

前撑式注浆钢管的自稳式支护在基坑工程中的设计与应用

晏 辛

上海勘察设计院(集团)有限公司, 上海 200093

[摘要] 依托上海市闵行区颛桥镇闵行新城 MHC10402 单元 25A-11A 地块住宅商品房项目, 介绍一种新型、节省工期及施工便利的前撑式注浆钢管的自稳式支护。本项目周边环境复杂、地层软弱、基坑面积大, 同时项目工期急、概算有限, 故经比选后, 靠近复杂环境区域采用前撑式注浆钢管的自稳式支护。通过平面有限元分析的 PLAXIS 模型预测基坑开挖对围护结构、土体变形及周边环境的影响, 并详细地介绍了前撑式注浆钢管施工及静载荷试验的流程, 最后整理监测数据分析得出, 前撑式注浆钢管的自稳式支护应用效果较好, 具有控制变形好、节省工期及造价、低碳环保的特点。

[关键词] 前撑式注浆钢管; 自稳式支护; 复杂环境; 有限元分析; 节省工期

DOI: 10.33142/aem.v5i1.7804

中图分类号: TU753

文献标识码: A

Design and Application of Self-stable Support of Pre-supported Grouted Steel Pipe in Foundation Pit Engineering

YAN Xin

SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200093, China

Abstract: Relying on the residential commercial housing project of Plot 25A-11A, Unit MHC10402, Minhang New Town, Zhuanqiao Town, Minhang District, Shanghai, this paper introduces a new type of self-stable support of pre-supported grouting steel pipe, which can save time and facilitate construction. The surrounding environment of the project is complex, the stratum is weak, the foundation pit area is large, and the project construction period is urgent and the budget estimate is limited. Therefore, after comparison and selection, the area close to the complex environment adopts the self-stable support of the pre-supported grouting steel pipe. The PLAXIS model of plane finite element analysis is used to predict the impact of foundation pit excavation on the retaining structure, soil deformation and the surrounding environment, and the process of construction and static load test of the pre-supported grouting steel pipe is introduced in detail. Finally, the monitoring data analysis shows that the self-stable support of the pre-supported grouting steel pipe has good application effect, has the characteristics of good deformation control, saving construction period and cost, and low carbon and environmental protection.

Keywords: front support grouting steel pipe; self-stable support; complex environment; finite element analysis; save time

随着基坑工程实践的多年积累, 人们在基坑工程领域也取得了一定的成果, 但目前传统的基坑施工工艺存在较多弊端, 如资源消耗大、受场地限制、施工效率低、作业条件差、施工期长、环境污染严重等^[1], 为让上述问题得到改善及适应市场环境, 越来越多的基坑工程新技术被学者们探索出来。

目前主要分两类对其优化, 一类是通过改良支护桩, 如采用预应力管桩作为支护结构, 对施工效率和缩短工期非常有利, 同时又有很好的环境效应^[2]; 又如将地下室外墙和基坑围护排桩相结合, 考虑围护排桩作为永久使用阶段地下室侧壁的一部分, 可减少地下室外墙的厚度, 实现建筑节能和可持续发展的支护设计^[3]。另一类是通过改良支撑, 这也是本文介绍的重点, 如采用可回收式锚索, 将钢绞线回收再利用, 减少了对相邻区域地下的影响, 绿色环保, 又减少施工成本^[4]; 又如采用鱼腹梁支撑体系组合式拼装结构, 其安装和拆除工效均高于混凝土支撑, 较混凝土支撑缩短工期, 且可重复利用^[5]。可回收式锚索及鱼

腹梁支撑体系虽然也是通过对改良支撑, 但与前撑式注浆钢管的应用场景各不相同, 如他们在周边环境复杂、地层软弱、基坑面积大等多种情况同时存在时就不是那么适用。

本文以上海市闵行区颛桥镇闵行新城 MHC10402 单元 25A-11A 地块住宅商品房项目为例, 详细介绍前撑式注浆钢管的自稳式支护在软土地区复杂环境下设计到施工的一系列工作流程, 通过基坑实践和监测数据的整理分析, 验证了采用自稳式基坑支护的优势, 为后续类似工程提供参考和借鉴。

1 自稳式基坑支护简介

1.1 工作结构与机理

自稳式基坑支护主要由围护桩、圈梁、前撑式注浆钢管或后拉式注浆钢管、配筋垫层组成, 相对于传统支护形式, 区别在于此工艺用采用注浆钢管作为支撑, 并增加配筋垫层。常见的形式见图 1, 受于上海地区土性差受拉效果不好、不能出红线等条件限制, 前撑式注浆钢管的自稳式支护应用比较广。

前撑式注浆钢管顶部是通过设置 L 型钢筋及短钢筋与围檩连接,端头则插入土中,并向钢管内注入水泥浆,通过坑底以下的土体提供的承载力来作为支撑所需的反力。配筋垫层也起到非常关键的作用,一是与前撑式注浆钢管连接增强钢管的承载力,从而增加支撑的刚度;二是形成一道板撑顶住围护桩,并与前撑式注浆钢管形成三角受力体系,抵抗水平位移;三是起到抵抗坑内土体隆起的作用。

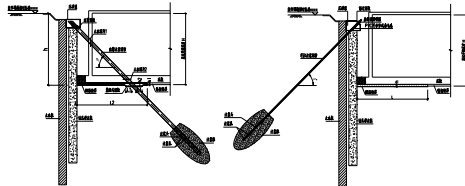


图1 典型前撑式(前)/后拉式(后)注浆钢管的自稳式支护图

1.2 施工流程简介

以本工程为例的前撑式注浆钢管的自稳式支护施工流程图如下:

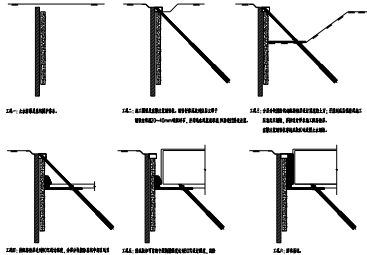


图2 本工程自稳式支护施工流程图

1.3 工艺特点

截至目前全国约有 200 余项的自稳式基坑支护工程已成功实施,对于采用前撑式注浆钢管的自稳式支护总结主要有如下几个方面的特点^[6-8]:

- (1) 代替了原有复杂的支撑体系,施工内容大大减小;
- (2) 类似常规的斜抛撑,但无须对底板进行分块施工;
- (3) 施工速度较快,且可实现土方的敞开式开挖,施工工期大大节约;
- (4) 有利于基坑的风险控制,内抛式支撑可在基坑;

(5) 绿色环保,环境及社会效益明显,钢筋、混凝土等材料用量远少于常规支撑方案,又避免了拆撑时对环境的二次噪音、粉尘污染,钢管割除后也可回收利用。

2 工程背景

2.1 主体结构及基坑概况

本工程位于上海市闵行区颛桥镇鑫都路与沪闵公路交叉口,为新建住宅项目,含 30 栋中高层住宅,整体下设一层地下车库,地块中间局部设两层地下车库,均采用桩基础。本文关注的地下一层区域,基坑面积约 63500m²,基坑周长约 1470m,基坑挖深 5.35m。

2.2 环境概况

拟建场地周边环境条件较为复杂,此处重点介绍采用自稳式支护区域的环境,一是东侧泵站的水库,水库为混凝土框架结构,筏板基础,基础埋深约 2.0m,采用水泥土搅拌桩复合地基,水泥土搅拌桩长度为 6.5m~10.5m,房屋主要用于储水,储水最高水位为 5.5m,基坑开挖边线距离泵站约 7.69m~8.75m;二是北侧的原水渠道,含两根管道,呈矩形,并排设置,原水渠道结构高约 4.2m、总宽约 18.0m,结构板底埋置深度 6.32m~6.84m,结构外边线与基坑距离约为 14.17m~16.72m。

泵站水库及原水渠道都是生命线工程,且对变形十分敏感,需严格控制基坑开挖对其的不利影响。在围护设计前期,就与水库及原水渠主管部门沟通围护方案,双方主管部门均非常重视本基坑开挖对其产生的影响,并均要求实时监护,故必须确保其绝对安全。

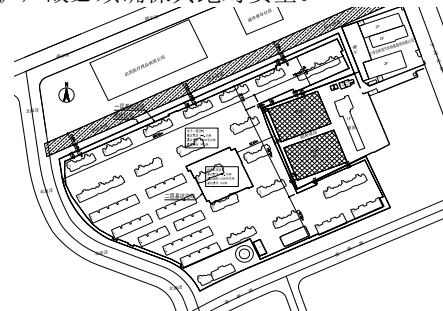


图3 基坑周边环境示意图

表1 土层物理力学参数表

土层编号	土层名称	厚度 h (m)	重度 γ (kN/m ³)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	渗透系数 K (cm/s)	压缩模量 E _{50.1-0.2} (MPa)	静止侧压力系数 K ₀
①	杂填土	2.12	-	-	-	-	-	-
②	粉质粘土	1.40	19.3	25	17.5	3.5x10 ⁻⁶	5.29	0.45
③	淤泥质粉质粘土	1.10	17.6	12	17.0	3.5x10 ⁻⁶	3.09	0.50
③ _夹	粘质粉土	0.70	18.8	8	28.0	2.0x10 ⁻⁴	8.23	0.40
③	淤泥质粉质粘土	2.90	17.6	12	17.0	3.5x10 ⁻⁶	3.09	0.50
④ ₁	淤泥质黏土	3.40	16.8	12	11.5	3.0x10 ⁻⁷	2.09	0.59
④ ₂	砂质粉土	6.20	19.0	5	31.0	4.0x10 ⁻⁴	10.23	0.38

2.3 地质条件

项目位于长江三角洲冲积平原,地貌为滨海平原类型。从地面到地下约 12m 范围内主要分布有软弱的杂填土、流塑状态的淤泥土,地下 12m~18m 范围内为中等密实的砂质粉土,各土层物理力学指标见表 1。

地下水有潜水和承压水两种类型。浅部潜水赋存于杂填土、黏性土中,年平均水位埋深 0.5 m~0.7m。深部分布有第④2 层微承压水,经复核地下一层区域微承压水稳定性安全系数满足规范要求。

3 基坑支护方案

3.1 总体设计思路

靠近原水渠管及水库的区域为地下一层,坑深 5.35m,水库距离基坑边线 7.69m~8.75m,原水渠道距离基坑边线 14.17m~16.72m,根据上海基坑规范^[9],这两处区域的安全等级定义为三级,环境保护等级定义为二级。

本项目基坑设计方案的选型,一方面应严格控制基坑开挖引起的变形和环境影响,进而保证原水渠管及水库的正常使用;另一方面应兼顾项目的开发进度,由于本项目为住宅项目,所以对于抢预售的要求特别高;最后是围护造价,总的工程概算有限,需在安全、工期及造价之间寻求最佳平衡点。

3.2 支护结构选型

周边环境条件复杂,为加强对其保护,需严格控制基坑开挖对其造成的影响,故采用刚度较大的板式支护是必然的,根据上海地区大量基坑工程的成功经验,可考虑选择的围护形式主要有工法、钻孔灌注桩,本项目面积较大,采用工法租赁周期会比较长,且容易出现渗漏风险,故选用钻孔灌注桩结合扰动较小的三轴搅拌桩止水。

3.3 支撑体系选型

本基坑地下一层区域的面积较大,如采用水平支撑,支撑和立柱的工程量将十分大,且施工工期长、土方开挖不便,故宜采用竖向斜撑的支撑形式^[10],常用的竖向斜撑分为常规斜抛撑及前撑式注浆钢管,针对本项目的优缺点对比见表 2,可以看到常规斜抛撑在本项目中适用性极低,故采用在控制变形、便利性、工期优势均明显的前撑式注浆钢管;但基坑东北侧独有的窄条形形状,宜采用水平支撑的支撑形式。

表 2 本项目竖向斜撑对比表

方案 项目	常规斜抛撑	前撑式注浆钢管
围护单价 (元/m)	23496 (A)	24545 (1.05A)
施工便利性	坑边留土二次开挖,基础底板分两次浇筑,总体施工工艺复杂	基坑敞开式挖土,基础底板一次形成,施工较方便
变形控制能力	理论计算是可行的,但实际留土开挖阶段周边变形	变形控制好

方案 项目	常规斜抛撑	前撑式注浆钢管
	就已经超标,对施工单位要求较高	
总工期	底板分两次施工,预计桩基施工至地下室结构完成时间为 A+44 天(其中挖土 17 天+底板 20 天+底板养护 7 天)	预计桩基施工至地下室结构完成时间为 A
本项目适用性	东侧及北侧区域主楼贴边,支撑需加长以避让主楼,但同时造价及主楼的回筑严重影响;土方二次开挖难度大,变形控制难度大,牛腿、后浇带、防水等费用大大增加;斜抛撑下部留土须借用外侧场地开挖及行车,但东侧坑外无施工条件	前撑式注浆钢管可以在土方开挖前全部实施完毕,可全面、大范围开挖,地下结构施工一气呵成、有条不紊,大大节省工期

3.4 坑内被动土加固设计

基坑开挖影响范围内以流塑~软塑的软弱粘性土为主,为有效控制基坑开挖阶段的围护体变形以及对水库和原水渠道的影响,设计对基坑开挖范围内的被动区土体进行了加固改良,以提高被动区土体抗力。

3.5 支护方案介绍

邻近原水渠管及水库普遍区域的支护方案如下:围护采用 $\Phi 800@1000$ 钻孔灌注桩挡土,灌注桩有效长度 11.5m,灌注桩外侧止水采用 $3\Phi 850@1200$ 三轴搅拌桩,有效长度 11.5m,水泥掺量 20%,搅拌桩与灌注桩之间设压密注浆防止桩间土流失;坑内设置前撑式注浆钢管及配筋垫层,前撑式注浆钢管型号为 $\phi 325 \times 8$,钢管长度为 19.0m,平均间距 4.0m,击入角度为 45° ,单根钢管注浆量 4.0t,配筋垫层厚 250mm,宽度为 6.0m;沿基坑周边设置双轴水泥土搅拌桩裙边格栅加固,加固宽度为 5.2m,加固深度为地面至坑底以下 4.0m,坑底以上水泥掺量 8%,坑底以下水泥掺量 13%;同时为避免换撑悬臂过高导致围护变形过大以及前撑穿外墙导致结构防水问题,设置 1.0m 高换撑砼牛腿。

邻近原水渠管及水库东北侧窄条形区域的支护方案同上,唯一区别在于支撑采用的水平 609×16 钢管支撑。

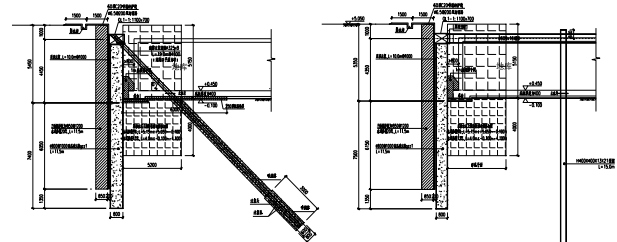


图 4 邻近原水渠管及水库普遍区域(前)/窄条形区域(后)剖面图

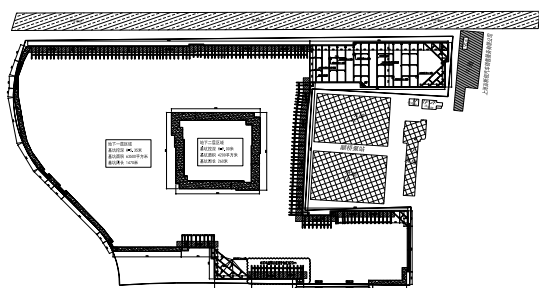


图5 支撑平面布置图

4 围护设计计算

4.1 支护变形及内力计算

对上述邻近原水渠管及水库的前撑式注浆钢管剖面进行计算, 计算采用规范推荐的平面竖向弹性地基梁法, 把挡土墙作为弹性梁单元, 支撑作为弹性杆单元, 坑内土体对支挡结构的反作用采用弹簧支座模拟^[11], 计算得到各阶段的挡墙内力、水平位移和支撑杆轴力的包络图。得到的主要计算结果如图6所示, 可以看出围护结构最大位移分别为 14.3mm、15.3mm, 满足上海基坑规范要求的二级环境区域 0.30%倍基坑深度的变形要求^[9]。

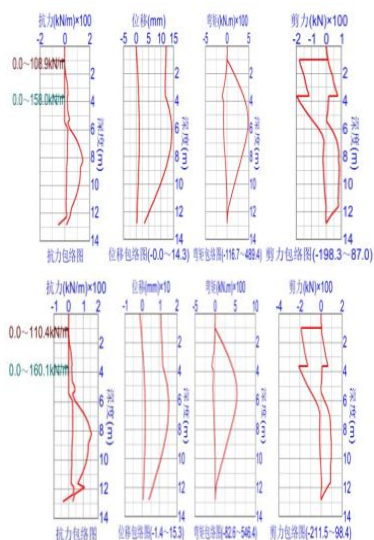


图6 邻近原水渠管(前)/水库(后)普遍区域的计算结果

4.2 周边环境的影响分析

4.2.1 环境影响分析方法的选择

本工程邻近原水渠管及水库的周边环境相对复杂, 故需要更详尽地评价基坑围护开挖对围护结构、土体变形、原水渠管及水库的影响, 预估周边建筑物的影响主要有两种方法, 即有限元方法和简化分析方法^[12]。简化分析方法应用非常有限, 如对于埋置深度较深的原水渠管就无能为力, 同时简化分析法虽然简单, 但需要建立在大量工程经验的基础上, 对于多数工程师预估结果的可靠性会大打折扣。有限元数值方法能模拟复杂的土层特征和开挖过程能给出特定基坑随开挖的变形过程, 在基坑工程中的应用取

得了长足的进步, 并已成为分析敏感环境条件下的基坑工程最重要的技术手段。

基坑开挖本质上是三维问题, 但以往的平面和三维分析结果相比较表明: 在反映围护结构的变形和对周边环境的影响方面, 变形趋势及数值基本接近。目前已有姜峥^[13]、杨卓^[14]、冯晓腊^[15]等应用二维有限元较准确地预测出周边环境变形, 这说明二维的假定可以满足工程计算的要求, 且本项目基坑边长较长, 空间效应不明显, 采用平面有限元分析方法, 可以简化计算模型, 节省计算工作量, 因此本工程考虑采用平面应变有限元法, 对基坑开挖各施工流程进行模拟, 以分析围护结构与周边环境在各工况下的变形情况。

4.2.2 计算模型及工况

基坑开挖涉及围护结构施工、土体开挖、支撑施工等复杂过程, 要准确地分析基坑的变形和受力情况以及基坑开挖对周边环境的影响, 必须合理地模拟基坑的实际施工工况, 因此在建模时需综合考虑土层的分层情况、周边建(构)筑物的存在、开挖及支护结构的施工顺序等。采用单元的“生”“死”功能来模拟具体施工过程中有关结构构件的施工以及土体的挖除, 并采用分步计算功能来模拟具体的施工工况^[10]。

计算软件采用 PLAXIS, 计算断面分为邻近原水渠的前撑式注浆钢管剖面及邻近水库的前撑式注浆钢管剖面, 基坑围护分析过程中, 单元类型见表3, 边界条件为模型的底部采用全自由度约束, 即水平、竖向向固定约束, 侧面采用法向约束, 允许竖向变形。

表3 单元类型与本构模型表

对象	单元类型	本构模型
土体	三角形	HS 硬化模型
围护桩	梁单元	线弹性
支撑	梁单元	线弹性
结构	梁单元	线弹性
桩土接触面	接触面单元	库仑准则

计算工况如下, 基坑在开挖之前存在初始应力场, 按土体自重应力场来模拟场地存在的初始应力场, 计算中结合设计工况, 按表4所列工况进行计算分析。

表4 计算工况表

工况	模拟内容
Stage 0	初始应力计算
Stage 1	施加围护结构(包括接触面)
Stage 2	开挖到围檩底
Stage 3	施工前撑式注浆钢管
Stage 4	开挖到坑底

4.2.3 计算结果及分析

(1) 邻近原水渠的前撑式注浆钢管区域侧, 基坑开

挖对围护结构、土体变形及原水渠管的影响如下:

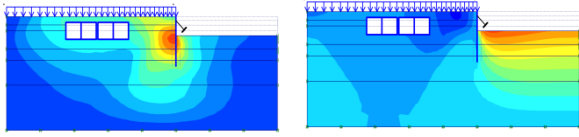


图7 邻近原水渠管开挖到底的水平位移(前)/竖向位移(后)云图

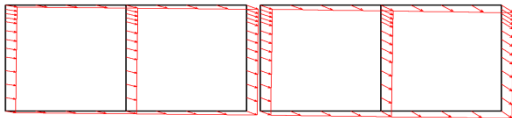


图8 原水渠管位移图

(3) 邻近水库的前撑式注浆钢管区域侧, 基坑开挖对围护结构、土体变形及水库的影响如下:

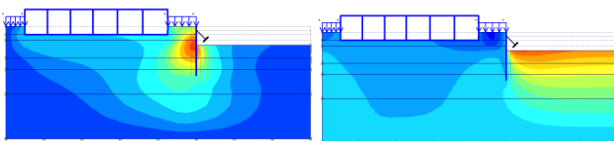


图9 邻近水库开挖到底的水平位移(前)/竖向位移(后)云图

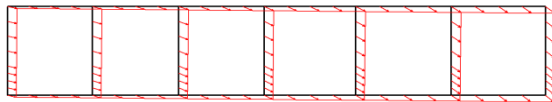


图10 水库位移图

基坑开挖至坑底时为位移最大工况, 邻近原水渠的前撑式注浆钢管区域侧对应的基坑水平和竖向最大位移分别 12.64mm、13.60mm, 邻近水库的前撑式注浆钢管区域侧对应的基坑水平和竖向最大位移分别 13.13mm、14.25mm, 在这样的位移水平下, 围护结构能够保证正常工作; 邻近原水渠的前撑式注浆钢管区域侧基坑工程施工引起的原水管渠最大位移 1.77mm, 邻近水库的前撑式注浆钢管区域侧基坑工程施工引起的泵站水库最大位移 8.43mm, 可见基坑开挖到底时对周边环境的影响也在可控范围内。

5 前撑式注浆钢管实施过程

5.1 前撑式注浆钢管的构造

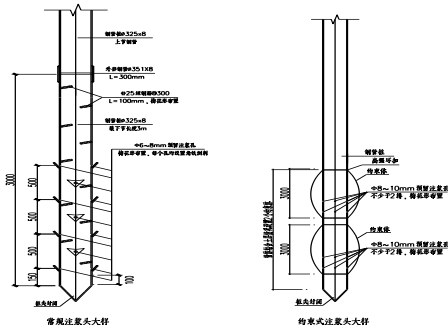


图11 普通式注浆头及约束式注浆头大样图

前撑式注浆钢管是在钢管端头的侧面开口并注入水

泥浆的工艺。根据注浆工艺的不同常规可分为两类, 一类是普通式注浆钢管, 一类是增加约束体的注浆钢管, 两者主要区别在于是否在注浆钢管端头增加囊袋式约束体, 类比同类项目, 原本是需要增加约束体来提高钢管的承载力, 但本项目桩端存在较厚且稳定的④₂层砂质粉土层, 该层标准贯入击数 14.9, 比贯入阻力 4.45MPa, 能提供较大的桩端承载力, 故本项目可按普通式注浆钢管进行设计施工。也因为本工程地层特殊, 与注浆钢管的匹配度极高, 故而钢管长度也较类似项目减短, 为业主进一步节省造价。

5.2 前撑式注浆钢管施工流程

施工主要步骤如下: 钢管加工→沟槽开挖→钢管定位→沉桩施工→钢管内碎石、灌水泥浆→钢管注浆→焊接桩顶→钢管桩回收。对上述关键施工步骤作如下详细的解释:

(1) 钢管加工: 钢管到场后需要对桩端开洞, 预留注浆孔, 并在周围焊接角铁倒刺, 短钢筋等; 钢管底部封闭并焊接桩尖, 常用的桩尖有十字形、H 型钢、锥形, 土质较软的情况也可不用焊接桩尖, 本项目采用的是十字形桩尖, 钢管分为 13m+6m 两段施工, 提前把连接部分的外套套管与下部钢管焊接;

(2) 沟槽开挖: 在灌注桩施工并完成终凝后, 凿除多余灌注桩桩头, 清理出钢管施工空间;

(3) 钢管定位: 根据设计图纸确定施工位置, 施工角度, 并根据现场围墙位置, 确认是否有与冲突的情况, 若冲突, 可采取拆除围墙、钢管分段施工、设置挑梁的方式解决;

(4) 沉桩施工: 依靠打拔机的机械手将钢管插入设计深度, 施工过程中为防止钢管掉落的风险, 在顶部设置防滑的钢链条套住钢管; 为防止机械手直接静压对钢管造成损坏, 施工时另设保护套筒; 当钢管施工困难时, 可先引孔后再工压入钢管, 引孔钢管直接可采用同直径的空心高强钢管, 起到松动并带出部分土体的作用; 在第一节钢管施工完毕后, 吊放第二节钢管至套管口, 焊接钢管与套管;

(5) 钢管内碎石、灌水泥浆: 钢管杆体沉放到位后先把注浆管放入, 再填满碎石、灌水泥浆, 灌水泥浆的作用主要是增强钢管刚度及封闭管口;

(6) 钢管注浆: 在水泥浆达到一定强度后进行注浆, 注浆采用三次注浆工艺, 第一次注浆量为设计注浆量的 60%, 第二、三次注浆量为设计注浆量的 20%, 每次注浆间隔时间 1.5~2.5 小时; 注浆流量控制在 20~30L/min, 注浆最终完成的标准以单根桩水泥用量和最终注浆压力控制: 单根桩水泥用量不少于 4t, 最终注浆压力不小于 1.5~2MPa;

(7) 焊接桩顶: 钢管顶部设置 L 型钢筋及短钢筋, 同时绑扎围檩钢筋, 最后浇筑混凝土形成整体;

(8) 钢管桩回收: 在底板及换撑牛腿达到强度后, 即可对钢管进行割除, 割除的钢管可另做换撑或回收。



(a) 加工完成的前撑式注浆钢管 (b) 前撑式注浆钢管沉桩



(c) 前撑式注浆钢管焊接 (d) 前撑式注浆钢管开挖照片

图 12 前撑式注浆钢管相关图片

6 前撑式注浆钢管的静载荷试验

6.1 试验目的

前撑式注浆钢管作为支撑构件,主要通过坑底以下的土体提供的承载力来作为支撑所需的反力,故为验证前撑式注浆钢管的单桩极限抗压承载力是否满足设计的要求,应进行抗压静载荷试验。

6.2 试验方法

6.2.1 检测依据

依据上海市标准《建筑地基与基桩检测技术规程》^[16]及设计图纸要求,本次抗压静载荷试验检测 3 根,设计最大加载量为 750kN。

6.2.2 检测设备

(1) 荷载装置:在圈梁达到强度后,利用圈梁提供反力;

(2) 加荷系统:采用油压千斤顶,高压油泵及油管等;

(3) 量测系统:基桩全自动静载荷试验系统。



图 13 抗压静载荷试验照片

6.2.3 荷载分级

每级荷载值为最大加载量的 1/10,第一级取 2 倍级差加载量进行加载,逐级等量加载,直至达到设计要求的最大加载量,每级卸载量为分级加载量的 2 倍,共分 5 级卸载。具体分级如下:150kN→225kN→300kN→375kN

→450kN→525kN→600kN→675kN→750kN→600kN→450kN→300kN→150kN→0kN。

6.2.4 加载方式

采用快速维持荷载法进行测试,每级加载后第一个小时内按第 5min、15min、30min、45min、60min 测读桩身变形量,为了更准确地模拟出累计沉降量,施加最后两级荷载时采用慢速法的沉降稳定标准,变形稳定标准按每 1h 的变形量不大于 0.1mm,且连续出现 2 次;卸载时,每级荷载维持 15min,按第 5min、15min 测读 2 次,卸载至零后测读残余沉降量两小时,测读时间为第 5min、15min、30min、60min、90min、120min。

6.2.5 抗压试验终止加荷条件

本项目的实验终止加荷条件为达到设计要求的最大试验荷载 750kN,且桩顶沉降达到稳定。

6.3 试验结果与分析

单桩极限抗压承载力按下列方法综合确定:

(1) 取 Q-s 曲线发生明显陡降段的起始点所对应的荷载值;

(2) 取 s-lgt 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值;

(3) 当某级荷载作用下,桩顶累计沉降量超过 30mm,应取前一级荷载;

(4) 当某级荷载作用下,桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍,且经 24h 尚未达到相对稳定标准应取前一级荷载;

(5) 不符合本条第 1~4 款情况时,可判定单桩竖向抗压极限承载力不小于最大试验荷载。

根据实验结果,本次试验极限承载力确定依据上述第 5 条,故本项目单桩极限抗压承载力不小于 750kN,满足设计要求,下附其一抗压静载荷试验曲线图。

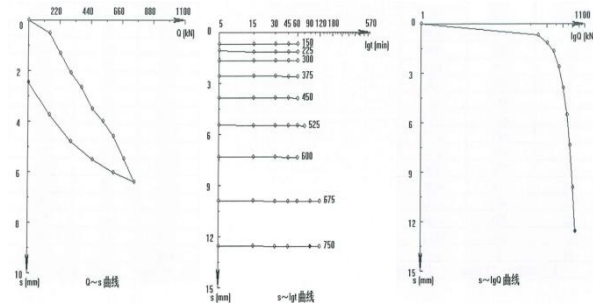


图 14 抗压静载荷试验曲线图

7 基坑监测

7.1 监测点平面布置

为了及时收集和反馈围护结构、周边土体及环境在基坑开挖过程中的影响,基坑施工过程中设置了围护结构及周边环境监测项目,限于篇幅,本文仅对靠近原水渠管及水库位置的典型测点进行分析,其监测点平面布置如图 15 所示。

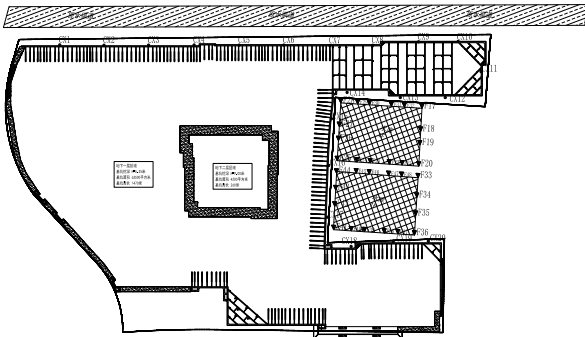


图 15 监测点平面布置图

7.2 监测数据分析

7.2.1 灌注桩侧移

基坑开挖及地下室回筑阶段,靠近原水渠管及水库的灌注桩最大侧移统计情况见表 5,并附部分不同位置的深层水平位移测斜图,分别对应:采用前撑式注浆钢管的原水渠管侧的测斜点 CX3、采用水平 609x16 钢管支撑的原水渠管侧的测斜点 CX9、采用水平 609x16 钢管支撑的水库侧的测斜点 CX13、采用前撑式注浆钢管的水库侧的测斜点 CX16。

表 5 CX1~20 最大侧移统计表

测点	CX1	CX2	CX3	CX4	CX5
最大位移 (mm)	13.07	14.30	11.17	9.59	10.48
测点	CX6	CX7	CX8	CX9	CX10
最大位移 (mm)	8.16	8.95	17.81	13.80	13.21
测点	CX11	CX12	CX13	CX14	CX15
最大位移 (mm)	12.24	18.58	19.62	17.53	9.27
测点	CX16	CX17	CX18	CX19	CX20
最大位移 (mm)	9.17	10.31	16.21	12.32	10.13

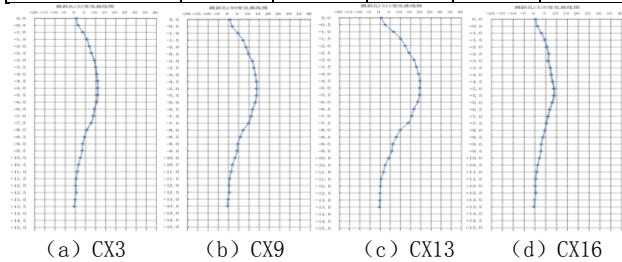


图 16 不同位置的深层水平位移测斜图

由上可见,侧向位移整体呈现为“纺锤形”,随着基坑的挖深不断增加,到坑底附近出现最大侧移。基坑最大侧向位移在 8.16mm~19.62mm,平面内没有明显规律,平均位移 12.80mm,即本项目平均最大侧向位移为 0.24%H,徐中华^[17]等在上海软土地区统计了 80 个采用灌注桩围护的平均最大侧向位移基本介于 0.10%H~0.10%H,均值在 0.44%H,可见本项目的最大侧向位移位于上海同类型基坑变形范围内,且较上海地区统计的均值稍小,说明本项目的变形量可控。采用前撑式注浆钢管的原水渠管侧的平均

最大侧向位移为 10.81mm,采用水平 609x16 钢管支撑的原水渠管侧的平均最大侧向位移为 14.94mm,采用水平 609x16 钢管支撑的水库侧的平均最大侧向位移为 18.57mm,采用前撑式注浆钢管的水库侧的平均最大侧向位移为 11.23mm,即本目前撑式注浆钢管区域的基坑变形控制比水平钢管支撑区域好,这也反映出前撑式注浆钢管可以更有效地控制围护变形,确保基坑安全。

实测情况与平面竖向弹性地基梁法、平面有限元分析法的平均最大侧移结果对比见表 6,可以看出两种方法均能较准确地预测出结果,预测结果均略大,采用平面有限元分析法更接近实测结果。

表 6 不同方法最大侧移统计表

位置	分析方法	平面竖向弹性地基梁法	平面有限元分析法	实测法
采用前撑式注浆钢管的原水渠管侧最大侧向位移 (mm)		14.3	12.64	10.81
采用前撑式注浆钢管的水库侧最大侧向位移 (mm)		15.3	13.13	11.23

7.2.2 周边环境变形

原水渠监测是主管部门另请的监护机构,数据暂未能收集,但通过推断也可以判定基坑施工对其影响满足主管部门要求,一是原水渠实时监测过程中从未产生报警,二是靠近原水渠侧的平均最大侧向位移为 12.05mm,本身基坑挖深 5.35m,最近距离约 14.17m,超 2.5 倍基坑挖深,且其埋置深度最浅约 6.32m,比本项目埋置深度深,故推断基坑施工对其产生的影响较小。

对于水库,其最终沉降见图 17,可以看出其沉降在 1.7mm~14.7mm 之间,差异沉降不大,最大沉降均满足主管单位要求的 20mm,基坑开挖对其影响在可控范围内。普遍呈现靠近基坑侧的沉降比远离区域大,同时监测过程中发现,前期施工围护就会对其产生影响,开挖过程中影响最大,在底板浇筑之后沉降趋近于稳定。

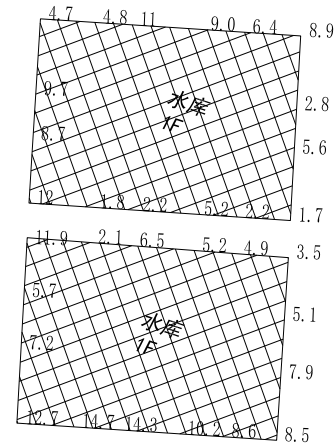


图 17 水库最终沉降图

对于水库,实测采用前撑式注浆钢管区域侧的水库的

平均沉降在 9.91mm, 平面有限元分析的沉降为 8.43mm, 说明平面有限元分析预测的结果与实测结果基本吻合, 两者数据相差不大, 证明采用 PLAXIS 模型能够较准确地预测对水库的沉降影响, 其模拟计算结果是合理、可靠的。

8 结论

本项目目前已顺利完工, 对工期、造价、环境保护等方面均超额完成预期目标, 自稳式支护应用在本工程是成功的, 从本项目的实施情况及监测分析, 主要结论与建议如下:

(1) 本项目的最大侧向位移较上海地区统计的均值稍小, 说明变形量可控, 前撑式注浆钢管的自稳式支护可以应用在大跨度、软土地区及周边环境复杂的地区, 特别是对工期要求较高的工程匹配度较高。

(2) 前撑式注浆钢管的自稳式支护大幅提升施工效率, 类比采用钢筋混凝土支撑大幅降低工程造价、节约工期, 同时避免大量拆除支撑的二次噪音、粉尘污染、资源浪费等; 类比采用常规斜抛撑在控制变形、便利性、工期方面均优势明显, 节约工期约 44 天, 具有广阔的应用前景和重大的社会效益。

(3) 当桩端有较好的持力层时, 可以进一步减短前撑式注浆钢管的长度, 节省工程造价。

(4) 前撑式注浆钢管区域比水平钢管支撑区域的变形控制好, 可以更有效地控制围护结构、土体变形及周边环境的影响, 确保基坑安全。

(5) 平面竖向弹性地基梁法及平面有限元分析法都能较准确的预测出结果, 预测结果均略大, 采用平面有限元分析法更接近实测结果。

(6) 通过平面有限元 PLAXIS 模型, 预测开挖过程中对周边环境的影响, 计算结果与实测数据较为吻合, 表明

该模型预测软土地区基坑开挖对周边建筑物影响较为合理, 可为基坑围护结构的选型及安全性评估提供参考。

【参考文献】

- [1] 王卫东, 丁文其, 杨秀仁, 等. 基坑工程与地下工程——高效节能、环境低影响及可持续发展新技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 78-98.
- [2] 黄广龙, 李勇, 宰金珉, 等. 预应力混凝土管桩在深基坑支护工程中的应用研究[J]. 建筑施工, 2005(4): 12-14.
- [3] 王卫东, 沈健. 基坑围护排桩与地下室外墙相结合的“桩墙合一”的设计与分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 303-308.
- [4] 夏克平. 可回收的预应力锚索施工技术[J]. 建筑施工, 2017, 39(6): 775-777.
- [5] 周冠南. 预应力鱼腹梁支撑体系在异形基坑中的应用与研究[J]. 施工技术, 2014, 43(17): 7-10.
- [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.
- [7] 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): 69-73.
- [8] 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.
- [9] 上海市住房和城乡建设管理委员会. DG/TJ08-61-2018 基坑工程技术规范规程[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- [10] 刘国斌, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

作者简介: 晏辛 (1996.2-), 男, 毕业院校: 上海应用技术大学; 所学专业: 结构工程; 职务: 三级项目经理; 目前职称: 助理工程师; 工作单位: 上海勘察设计研究院(集团)有限公司。