

软土超深圆形基坑开挖卸载土体回弹变形性状研究

成 龙

上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2023年3月26日; 录用日期: 2023年4月22日; 发布日期: 2023年4月29日

摘 要

本文通过上海苏州河段深层排水调蓄管道系统工程云岭超深圆形竖井基坑施工过程中, 基坑土方卸载施工引起坑内各土层回弹隆起变形, 基于大量详实的测试数据, 系统总结了深基坑开挖卸载全程土体的回弹变形规律及相关影响因素, 为后续软土地区超深基坑工程设计参数的选取与优化提供了相关借鉴与参考。

关键词

软土地层, 超深基坑, 开挖卸载, 土体回弹

Study on the Springback Deformation Behavior of the Soft Soil during Excavation of the Ultra-Deep Circular Foundation Pit

Long Cheng

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

Received: Mar. 26th, 2023; accepted: Apr. 22nd, 2023; published: Apr. 29th, 2023

Abstract

In this paper, based on the detailed and accurate testing data of springback and uplifting of the soil layers caused by unloading construction during the excavation of Yunling ultra-deep circular shaft foundation pit in the project of the deep drainage and storage pipeline system of Suzhou River in

Shanghai, the law of the soil rebound deformation and related influencing factors during the whole process of deep foundation pit excavation and unloading are summarized as references for the selection and optimization of design parameters of super deep foundation pit in soft soil area.

Keywords

The Soft Soil Layer, Super Deep Foundation Pit, The Excavation Unloading, The Springback of Soil

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 全国各地深层地下空间的开发利用越来越普遍, 深层地下空间开发项目如雨后春笋般不断涌现, 深大基坑以及超深基坑工程层出不穷。以目前国内项目为例, 国家大剧院项目基坑最大挖深约 33 m; 润扬长江大桥北锚碇深基坑近 48 m。上海软土地区, 上海国际金融中心项目基坑最大挖深约 28 m [1], 上海中心大厦塔楼基坑普遍挖深约 31 m [2], 上海轨道交通 13 号线淮海中路站基坑挖深 33 m [3], 上海张江硬 X 射线项目基坑开挖更是超 40 m 深度[4]。

超深基坑工程施工带来的土建施工风险不断加大, 深基坑开挖过程中土体回弹量的大小直接关系到基坑支护结构的稳定性及对周边环境沉降变形的影响程度, 通过坑内土体回弹监测准确掌握基坑开挖卸载引起土体回弹量的大小, 进而合理控制后续基坑分层分块及开挖卸载速率等开挖施工参数, 对控制地下土建工程施工风险大有裨益。目前国内诸多专家学者针对基坑工程开挖卸载土体回弹进行了相关研究, 例如: 李德宁[5]将土体回弹实测值与不同方法计算结果进行比较, 发现不同方法计算结果相差较大; 陆善佳[6]基于现行一些基底土回弹变形计算方法, 结合实际工程案例得出自重应力抵消法与土体回弹实测数据更为接近等研究工作。

超深基坑工程土方开挖卸载后, 坑内土体回弹量的大小对基坑土方开挖方案的调整与动态控制十分重要, 直接影响基坑支护结构的稳定性与深基坑的安全。但由于工程地质条件及岩土参数的不确定性, 设计计算条件的模糊性与边界条件的局限性, 致使基坑工程的设计理论计算与实测成果存在一定的差异 [7]。为了探明及掌握深基坑开挖过程中坑内土层的回弹隆起情况, 为后续软土地区深基坑工程设计参数优化提供必要的经验数据, 本文在对软土地区深基坑卸载过程坑内土体回弹测试实践的基础上, 分析深基坑开挖卸载全程坑内土体回弹变形规律及相关影响因素, 为后续类似深基坑实践提供了相关工程经验。

2. 工程概况

2.1. 工程简况

苏州河段深层排水调蓄管道系统工程云岭设施总用地面积 4800 m², 总建筑面积 556.0 m²; 云岭综合设施土建部分包括竖井与综合设施, 共分 4 个分区先后施工, 1 区竖井基坑整体呈圆形, 基坑面积约 908 m², 直径 34 m, 采用 105 m 深的地下连续墙作为围护; 2 区综合设施基坑呈长方形, 基坑面积约 2120 m²; 3 区综合设施基坑面积约 168 m²; 4 区综合设施包围 1 区竖井, 基坑面积约 1390 m², 基坑平面与回弹测点平面布置见图 1。

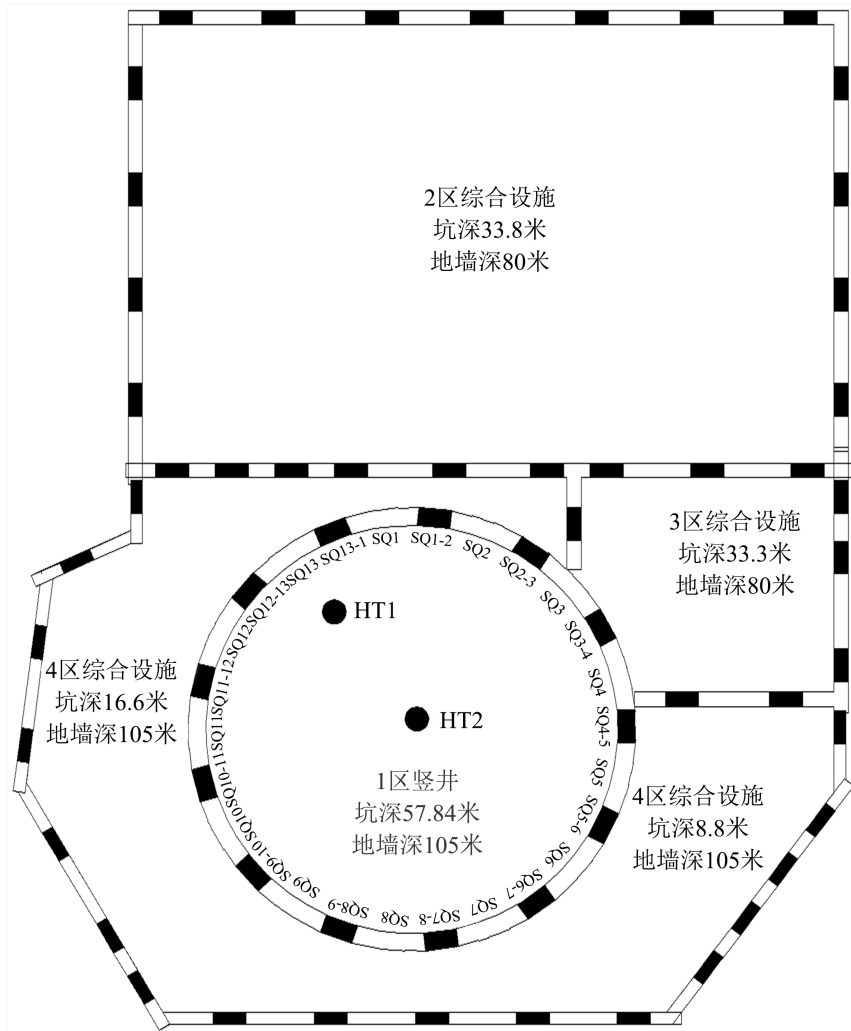


Figure 1. Foundation pit and springback layout of measuring points
图 1. 基坑平面与回弹测点平面布置图

2.2. 围护设计

云岭 I 区竖井基坑开挖深度 57.84 m，采用地下连续墙围护，地墙采用铰接头，墙深 105 m，墙厚 1500 mm，明挖逆作法施工，分 15 层土方进行开挖，逆作内衬墙作为支撑。竖井外侧设 1000 mm 和 1200 mm 防渗墙，墙深均为 105 m，外侧防渗墙与附属设施围护结合设置，其中 1 区竖井围护结构剖面与回弹测点剖面见图 2。

3. 测试方法原理

土体回弹监测采用钻孔法布设分层沉降管与分层沉降磁环，根据分层沉降磁环的设计布设位置，下套管前按设计深度将各磁环套在分层沉降管外，并设置相应的定位装置。逐节向孔内下入套管时，将套管徐徐下放，管与管的连接采用螺钉定位，下管时要平稳放入，然后加压使磁环脚外伸，插入孔壁土体中固定。下压套管至设计深度，并固定孔内 PVC 管，密实回填泥球或膨润土将磁环和土层粘结固定。待分层沉降磁环埋设经历一定的稳定期后，按照地面起算高程，实测并记录各分层沉降磁环所处剖面深度的高程，分层沉降磁环位置以绝对高程表示，计算公式如下：

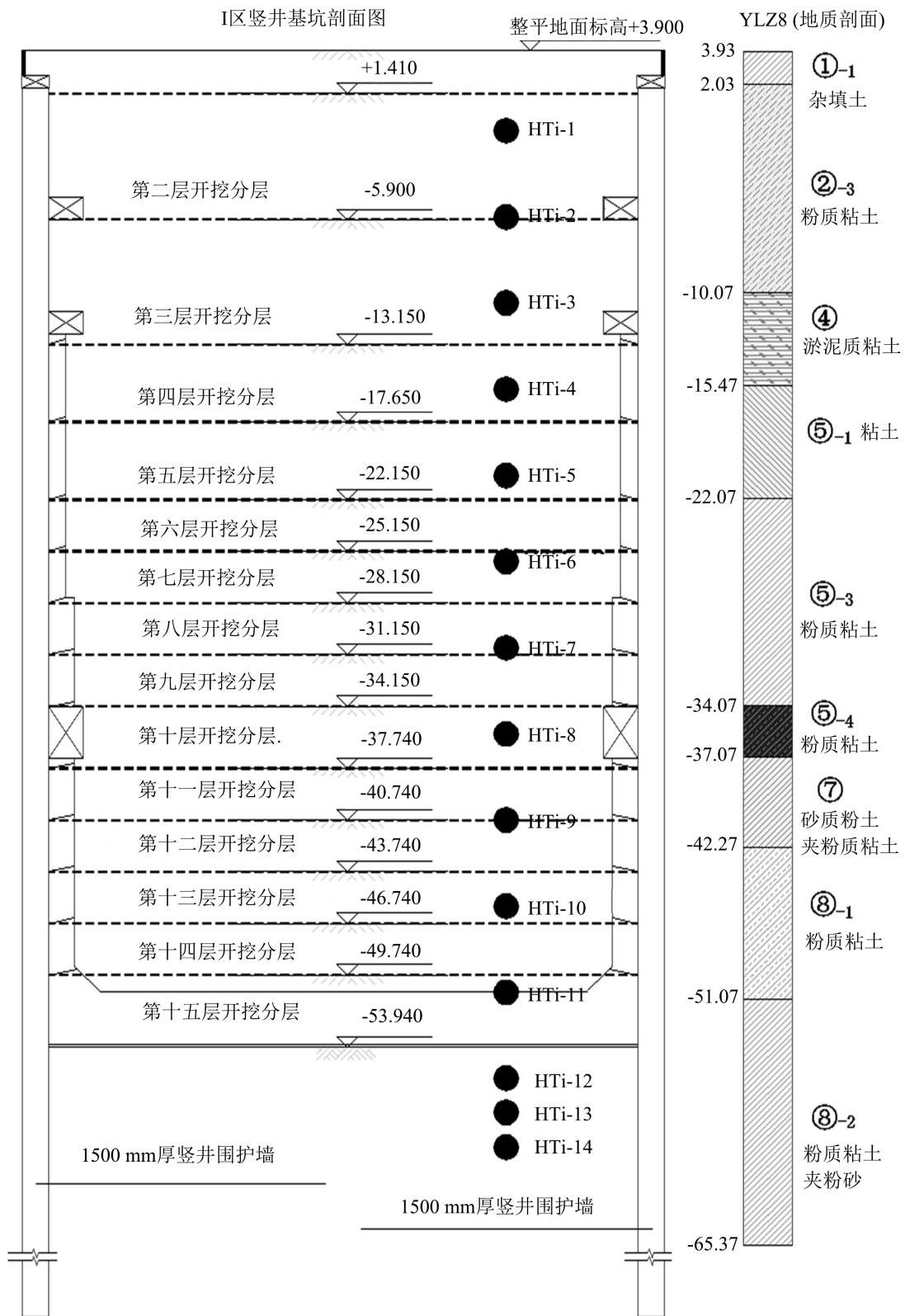


Figure 2. District 1 shaft palisade structure profile and rebound measuring point section
 图 2. 1 区竖井围护结构剖面与回弹测点剖面图

$$Dc = Hc - hc$$

式中, Dc 为分层沉降磁环的绝对高程, m; Hc 为分层沉降管管口绝对高程, m; hc 为分层沉降磁环距分层沉降管管口的距离, m。

根据上式可以分别计算出磁环前后两次位置变化, 即本次竖向位移量和累计竖向位移量。

4. 测试工作布置

在本工程开挖深度最深的 1 区竖井内布置 2 组坑内土体回弹监测点, 其中一组土体回弹测点 HT1 布设于离圆形竖井围护边线约 3 m 处, 另一组土体回弹测点 HT2 布设于圆形竖井基坑中部圆心部位, 测点布设平面位置如图 1 所示。

每组坑内土体回弹监测点剖面方向, 在坑底以上从地表以下起每隔约 5 m 埋设一个沉降磁环测点, 坑底以上布设 11 个分层沉降磁环, 坑底以下每隔 2 m 设置一个沉降磁环测点, 坑底以下布设 3 个分层沉降磁环, 每组测点共计布设 14 个分层沉降磁环, 坑内土体回弹监测孔设置深度约 65 m, 回弹测点布设剖面位置如图 2 所示, 回弹监测孔各深度处磁环测点绝对标高信息如表 1 所示。

Table 1. Pit soil rebound measuring point embedding depth information table

表 1. 坑内土体回弹测点埋设深度信息表

测点编号	绝对标高(m)	测点编号	绝对标高(m)
HTi-1	-1.1	HTi-8	-36.0
HTi-2	-6.0	HTi-9	-42.1
HTi-3	-11.0	HTi-10	-45.9
HTi-4	-15.9	HTi-11	-50.9
HTi-5	-20.7	HTi-12	-56.0
HTi-6	-26.1	HTi-13	-58.0
HTi-7	-31.4	HTi-14	-60.0

5. 实测数据分析

1 区竖井基坑共分为 15 层土方开挖, 在各层土方开挖完成后, 对开挖面以下各土体回弹监测点进行实测实量, 各阶段坑内土体回弹数据与土体回弹曲线如下。

通过不同开挖深度 1 区竖井底部土体的隆起测量结果分析, 随着开挖深度的增大, 坑底土体的隆起值呈现不断发展的趋势, 坑底土体隆起在深度方向近似呈线性分布, 且随着深度的增大, 土体累计隆起值逐渐减小(图 3 和图 4)。在基坑开挖深度 10 m 左右出现的土体隆起值回落现象, 主要与春节期间坑内持续的疏干降水及节假日长时间停工引起土体固结沉降回落有关。

坑内土体回弹呈现出上部临近开挖面附近的土体回弹量大于深部土体, 且基坑中部土体回弹量大于基坑边土体回弹量的规律(图 5 和图 6)。同时随着开挖深度的加深及分层开挖厚度的减小, 同一深度的土体回弹整体呈放缓的趋势(32 m 以上)。在第九层至第十二层土方开挖期间, 深层土体回弹有一定的增大趋势, 主要与第⑦层与第⑧层等深部土体回弹模量相对较大因素密切相关, 地质勘察报告相关参数显示, 第⑦层与第⑧层土的回弹模量在 35 MPa 至 45 MPa 之间, 而浅层的第④层与第⑤层土回弹模量在 10 MPa 左右。

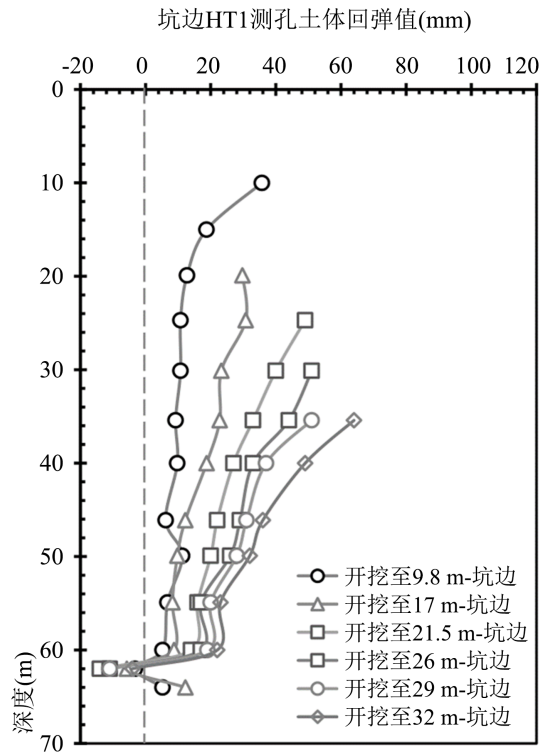


Figure 3. Pit soil rebound HT1 point curve-The seventh excavation layers above
图 3. 坑内土体回弹 HT1 测点曲线 - 第七开挖分层以上

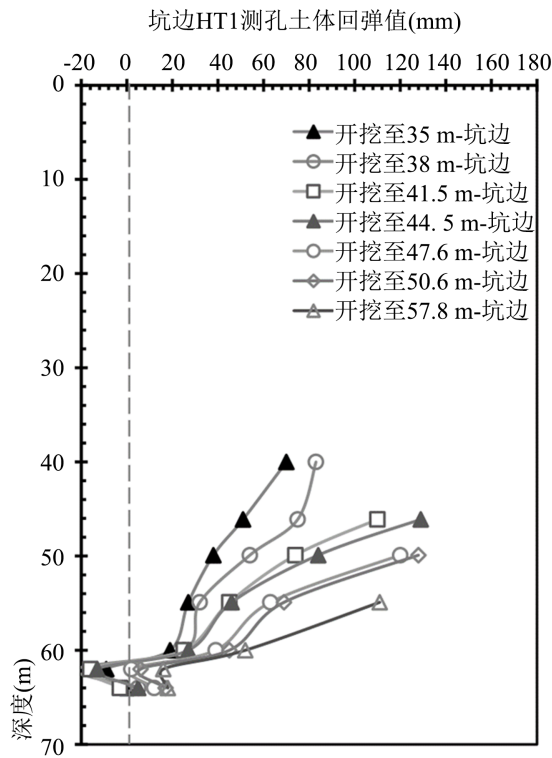


Figure 4. Pit soil rebound HT1 point curve-The seventh excavation under stratified
图 4. 坑内土体回弹 HT1 测点曲线 - 第七开挖分层以下

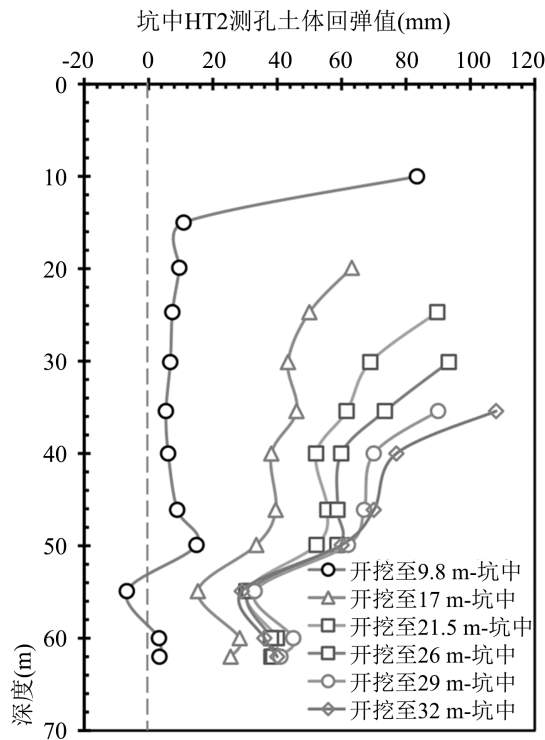


Figure 5. Pit soil rebound HT2 point curve-The seventh excavation layers above
图 5. 坑内土体回弹 HT2 测点曲线 - 第七开挖分层以上

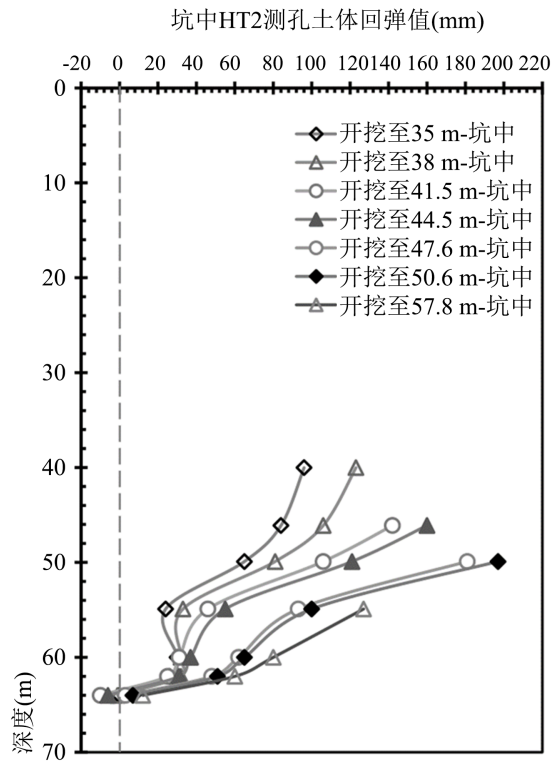


Figure 6. Pit soil rebound HT2 point curve-The seventh excavation under stratified
图 6. 坑内土体回弹 HT2 测点曲线 - 第七开挖分层以下

由于地连墙对抗边土体约束作用，整体上竖井中心测孔 HT2 各深度处的回弹值明显大于围护坑边 HT1 各深度处的回弹值。在竖井基坑开挖至 32 m 深度，对应第七层开挖分层时，靠近围护结构的边孔 HT1 在 35 m 深度处的土体回弹值为 64 mm，回弹数据见表 2；而基坑中心部位测孔 HT2 的土体回弹值为 108 mm，回弹数据见表 3，土体回弹量有一定的差异。

Table 2. Pit springback HT1 point data of soil -The seventh excavation layers above
表 2. 坑内土体回弹 HT1 测点回弹数据 - 第七开挖分层以上

测点 编号	第二层开挖 土体回弹量/mm	第三层开挖 土体回弹量/mm	第四层开挖 土体回弹量/mm	第五层开挖 土体回弹量/mm	第六层开挖 土体回弹量/mm	第七层开挖 土体回弹量/mm
HT1-1	36					
HT1-2	19					
HT1-3	13					
HT1-4	11	30				
HT1-5	11	31	49			
HT1-6	9	23	40	51		
HT1-7	10	23	33	44	51	64
HT1-8	6	19	27	33	37	49
HT1-9	11	12	22	29	31	36
HT1-10	7	10	20	26	28	32
HT1-11	5	8	16	17	20	23
HT1-12	-3	9	14	17	19	22
HT1-13	5	-6	-14	-11	-11	-4

Table 3. Pit springback HT2 point data of soil -The seventh excavation layers above
表 3. 坑内土体回弹 HT2 测点回弹数据 - 第七开挖分层以上

测点 编号	第二层开挖 土体回弹量/mm	第三层开挖 土体回弹量/mm	第四层开挖 土体回弹量/mm	第五层开挖 土体回弹量/mm	第六层开挖 土体回弹量/mm	第七层开挖 土体回弹量/mm
HT2-1	83					
HT2-2	11					
HT2-3	10					
HT2-4	7	63				
HT2-5	7	50	90			
HT2-6	5	43	69	93		
HT2-7	6	46	62	73	90	108
HT2-8	9	38	52	60	70	77
HT2-9	15	40	56	59	67	70
HT2-10	-7	34	52	59	62	60
HT2-11	3	15	30	31	33	29
HT2-12	3	28	40	38	45	36
HT2-13		26	38	39	41	40

对于竖井中心回弹测点 HT2 来讲, 不同深度土体回弹随开挖深度的发展趋势出现了明显的不同, 比如 30 m 处的土体回弹值一致保持较大的发展速率, 而 35 m~45 m 处的土体回弹值在开挖深度大于 26 m 时出现了快速发展, 深度大于 45 m 处的土体回弹值仍保持着较小的速率, 见表 4 与表 5, 这与土体卸荷对回弹影响深度有关, 即土体的卸荷只能引起开挖面以下一定深度范围的土体发生较大回弹。但是这个规律在围护边回弹测点 HT1 中却不明显, 不同深度的回弹值随开挖深度的发展趋势近似平行, 这与基坑围护对抗边土的侧摩阻力影响相关。

Table 4. Pit springback HT1 point data of soil -The seventh excavation under stratified
表 4. 坑内土体回弹 HT1 测点回弹数据 - 第七开挖分层以下

测点 编号	第八层 开挖土体 回弹量/mm	第九层 开挖土体 回弹量/mm	第十层 开挖土体 回弹量/mm	第十一层 开挖土体 回弹量/mm	第十二层 开挖土体 回弹量/mm	第十三层 开挖土体 回弹量/mm	第十四与十五层 开挖土体 回弹量/mm
HT1-8	70	83					
HT1-9	51	75	110	128			
HT1-10	38	54	74	84	120	129	
HT1-11	27	32	45	46	63	69	111
HT1-12	19	25	25	27	39	45	52
HT1-13	-9	-22	-16	-13	2	6	16
HT1-14	0	5	-3	5	12	17	18

Table 5. Pit springback HT2 point data of soil -The seventh excavation under stratified
表 5. 坑内土体回弹 HT2 测点回弹数据 - 第七开挖分层以下

测点 编号	第八层 开挖土体 回弹量/mm	第九层 开挖土体 回弹量/mm	第十层 开挖土体 回弹量/mm	第十一层 开挖土体 回弹量/mm	第十二层 开挖土体 回弹量/mm	第十三层 开挖土体 回弹量/mm	第十四与十五层 开挖土体 回弹量/mm
HT2-8	96	123					
HT2-9	84	106	142	160			
HT2-10	65	81	106	121	181	197	
HT2-11	24	33	46	55	93	100	127
HT2-12	30	32	31	37	62	65	80
HT2-13	26	32	25	31	48	51	60
HT2-14	0	-1	-10	-6	3	7	12

6. 结语

通过本超深基坑工程开挖卸土过程中坑内土体回弹监测实践与数据分析工作, 可以得出以下结论:

1) 上海软土地区开挖深度近 60 m 的直径 34 m 圆形深基坑, 在开挖过程中, 开挖面以下土体最大回弹量, 在基坑围护结构边达 129 mm, 最大回弹量约为基坑开挖深度的 2.6%, 在基坑中部达 197 mm, 最大回弹量约为基坑开挖深度的 4%, 基坑中部各深度土体回弹量明显大于基坑边各深度土体回弹量, 基坑围护与基坑边土体间的侧摩阻力作用对基坑边的土体回弹有一定的牵制抑制作用。

2) 软土地层深基坑开挖卸载, 坑底土体累计回弹量随着深度增大而逐渐减小, 呈一定的线性相关。临近基坑开挖面附近土体的回弹增量要大于深部土体的回弹增量, 基坑开挖卸载引起土体回弹的深度效应明显, 即土体的卸荷只能引起开挖面以下一定深度范围的土体发生较大回弹现象。

3) 在基坑各分层土方开挖过程中, 同步进行坑内疏干降水及承压降水施工, 坑内土体回弹量的大小是土方卸载引起坑底土体应力释放致使土体回弹变形及降水施工引起土体固结沉降共同作用的结果, 与基坑开挖及基坑降水施工参数密切相关。

参考文献

- [1] 刘波. 上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 10(40): 1950-1958.
- [2] 谢小林, 翟杰群, 张羽, 等. “上海中心”裙房深大基坑逆作开挖设计及实践[J]. 岩土工程学报, 2012, 11(34): 744-749.
- [3] 陈祺. 复杂环境下超深套铣地下连续墙施工风险监督管理[J]. 山西建筑, 2018, 5(44): 247-248.
- [4] 路鹏. 超深基坑施工支护结构受力变形实测分析[J]. 工程勘察, 2020(7): 12-17.
- [5] 李德宁. 上海环球金融中心塔楼基坑回弹变形研究[J]. 中国水运, 2016, 3(16): 338-340.
- [6] 陆善佳, 陈祥侨, 王伟, 等. 软土地区深基坑回弹变形分析[J]. 土工基础, 2022, 8(36): 571-575.
- [7] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.