

DOI: 10.11779/CJGE20221074

# 单侧卸荷诱发深基坑的不对称性变形特性与机制

邱滢玲<sup>1,2</sup>, 丁文其<sup>1,2</sup>, 赵腾腾<sup>3</sup>, 王校勇<sup>4</sup>, 乔亚飞<sup>\*1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海城投水务工程项目管理公司, 上海 200002; 4. 上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 随着城市更新的推进, 越来越多的基坑在既有邻近基坑造成的单侧卸荷条件下施工, 表现出与常规基坑不同的变形特性和机制。为此, 依托上海某单侧卸荷的深基坑工程 (34.3 m), 统计分析了现场监测数据 (地下连续墙侧移、墙后土体侧移、周边地表沉降、支撑轴力和墙后土压力), 揭示了软土地区单侧卸荷诱发的深基坑不对称变形特性, 并初步探讨了其发生机制。结果表明: 单侧卸荷引起了地下连续墙侧移的不对称性, 卸荷侧侧移减小 76%, 非卸荷侧侧移增大 72%, 进而导致非卸荷侧地表沉降最大值增加 1 倍以上, 这是卸荷侧土压力减小、围护结构整体水平位移和卸荷方向支撑等效刚度变化 3 种机制综合作用的结果。在类似工程的设计施工中, 应充分考虑基坑的不对称变形特性, 选取合适的等效支撑刚度进行计算, 并针对卸荷/非卸荷侧制定合理的监测预警指标。

**关键词:** 深基坑; 监测分析; 不对称变形特性; 土压力; 机制

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)01-0199-08

**作者简介:** 邱滢玲(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的科研工作。E-mail: qiuyanling@tongji.edu.cn。

## Asymmetrical deformation characteristics and mechanisms of deep excavations induced by one-side unloading

QIU Yanling<sup>1,2</sup>, DING Wenqi<sup>1,2</sup>, ZHAO Tengting<sup>3</sup>, WANG Xiaoyong<sup>4</sup>, QIAO Yafei<sup>\*1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory

of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Engineering

Project Management Company, Shanghai Chengtou Water Group, Shanghai, 200002; 4. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd.,

Shanghai 200093, China)

**Abstract:** With the advancement of urban renewal, more and more excavations are being constructed under one-side unloading condition caused by the existing adjacent ones, resulting in different deformation characteristics and mechanisms compared to those of the normal excavations. Therefore, with the support of an asymmetrical deep excavation (34.3 m) that is induced by the adjacent one-side unloading in Shanghai, the site monitoring data (i.e. deflection of diaphragm wall, soil displacement, ground surface settlement, struct axial force and earth pressure) are collected and analyzed. The asymmetrical deformation characteristics of the deep excavation induced by unilateral unloading are then summarized, followed by a discussion of the corresponding mechanisms. The results show that the one-side unloading leads to the asymmetrical deformation of diaphragm wall. The displacement at the unloaded side reduces by 76% while that at the non-unloaded side increases by 72%, resulting in an increase of more than one times of the maximum surface settlement at the non-unloaded side. All these changes are the combined results of three mechanisms, including the reduced soil pressure at the unloaded side, the horizontal movement of retaining structures, and the change of the equivalent stiffness of supports in the unloaded direction. Therefore, the asymmetrical deformation of excavations should be fully considered during their design and construction. The equivalent stiffness of supports should be determined appropriately, and the rational monitoring warning indexes should be proposed for the unloading side and non-unloading side, respectively.

**Key words:** deep excavation; monitoring analysis; asymmetrical deformation characteristic; earth pressure; mechanism

## 0 引言

随着城市更新和地下空间的高密度开发, 常出现多个相邻基坑同期施工或在既有地下工程周边施工新

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目 (52090083); 上海市晨光计划项目 (20CG26); 上海市苏州河深隧项目横向课题

**收稿日期:** 2022-08-29

**\*通信作者** (E-mail: yafei.qiao@tongji.edu.cn)

基坑的需求。尤其是,既有邻近地下工程会引起新建基坑在该侧土压力的减小,即出现单侧卸荷作用,这将导致新建基坑表现出与常规基坑不同的变形特性。因此,探明因邻近地下工程诱发的单侧卸荷对深基坑变形特性的影响规律具有重要意义。

许多学者对软土地区基坑的变形特性进行了研究。王卫东等<sup>[1]</sup>统计上海软土地区 35 个深基坑工程的实测数据,发现最大地表沉降介于  $1\%H_e\sim 8\%H_e$  ( $H_e$  为开挖深度)。万星等<sup>[2]</sup>收集分析了南京软土地区 35 个基坑工程的地连墙变形实测数据,发现墙体的最大侧移量随开挖深度明显增大,变化范围为  $0.05\%H_e\sim 0.69\%H_e$ ,最大侧移点位于  $H_e+2\sim H_e-8$  m。丁智等<sup>[3]</sup>基于浙江地区 37 个深基坑实测数据,发现基坑侧移多呈“弓”形,最大侧移点位于  $H_e+4\sim H_e-7$  m。Tan 等<sup>[4]</sup>分析了上海地区 111 个基坑工程,发现多数基坑墙体最大侧移点位于  $H_e+7\sim H_e-7$  m。吴昌将等<sup>[5]</sup>指出墙体侧移变形主要在开挖阶段产生,在换撑阶段发展较小。

部分学者对相邻基坑开挖的影响进行了研究。通过实测数据与数值模拟,胡敏云等<sup>[6]</sup>指出软土地区相邻基坑同步开挖将引起本体基坑相邻侧支护结构侧移的减小与回弹;黄开勇<sup>[7]</sup>发现采用中隔墙及坑内加固能减小相邻基坑的变形。通过数值模拟,朱炎兵等<sup>[8]</sup>发现既有地铁站将引起邻近侧基坑墙体侧移减小,对侧的增大,引起远侧地表沉降量的增大。岳树桥等<sup>[9]</sup>给出了相邻基坑间土条主动土压力的计算公式,以解释基坑的相互影响。但上述研究的对象多为深度小于 30 m 的基坑,且研究结论的普适性还需更多实测数据的验证。同时,单侧卸荷改变深基坑变形特性的发生机制还需进一步研究。

因此,依托上海某受邻近超深竖井单侧卸荷影响的 34.3 m 深基坑工程,本文通过科研监测详细记录了基坑的变形特性和受力特性,总结分析了单侧卸荷对基坑特性的影响规律,并对其发生机制进行了探讨,以期今后类似深基坑的设计、监测和施工提供指导。

1 工程概况

上海某排水工程综合设施基坑平面呈矩形,尺寸为  $60\text{ m}\times 39.2\text{ m}$  (图 1),开挖深度为 34.3 m,采用 1.2 m 厚地下连续墙加 7 道钢筋混凝土内支撑的围护结构形式 (图 2)。南侧地下连续墙长度为 102 m,其余三边的地下连续墙长 80 m;内支撑采用正交规则布置,水平间距大部分为 8.0 m,局部为 9.4, 11.0 m (图 1),竖向布置如图 2 所示。为了提高围护结构的止水效果,坑外施做一圈三轴搅拌桩和 RJP 工法桩;同时坑内采用 6 m 宽旋喷裙边加固至坑底 5 m 以提高围护

结构的抗变形能力。

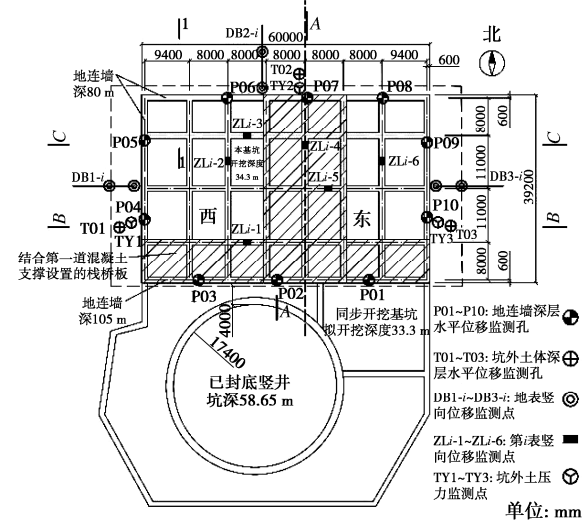


图 1 基坑平面图及监测点布置

Fig.1 Plan view of excavation and layout of monitoring points

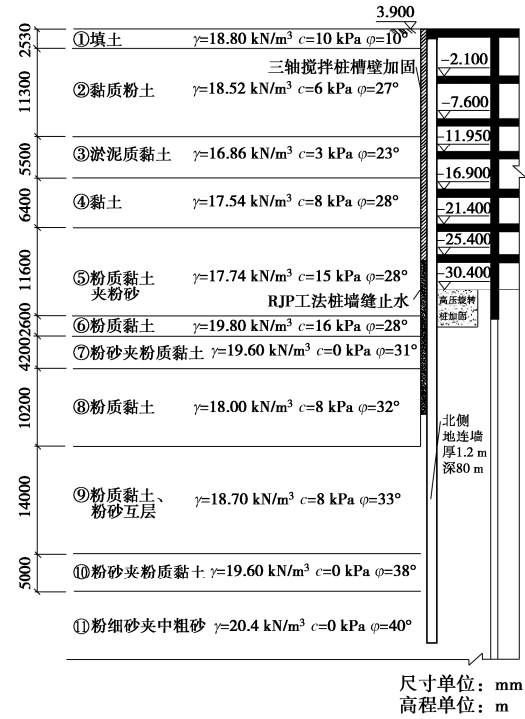


图 2 1-1 断面剖面图

Fig. 2 Profile of section 1-1

基坑南侧有一超深竖井,已于本基坑开挖前约 40 d 完成底板浇筑,与南侧地下连续墙的最小间距约 4 m;竖井开挖深度 58.65 m,内径 34 m,采用 102 m 的地下连续墙作为围护结构。紧邻基坑东南角有一近似同期开挖的深基坑,开挖深度为 33.3 m,平面尺寸约  $25\text{ m}\times 20\text{ m}$ ,且与依托基坑共用南侧地下连续墙;开挖工序与依托基坑一致,但施工进度略落后约一周 (图 1)。因此,在南北方向上,南侧既有竖井的存在将造成基坑南侧土压力的减小,构成典型的单侧卸荷深基坑监测断面;在东西方向上,因无卸载形成了典型的深基坑监测断面。

场地为典型上海软土, 其竖向分层及典型的物理力学参数如图2所示。场地潜水水位埋深约0.05~1.63 m。基坑开挖涉及⑦层承压水和⑨层承压水, 两层承压水的水位分别为3.16~4.75, 3.86~5.54 m, 施工期对承压水进行预先降压处理。

考虑基坑东南角同步开挖基坑的影响, 基坑在深部采用东西侧交替开挖方案, 具体如图3所示。在开挖深度不大于17.4 m时, 东西侧同步开挖; 当深度大于17.4 m时, 东侧先开挖, 待东侧支撑施作后, 西侧再开挖。东西侧的具体划分如图1所示。2021年10月19日, 基坑开挖完毕并进行底板养护施工, 施工总工期259 d。施工前和施工期间持续采用坑内疏干井降低潜水水位, 开挖最后一层土方前采用坑内降水井降低⑦和⑨层承压水水头, 坑外潜水水位、⑦层承压水水位及⑨层承压水水位基本保持不变, 如图3所示。

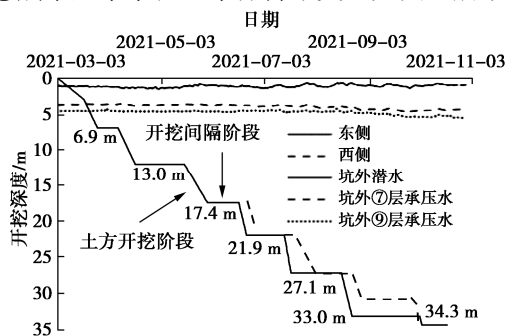


图3 施工进度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of excavation schedule

开挖期间进行了大量的科研监测以掌握单侧卸荷诱发的基坑不对称变形特性, 具体测点布置如图1所示。共布设10个地下连续墙侧移监测孔(P01~P10), 其中, P01~P03位于南侧墙体, 孔深90 m; P04~P10位于其余三侧墙体, 孔深60 m。在P04、P07和P10对应坑外土体位置布设3个深层土体水平位移监测孔, T01~T03, 孔深65 m。同时, 在对应位置布设坑外土压力监测断面, TY1~TY3, 每个断面布设8个土压力盒。布设3个地表沉降监测断面, DB1~DB3; 每个断面布设10个测点, 距离坑边依次为3, 8, 13, 18, 23, 33, 43, 53, 63, 73 m。每层支撑布设6个测点, ZLi-1~ZLi-6, 每层的布设位置相同; 其中, 1, 3和5用于监测东西向支撑轴力; 2, 4和6监测南北向支撑轴力。

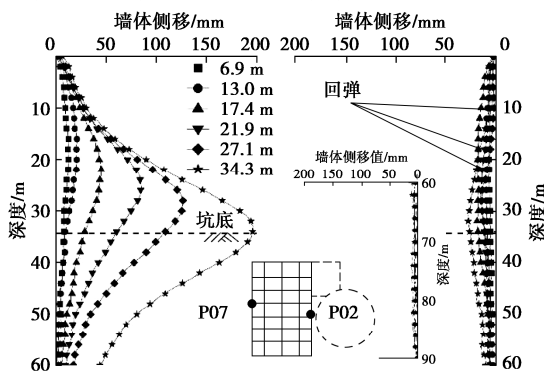
为了揭示单侧卸荷的影响, 选取单侧卸荷断面A—A和无卸荷断面B—B(图1)进行对比研究。

## 2 单侧卸荷诱发的深基坑不对称变形

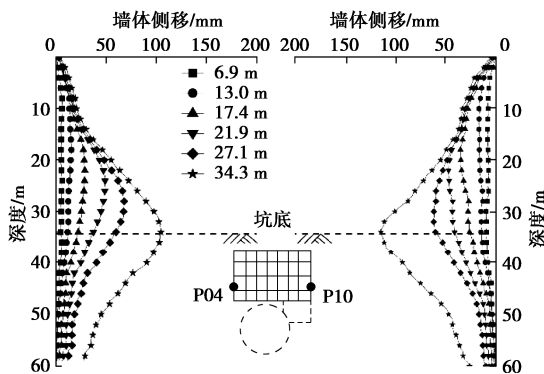
### 2.1 墙体侧移

#### (1) 竖向分布模式

图4汇总了A—A和B—B断面的墙体侧移监测结果。开挖完成时, 4个测孔的墙体侧移均呈现“鼓肚形”, 即随深度的增大, 侧移先不断增大, 在开挖面附近达到最大值, 然后随深度逐渐减小, 符合软土地区基坑支护结构的侧移曲线<sup>[2-4]</sup>。4个测孔的侧移值有较大差异, 非卸荷侧P07的侧移最大(196.52 mm), B—B断面的P04和P10次之(105.07, 114.39 mm), 卸荷侧P02最小(27.78 mm)。在开挖27.1 m工况, 非卸荷侧进行了跟踪注浆以控制临近管线的变形。注浆期间, P07测点发生了5~9 mm的侧移增量, 这虽会加剧P02和P07侧移的差异, 但该阶段侧移增量仅占P07侧移总量6%左右, 考虑施工期其他误差和监测误差的影响, 注浆影响可近似忽略, 故在以下分析中未单独剥离注浆阶段的影响。整体来讲, 单侧卸荷引起了A—A断面墙体侧移的不对称特征。



(a) A—A断面



(b) B—B断面

图4 墙体侧移

Fig. 4 Deflections of diaphragm wall

随开挖深度的增大, P04、P07和P10三个测孔的侧移均呈现相同的增大趋势, 最大侧移深度始终位于开挖面附近。每层土方开挖仅引起一定范围墙体侧移的增大, 如第一层土方开挖几乎不引起40 m以下墙体的侧移, 而最后一层土方开挖对墙体顶部20 m的侧移几乎无影响。这表明内支撑体系具有足够的刚度, 可以将开挖扰动控制在一定范围内。在开挖深度超过17.4 m后, P07处墙体侧移快速增大, 远大于P04和P10, 这与A—A断面的单侧预先卸载有关。

P02 处墙体侧移因邻近竖井的预先卸载而呈现不同的发展趋势。在开挖深度不大于 17.4 m 时,侧移随开挖深度增大而增大;在 17.4~27.1 m 开挖阶段,墙体浅部 40 m 的侧移出现了回弹趋势,而深部侧移几乎不变;在最后一层土方开挖及底板施工阶段,墙体侧移再次出现增大趋势,且最大侧移移动至开挖面处,这与最后一层土方开挖前的坑内承压水降水有关,坑内水压力的减小导致了墙体位移的增大。

为进一步分析单侧卸荷对墙体侧移的影响,对比分析了 B—B 断面与 A—A 断面墙体侧移在开挖深度为 6.9, 21.9, 34.3 m 时的监测结果(图 5)。图 4 表明 B—B 断面两侧墙体侧移值几乎相等,故取其均值作为该断面的监测结果。开挖至 6.9 m 时,不同测点的墙体侧移相近,说明挖深较浅时单侧卸荷的影响不明显。开挖至 21.9 m 时,不同测点的墙体侧移模式相同,但侧移值有较大差异;卸荷侧墙体侧移最小,非卸荷侧侧移最大, B—B 断面侧移处于两者之间,这表明单侧卸荷引起了不对称变形,与朱炎兵等<sup>[8]</sup>的结论相一致。当开挖至 34.3 m 时,各测点的侧移值差异进一步增大,卸荷侧的侧移仅为非卸荷侧的 1/7 左右,表明单侧卸荷引起的不对称变形更加明显。

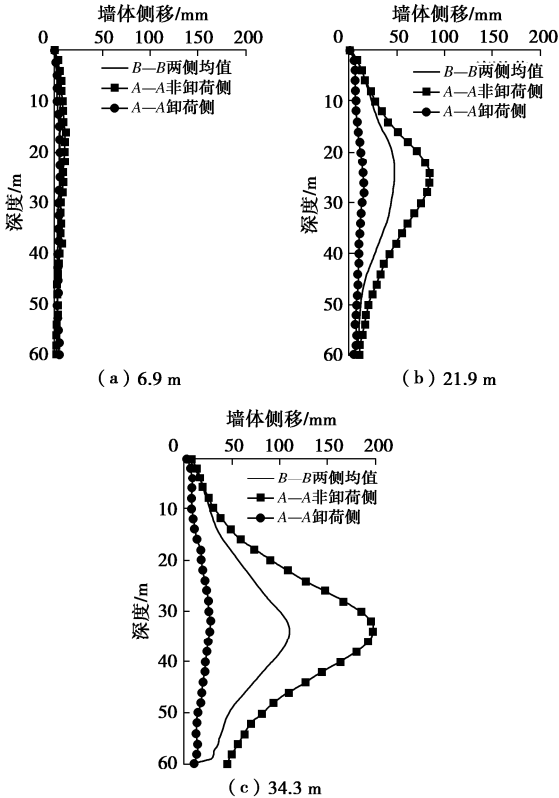


图 5 不同挖深时的墙体侧移  
Fig. 5 Deflections of diaphragm wall at different depths

(2) 最大侧移

图 6 统计分析了墙体最大侧移随开挖深度的演变规律。最大侧移共有 3 种发展趋势:①随开挖深度近似线性增大,斜率略大于上海市 I 类基坑控制值

1.8‰,开挖完成时约 3.00‰ $H_c$ ,表现在 B—B 断面的两侧墙体;②随开挖深度线性增大,但斜率很小,仅约 0.81‰,表现在卸荷侧墙体;③随开挖深度呈两阶段线性增大趋势,且后一阶段的斜率较大,表现在非卸荷侧墙体。上述 3 类发展趋势的差异在开挖深度 13 m 时开始出现,在首层土方开挖时各墙体的最大侧移发展规律一致。这进一步表明,单侧预先卸荷的影响在开挖一定深度后才开始显现。开挖完成时,基坑最大侧移值为开挖深度的 0.81‰~5.73‰。此外, A—A 断面两侧墙体最大侧移值的总和与 B—B 断面的两墙侧移和基本相等。

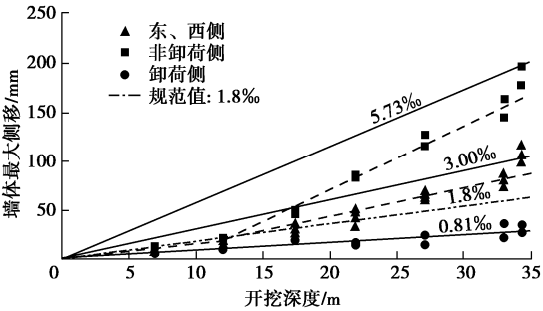


图 6 墙体最大侧移与开挖深度关系图  
Fig. 6 Relationship between maximum deflection of diaphragm wall and excavation depth

2.2 墙后土体侧移

3 个测孔处的土体侧移发展规律基本一致,仅选取侧移最大的 T02 测孔进行分析。图 7 中对比分析了 T02 孔土体侧移和对应位置 P07 墙体侧移的监测结果。土体侧移模式与墙体侧移整体类似,在竖向呈“鼓肚形”,侧移值和侧移最大值深度随挖深逐渐增大;但存在如下差异:土体的最大侧移深度小于墙体,位于开挖面以上;同一工况下,土体侧移大于墙体侧移,且随挖深的增大差异不断增大,侧移最大差值超过 100 mm;土体侧移在整个施工阶段持续增大,而浅部墙体侧移在深部开挖阶段基本保持不变,这导致两者“鼓肚形”模式的差异。

造成上述差异的原因是土体侧移除其跟随墙体侧移的水平位移外,还可由孔隙水压消散及软土蠕变等因素诱发。

2.3 墙后地表沉降

图 8 给出对非卸荷断面 DB1 处与单侧卸荷断面非卸荷侧 DB2 处的地表沉降监测结果。两断面的地表沉降槽形状与发展规律相似;地表沉降呈凹槽型,沉降量随基坑开挖深度的增大逐步增大,沉降最大位置逐渐向远离基坑方向移动,最终位于距离坑边约 15 m 处(0.44 $H_c$ ),地表沉降影响范围均为 50 m(1.3 $H_c$ )左右。DB1 处最大沉降量为 42.93 mm, DB2 处为 93.07 mm,约为 DB1 的两倍。这是因为沉降量与地墙侧移相

关, DB2 处的墙体因单侧卸荷引起的不对称变形发生了更大的侧移 (P07)。因此, 单侧卸荷会导致对应非卸荷侧地表沉降的增大, 这与朱炎兵等<sup>[8]</sup>的结果一致。

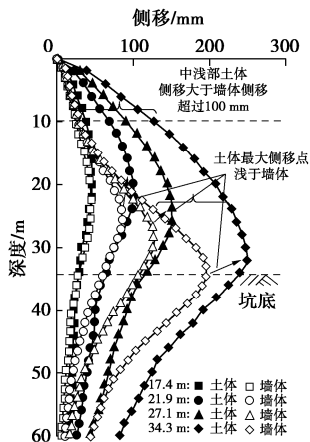
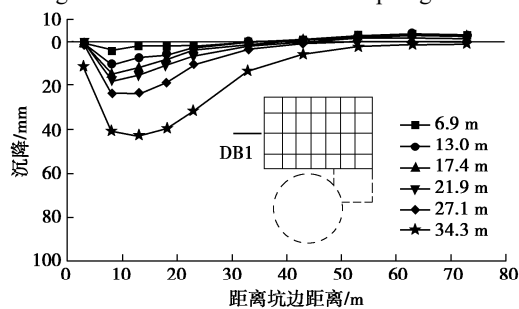
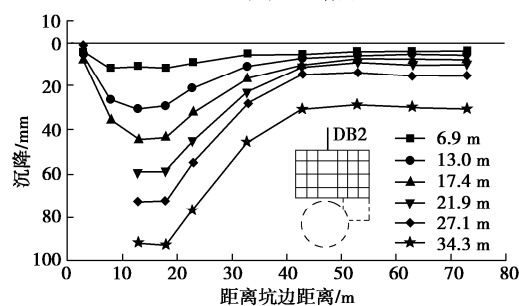


图 7 墙后土体侧移

Fig. 7 Deflections of soil behind diaphragm wall



(a) DB1断面



(b) DB2断面

图 8 地表沉降曲线

Fig. 8 Surface settlement trough

## 2.4 深基坑的不对称变形特性

根据前述分析结果, 图 9 给出了单侧卸荷诱发的深基坑不对称变形特性示意图。单侧卸荷不影响墙体的整体侧移模式和墙后沉降槽的形式, 但对相应的量值有较大影响。相比非卸荷断面, 卸荷侧的墙体侧移减小, 非卸荷侧的墙体侧移增大, 进而导致其墙后的地表沉降值增大。图 5, 8 表明上述不对称变形随挖深增大而加剧。

## 3 不对称变形的诱发机制

### 3.1 支撑轴力

图 10 给出了各层南北向 ZLi-4 和东西向的 ZLi-5

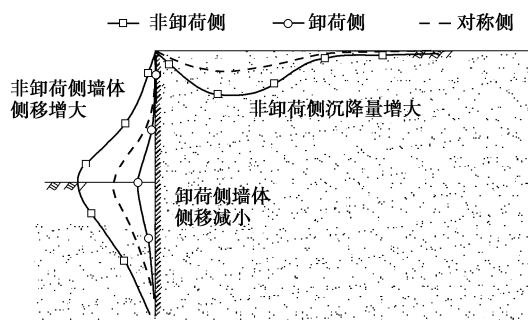
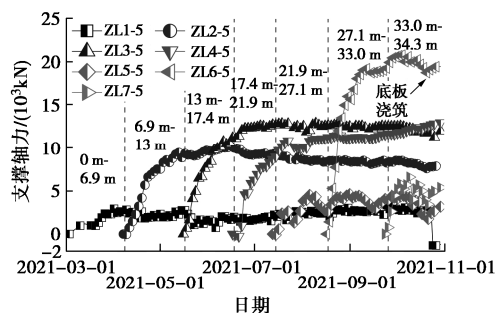
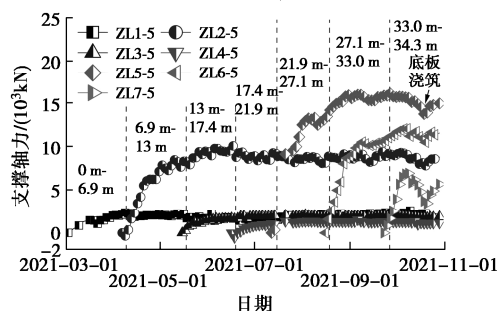


图 9 深基坑不对称变形特性示意图

Fig. 9 Asymmetrical deformation characteristics of deep excavation



(a) A—A断面



(b) B—B断面

图 10 支撑轴力时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of axial force of strut

测点支撑轴力时程曲线。单侧卸荷对支撑轴力的发展和大小影响不大。各道支撑施作后, 轴力在该层施工阶段不断增长, 在下一道支撑出现后趋于稳定, 说明开挖造成的应力释放主要由临近开挖面的支撑承担。最后一层施工末期, 底板浇筑后分担了支撑轴力, 使各道支撑, 尤其是靠近底部的支撑轴力小幅下降。

两组支撑中轴力最大的分别为第 6 道和第 5 道支撑, 轴力最大值分别为 20742.48, 16265.45 kN, 分别发挥了支撑截面承载力设计值的 64.64%和 60.83%, 说明本基坑支撑轴力设计较安全。第 5, 6 道支撑分别位于地面以下约 21, 25 m 深度处, 接近墙体侧移值最大位置附近, 故受到挤压产生更大应变和轴力, 最后一道支撑深约 30 m, 但上层支撑已对墙体提供了较大支撑力, 下部有坑内土体的支撑作用, 故轴力较小。

东西向第 3, 4 道支撑轴力很小, 最大值只有 1085.00, 776.64 kN, 是因为支撑施作较晚, 大部分墙

体侧移变形已在支撑施作前完成, 支撑施作后受到的挤压较小。故土方开挖完毕后应尽快施作支撑, 及时发挥其对结构变形的抵抗作用。

### 3.2 土压力

#### (1) 土压力的竖向分布

图 11 统计了 3 个测孔在基坑开挖前和开挖后的土压力监测结果, 同时分别与静止土压力和朗肯土压力的计算结果进行对比。开挖前, 浅部 (<26 m) 土压力监测值与水土合算的静止土压力相吻合, 在竖向上近似呈线性分布; 在深部 (>26 m), 土压力实测值位于水土合算和水土分算之间, 且在 40 m 左右与水土分算静止土压力相一致。这与场地内的地层分布有关, 对于深部的⑤-4 层和⑦层土, 采用水土分算更合适。

开挖后, 土压力的实测值在浅部与水土合算的朗肯土压力一致, 在深部介于水土合算和水土分算之间, 与开挖前的规律一致。北侧的土压力监测值在深部远大于东、西两侧, 是因为后期非卸荷侧地表沉降过大, 影响了附近箱涵的正常运营, 采用坑外跟踪注浆的方式控制沉降, 过大的注浆压力对测点产生了挤压, 土压力出现了增大趋势。图 11 (b) 中同时给出了采用 Terzaghi 等<sup>[12]</sup>方法反算的表观土压力分布。在东西方向, 表观土压力在浅部小于实测值, 而在深部与实测值吻合度较高; 对于 TY2 的监测结果, 表观土压力大于实测结果。

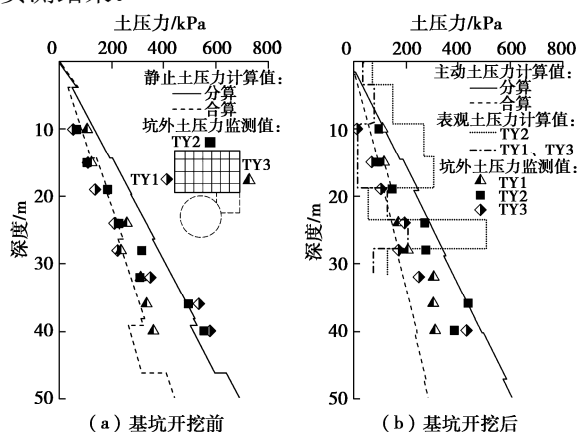


图 11 土压力实测值

Fig. 11 Monitoring results of earth pressure

#### (2) 土压力的演变规律

为进一步分析土压力在开挖过程中的发展趋势, 图 12 (a) 统计了 3 个测孔在 28 m 深度处的实测土压力增量时程曲线。图中灰色阴影填充区间表示土方开挖阶段; 在该区间内, 土压力快速减小, 表明开挖卸荷直接导致了土压力的下降。图中未填充部分表示支撑施作阶段; 在该区间, 土压力缓慢减小, 且会出现波动现象, 这是孔隙水压力消散和地下连续墙侧移综合作用的结果。

在前两层土方开挖阶段, 3 个测孔的土压力变化

趋势基本一致; 但在第三层土方开挖阶段, TY2 (非卸荷侧) 处的土压力快速减小, 这与围护结构的整体向卸荷侧水平位移有关, 同时该阶段此处的墙体侧移也出现快速的发展。因此, 单侧卸荷虽未引起初始土压力的变化, 但会对后续开挖阶段土压力的演变产生影响。后期, 由于北侧地表沉降过大, 影响了附近顶管的正常运营, 采用坑外跟踪注浆的方式控制沉降。过大的注浆压力对墙体产生了挤压, 引起了土压力的快速增大 (图 12 (a))。

经典土力学认为土压力与位移呈非线性关系, 即随着墙体远离土体的位移增大, 土压力不断减小, 并最终达到主动土压力。为此, 统计了 3 个测孔在 28 m 处的土压力增量与墙体位移的关系, 如图 12 (b) 所示。随着墙体侧移的增大, 土压力非线性减小, 且在侧移小于 20 mm 时快速减小, 而后逐渐趋于稳定。

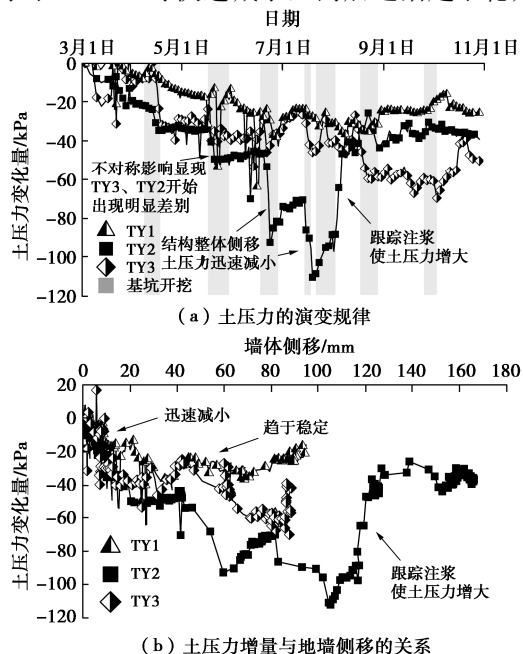


图 12 土压力的监测结果

Fig. 12 Monitoring results of earth pressure

### 3.3 单侧卸荷对基坑变形特性的影响机制

基于上述分析, 本节从以下 3 个方面初步探讨了单侧卸荷诱发基坑不对称变形 (图 9) 的机制。

(1) 卸荷侧土压力的减小。邻近竖井的预先开挖改变了卸荷侧土压力的分布模式, 如图 13 所示。

当新建基坑深度小于  $H_1$  时, 邻近竖井位于墙后土体滑裂面之外, 对新建基坑几乎无影响。当深度介于  $H_1$  与  $H_2$  之间时, 墙后土体滑裂面通过竖井, 卸荷侧产生有限土压力, 土压力沿深度不再增大。卸荷侧与非卸荷侧土压力分布出现了差异, 两侧土压力出现不平衡。当深度大于  $H_2$  时, 邻近竖井全部位于墙后土体滑裂面之内, 竖井卸荷仅影响局部土压力分布, 随深度增加土压力恢复至常规土压力分布。

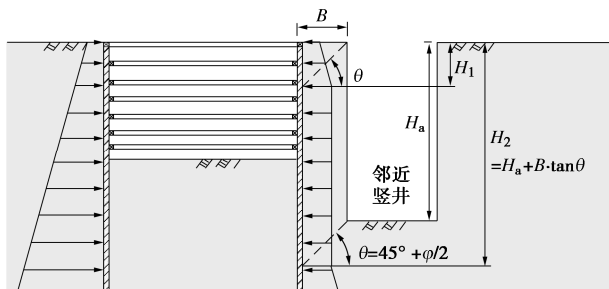


图 13 单侧卸荷对基坑土压力的影响机制示意图

Fig. 13 Influence mechanism of one-side unloading on earth pressure

对于依托基坑, 其最终开挖深度为 34.3 m, 邻近圆形竖井深 58.65 m, 考虑竖井与依托基坑的等效间距  $B=5.98$  m 和地层平均摩擦角  $\varphi=25.54^\circ$ , 得到  $H_1=9.49$  m,  $H_2=68.14$  m, 因此, 在开挖前两个工况 (13 m), 单侧卸荷对变形几乎无影响, 而后出现较大差异, 如图 5, 9 所示。

(2) 围护结构的整体水平位移。挖深处于  $H_1$  与  $H_2$  之间范围内时, 在不平衡土压力作用下, 围护结构整体向卸荷侧位移  $\Delta$  (图 14), 使得卸荷侧墙体挤压墙后土体, 土压力增大, 非卸荷侧远离墙后土体, 土压力减小, 以实现两侧土压力的平衡。同时, 由于位移  $\Delta$ , 卸荷侧墙体的侧移值减小, 并出现回弹现象, 而非卸荷侧墙体侧移快速增大 (图 4)。

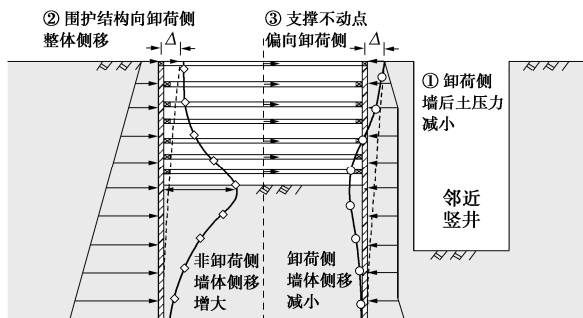


图 14 单侧卸荷对基坑变形特性的影响机制示意图

Fig. 14 Influence mechanism of one-side unloading on deformation characteristics of excavation

图 15 是两侧墙体 15 m 深度处的水平位移及其向坑内挤压量的演变曲线 (以向卸荷侧位移为正)。施工前期, 两侧墙体均发生向坑内位移, 且位移逐渐增大。施工中期, 非卸荷侧墙体侧移继续增大, 而卸荷侧侧移减小, 发生回弹, 且其侧移减小趋势与非卸荷墙体侧移的增大趋势基本平行; 同时, 两侧墙体向内挤压量几乎不变, 这表明两侧墙体出现了整体向卸荷侧移动的趋势, 即整体水平位移。

(3) 支撑体系等效刚度的不对称变化。基坑设计计算时通常假设支撑不动点位于支撑中点, 而存在单侧卸荷时, 由于围护结构的整体水平位移, 支撑不动点偏向卸荷侧 (图 14), 这将导致支撑对两侧地连墙的等效刚度发生不对称变化。

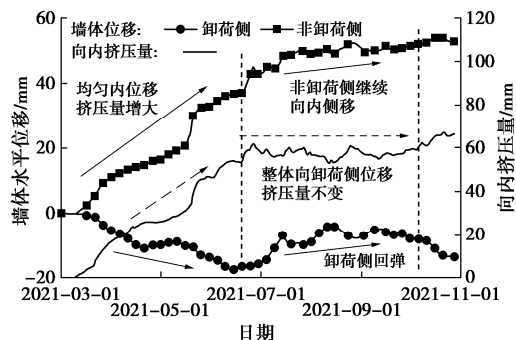


图 15 墙体水平位移与向内挤压量演变曲线

Fig. 15 Evolution curves of horizontal displacement and inward compression of wall

按图 1 所示支撑的布置形式建立二维有限元模型, 计算支撑不动点由中点逐渐移动至卸荷侧时的支撑体系等效刚度。图 16 给出了以不动点位于中点工况的计算值进行归一化后的结果 ( $L$  为支撑长度)。随着不动点向卸荷侧偏移, 卸荷侧支撑等效刚度非线性增大, 而非卸荷侧的支撑刚度非线性降低。这将抑制卸荷侧的位移, 而加剧非卸荷侧的侧移。

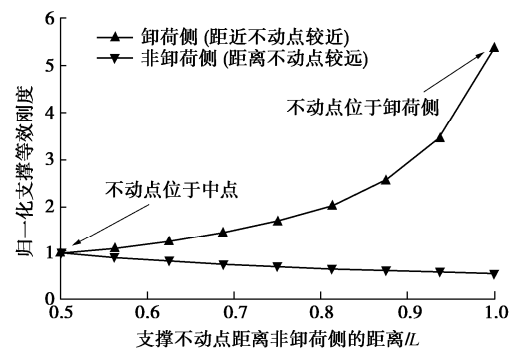


图 16 支撑等效刚度与不动点位置的关系

Fig. 16 Relationship between equivalent stiffness of supports and position of fixed points

综上所述, 单侧卸荷引起的卸荷侧土压力减小导致了卸荷侧墙体侧移的减小和围护结构的整体水平位移; 而整体水平位移又进一步导致了卸荷侧墙体的侧移减小和非卸荷侧墙体的侧移增大, 同时引起支撑体系等效支撑刚度在卸荷侧增大, 而在非卸荷侧减小, 进一步加剧了上述影响。

## 4 结 论

本文通过对上海某单侧卸荷 34.3 m 深基坑的实测分析, 总结了单侧卸荷引起的深基坑不对称变形特性, 并探讨了其发生机制, 得到以下 2 点结论。

(1) 单侧卸荷导致了深基坑的不对称变形; 其中, 卸荷侧变形减小, 非卸荷侧变形增大, 但地下连续墙“鼓肚形”侧移模式和“凹槽形”地表沉降槽形式不会发生改变。依托工程卸荷侧的最大侧移为  $0.81\%H_c$ , 仅为非卸荷侧  $5.72\%H_c$  的  $1/7$  左右; 非卸荷侧的最大地表沉降比  $B-B$  断面最大沉降增大 116.8%。

(2)单侧卸荷诱发深基坑的不对称变形特性是单侧卸荷导致的土压力不平衡、围护结构整体水平位移和支撑体系等效刚度不对称变化三者综合作用的结果,其中主导因素是单侧卸荷导致的卸荷侧土压力减小。

在类似存在单侧卸荷的深基坑工程的设计和施工过程中,应充分考虑基坑的不对称变形特性。建议对卸荷侧土体加固,抑制围护结构的整体水平位移现象;在基坑设计计算时应合理评估支撑体系的不动点位置,采用卸荷侧增大、非卸荷侧降低的支撑等效刚度,进而确定合适的监测预警指标,防止非卸荷侧因计算采用的等效支撑刚度偏大而得到偏小的预警值,导致工程频繁报警、影响工期的现象。

### 参考文献:

- [1] 王卫东,徐中华,王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1659-1666. (WANG Weidong, XU Zhonghua, WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1659-1666. (in Chinese))
- [2] 万星,戈铭,贺智江,等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 1): 85-88. (WAN Xing, GE Ming, HE Zhijiang, et al. Characteristics of deformation of retaining wall due to deep excavation in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 85-88. (in Chinese))
- [3] 丁智,王达,王金艳,等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 506-512. (DING Zhi, WANG Da, WANG Jinyan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 506-512. (in Chinese))
- [4] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: bottom-up construction of the central cylindrical shaft[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(11): 1875-1893.
- [5] 吴昌将,孙召花,赖允瑾,等. 软土地区地下连续墙深大基坑的变形性状研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 245-253. (WU Changjiang, SUN Zhaozhua, LAI Yunjin, et al. Study of deformation characteristics of diaphragm wall induced by deep large excavation in soft soil region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 245-253. (in Chinese))
- [6] 胡敏云,寿树德,袁静,等. 软土相邻基坑支护结构受力影响特征及机理研究[J]. 浙江工业大学学报, 2022, **50**(1): 111-118. (HU Minyun, SHOU Shude, YUAN Jing, et al. Study on influence of excavation process of adjacent foundation pits[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, **50**(1): 111-118. (in Chinese))
- [7] 黄开勇. 软土地区相邻深大基坑同步施工设计实践[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(增刊 2): 743-750. (HUANG Kaiyong. Design application of adjacent large-scale deep excavations constructed simultaneously in soft soil area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(S2): 743-750. (in Chinese))
- [8] 朱炎兵,周小华,魏仕锋,等. 临近既有地铁车站的基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(10): 2997-3002. (ZHU Yanbing, ZHOU Xiaohua, WEI Shifeng, et al. Investigation on deformation behaviors of foundation pit adjacent to existing metro stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(10): 2997-3002. (in Chinese))
- [9] 岳树桥,左人宇,陆钊. 相邻基坑有限宽度土条主动土压力的计算[J]. 岩土力学, 2016, **37**(7): 2063-2069. (YUE Shuqiao, ZUO Renyu, LU Zhao. A method for calculating active earth pressure of soil piece with a finite width between adjacent foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 2063-2069. (in Chinese))
- [10] 乔亚飞,丁文其,王军,等. 无锡地区地铁车站深基坑变形特性[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 1): 761-766. (QIAO Yafei, DING Wenqi, WANG Jun, et al. Deformation characteristics of deep excavations for metro stations in Wuxi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 761-766. (in Chinese))
- [11] 程康,徐日庆,应宏伟,等. 杭州软黏土地区某 30.2m 深大基坑开挖性状实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(4): 851-863. (CHENG Kang, XU Riqing, YING Hongwei, et al. Performance analysis of a 30.2m deep-large excavation in Hangzhou soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(4): 851-863. (in Chinese))
- [12] HARAHA S E, OU C Y. Finite element analysis of time-dependent behavior in deep excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **119**: 103300.
- [13] 张有桔,丁文其,刘学增,等. 不对称水压下基坑围护内力及变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 107-112. (ZHANG Youjie, DING Wenqi, LIU Xuezheng, et al. Internal force and deformation of deep foundation pit under asymmetric water pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 107-112. (in Chinese))
- [14] TERZAGHI K, PECK R B. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. 2d ed. New York: Wiley, 1967.