

复杂工况下超大型人工堆山与邻近工程施工时序耦合影响研究

颜超¹, 吴康², 李长颖²

¹上海建工集团股份有限公司, 上海

²上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2026年9月14日; 录用日期: 2026年10月7日; 发布日期: 2026年10月13日

摘要

为研究人工堆山及不同施工顺序对邻近基坑变形的影响, 采用MIDAS GTS NX建立堆山-基坑三维有限元模型, 设置仅开挖基坑、基坑-堆山同步施工、先开挖后堆山和先堆山后开挖四种工况, 对靠山侧地表沉降、两侧拉森钢板桩侧向位移及坑底隆起进行对比分析。结果表明: 堆山显著增大靠山侧地表沉降和钢板桩侧向位移, 同步施工和先开挖后堆山工况的不均匀沉降更为突出; 远山侧位移因距离衰减及基坑开挖对浅层传递路径的削弱而明显小于靠山侧; 四种工况的最终坑底隆起量较为接近, 施工顺序主要改变变形的发展过程和增长速率。研究结果表明, 不同工序对应的主要变形控制指标不同, 工程评价应综合考虑沉降量、沉降差、两侧围护结构位移及坑底隆起。

关键词

人工堆山, 基坑开挖, 施工顺序, 地表沉降, 侧向位移, 坑底隆起

Coupled Effects of Construction Sequence between a Super-Large-Scale Artificial Hill and Adjacent Engineering Works under Complex Construction Conditions

Chao Yan¹, Kang Wu², Changying Li²

¹Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai

²School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 14, 2026; accepted: October 7, 2026; published: October 13, 2026

文章引用: 颜超, 吴康, 李长颖. 复杂工况下超大型人工堆山与邻近工程施工时序耦合影响研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(10): 51-61. DOI: 10.12677/mos.2026.1510144

Abstract

To investigate the effects of artificial hill piling and construction sequence on the deformation of an adjacent foundation pit, a three-dimensional finite element model was established using MIDAS GTS NX. Four cases were considered: foundation-pit excavation only, simultaneous excavation and hill piling, excavation followed by hill piling, and hill piling followed by excavation. Ground settlement on the hill side, lateral displacement of the sheet-pile walls on both sides, and basal heave were compared. The results show that hill piling markedly increases hill-side settlement and lateral displacement, while simultaneous construction and excavation followed by piling produce more evident differential settlement. The far-side response is smaller because of distance attenuation and the weakening of the shallow transfer path caused by excavation. The final basal heave is similar among the four cases, although the construction sequence changes its development process and growth rate. The results indicate that the principal deformation control indicators vary with the construction sequence. A comprehensive assessment should therefore consider settlement, differential settlement, wall displacement on both sides, and basal heave.

Keywords

Artificial Hill Piling, Foundation-Pit Excavation, Construction Sequence, Ground Settlement, Lateral Displacement, Basal Heave

Copyright © 2026 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

随着城市建设用地日趋紧张,深基坑开挖、地表堆载与地下空间开发相邻实施的工程情形逐渐增多。基坑开挖会引起围护结构侧移、坑外地表沉降和坑底回弹,早期经典研究已对其基本变形规律和预测方法进行了系统总结[1]-[3]。地表沉降槽形态、围护墙挠曲模式及二者之间的关系受土体性质、开挖深度、支护刚度和施工过程等因素共同影响[4][5]。在软土地区,土体刚度、基底稳定性及围护体系变形控制对最终响应尤为重要[6]-[8]。当人工堆山或其他大面积堆载位于基坑一侧时,堆载产生的附加竖向应力和侧向挤压作用会与基坑开挖卸荷效应叠加,使围护结构及周边土体呈现明显的非对称变形。特别是在堆山荷载较大、坡脚距基坑较近或软弱土层较厚的条件下,靠堆载侧的地表沉降和围护结构位移可能进一步增大[9][10]。

基于大量工程案例的统计研究表明,基坑围护结构和周边地表变形具有较为明确的统计分布规律,但不同地层和支护条件下仍存在较大离散性[11]。三维分析进一步揭示了基坑角部、长边中部及不同开挖侧之间的空间效应[12][13];邻近建(构)筑物和桩基础的响应则与开挖引起的土体侧向位移密切相关[14]-[16]。针对邻近堆载问题,已有研究表明堆载位置、作用范围和荷载水平会显著影响地表沉降及围护结构变形[9][10]。相邻基坑离心模型试验及邻近开挖研究还表明,施工先后关系会改变土体初始应力状态、荷载传递路径和变形累积过程[17][18]。例如,先堆山后开挖时,基坑开挖作用于已经受压并发生侧向挤压的土体;先开挖后堆山时,新增堆载则作用于已经卸荷和变形的围护-土体体系。因此,即使最终几何尺寸和荷载水平相同,不同施工顺序仍可能形成不同的变形发展速率、峰值及空间分布。

需要说明的是,原项目实际建设条件中基坑并未布置在人工堆山邻近区域。本文并非对原项目实际

基坑位置及现场变形的复现，而是以原项目的工程地质条件、人工堆山规模 and 材料参数为基础，构建“堆山影响区内后续地下空间开发”的典型近接情景，开展项目成果的拓展性和前瞻性风险研究。采用 MIDAS GTS NX 设置仅开挖基坑、基坑与堆山同步施工、先开挖后堆山以及先堆山后开挖四种工况，通过对比靠山侧地表沉降、基坑两侧围护结构侧向位移及坑底隆起的发展过程，识别不同施工顺序下的主要控制指标。相关监测项目和评价思路参考现行基坑支护与监测标准[19][20]。研究结论主要用于揭示堆载 - 开挖耦合作用机制、筛选潜在不利工况，并为类似人工堆山周边后续建设活动的风险预判提供参考。

2. 数值模型与工况设计

2.1. 模型几何尺寸

采用 MIDAS GTS NX 建立人工堆山 - 基坑三维有限元模型，模型主要由分层地基、人工堆山、基坑及围护结构组成，其整体布置如图 1 所示。基坑平面尺寸为 $74\text{ m} \times 74\text{ m}$ ，开挖深度为 3.8 m ；人工堆山位于基坑左侧，堆山最大高度为 42 m ，占地范围约为 $300\text{ m} \times 170\text{ m}$ 。基坑围护采用拉森钢板桩，长度为 15 m 。堆山坡脚与基坑边缘的最小水平距离为 17 m 。为减小模型边界对基坑和堆山变形计算结果的影响，模型整体尺寸取为 $550\text{ m} \times 350\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。

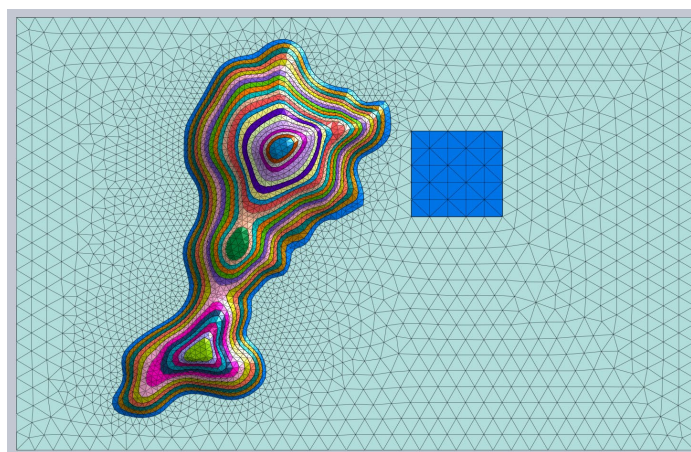


Figure 1. Relative positions of the artificial hill and foundation pit and the finite element model

图 1. 堆山与基坑相对位置及有限元模型

2.2. 网格划分与边界条件

模型土体及人工堆山采用三维实体单元进行离散。考虑到基坑开挖和堆山施工引起的变形主要集中在基坑周边及堆山坡脚附近，对上述区域进行局部网格加密，远离研究区域后逐渐增大单元尺寸，以兼顾计算精度和计算效率。模型网格划分如图 1 所示，共划分 94,845 个单元和 18,349 个节点。

模型底面约束三个方向的位移，四周侧面约束其法向水平位移，模型顶面设置为自由边界。计算初始阶段首先施加土体自重并建立初始地应力场，在初始位移清零后，再按照不同施工顺序激活或钝化相应单元，以模拟基坑开挖与人工堆山施工过程。

2.3. 材料模型及计算参数

土体采用摩尔 - 库仑(Mohr-Coulomb)模型描述其应力 - 应变关系，人工堆山填筑材料同样采用摩尔 - 库仑模型模拟。计算所需参数主要包括天然重度、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等。根据工程

地质条件，土体共划分为 8 层，各土层及人工堆山填筑材料的厚度和物理力学参数均由项目地质勘察报告确定，具体取值见表 1。围护结构采用板单元模拟，钢板桩材料按线弹性本构模型考虑。

Table 1. Physical and mechanical parameters of model materials
表 1. 模型材料物理力学参数

编号	材料名称	层厚/m	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
①	素填土	3	12.0	0.35	18.5	8.0	15.0
②	低液限黏土(CL)	2	22.5	0.32	19.2	25.0	18.0
③	淤泥质黏土	8	8.5	0.38	17.5	12.0	10.0
④	粉砂夹粉土	6	36.0	0.30	19.0	5.0	28.0
⑤	低液限黏土(CL)	5	31.5	0.30	19.5	35.0	20.0
⑥	粉细砂	4	60.0	0.28	19.8	2.0	32.0
⑦	密实低液限黏土(CL)	12	55.0	0.28	20.0	45.0	22.0
⑧	密实低液限黏土(CL)	10	65	0.28	21	40	22
—	堆山填筑材料		20.0	0.30	26.0	21.5	28.0
—	钢板桩		208 000	0.30	78.0	—	—

注：“—”表示该参数不适用于相应材料。

2.4. 施工工况设计

为分析人工堆山及其施工顺序对邻近基坑变形的影响，在保持模型尺寸、土体参数、基坑开挖深度和堆山最终规模不变的条件下，设置以下四种施工工况。不同施工工况及施工阶段划分见表 2。

为便于不同工况变形发展过程的统一对比，数值计算结果按统一的阶段编号进行输出和对比。其中，实际施工过程采用字母进行区分：S 表示人工堆山填筑阶段，共设置 S1~S9 九个阶段，堆山高度随填筑逐级增加，分别约对应 4.7、9.3、14.0、18.7、23.3、28.0、32.7、37.3 和 42.0 m；K 表示基坑开挖阶段，共设置 K1~K4 四个阶段，开挖深度分别约为 0.95、1.90、2.85 和 3.80 m。对于含堆山工况，S1~S9 与 K1~K4 按照各工况规定的先后关系组合实施；对于仅开挖基坑工况，实际施工活动仅包括 K1~K4，图中的 13 个阶段编号仅用于统一表示数值计算结果的输出与对比过程，并不表示 13 次独立开挖施工。各工况计算阶段编号与施工阶段的对应关系见表 3。

Table 2. Construction cases and corresponding construction stages
表 2. 不同施工工况及施工阶段划分

工况	工况名称	施工过程	施工阶段表示	对比目的
工况 1	仅开挖基坑	不设置堆山，按照既定施工阶段逐步开挖基坑	K1→K2→K3→K4	作为基准工况
工况 2	基坑 - 堆山同步施工	基坑分层开挖与堆山分级填筑同步进行	S1/K1→S2/K2→S3/K3→S4/K4→S5→S6→S7→S8→S9	分析同步加载与卸荷的耦合作用
工况 3	先开挖基坑再堆山	基坑开挖完成后，再进行堆山分级填筑	K1→K2→K3→K4→S1→S2→S3→S4→S5→S6→S7→S8→S9	分析堆载作用于已卸荷基坑的影响
工况 4	先堆山再开挖基坑	堆山施工完成后，再进行基坑分层开挖	S1→S2→S3→S4→S5→S6→S7→S8→S9→K1→K2→K3→K4	分析预堆载条件下基坑卸荷的影响

Table 3. Correspondence between calculation stage numbers and construction stages under different construction cases
表 3. 不同施工工况计算阶段编号与施工阶段对应关系

阶段编号	工况 1: 仅开挖基坑	工况 2: 基坑 - 堆山 同步施工	工况 3: 先开挖后堆山	工况 4: 先堆山后开挖
1	初始状态	S1/K1	K1	S1
2	K1	S1/K1	K2	S2
3	K1	S2/K2	K3	S3
4	K1	S2/K2	K4	S4
5	K2	S3/K3	S1	S5
6	K2	S3/K3	S2	S6
7	K2	S4/K4	S3	S7
8	K3	S4/K4	S4	S8
9	K3	S5	S5	S9
10	K3	S6	S6	K1
11	K4	S7	S7	K2
12	K4	S8	S8	K3
13	K4	S9	S9	K4

各工况均采用相同的堆山分级填筑量和基坑分层开挖深度，从而排除最终几何尺寸差异的影响。不同工况仅改变堆山与基坑的施工先后关系，以反映施工顺序引起的应力路径差异。

2.5. 观测点布置与评价指标

为研究堆山作用下基坑不同部位的变形响应，在靠山侧地表、基坑靠山侧、基坑远山侧及坑底分别布置观测点，如图 2 所示。靠山侧地表设置 A~F 共 6 个观测点，用于提取不同施工阶段的地表竖向位移；基坑靠山侧和远山侧分别设置观测点，用于分析两侧土体或围护结构的侧向位移；坑底布置观测点，用于分析开挖卸荷引起的坑底隆起。

本文选取地表沉降、靠山侧侧向位移、远山侧侧向位移和坑底隆起作为主要评价指标。

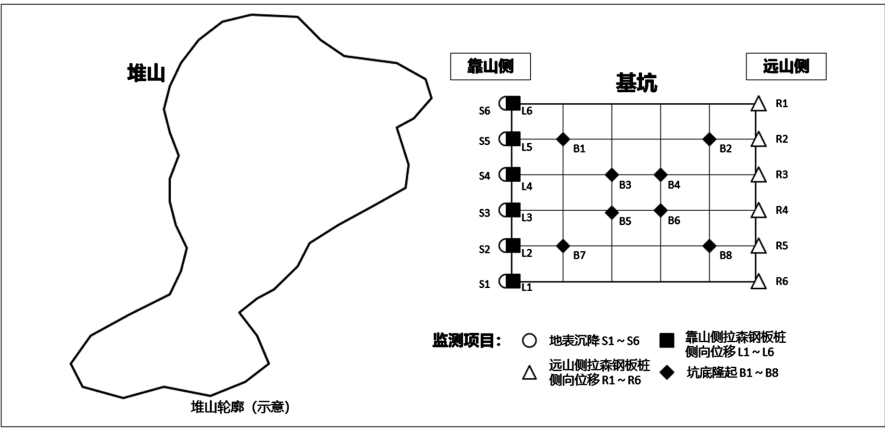


Figure 2. Layout of monitoring points
图 2. 观测点布置示意图

3. 结果分析

3.1. 靠山侧地表沉降

由图 3 可知, 仅开挖基坑时各测点沉降随施工逐步累积, 最终约为 136~150 mm, 曲线变化平缓。加入堆山后, 沉降明显增大且主要集中在施工阶段转换附近: 同步施工工况在第 2~5 步快速发展, 先开挖后堆山工况在第 2~5 步出现连续突降; 先堆山后开挖工况前期已产生一定沉降, 后期基坑开挖又引起显著附加沉降。

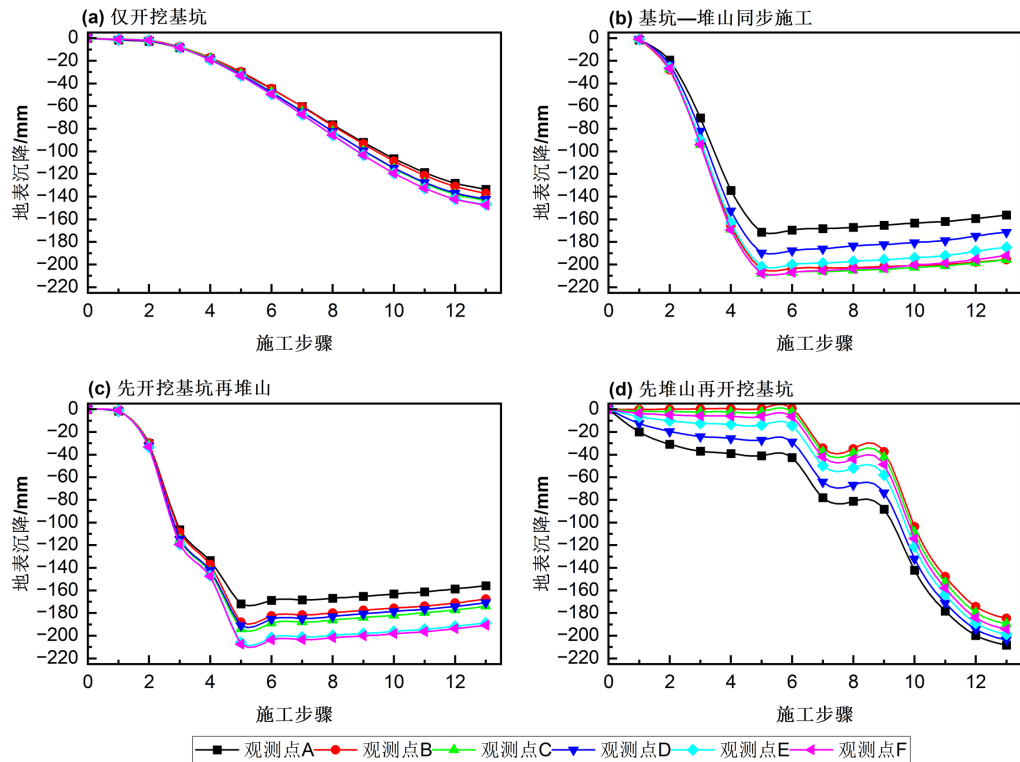


Figure 3. Hill-side ground settlement variation curves under different construction cases
图 3. 不同施工工况下靠山侧地表沉降变化曲线

四种工况的最终最大沉降依次约为 150、200、190 和 210 mm, 即仅开挖基坑 < 先开挖后堆山 < 同步施工 < 先堆山后开挖; 后三种工况较仅开挖基坑分别增加约 33%、27%和 40%。含堆山工况下不同测点之间的差异也更明显, 说明堆山附加荷载扩大了沉降量及其不均匀性。

因此, 堆山荷载与基坑开挖卸荷之间存在明显的叠加作用。在最大沉降量方面, 先堆山后开挖工况的数值较大, 但不能仅依据最大沉降判定其为整体最不利工况。值得注意的是, 基坑 - 堆山同步施工和先开挖后堆山工况下, 各观测点之间的沉降差约为 30~40 mm, 明显大于仅开挖基坑工况, 表现出较强的不均匀沉降特征。这是由于堆山加载与基坑开挖在时间和空间上的相互作用, 使靠山侧土体变形分布更加不均匀。因此, 工程评价除关注最大沉降量外, 还应重视同步施工和先开挖后堆山过程中产生的沉降差, 并结合围护结构侧向位移、坑底隆起及结构内力等指标进行综合判断。

3.2. 左侧(靠山侧)拉森钢板桩侧向位移

由图 4 可知, 仅开挖基坑时左侧钢板桩侧向位移较小, 施工结束时最大值约为 40 mm。同步施工和

先开挖后堆山工况的最大位移分别约为 215 mm 和 212 mm，均约为仅开挖工况的 5.3~5.4 倍；两者最终结果接近，但同步施工表现为逐步累积，先开挖后堆山则主要在后期堆山阶段快速增长。

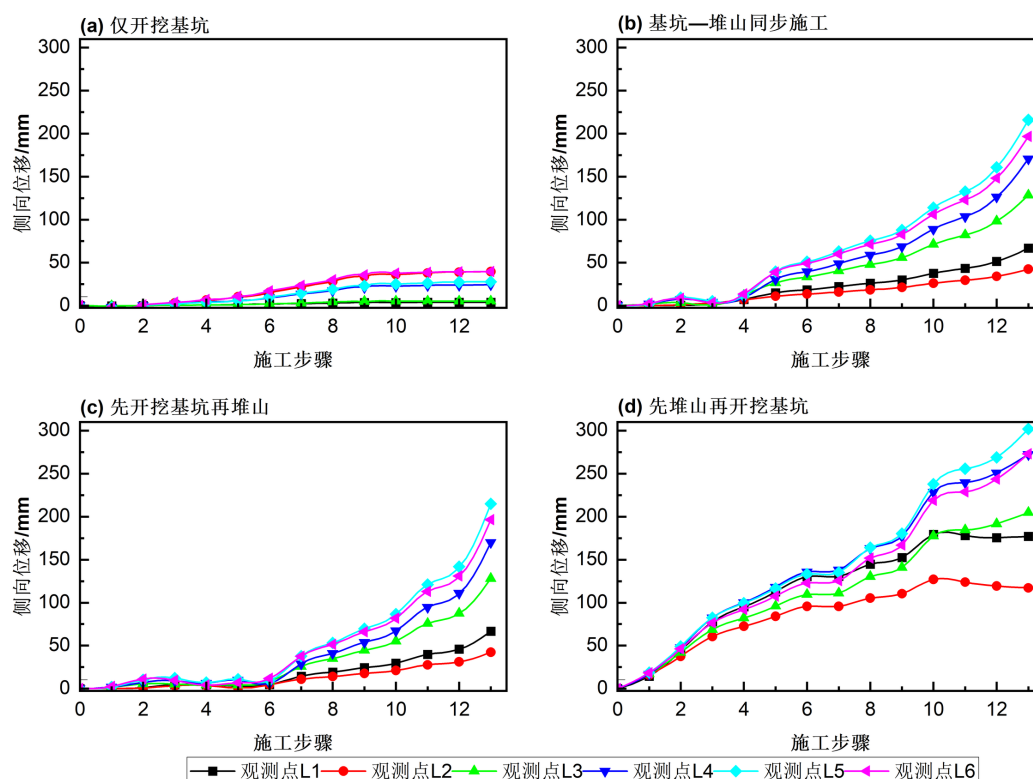


Figure 4. Lateral displacement variation curves of the left sheet-pile wall under different construction cases
图 4. 不同施工工况下左侧拉森钢板桩侧向位移变化曲线

先堆山后开挖工况从施工初期即产生明显侧向位移，并在第 9~10 步再次跃增，最终 L5 点达到约 300 mm，约为仅开挖工况的 7.5 倍，比同步施工和先开挖后堆山工况高约 40%。各工况均表现出明显空间差异，其中 L4~L6 点对堆山和开挖作用最敏感。

结果表明，堆山产生的附加侧向土压力是靠山侧钢板桩变形增大的主要原因，先期堆山形成的初始侧向变形还会与后续基坑开挖效应相互叠加。在本计算条件下，先堆山后开挖工况的靠山侧钢板桩侧向位移较大，L4~L6 点对堆山及基坑开挖作用较为敏感。因此，工程中应重点加强该区域的支护和变形监测。不同施工顺序的整体安全性仍需结合地表沉降、两侧围护结构位移、坑底隆起及支护结构内力等指标综合评价。

3.3. 右侧(远山侧)拉森钢板桩侧向位移

由图 5 可知，右侧钢板桩的侧向位移明显小于左侧，其原因主要包括两个方面：一是右侧钢板桩距堆山较远，堆山附加应力及侧向挤压作用在土体中传递时随距离增加而逐渐衰减；二是基坑开挖破坏了原有表层土体的连续性，形成临空面，切断了堆山荷载沿浅层土体向远山侧传递的主要路径。因此，堆山作用只能通过坑底以下较深土层及围护—支撑体系向右侧传递，其影响程度明显弱于左侧。

仅开挖基坑时，右侧钢板桩主要向负方向变形，最大位移绝对值约为 40 mm。同步施工后，各测点由初期小幅负位移逐渐转为正位移，最终最大值约为 77 mm。先开挖后堆山工况表现出更明显的“先负

向、后正向”变化特征：前期基坑开挖使坑内土体卸荷，围护结构在坑内外土压力差作用下沿开挖控制方向变形，因而产生负向位移；后期堆山产生附加竖向荷载和水平挤压作用，推动土体及基坑围护体系向远山侧移动。当堆山引起的正向位移逐渐超过前期开挖形成的负向位移后，右侧钢板桩的累计位移便由负值转变为正值，最终最大值约为 77 mm。

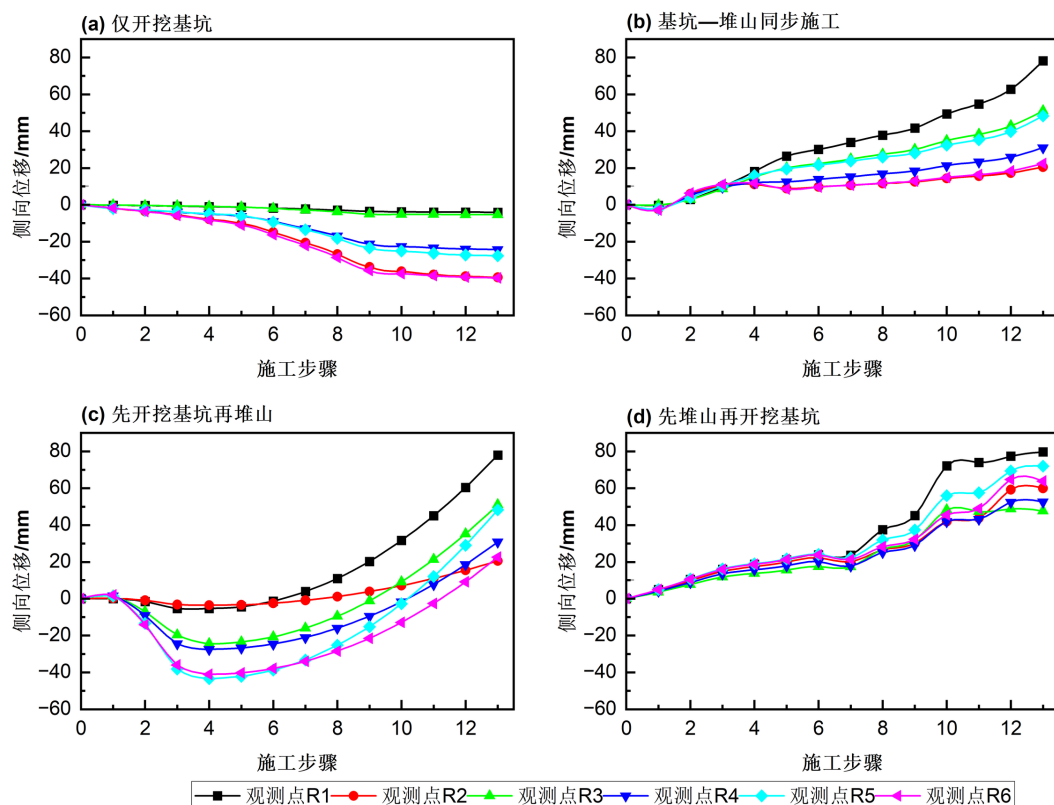


Figure 5. Lateral displacement variation curves of the right sheet-pile wall under different construction cases
图 5. 不同施工工况下右侧拉森钢板桩侧向位移变化曲线

先堆山后开挖工况下，各测点从施工初期即向正方向发展，并在第 9~10 个施工步骤出现明显增长，最终最大位移约为 79 mm。含堆山工况下右侧钢板桩的最大位移约为仅开挖工况的 1.9~2.0 倍。与左侧最大位移约 300 mm 相比，右侧最大位移仅约 79 mm，约为左侧的 26%。这说明基坑开挖虽然削弱了堆山荷载向远山侧的传递，但仍有部分附加作用通过深层土体和围护体系传至右侧，从而使基坑两侧产生明显的不对称变形，并表现出向远山侧整体偏移的趋势。

3.4. 坑底隆起

由图 6 可知，四种工况下坑底最终隆起量及空间分布总体接近。B2 及 B4~B6 点隆起较大，约为 540~560 mm；B1、B3、B7 和 B8 点约为 400~450 mm。仅开挖、同步施工、先开挖后堆山和先堆山后开挖工况的最大隆起量分别约为 560、560、555 和 560 mm，差值不超过约 5 mm，相对差异小于 1%。

施工顺序主要改变隆起的发展过程：仅开挖工况随施工持续增长；同步施工在第 2~7 步快速发展后稳定；先开挖后堆山工况在第 2~4 步基本完成隆起；先堆山后开挖工况前期受堆山加载出现约 20~40 mm 沉降，后期开挖时迅速转为隆起，呈现“加载沉降-卸荷隆起”的方向转换。

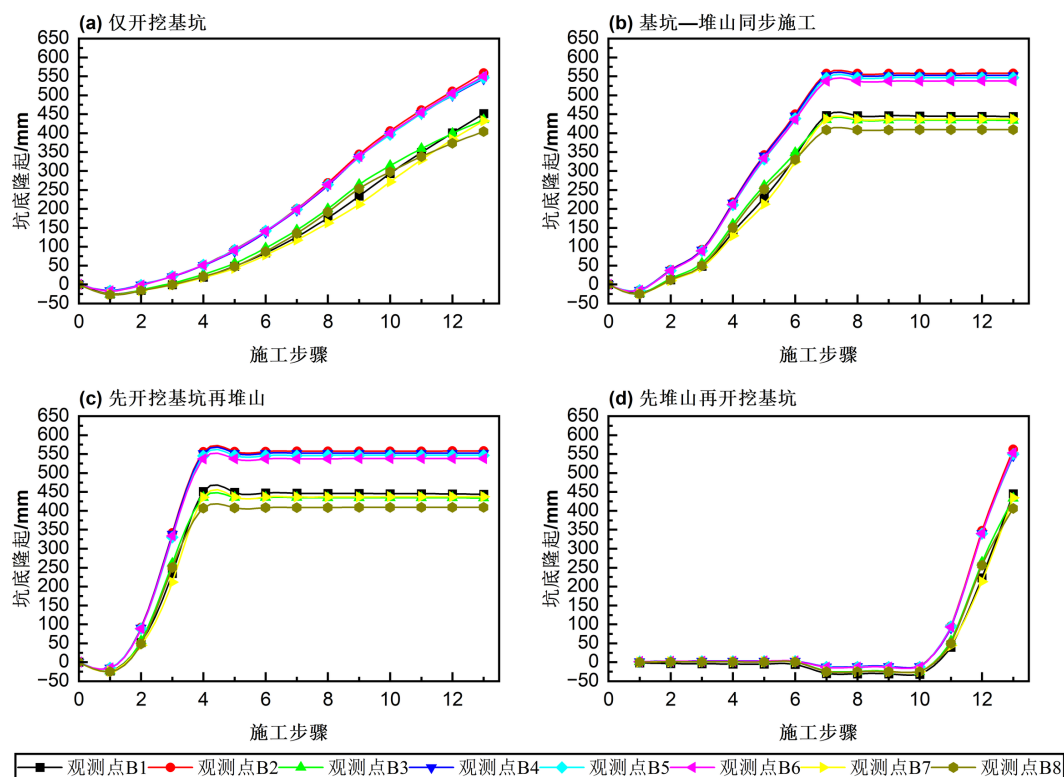


Figure 6. Basal heave variation curves of the foundation pit under different construction cases

图 6. 不同施工工况下基坑坑底隆起变化曲线

由此可见,坑底最终隆起主要受基坑开挖卸荷、土体回弹特性及开挖深度控制,堆山对其最终幅值的影响相对有限。这是因为堆山荷载引起的沉降和附加变形主要集中在浅层土体,而基坑开挖过程中坑内表层土体被逐步移除,使堆山荷载向坑底传递的直接路径受到削弱。因此,堆山对坑底土体应力状态的影响明显小于基坑开挖卸荷作用,四种工况的最终隆起量较为接近。不过,堆山及施工顺序仍会改变坑底隆起的发生时间、增长速率和方向转换过程,工程中应重点监测开挖阶段及工序转换阶段的隆起增量。

4. 结论

本文采用 MIDAS GTS NX 建立堆山 - 基坑三维有限元模型,对仅开挖基坑、基坑 - 堆山同步施工、先开挖基坑后堆山以及先堆山后开挖基坑四种工况进行了对比分析,主要结论如下:

(1) 堆山荷载显著增大靠山侧地表沉降。四种工况的最大沉降分别约为 150、200、190 和 210 mm。先堆山后开挖工况的最大沉降较大,而同步施工和先开挖后堆山工况下各测点的沉降差约为 30~40 mm,不均匀沉降特征更加明显。因此,地表变形评价应同时考虑最大沉降量与沉降差。

(2) 堆山对靠山侧拉森钢板桩侧向位移影响显著。四种工况的最大侧向位移分别约为 40、215、212 和 300 mm,含堆山工况约为仅开挖基坑工况的 5.3~7.5 倍。其中 L4~L6 点对堆山加载及基坑开挖较为敏感,说明靠山侧中后部区域应作为围护结构变形控制和监测的重点。

(3) 右侧钢板桩的侧向位移明显小于左侧。这是因为堆山附加应力随距离增加逐渐衰减,同时基坑开挖移除了坑内表层土体,削弱了浅层侧向位移向远山侧传递的连续路径。先开挖后堆山工况下,右侧钢板桩呈现“先负向、后正向”的变化过程,反映了前期开挖卸荷与后期堆山水平挤压作用的先后叠加。

(4) 四种工况的最终最大坑底隆起量均约为 555~560 mm, 差异小于 1%, 说明坑底最终隆起主要受基坑开挖卸荷、开挖深度及土体回弹特性控制。堆山引起的沉降和附加变形主要集中于浅层土体, 而坑内浅层土体在开挖过程中被逐步移除, 因此堆山对最终坑底隆起量的影响有限, 但会改变隆起的发生时间、增长速率及方向转换过程。

(5) 不同施工顺序对应的主要变形控制指标并不相同: 先堆山后开挖工况的最大地表沉降和靠山侧钢板桩侧向位移较大, 而同步施工和先开挖后堆山工况的不均匀沉降更为突出。因此, 不能仅依据单一变形指标判断某一施工顺序整体最不利, 工程安全评价应综合考虑地表沉降、沉降差、两侧围护结构位移、坑底隆起及支护结构内力。

基金项目

上海建工集团股份有限公司重点科研项目(24JCSF-14)。

参考文献

- [1] Peck, R.B. (1969) Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 25 - 29 August 1969, 225-290.
- [2] Mana, A.I. and Clough, G.W. (1981) Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **107**, 759-777. <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0001150>
- [3] O'Rourke, T.D. (1981) Ground Movements Caused by Braced Excavations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **107**, 1159-1178. <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0001183>
- [4] Ou, C., Hsieh, P. and Chiou, D. (1993) Characteristics of Ground Surface Settlement during Excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, **30**, 758-767. <https://doi.org/10.1139/t93-068>
- [5] Hsieh, P. and Ou, C. (1998) Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused by Excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**, 1004-1017. <https://doi.org/10.1139/t98-056>
- [6] Ge, C., Yang, M., Li, P., Zhang, M. and Zhang, Z. (2024) Performance and Environmental Impacts of Deep Foundation Excavation in Soft Soils: A Field and Modeling-Based Case Study in Nanjing, China. *Underground Space*, **18**, 218-238. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.01.002>
- [7] Kung, G.T., Juang, C.H., Hsiao, E.C. and Hashash, Y.M. (2007) Simplified Model for Wall Deflection and Ground-Surface Settlement Caused by Braced Excavation in Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**, 731-747. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2007\)133:6\(731\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:6(731))
- [8] Wang, J.H., Xu, Z.H. and Wang, W.D. (2010) Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Shanghai Soft Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**, 985-994. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000299](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000299)
- [9] Wang, Y., Chen, S., Ouyang, J., Li, J., Zhao, Y., Lin, H., *et al.* (2022) Predicting Ground Surface Settlements Induced by Deep Excavation under Embankment Surcharge Load in Flood Detention Zone. *Water*, **14**, Article 3868. <https://doi.org/10.3390/w14233868>
- [10] Wang, H., Xu, X., Zhang, M., Zhang, S., Hu, Q. and Liang, Y. (2025) Model Test on the Behaviors of Deep Excavation under Asymmetrical Loading. *Structures*, **78**, Article ID: 109346. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109346>
- [11] Moormann, C. (2004) Analysis of Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Soft Soil Based on a New Worldwide Database. *Soils and Foundations*, **44**, 87-98. <https://doi.org/10.3208/sandf.44.87>
- [12] Luo, L., Zheng, Y., Wang, R., Ren, X. and Zhang, Y. (2025) Method for Predicting Deformation Field of Deep Foundation Pit Considering Spatial Effect. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering*, **178**, 290-306. <https://doi.org/10.1680/jgeen.23.00096>
- [13] Zhu, Y., Wang, W., Xu, Z., Chen, J. and Yang, Z. (2026) Observed Performances and Spatial Effects of a Set of 40 M Ultra-Deep Rectangular Excavations in Shanghai Soft Soils. *Soils and Foundations*, **66**, Article ID: 101710. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101710>
- [14] Xia, B., Zheng, G., Zhou, H. and He, Y. (2025) Evaluation of Building Damage Caused by Excavation-Induced Ground Movements in Three-Dimensional Deformation Field: A Case Study in Tianjin, China. *Acta Geotechnica*, **20**, 3795-3809. <https://doi.org/10.1007/s11440-025-02596-w>
- [15] Wang, Z., Lian, N., Dai, G., Zhou, Y., Huang, L. and Wang, J. (2025) Laboratory Study of the Influence of the Excavation

-
- of a Foundation Pit on Adjacent Engineering Piles. *International Journal of Geomechanics*, **25**, Article ID: 04025245. <https://doi.org/10.1061/jignai.gmeng-11596>
- [16] Zheng, G., Huang, J., Diao, Y., Yan, Y., Jiao, C., Zhang, L., *et al.* (2025) Field Investigation of Deflection Characteristics and Control Strategies of a Short Floating Pile Adjacent to Deep Excavation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **151**, Article ID: 05025001. <https://doi.org/10.1061/jggefk.gteng-12740>
 - [17] Yin, Z., Jin, R., Guan, S., Chen, Z., Dai, G. and Zhu, W. (2025) Research on Construction Sequencing and Deformation Control for Foundation Pit Groups. *Applied Sciences*, **15**, Article 7719. <https://doi.org/10.3390/app15147719>
 - [18] Xu, L., Li, W., Liu, L., Wu, F., Fan, Z. and Chen, R. (2026) Deformation Analysis of a Deep Excavation with a Servo Control System Adjacent to an Existing Foundation Pit: A Case Study in Shenzhen. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **170**, Article ID: 107374. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107374>
 - [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50497-2019 建筑基坑工程监测技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
 - [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.