

特殊地质条件下支护结构的变形特点研究

代立伺

华设设计集团股份有限公司，江苏南京 210000

DOI:10.61369/ERA.2025110006

摘要：软土地基主要由淤泥、淤泥质粘土等软弱土层组成，具有压缩性高、承载力低等特点。在工程建设中，大部分建筑基坑的开挖都处在淤泥层中，由于该特殊的地质构造，基坑施工中支护结构的设置和变形就成了施工安全的重点，对工程施工的安全、生命财产安全造成较大影响，需要特别注意软土地基的处理和加固，以确保工程的安全性和稳定性。因此，必须重视支护结构的设置和施工过程中结构变形情况，为施工做出必要的安全警示和防范作用，为后续同类工程的施工提供指导经验，经可能避免安全事故的发生。

关键词：基坑监测；钢板桩支护；型钢支撑；淤泥地质；深层水平位移监测

Research on the Deformation Characteristics of Support Structures under Special Geological Conditions

Dai Lisi

China Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : Soft soil foundation is mainly composed of soft soil layers such as silt and silty clay, which have the characteristics of high compressibility and low bearing capacity. In engineering construction, the excavation of most building foundation pits is located in the silt layer. Due to this special geological structure, the setting and deformation of support structures in foundation pit construction have become the focus of construction safety, which has a significant impact on the safety of engineering construction and the safety of life and property. Special attention should be paid to the treatment and reinforcement of soft soil foundation to ensure the safety and stability of the project. Therefore, it is necessary to pay attention to the setting of supporting structures and the deformation of structures during the construction process, to provide necessary safety warnings and prevention measures for construction, and to provide guidance and experience for the construction of similar projects in the future, in order to avoid the occurrence of safety accidents.

Keywords : foundation pit monitoring; steel sheet pile support; section steel support; silt geology; deep horizontal displacement monitoring

引言

我国的浙江省沿海平原地区广泛分布着软土地基。通过对位于苍南县的三澳核电厂环境监测前沿站项目地下室基坑的监测，研究黏土层中拉森钢板桩+型钢支撑的结构随施工的进展而产生的变形特点。

一、地质条件与支护结构设置

(一) 设计开挖深度

拟建地下室底板面标高为 -5.05m，地下室底板厚 350mm，承台厚 600/1000mm。垫层为 150mm 厚，基坑设计开挖深度为 4.20~4.60m。

(二) 场区内工程地质及水文地质情况

根据岩土工程勘察报告，基坑开挖深度影响范围内土层自地面向下分别为：(1)0 素填土：全场地分布，层厚 0.30~1.10m；(1)1

粘土：全场分布，层厚 0.60~2.00m；(2)1 淤泥：全场分布，层厚 12.90~14.20m，(4)2 淤泥：全场分布；层厚 8.10~9.60m。具体描述详见工程地质勘察报告，各土层物理力学指标见表1。

表1 土层物理力学指标

地层名称	含水量	重度 (kN/m³)	粘聚力 (kpa)	内摩擦角 (度)
10 素填土		18.00	(5.0)	(15.0)
11 粘土	43.0%	16.80	22.0 (19.8)	10.3 (9.3)
21 淤泥	67.0%	16.50	10.7 (8.6)	7.5 (6.0)
22 淤泥	58.7%	16.50	11.0 (8.8)	7.3 (6.0)

作者简介：代立伺（1991.05—），男，汉族，江苏涟水人，本科学士学位，工程师，研究从事工程测量工作。

注 c、 Φ 值为勘察报告提供的直剪固快标准值，括号内为根据工程经验后的折减值。

勘察期间测得稳定水位在地表以下 0.30–1.50m（高程为 2.96–3.15m），地下水位年变化幅度约为 1.0–2.0 米^[1]。

（三）支护结构类型

本工程为一层地下室，基坑开挖深度 4.20–4.60m，围护结构采用拉森钢板桩 +H 型钢支撑的支护形式。

基坑围护材料采用 400X170 型号拉森钢板桩进行支护，钢板桩长度为 15.0m。桩位水平偏差 ~50mm 垂直度偏差不得大于桩长的 0.5%。钢结构构件均采用 Q235B 级钢，焊接采用 E43 型焊条^[2]。

本工程围檩和内支撑均采用单拼 400X400X13X21H 型钢。

本工程的基坑维护桩及围檩和内支撑的具体设置如图 1, 图 2 所示。

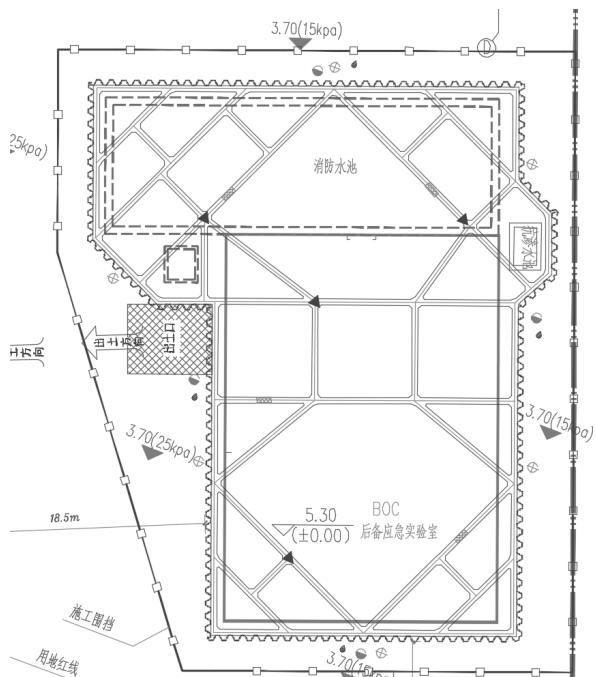


图 1 基坑维护桩及围檩和内支撑结构图

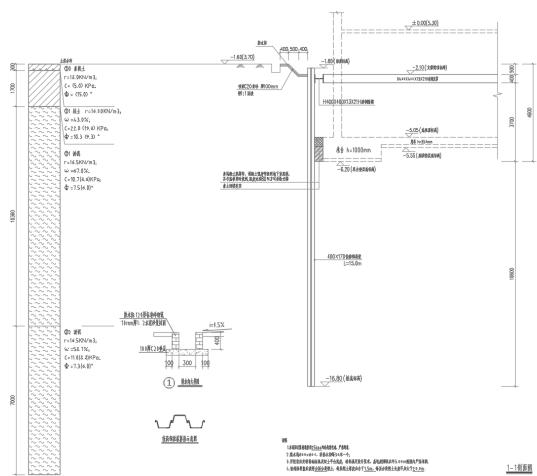


图 2 基坑维护桩及围檩和内支撑结构图

二、钢板桩支护结构变形机理分析

（一）变形影响因素

1. 土压力作用

主动土压力：开挖侧土体松弛，压力向桩体传递。

被动土压力：桩后土体抵抗变形的反力，受土质密实度影响大。

水压力：地下水位变化（降水）加剧压力波动^[3]。

2. 结构自身因素

桩体刚度 (EI)：钢板桩截面模量（如 U 型、Z 型）、材质强度 (Q235/Q345) 直接影响抗弯能力。

嵌固深度：嵌固不足易导致“踢脚”破坏，过深则经济性差。

支撑 / 锚固系统：支撑间距、预加轴力、锚杆长度等设计参数是否合理^[4]。

3. 外部荷载

施工荷载：机械振动、堆载超限。

邻近荷载：周边建筑物或交通动载传递应力。

（二）变形过程与规律

1. 侧向位移（挠曲变形）

表现形式：桩身向基坑内侧凸出，呈“鼓肚”状。

成因：土压力不平衡（主动土压力 > 支护抗力）；

桩体刚度不足或嵌固深度不够；

开挖卸荷导致土体应力释放^[5]。

2. 竖向沉降 / 隆起

基坑底部隆起：软土区因开挖卸荷引发塑性回弹。

桩顶沉降：支撑系统松动或锚固失效导致整体下沉。

3. 转动变形

表现形式：桩体绕底部或某支点旋转倾斜。

常见于：单锚式支护或悬臂式支护中锚固力不足时^[6]。

三、淤泥质地质钢板桩支护条件下变形特点研究

根据监测数据，结合基坑开挖、型钢支撑搭建 / 拆除及周边荷载变化（尤其是北侧荷载持续增加）等施工活动，以下为关键分析结论，如图 3 所示。

（一）周边地表沉降分析

1. 总体趋势：所有测点均呈现沉降，北侧 (DBC05) 沉降最显著。

2. DBC05 (北侧)：累计沉降达 122.3mm，与北侧荷载持续增加直接相关。

3. 突变点：支撑拆除后，各监测点均出现了沉降量突然增大的情况，需警惕支撑拆除后的土体回弹风险^[7]。

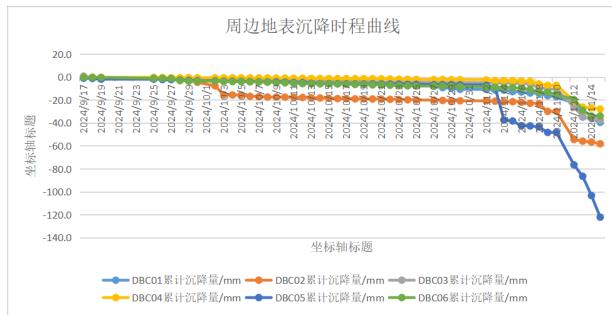


图3周边地表沉降数据时程曲线

（二）水平变形特点

- 所有监测点均向基坑内侧偏移；
- 在内侧钢支撑拆除后，各监测点均向基坑内侧方向出现较大位移量；
- 由于基坑北侧地表荷载持续增加，且该处荷载显著大于其它方位，因此，DBP05的累计位移量达70.1mm，也显著大于基坑的其它方向^[3]。

如图4所示

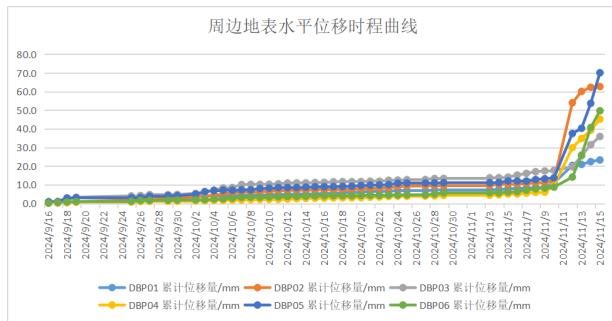


图4周边地表水平位移时程曲线

（三）立柱竖向变形特点

- 立柱4个监测点在立柱施工完成后，均出现了不同程度沉降；
- 随着基坑开挖的进行，立柱均出现不同程度的抬升现象，基坑立柱抬升顺序与开挖区域范围呈现关联现象；
- 基坑开挖完成，底板施作后，立柱各监测点沉降监测数据均出现缓慢下沉特点，并随底板成型时间的推移和其它结构的施工，立柱沉降趋于平稳状态，如图5所示。

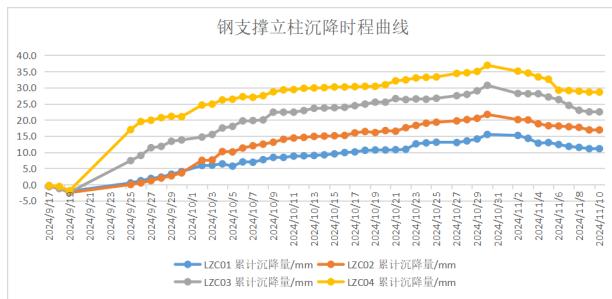


图5钢支撑立柱竖向位移时程曲线

（四）周边土体深层水平位移变形特点

1. 总体分析

所有测点都显示最大位移发生在中部深度（5–6米处），这是

淤泥地层的典型滑移面位置。0–5米浅层位移较小，验证了钢板桩顶部约束有效；15米以下基本无位移，验证了设计支护深度满足现场生产要求^[3]。

2. 分点分析特点

CX-1（西侧，时常受到机械荷载影响）

前期变化：随着基坑开挖，CX-1的累计位移逐渐增大，最大位移深度集中在5–6m（如5m深处累计位移达53.19mm），且增长速率较快。这与基坑西侧存在大型机械荷载，导致土体受到较大的侧向压力的现场工况相符。

中期变化：在基坑开挖到一定深度后，累计位移的增长速率有所放缓，但仍保持增长趋势（44–50mm）。这证明了随着开挖深度的增加，围护结构的支撑约束作用逐渐显现，对土体的侧向位移起到了一定的限制作用。

型钢支撑拆除后：型钢支撑拆除后（2024年11月10号后），CX-1的累计位移出现了较为明显的增长，11月12日：5m深处位移从49.89mm → 51.27mm (+1.38mm)。11月30日：5m深处达59.64mm（较拆除前增约20%）。深层位移加剧：15m以下位移增幅显著（如16m深处从1.68mm → 6.72mm），表明型钢支撑的拆除对基坑西侧的土体稳定性产生了较大影响，导致侧向位移显著增加。累计位移达63mm。在机械荷载叠加支撑拆除的双重效应叠加下，出现明显突变，从44mm跳到51mm，单日增量超7mm。与现场实际生产工况相符，如图6所示。

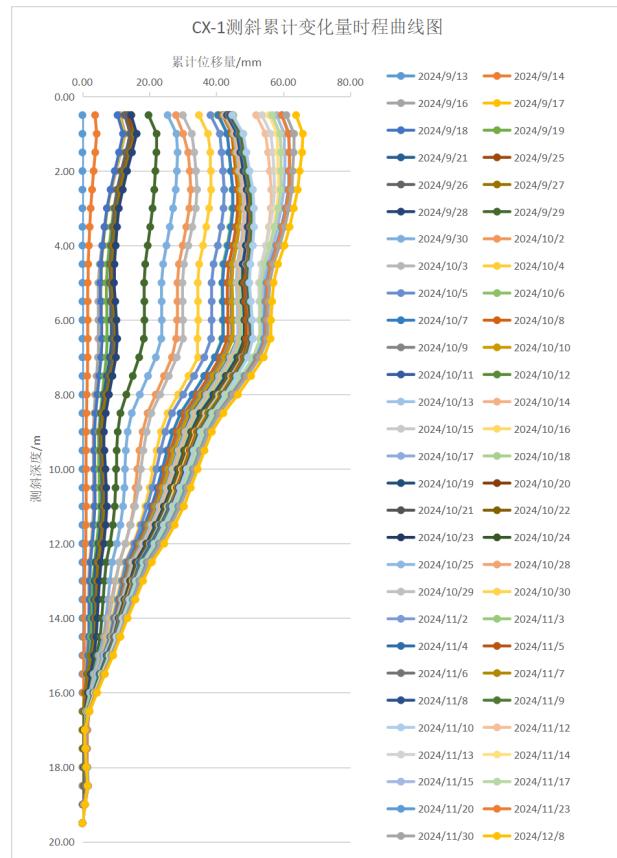


图6测斜累计变化量曲线

CX-2（南侧，有较小荷载影响）

前期变化：与CX-1类似，CX-2的累计位移也随着基坑开挖

逐渐增大，但增长速率相对较慢，最大位移深度3~4m（如3m深处累计位移45.68mm）。10月位移增速稳定（日均0.5~1mm）。这与南侧的地表荷载较小的实际工况相符。

中期变化：在基坑开挖过程中，CX-2的累计位移增长较为平稳，没有出现突增的情况。此变化证明了南侧围护结构能够有效地控制土体的侧向位移^[10]。

型钢支撑拆除后：型钢支撑拆除后，CX-2的累计位移也有所增长，但增长幅度相对较小，11月10日后位移小幅跳增（如4m深处48.6mm→50.36mm）。11月下旬趋稳（如4m深处维持52.76mm），反映南侧土体自稳定性较好。此现象与南侧地表荷载较小的施工工况相符，也证明了围护结构本身具有较好的稳定性，如图7所示。

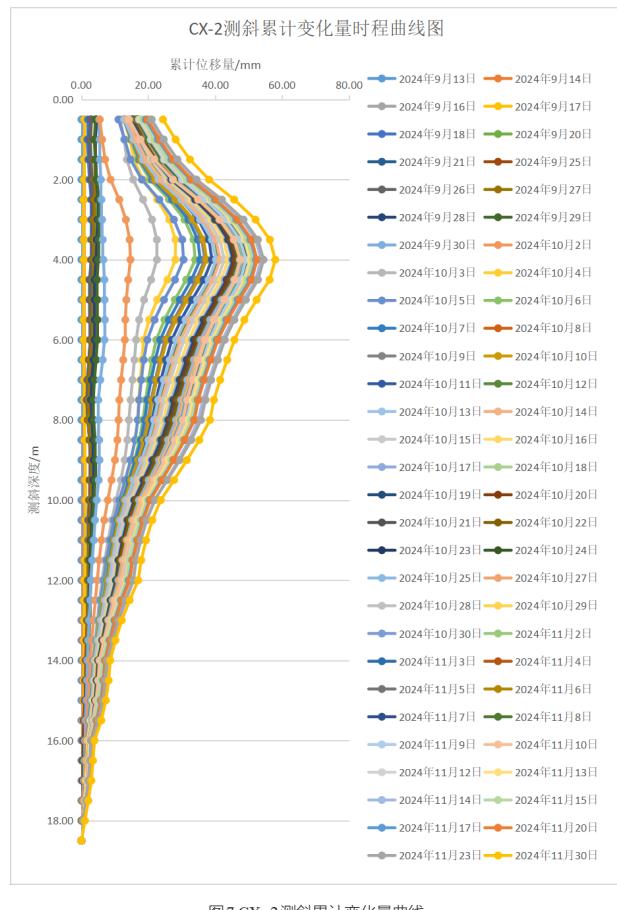


图7 CX-2测斜累计变化量曲线

CX-3（东侧，无荷载）

前期变化：由于基坑东侧无荷载，CX-3的累计位移在前期增长较为缓慢，甚至在某些时间段内出现负值（即向基坑内侧位移），这可能是由于测量误差或土体自然固结等原因造成的。

中期变化：随着基坑开挖的深入，CX-3的累计位移逐渐转为正值，并呈现缓慢增长的趋势。这可能是由于东侧围护结构在承受一定侧向压力后产生的位移。

型钢支撑拆除后：型钢支撑拆除对CX-3的累计位移影响较小，没有出现明显的增长，11月10日后位移无显著突变（如6m

深处：35.42mm→36.35mm），深层位移几乎无变化（如18m深处始终≤1.48mm）。这进一步证明了东侧无荷载条件下，围护结构本身具有较好的稳定性，与基坑东侧无周边地表荷载的工况相匹配，如图8所示。

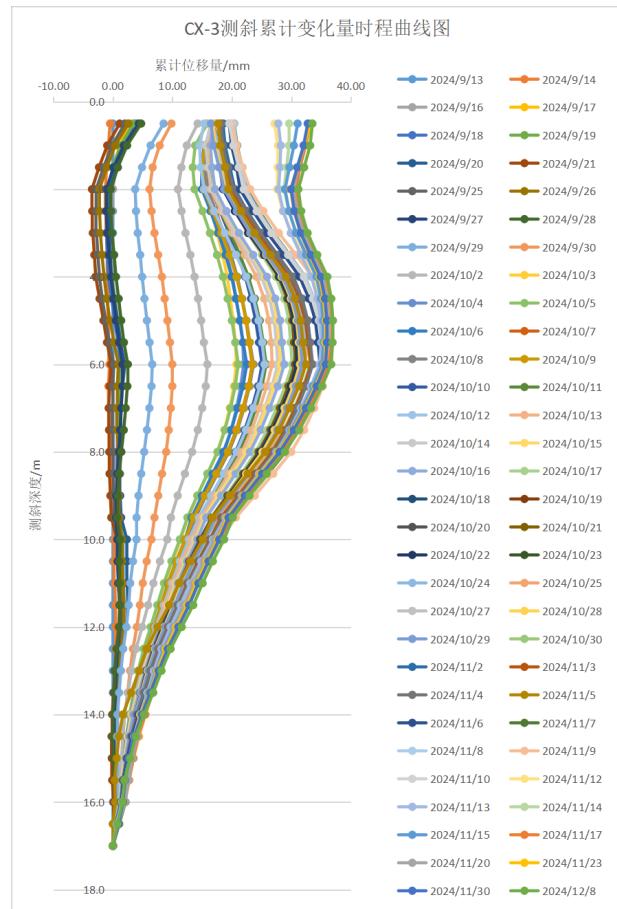


图8 CX-3测斜累计变化量曲线

CX-4（北侧，地表荷载持续增加）

前期变化：由于基坑北侧周边地表荷载一直不断增加，CX-4的累计位移在前期就呈现出较快的增长趋势。初始位移极大：9月13日0.5m深处已达52.82mm（远超其他点同期的0~5mm）。

持续快速增长：10月底0.5m深处达62.87mm，反映荷载叠加效应。

中期变化：随着基坑开挖的深入和北侧地表荷载的持续增加，CX-4的累计位移增长速率进一步加快。这表明北侧围护结构在承受较大侧向压力时，其控制土体位移的能力相对较弱。

型钢支撑拆除后：型钢支撑拆除后，CX-4的累计位移出现了显著的增长。11月10日：0.5m深处61.3mm→77.2mm（+15.9mm，单日增幅26%）。12月8日：145.56mm（较拆除前增长137%）。全深度位移失控：浅层（0.5m）和深层（17m）同步大幅位移，表明整体失稳。这可能是由于北侧地表荷载较大，且型钢支撑的拆除进一步削弱了围护结构的稳定性，导致土体侧向位移显著增加，如图9所示。

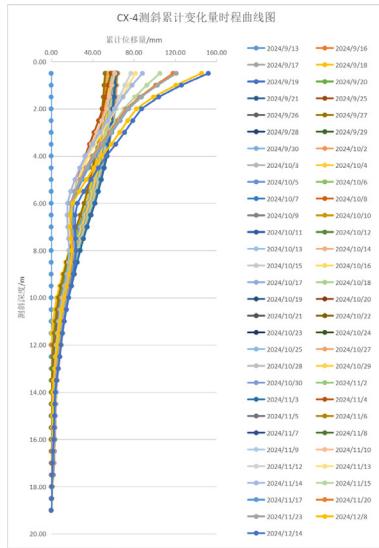


图9 CX-4测斜累计变化量曲线

四、钢板桩支护结构变形控制技术研究

(一) 支护结构设计优化

增加嵌固深度（通常 ≥ 1.2 倍开挖深度）。

采用多道支撑或斜锚减少跨中弯矩。

施工条件允许的情况下，可采用其他基坑围护结构。例如混凝土搅拌桩墙，SMW工法桩、混凝土板桩等，以增加围护桩墙的整体刚性。

(二) 施工工艺改进

分层分段开挖，避免一次性卸荷过大。

及时施作基坑底板，减少基底土体涌起幅度，增加钢板桩中部支撑强度，抵抗钢板桩中部的土压力，抑制基坑外土体位移，以增加围护桩墙的整体刚度。

(三) 变形控制措施

监测支撑轴力并及时复加预应力。

软土区采用注浆、搅拌桩改良被动区土体。

设置降水井或止水帷幕，降低孔隙水压力影响。

五、结论与展望

(一) 研究结论

基坑开挖施工：随着基坑开挖的深入，各测斜点的累计位移

均呈现出不同程度的增长趋势。其中，受荷载影响较大的测斜点（如 CX-1 和 CX-4）增长速率较快，而无荷载或荷载较小的测斜点（如 CX-3）增长速率较慢。

型钢支撑拆除后：型钢支撑的拆除对各测斜点的累计位移均产生了一定影响，其中受荷载影响较大的测斜点（如 CX-1 和 CX-4）影响更为显著，出现了较为明显的位移增长。这表明型钢支撑在维持基坑稳定性方面起到了重要作用。

拉森钢板桩在开挖面深度范围内的测斜数据均出现了不同程度的“鼓肚子”现场，说明钢板桩的自身的刚度在该地质条件下相对较弱。

最后补充三个技术细节：

1. 所有点在支撑拆除后都出现位移速率变化，证明拆除作业本身就是扰动源

2. 淤泥地层表现出典型的时间效应，即使施工结束仍持续蠕变

3. 位移曲线形态反映钢板桩 + 支撑体系对浅层约束较好，但未能完全控制深层滑移

(二) 研究不足

本次研究的特殊地质条件下支护结构的变形特点也存在诸多不足方面，主要体现在以下几个方面。

1. 基坑面积较小，难以与大型基坑做相应对比，研究范围代表性较小；

2. 基坑监测点布设较晚，基坑开挖前监测数据较少；且现场施工干扰大，基坑钢支撑拆除后，基坑未能完全回填前的监测工作开展困难，监测数据相对较少，难以完全反应全面、完整的基坑施工过程的各监测项的变化情况；

3. 基坑监测中缺少钢支撑轴力方面的监测数据，无法反映基坑各施工阶段型钢支撑的轴力变化情况，确实相应数据指导现场施工安排和调整。

(三) 后期研究展望

对于类似地质条件的基坑工程支护结构的变形研究，能有更大更深的基坑监测数据用于研究分析；应尽可能从基坑施工前期阶段介入监测工作，以掌握基坑施工支护结构的全过程监测情况，全面分析支护结构的变形特点；加强施工协调共组，尽可能减少施工对监测过程的干扰，采用合理监测方式，确保监测数据准确；同时应采集更为全面的监测数据，尤其是钢支撑轴力监测方面数据，能够更全面的分析施工各环节支撑结构的受力情况，更好的分析成因，指导施工，确保支护结构应用得当，施工过程安全。

参考文献

- [1] 郝增明, 闫楠, 白晓宇, 张立, 张启军, 林西伟. 杂填土地层深基坑微型桩 - 锚 - 撑组合支护体系受力特性原位试验 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024(02): 755-77.
- [2] 史宏博, 聂棒, 王安明, 陈泰霖, 康文献, 费应春. 地层厚度非均匀性对基坑支护结构稳定性的影响研究 [J]. 建筑结构, 2023(S2): 2608-2615.
- [3] 鲁海涛, 刘世安, 刘雪颖. 特深基坑排桩支护连续破坏受力有限元数值模拟研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2023(06): 8-10.
- [4] 赵成江, 张世径, 玄超群, 于凯同, 程磊. 锚索布置对长短双排桩的受力影响分析研究 [J]. 建筑结构, 2022(S1): 2819-2825.
- [5] 吕松梅, 夏敏, 任光明, 范荣全, 梁永闪. 富水砂卵石层地区桩锚支护深基坑变形特性 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022(03): 347-357.
- [6] 曹程明, 时铁磊, 龙熙, 叶帅华, 王宁. 桩锚支护上土下岩地层深基坑沉降与变形分析 [J]. 科学技术与工程, 2022(10): 4120-4126.
- [7] 余建民, 冯翠红, 闫银刚. 止水型复合土钉墙支护的研究与应用 [J]. 建筑技术, 2009(02): 132-135.
- [8] 李象范, 徐水根. 复合型土钉挡墙的研究 [J]. 上海地质, 1999(03): 1-11.
- [9] 孙林娜, 徐福宾. 水泥土墙复合土钉墙的协同作用机理数值模拟 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020(03): 314-322.
- [10] 胡敏云, 欧阳维杰, 陈乾浩, 肖斌, 徐晓兵. 复合土钉墙工作特性的细观数值模拟研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2021(04): 442-448.