。

1 工程概况

本文分析的三个工程应用案例分别位于上海市浦东新区康桥工业区(以下简称工程一)、浦东新区三林镇(以下简称工程二)及青浦区(以下简称工程三),其基坑概况如表1所示^[19]。

表1 工程概况及土层物理力学性质指标
Tab. 1 Project profile and physical and mechanical properties index of soil

工程概况	土层序号	土层名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c_{cq}/kPa	内摩擦角 $\varphi_{\text{cq}}/(\text{°})$	平均层 厚/m	比贯入 阻力 P_s/MPa	桩侧极限摩 阻力标准值 f_s/kPa	桩端极限端 阻力标准值 f_p/kPa
工程一: 面积50122 m ² , 挖深6.65 m, 围护结构: SMW工法桩($\phi 850@600$ mm三轴搅拌桩内插H700×300 mm型钢)+前撑式注浆钢管($\phi 377\times 10$ mm, 倾角45°, $L=26$ m@3600 mm, 端部9 m注浆)	①	填土	18	10	10.0	1.82			
	②	粉质黏土	18.9	22	21.5	1.73	0.73	15	
	③(坑底)	淤泥质粉质黏土	17.8	16	16.0	4.10	0.47	15	
	③ _美	砂质粉土	18.5	6	29.5	1.96	1.30	15	
	④	淤泥质黏土	16.9	13	12.0	8.94	0.60	20	
	⑤ ₁ (桩底)	黏土	17.5	17	15.0	9.18	0.93	35	400
工程二: 面积29217 m ² , 挖深5.75 m, 围护结构: SMW工法(2 $\phi 700@1000$ mm双轴搅拌桩内插H500×300 mm型钢)+前撑式注浆钢管($\phi 377\times 10$ mm, 倾角45°, $L=27$ m@4000 mm, 端部9 m注浆)	①	填土	18	10	10.0	4.53			
	③ ₂ (坑底)	砂质粉土	18.5	2	30.5	2.19	1.87	15	
	③ ₃	淤泥质粉质黏土	17.6	12	16.5	3.49	0.48	15	
	④	淤泥质黏土	16.8	11	11.0	6.03	0.60	25	
	⑤ ₁	黏土	17.5	16	13.0	2.93	0.76	30	
	⑤ _{2,1} (桩底)	粉砂	18.9	4	33.0	3.70	4.91	55	1250
工程三: 面积21648 m ² , 挖深4.75 m, 围护结构: SMW工法($\phi 650@450$ mm三轴搅拌桩内插H500×300 mm型钢)+前撑式注浆钢管($\phi 377\times 10$ mm, 倾角45°, $L=28$ m@4500 mm, 全长注浆)	① ₁	填土	18	10	10.0	1.99			
	① ₂	淤泥	18	10	10.0	1.28			
	③(坑底)	淤泥质粉质黏土	17.3	12	11.5	1.83	0.43	15	
	⑥ ₁	粉质黏土	19.3	38	15.5	4.20	2.42	40	750
	⑥ _{3,1} (桩底)	粉质黏土	18.5	27	15.0	10.34	4.04	35	500

由表1可见三个案例工程地质条件各有特点: 工程一基坑坑底(两倍开挖深度平均比贯入阻力 $P_s=0.65$ MPa)及前撑桩底($P_s=0.93$ MPa, $f_p=400$ kPa)土质均不佳; 工程二基坑坑底(两倍开挖深度平均比贯入阻力 $P_s=0.76$ MPa)土质不佳, 但前撑桩底土质较好($P_s=4.91$ MPa, $f_p=1250$ kPa); 工程三基坑坑底(两倍开挖深度平均比贯入阻力 $P_s=1.24$ MPa)及前撑桩底($P_s=4.04$ MPa, $f_p=500$ kPa)土质均较好。

图1为前撑式注浆钢管围护体系剖面示意图。图中围护桩可以为SMW工法桩、钻孔灌注桩或其他板式围护桩; 前撑式注浆钢管规格一般为 $\phi 325\times 8$ mm或 $\phi 377\times 10$ mm, 后注浆方式为钢管端部封闭注浆或坑底钢管全长注浆; 前撑桩夹角为钢管与水平方向夹角, 一般为45°; 垫层为厚度200 mm以上的配筋砼垫层, 范围从坑边至钢管入土点后不少于2 m。

前撑式注浆钢管体系施工及开挖工况如下:

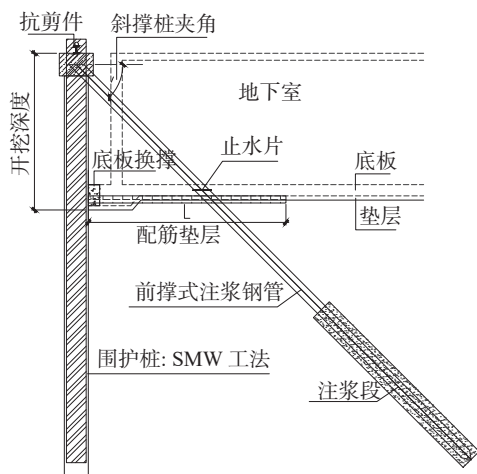


图1 前撑式注浆钢管围护体系剖面示意图

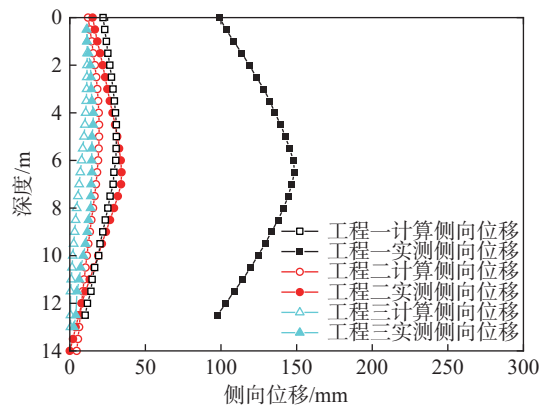
Fig. 1 Generalized section of prestressed grouting steel pipe system

- (1) 施工围护桩, 随后施工前撑桩;
- (2) 钢管注浆, 并施工围护桩砼围檩;
- (3) 待围护桩及前撑桩龄期及承载力达到要求后, 岛式开挖坑边土方, 并立即施工配筋垫层;
- (4) 开挖基坑其余区域土方, 并施工垫层、底板及换撑, 在前撑桩穿越底板处设置止水片;
- (5) 待底板及换撑达到要求后, 割除底板以上前撑桩或保留至基坑回填后割除。

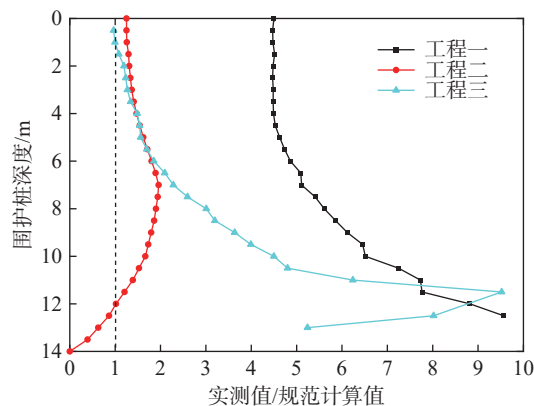
2 规范计算及实测数据分析

前述三个工程地下室均已施工完成, 图2为典型区域规范计算与实测围护桩侧向位移随深度变化曲线。由图2(a)可知, 侧向位移曲线形态较为一致, 均呈现出基坑坑底附近变形最大, 围护桩顶和桩底变形相对较小的特征, 但实测值均大于计算值, 其中工程一尤为显著。图2(b)为侧向位移实测(测斜)值与规范计算值的比值随深度变化的曲线, 可以看出, 对于开挖面以上部分, 实测值与规范计算值比值基本变化不大, 而对于开挖面以下部分, 尤其是工程一和工程三比值变化较大。为便于比较, 只计入开挖面以上部分, 工程一实测值为规范计算值4.6倍左右, 工程二实测值为规范计算值1.4倍左右, 工程三实测值为规范计算值1.2倍左右。

综合类似工程经验分析, 计算变形与实测变形差异的原因如下: 对于工程一, 由于基坑底及前撑桩底土质不佳, 土方开挖后垫层形成不及时, 且垫层需要养护一段时间后方可发挥作用, 围护桩产生了一定的“滑移”变形; 对于工程二, 由于基坑底土质不佳, 但前撑桩底土质较好, 由于垫层养护时间的原因, 围护桩变形会有一定程度的发展, 变形会稍大于计算值; 对于工程三, 由于基坑底及前撑桩底土质均较好, 垫



(a) 侧向位移曲线



(b) 侧移实测值与规范计算值比值曲线

图2 规范计算与实测围护桩侧向位移对比曲线

Fig. 2 Correlation curve of standard calculation and measured lateral displacement of retaining pile

层作用不再显著, 计算值与实测值较为接近。

以上工程实践表明前撑式注浆钢管在上海地区有一定的适用性, 尤其适用于前撑桩底部土质较好的工程。对于前撑钢管端部土质不佳的工程, 需要采取适当措施控制围护体系变形。

3 前撑注浆钢管的优化措施

根据不同地质条件前撑钢管的变形特性, 从承载力(桩长、入土角度)及变形控制措施两个方面进行优化设计。

3.1 承载力的优化设计

通过调整斜撑角度及桩长, 使单位长度前撑桩提供最大的水平反力。对于特定长度前撑桩, 通过调整其与水平方向的夹角实现承载力的最大水平方向分力, 从而得出特定长度最大水平承载力的最优角度, 计算公式如下:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = \eta \times \left(\sum \beta_{si} q_{sik} u_{p,i} l_{p,i} + \beta_p q_{pk} A_p \right) \quad (1)$$

$$N_{th} = N_t \times \cos \alpha = \frac{Q_{uk}}{K_t} \times \cos \alpha \quad (2)$$

式中: Q_{uk} 为前撑桩的极限承载力; Q_{sk} 为总极限侧阻力标准值; Q_{pk} 为总极限端阻力标准值; $u_{p,i}$ 为与前撑桩纵轴垂直的桩身周长; q_{sk} 和 q_{pk} 分别为桩侧极限摩阻力和端阻力标准值; β_{si} 和 β_p 分别为后注浆侧阻力和端阻力增强系数; l_{pi} 为沿前撑桩纵轴的桩周第 i 层土的厚度; A_p 为与桩身纵轴垂直的桩端截面面积; η 为施工工艺系数; N_{th} 为前撑桩承载力的水平分量; N_t 为前撑桩轴向承载力设计值; α 为前撑桩与水平方向夹角; K_t 为抗压安全系数。上述参数取值见《自稳式基坑支护结构技术标准》(T/SCDA 012—2021)。

图 3 为工程一前撑桩不同长度(桩端 9 m 封闭注浆)最优角度及最优角度水平承载力与常规 45° 倾角承载力的对比图。从图中可以看出:当桩端位于④层时,最优水平夹角为 30° ~ 45°, 但水平承载力提升并不明显,且承载力较小,④层不适合作为持力层;当桩端进入⑤₁层时,最优角度为 44° ~ 47°。可得出结论:对于桩端土质不佳(不可选用淤泥质土层)的前撑桩,水平夹角可取 45°。

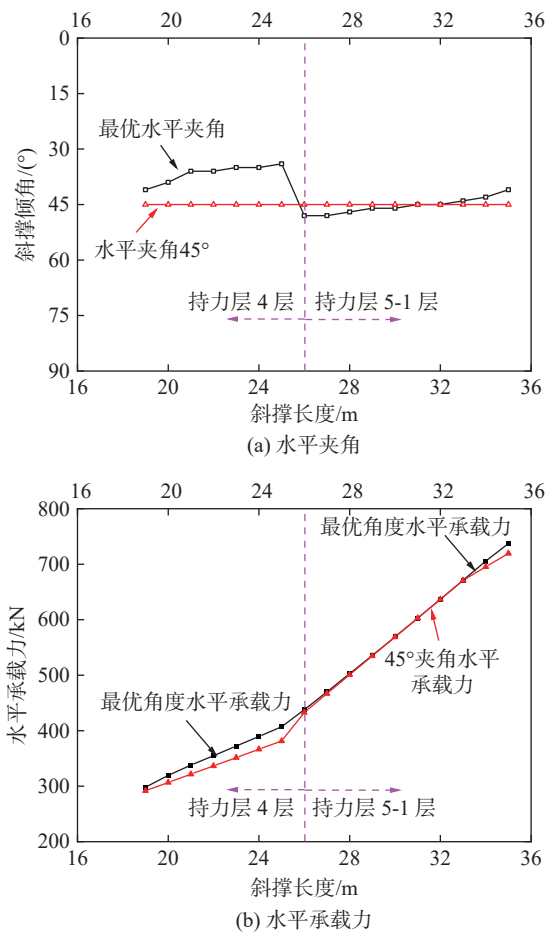


图 3 工程一前撑桩承载力优化对比图
Fig. 3 Comparison diagram of optimization bearing capacity for the prestressed grouting steel pipe system in Project One

图 4 为工程二前撑桩不同长度(桩端 9 m 封闭注浆)最优角度及最优角度水平承载力与常规 45° 倾角承载力的对比图。从图中可以看出:当桩端位于⑤₁层时,最优水平夹角为 45° 左右,水平方向承载力较为接近;当桩端进入⑤₂₋₁层时,最优角度为 40° ~ 55°, 而且在最优角度下前撑钢管进入持力层 2 m 左右时,承载力提升比例较大。可得出结论:若桩端可进入较好土层时(赋存有一定深度),水平夹角可取 50° ~ 55°。

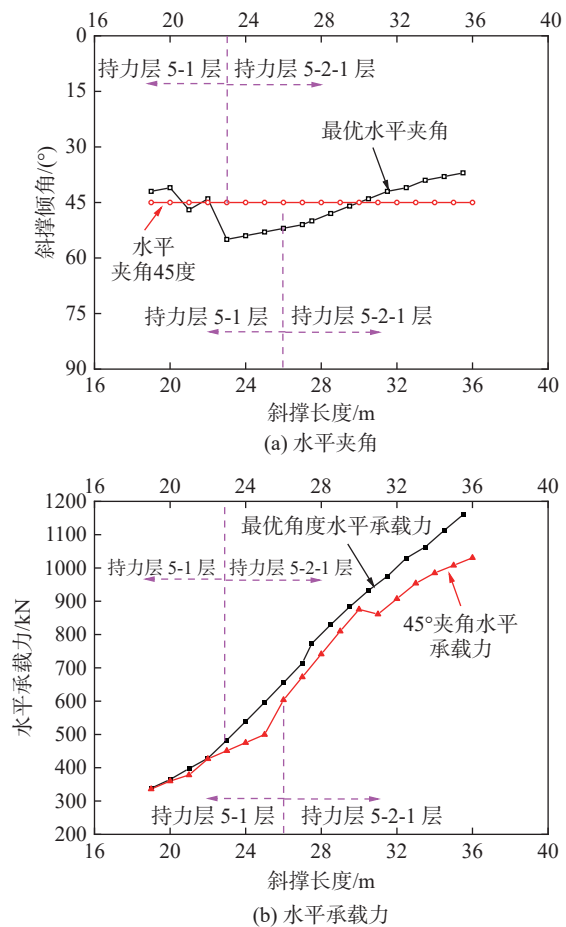


图 4 工程二前撑桩承载力优化对比图
Fig. 4 Comparison diagram of optimization bearing capacity for the prestressed grouting steel pipe system in Project Two

图 5 为工程三前撑桩不同长度(坑底以下全长注浆)最优角度及最优角度水平承载力与常规 45° 倾角承载力的对比图。从图中可以看出:当桩端位于⑥₃₋₁层时,随着入土长度的增加,最优水平夹角从 40° 逐渐变为 30°, 水平承载力增加较为显著。可得出结论:若桩端土质较好,土层赋存深度较浅(位于坑底附近)时,水平夹角可取 30° ~ 35°。

3.2 围护体变形控制措施的优化设计

通过调整施工措施,减小围护体变形。围护体

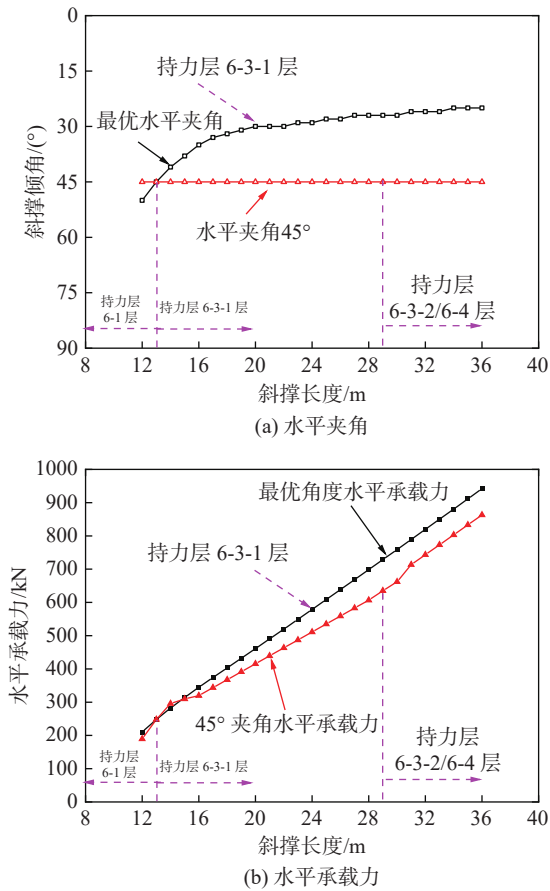


图5 工程三前撑桩承载力优化对比图

Fig. 5 Comparison diagram of optimization bearing capacity for the prestressed grouting steel pipe system in Project Three

变形控制的优化设计主要采取两方面的措施:

(1)坑边土方分层开挖,坑边留土最后开挖,缩短坑边垫层的形成时间;

(2)在前撑钢管桩入土处设置预制钢垫层,加强对支撑的约束,增加支撑整体刚度。

优化后的措施及工况如图6所示。在土方开挖阶段岛式开挖土方至前撑钢管入土区域,并施工预制垫层,此时坑边留土(见图6(a));再开挖坑边及坑内土方,及时形成配筋垫层(见图6(b))。其余施工工况不变。

3.3 优化设计的数值验证

采用数值模拟(PLAXIS 2D)的方式对优化设计措施的效果进行验证。土体本构模型采用HS-Small模型,相较于HS模型,HS-Small模型可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化,且还可以考虑剪切模量在微小应变范围内随应变衰减的行为,其计算结果能给出更为合理的墙体变形及墙后土体变形,可用于软土地层复杂环境的基坑变形分析^[20-23]。前撑桩采用桩单元模拟(实心圆弧梁, $E=3 \times 10^7$ kN/m, 桩与土体作用参

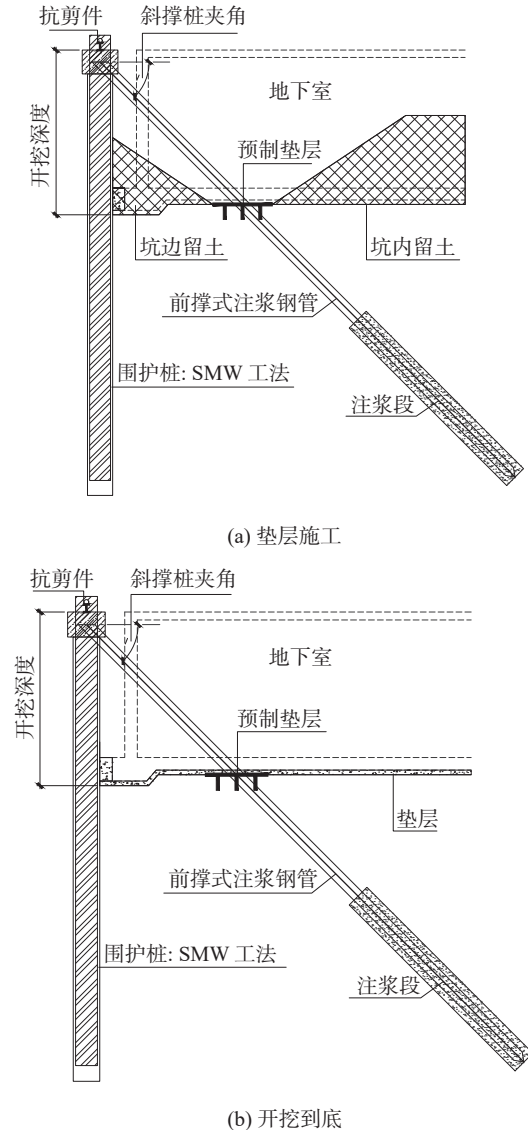


图6 围护体变形控制优化措施示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the deformation controlling measures of the foundation pit retaining pile

数见表1),垫层按板单元模拟(钢筋混凝土材料,板厚300 mm)。模型尺寸设置为80 m×30 m,边界处设置界面(特性同相邻土体),土层垂直分布及强度参数依据对应工程岩土工程勘察报告确定,其余参数参照文献[20],前撑式注浆钢管采用桩单元(承载力按式(1)、式(2)计算)。模拟工况见表2,模拟过程工况图见图7。

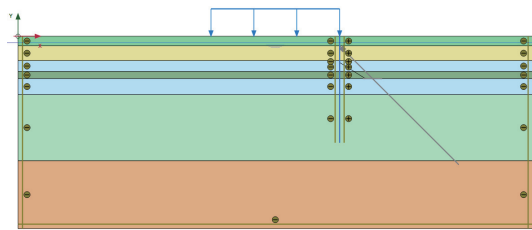
图7(a)为开挖前的初始工况,围护桩及前撑长度角度与表2一致。图7(b)为原方案开挖工况,即前撑角度均为45°,开挖工况为一次性开挖到坑底。图7(c)为优化后开挖工况,主要包含两方面的优化:1)前撑桩角度及长度的优化(优化后前撑桩的水平承载力基本一致,均满足规范对前撑钢管承载力的要求);2)挖土方式的优化(钢管近坑边土方放坡留土

表 2 模拟工况

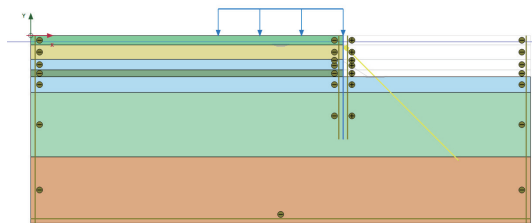
Tab. 2 Simulated conditions

工程类别	模拟方案	方案内容
工程一	方案一	钢管26 m, 倾角45°, 原岛式开挖
	方案二	钢管26 m, 倾角45°, 优化后开挖
工程二	方案一	钢管26 m, 倾角45°, 原岛式开挖
	方案二	钢管25 m, 倾角52°, 原岛式开挖
	方案三	钢管25 m, 倾角52°, 优化后开挖
工程三	方案一	钢管26 m, 倾角45°, 原岛式开挖
	方案二	钢管23 m, 倾角35°, 原岛式开挖
	方案三	钢管23 m, 倾角35°, 优化后开挖

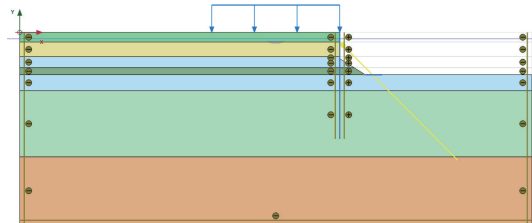
注: 基坑挖深6.65 m, 围护结构为SMW工法桩($\phi 850@600$ mm三轴搅拌桩内插H700 \times 300 mm型钢)+前撑式注浆钢管($\phi 377 \times 10$ mm, 间距3.6 m)。方案二和方案三前撑桩角度和长度调整后与方案一承载力水平分力基本一致。



(a) 开挖前



(b) 按原方案开挖到底



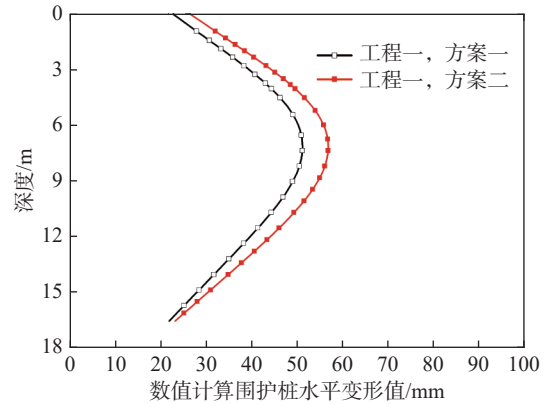
(c) 按优化措施开挖到底(坑边留土、预制垫层)

图 7 模拟过程工况图

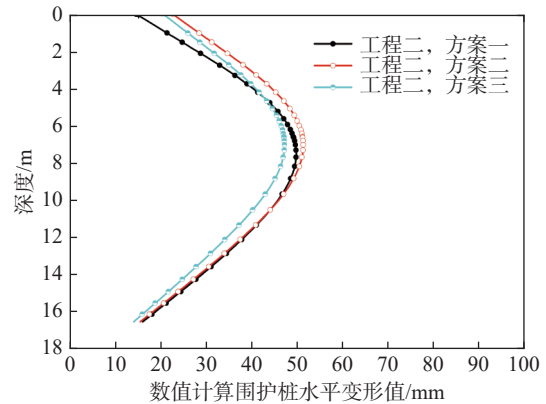
Fig. 7 Simulation process condition diagram

(坡率 1 : 1.5), 其余土方一次性开挖, 开挖到底后在钢管入土处设置预制钢垫层(垫层宽度为 2 m), 垫层强度达到设计要求后开挖坑边留土区域土方)。计算及对比结果如图 8 所示。

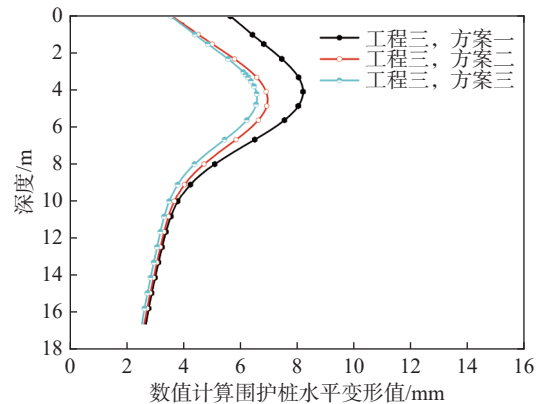
对于工程一的地质条件, 桩长不变情况下, 通过调整挖土方式并设置预制垫层可以一定程度减小围护桩侧向变形, 桩体最大侧移量由 56.9 mm 减小至



(a) 工程一



(b) 工程二



(c) 工程三

图 8 数值计算结果对比图

Fig. 8 Comparison diagram of simulation results

51.2 mm。对于工程二的地质条件, 通过调整前撑桩倾角, 减短桩长 1 m, 对围护桩最大侧向变形影响不大, 但由于水平刚度减小, 基坑开挖面以上的桩体侧向变形会有一定程度增大(由方案一的 49.7 mm 增至 51.2 mm); 调整挖土方式并设置预制垫层的方式, 可以一定程度减小围护桩最大侧向边变形(由方案二的 51.2 mm 降至 47.1 mm), 同时, 基坑坑底以下桩体变形同样减小, 有利于控制坑边地面沉降, 加强对周边环境的保护。对于工程三的地质条件, 通过调整前撑倾角, 同时桩长缩短 3 m, 围护桩最大侧向位移

(由 8.9 mm 降至 6.4 mm)及桩顶侧向位移(由 5.6 mm 降至 3.6 mm)的控制效果均较好,对基坑及周边环境的保护效果均较好;通过调整挖土方式及设置配筋垫层的方式对围护桩侧向变形影响不大。

由图 8 的模拟结果可知,对于三个不同地质条件的工程,采用优化措施后,围护结构经济性与安全性均得到有效提升。优化模拟结果分析见表 3。

表 3 优化措施模拟结果对比表
Tab. 3 Comparison table of simulation results of optimization measures

工程类别	模拟方案	围护体侧向最大位移/mm	结论
工程一	方案一	56.9	与方案一相比,造价相当,变形减小10%
	方案二	51.2	
工程二	方案一	49.7	与方案一相比,造价节约4%,变形增大3% 与方案一相比,造价节约4%,变形减小5%
	方案二	51.2	
	方案三	47.1	
工程三	方案一	8.9	与方案一相比,造价节约11.5%,变形减小22.5% 与方案一相比,造价节约11.5%,变形减小28%
	方案二	6.9	
	方案三	6.4	

4 结论

在分析上海地区不同地质条件下前撑注浆钢管支撑体系围护桩变形的基础上,提出了针对性的优化措施,并通过数值模拟验证了优化措施的有效性。得出以下结论:

(1)对于基坑坑底及前撑桩底土质均不佳的工程(两倍开挖深度范围内地层的平均比贯入阻力小于 0.8 MPa、前撑桩底持力层 $f_p < 500$ kPa),由于土体的蠕变性及垫层形成的时效性影响,实际工程中围护桩变形显著大于计算值;前撑桩水平夹角宜取 45°,采取分区挖土、增设预制垫层的方式,围护桩总变形可减小约 10%。

(2)对于基坑坑底土质不佳(两倍开挖深度范围内地层平均比贯入阻力小于 0.8 MPa),而前撑桩底土质较好($f_p > 500$ kPa)的工程,由于垫层形成时效性的影响,实际工程中围护桩变形值稍大于计算值;采用优化设计方案增大前撑桩水平夹角至 50°~55°、减短前撑桩长,同时结合分区挖土、设置预制垫层等措施,可节约前撑桩造价约 4%,围护桩变形改善不明显;当水平夹角较大时,需要特别关注围护桩与围檩间的抗剪设计,防止围檩与桩体间发生竖向错动。

(3)对于基坑坑底及前撑桩底土质均较好的工程

(两倍开挖深度范围内平均比贯入阻力大于 0.8 MPa、前撑桩底持力层 $f_p > 500$ kPa),实际工程中围护桩变形与计算值较为接近;采用优化设计方案,减小前撑桩水平夹角至 30°~35°,变形量减小超过 20%,造价节约超过 10%。

参考文献

- [1] 上海市建设协会. 自稳式基坑支护结构技术标准: T/SCDA 012—2021[S]. 上海: 上海市建设协会, 2021. (Shanghai Construction & Development Association. Technical standard for self-stable retaining structure of foundation excavation: T/SCDA 012—2021[S]. Shanghai: Shanghai Construction & Development Association, 2021. (in Chinese))
- [2] 顾国荣, 杨石飞, 许杰, 等. 一种可回收直立式钢管前撑围护结构及其应用方法: CN103410156B[P]. 2016-01-27. (GU G R, YANG S F, XU J, et al. Recyclable vertical steel tube front supporting envelop enclosure and applying method thereof: CN103410156B[P]. 2016-01-27. (in Chinese))
- [3] 陆秋平, 周吉, 陆陈华. 前撑式注浆钢管桩在砂质粉土层中的应用[J]. 建筑施工, 2019, 41(10): 1792-1794. (LU Q P, ZHOU J, LU C H. Application of front-braced grouting steel pipe pile in sandy silt layer[J]. Building Construction, 2019, 41(10): 1792-1794. (in Chinese))
- [4] 董林兵. 前撑注浆钢管桩在大面积深基坑工程中的应用[J]. 建筑施工, 2020, 42(7): 1126-1127, 1137. (DONG L B. Application of steel pipe pile with front support grouting in large area deep foundation pit engineering[J]. Building Construction, 2020, 42(7): 1126-1127, 1137. (in Chinese))
- [5] 郑先元, 张志. 前撑式注浆钢管斜撑体系在基坑工程中的应用分析[J]. 工程质量, 2019, 37(1): 69-72, 86. (ZHENG X Y, ZHANG Z. Analysis of application of the advanced grouting steel pipe diagonal brace system in deep foundation excavation engineering[J]. Construction Quality, 2019, 37(1): 69-72, 86. (in Chinese))
- [6] 惠彬永. 前撑式注浆钢管支撑在基坑围护中的应用与研究[J]. 建筑施工, 2018, 40(11): 1868-1870. (HUI B Y. Application and research on supporting of front supported type grouting steel pipe in foundation pit support[J]. Building Construction, 2018, 40(11): 1868-1870. (in Chinese))
- [7] 施春锋. 前撑式注浆管在深基坑工程中的应用[J]. 建筑施工, 2022, 44(6): 1157-1159. (SHI C F. Application of front support grouting pipe in deep foundation pit engineering[J]. Building Construction, 2022, 44(6): 1157-1159. (in Chinese))
- [8] 徐枫. 自稳式注浆钢管前撑技术在深大基坑中的应用[J]. 工程勘察, 2024, 52(11): 32-38. (XU F.

- Application of self stabilizing grouting steel pipe front support technique in deep and large excavations[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2024, 52(11): 32-38. (in Chinese))
- [9] 魏建华, 韩鹏飞, 孔令荣, 等. 双排桩门架结合前撑注浆钢管支护结构在软土深基坑工程中的应用 [J]. *地基处理*, 2025, 7(3): 303-310. (WEI J H, HAN P F, KONG L R, et al. Application of double-row pile gantry combined with front-supported grouted steel pipe retaining structure in soft soil deep excavation[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2025, 7(3): 303-310. (in Chinese))
- [10] 窦红瑞. 自稳式支护技术在基坑工程中的应用 [J]. *地基处理*, 2025, 7(1): 90-100. (DOU H R. Application of self-stabilizing support technology in foundation pit engineering[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2025, 7(1): 90-100. (in Chinese))
- [11] 海明雷, 魏建华. 前撑注浆钢管在某超大软土基坑中的应用 [J]. *工程勘察*, 2024, 52(3): 24-28. (HAI M L, WEI J H. Application of front-braced grouting steel pipe support in a super large deep excavation in soft ground[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2024, 52(3): 24-28. (in Chinese))
- [12] 李 明. 前撑式注浆钢管桩在软土地区基坑工程中的应用 [J]. *建筑施工*, 2025, 45(5): 849-851. (LI M. Application of front-supported grouting steel pipe pile in foundation pit engineering in soft soil area[J]. *Building Construction*, 2025, 45(5): 849-851. (in Chinese))
- [13] 张荣文. 前撑式抗压注浆钢管支撑在基坑支护中的应用 [J]. *建筑科技*, 2019, 3(3): 128-130. (ZHANG R W. Application of pressure grouting front support in foundation construction[J]. *Building Technology*, 2019, 3(3): 128-130. (in Chinese))
- [14] 倪浩群. 前撑注浆钢管在软土基坑中的应用 [J]. *建筑科技*, 2025, 9(3): 80-82,96. (NI H Q. Application of front-bracing grouting steel pipes in soft soil foundation pits[J]. *Building Technology*, 2025, 9(3): 80-82,96. (in Chinese))
- [15] 霍红伟, 潘昌盛, 蓬金高, 等. 基于前撑注浆钢管支撑体系的基坑施工效率提升研究 [J]. *建筑施工*, 2023, 45(11): 2157-2159. (HUO H W, PAN C S, PENG J G, et al. Research on improvement of foundation pit construction efficiency based on front support grouting steel pipe support system[J]. *Building Construction*, 2023, 45(11): 2157-2159. (in Chinese))
- [16] 陈学成. 前撑注浆钢管支护体系在基坑工程中的应用 [J]. *广东土木与建筑*, 2021, 28(5): 62-64,111. (CHEN X C. Analysis of front-braced grouting steel pipe pile in deep foundation excavation engineering[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2021, 28(5): 62-64,111. (in Chinese))
- [17] 陈海涛, 王 伟, 李 伟, 等. 超前注浆端承钢斜撑在基坑工程中的应用 [J]. *建筑施工*, 2017, 39(9): 1335-1336,1342. (CHEN H T, WANG W, LI W, et al. Application of advanced grouting at end bearing steel inclined strut to foundation pit engineering[J]. *Building Construction*, 2017, 39(9): 1335-1336,1342. (in Chinese))
- [18] 孙锦剑. 前撑注浆钢管桩在地下两层基坑工程中的应用 [J]. *广东土木与建筑*, 2024, 31(6): 69-71. (SUN J J. Application of pre-braced grouting steel pipe pile in two-storey underground foundation pit engineering[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2024, 31(6): 69-71. (in Chinese))
- [19] 戴生良, 张 宁, 黄惟奕, 等. 上海地区不同地质条件自稳式斜撑体系变形特性对比分析 [J]. *建筑施工*, 2022, 44(10): 2312-2315. (DAI S L, ZHANG N, HUANG W Y, et al. Comparative analysis of deformation characteristics of self-stabilizing inclined strut systems under different geological conditions in Shanghai Area[J]. *Building Construction*, 2022, 44(10): 2312-2315. (in Chinese))
- [20] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1766-1774. (WANG W D, WANG H R, XU Z H. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1766-1774. (in Chinese))
- [21] 王卫东, 李 青, 徐中华. 软土地层邻近隧道深基坑变形控制设计分析与实践 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(2): 163-175. (WANG W D, LI Q, XU Z H. Design and application of deformation control techniques for deep foundation pits adjacent to existing tunnels in soft soil[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(2): 163-175. (in Chinese))
- [22] 宗露丹, 徐中华, 翁其平, 等. 小应变本构模型在超深大基坑分析中的应用 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(S1): 231-242. (ZONG L D, XU Z H, WENG Q P, et al. Application of small strain constitutive model in the analysis of a ultra large and deep excavation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(S1): 231-242. (in Chinese))
- [23] 孙海忠, 邓捷程. 基于 HS-Small 模型软土基坑开挖过程三维数值分析 [J]. *建筑施工*, 2022, 44(6): 1373-1376. (SUN H Z, DENG J C. 3D numerical analysis of soft soil foundation pit excavation process based on HS-Small model[J]. *Building Construction*, 2022, 44(6): 1373-1376. (in Chinese))