

# 佛山东平广场坑边逆作深基坑变形数值分析

白成生

(佛山市建筑工程质量监督站, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 基坑坑边逆作时内部结构尚未构成整体, 所能提供的抗侧力是影响基坑变形的关键因素。结合佛山东平广场深基坑坑边逆作的初步设计, 并考虑深厚软土的力学特性, 采用硬化土(HS)材料, 建立三维有限元模型, 分析并对比了坑内抗侧墙为1排、2排、3排及简化逆作楼板外侧端部固支等4种情况下基坑的变形及抗侧墙的应力分布。结果表明, 与1排抗侧墙相比, 采用2排、3排抗侧墙时, 连续墙水平位移及墙后地面沉降可减小约20%、30%, 而简化各层逆作楼板末端为固支, 计算得出的连续墙侧移及地面沉降明显偏小, 增加了工程的风险。根据计算结果, 对深化设计提出了一些建议。

**关键词:** 坑边逆作法; 抗侧墙; 变形; 应力分布; 硬化土模型; 有限元

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0139-06

**作者简介:** 白成生(1973-), 男, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师, 从事建筑工程质量监督方面的工作。E-mail: baichengsheng@yahoo.com.cn。

## Numerical analysis of deformation of excavation of Foshan Dongping Plaza using edge top-down construction method

BAI Cheng-sheng

(Foshan Construction Engineering Quality Supervision Station, Foshan 528000, China)

**Abstract:** For the deformation of excavations using the edge top-down construction method, the resisting lateral force provided by the inner structure is the key factor during the construction period. Combined with a practical project, a 3D finite element model is simulated and analyzed. Considering the mechanical properties of deep soft soils, the hardening-soil (HS) model is used. The deformation, ground settlement and stress distribution of the resisting lateral walls are analyzed and compared under four cases: the inner resisting lateral walls for one, two, three rows and the top-down floors fixed support at the end. The results show that compared with those of one row of the resisting lateral walls, the horizontal displacement of diaphragm wall and the settlement of ground with two and three rows of resisting lateral walls can be reduced by approximately 20% and 30%, and they are obviously smaller in the case of the top-down floors fixed support at the end, which increases the risk of engineering. According to the calculated results, some suggestions are given to optimize the design.

**Key words:** edge top-down construction method; resisting lateral wall; deformation; stress distribution; HS model; FEM

## 0 引言

逆作法是近年来新兴的基坑施工技术, 它在减小围护结构变形, 缩短施工工期等方面有明显的优势。其中坑边逆作法采用坑边逆作, 中央顺作的形式, 既保留了逆作法的优点, 又解决了逆作法出土困难的不足, 在大型基坑工程中应用较为广泛。一些学者<sup>[1-4]</sup>分别介绍了坑边逆作法在厦门、上海等地成功应用的经验。钱川国等<sup>[5]</sup>、王旭军<sup>[6]</sup>针对逆作法工程采用平面有限元法分析了围护墙的变形, 得出一些具有参考价值的结论。上述文献对实际工程具有指导意义, 但坑边逆作法作为一种特殊的施工工艺, 其设计理论尚

不成熟。逆作区域的地下结构和围护墙共同构成格构式挡土体系, 如简化为杆系或者平面有限元模型, 则需要对结构做过多的折算, 必然影响结果的可靠性。另外, 坑内地下结构的跨数对于抗侧变形的贡献, 尚未见到有关研究的文献。本文以佛山东平广场深基坑坑边逆作法施工的初步设计为例, 采用三维有限元模拟施工过程, 分析对比当坑内抗侧墙为1排、2排、3排以及忽略抗侧墙, 简化逆作楼板末端为固定约束等4种情况下, 连续墙和抗侧墙的变形, 墙后地面沉降

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

层序	层厚 H/m	重度 $\gamma$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c'$ /kPa	内摩擦角 $\varphi'$ / $^{\circ}$	压缩模量 $E_s$ /MPa	孔隙比 $e_0$	泊松比 $\nu$	静力触探 $p_s$ /MPa	渗透系数 $K_s$ /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
①砂性素填土	3.0	17.8	2	22	4.0	0.73	0.40	3.25	$4.34 \times 10^{-4}$
②-2 淤泥质土	2.6	17.4	8.4	21.1	2.5	1.47	0.43	0.5	$1.5 \times 10^{-6}$
②-6 淤泥	20.4	16.4	18.1	10.1	2.0	1.69	0.45	0.6	$9.5 \times 10^{-7}$
④-1 强风化泥岩	2.3	20.0	100	25	50	0.88	0.28	9.93	$5.5 \times 10^{-7}$
④-2 中风化泥岩	—	22.0	200	26	1500*	—	0.25	—	—

注: 标★为弹性模量。

及抗侧墙的应力分布, 为深化设计和指导施工提供参考依据。

## 1 工程概况

### 1.1 周边环境条件

佛山东平广场位于乐从镇文化南路与裕和路交汇处东南侧, 占地面积约  $300 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ , 拟建大底盘多塔超高层建筑, 地下4层, 基坑开挖深度  $18.3 \sim 19.8 \text{ m}$ , 面积  $51565 \text{ m}^2$ , 周长  $891 \text{ m}$ 。场地处于珠江三角洲冲积平原, 属河口三角洲堆积地貌, 原为鱼塘、耕地, 已填土平整。场地东北侧为裕和路, 西侧为文化路, 南侧及东侧为空地, 交通条件较好。

### 1.2 工程地质与水文地质条件

根据钻探揭露的情况, 场地土层主要由人工填土①、冲积土②、第四系残积层③(分布较少)、白垩系上统沉积岩层④组成。场地代表性土层分布及物理力学指标如表1所示。

地表下为上层滞水, 接受大气降水和地表水补给, 水位受季节影响, 其中人工填土①为中等透水层, 其余各层为微~极微透水性。基岩裂隙水赋存于岩层裂隙中, 有上覆土层空隙水下渗补给, 含水程度受裂隙发育程度及补给条件控制, 据钻孔揭露, 裂隙含水贫乏。勘察时, 地下水位在  $1.5 \sim 2.5 \text{ m}$  之间。

## 2 支护方案

### 2.1 支护方案的选择

由于基坑面积大, 临近市政道路, 道路下方均有综合管沟, 预应力锚杆等传统的施工方法难以满足基坑施工和支护结构变形的要求, 且对后续的地铁和轻轨施工造成不便。经综合考虑场地条件、周边环境及开发建设次序等因素, 基坑工程采用顺逆结合的施工工艺, 即基坑上部  $2 \sim 3 \text{ m}$  天然放坡或喷锚网放坡, 下面采用连续墙维护, 中间制作中心岛, 周边部分采用逆作部分采用内支撑顺作, 这种支护方式整体性强, 止水效果好, 支撑刚度大, 对周边环境影响小, 可分区施工, 满足分期建设投资的需要。基坑支护平面图如图1所示。

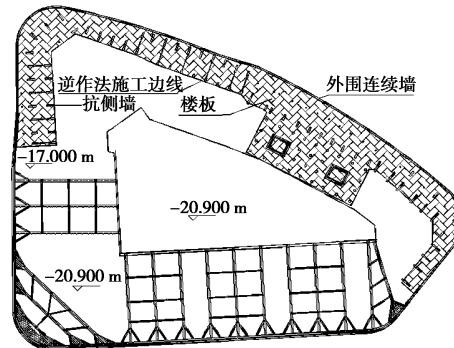


图 1 基坑支护平面图

Fig. 1 Plan of excavation

### 2.2 坑边逆作区剖面设计

本区淤泥层深度普遍超过  $10 \text{ m}$ , 坑边逆作的时候, 中心岛地下结构还没有形成。挖土时地下连续墙通过楼板支撑, 楼板的另外一端支撑在抗侧墙上。抗侧墙和围护连续墙成正交, 宽度为  $1 \text{ m}$ , 第1排长度为  $7 \text{ m}$ , 第2排、第3排长度为  $4 \text{ m}$ , 纵横间距根据地下柱网布置。抗侧墙兼作地下室的结构剪力墙, 要求进入中风化岩层不少于  $8 \text{ m}$ , 且墙高不小于  $22 \text{ m}$ 。外围连续墙兼作地下室外墙, 设计厚度为  $1 \text{ m}$ , 墙高及入岩根据不同剖面提出要求。逆作各层楼板的厚度为  $0.5 \text{ m}$ 。为了减少连续墙的变形, 被动区部分土体采用水泥土搅拌桩加固。典型的剖面结构如图2所示。

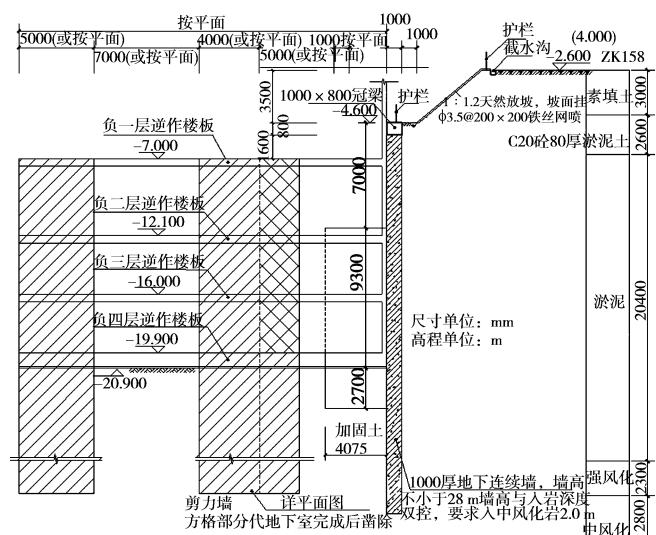


图 2 典型的剖面结构图

Fig. 2 Typical profile and layout of supporting structures

### 2.3 基坑施工顺序

基坑整体上划分为4个阶段施工。阶段1：做地下连续墙、抗侧墙和立柱桩，坑内及地下连续墙外卸载区土方普遍挖至-2.0~ -2.5 m，被动区土体加固。阶段2：从逆作区的对侧开始放坡分层开挖，直至中心岛和逆作区开挖到基坑底，其中逆作区逆作施工完成各层结构楼板。阶段3：中心岛区顺作地下各层结构，逆作区楼板和中心岛楼板连接。阶段4：放坡区采用内支撑法开挖至基坑底，顺作地下结构。各施工阶段示意图见图3。

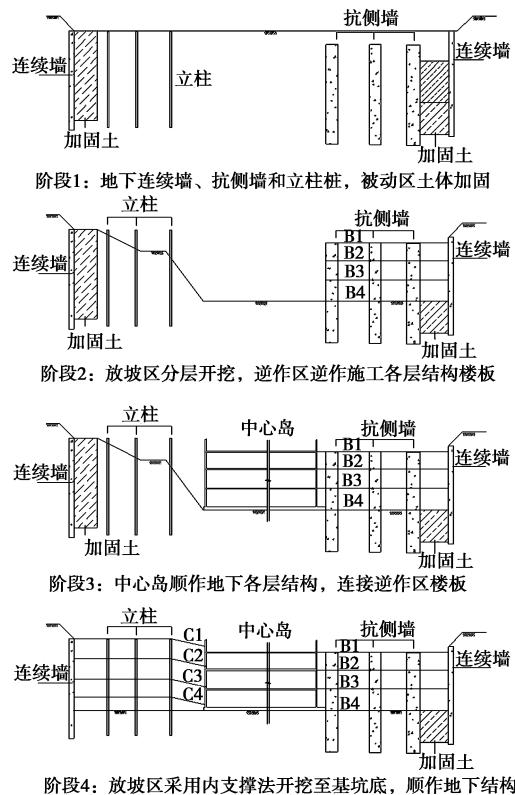


图3 施工工序图

Fig. 3 Construction stages

## 3 逆作区施工模拟

### 3.1 模拟对象

逆作区域的地下结构和围护墙共同构成格构式挡土体系，其内部结构的抗侧能力对于基坑的变形至关重要。为了分析不同结构跨数对变形的影响，模拟共设定了4种情况，分别为：情况a，抗侧墙只有1排（图4 (a)）；情况b，抗侧墙有2排（图4 (b)）；情况c，抗侧墙有3排（图4 (c)）；情况d，忽略抗侧墙，假定各层逆作楼板末端受到水平和竖向约束（图4 (d)）。

为了便于描述，把各种情况的抗侧墙也分别编号为ka、kb1、kb2、kc1、kc2、kc3，共6个，见图4。

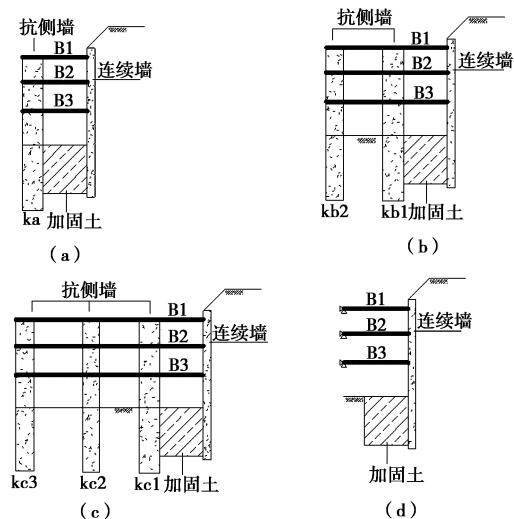


图4 模拟的4种情况

Fig. 4 Simulation of 4 cases

### 3.2 模型大小及参数选取

#### (1) 模型及参数选取

由于支护结构的独特性，如简化为平面有限元模型，必然要做较多的折算和假定，会影响结果的精确性。文中采用Zsoil-pc 2011三维有限元程序对开挖过程进行分析，为了使结果具有可比性，统一截取图2剖面所处的场地为分析对象。土体的计算范围在连续墙外侧取开挖深度的5倍，约80 m，高度为40 m，宽度26 m，基坑内侧根据不同情况取相应的计算宽度。对位移边界条件做假设：四周限制侧向位移，底部同时限制水平和垂直位移。

为了合理减少基坑底部回弹对抗侧墙竖向变形的影响，应考虑土体的卸荷模量，且珠江三角洲地区软土是一种典型的硬化型材料<sup>[7]</sup>，故采用硬化土模型(HS)。该模型是基于有效应力指标建立的，本文采用土体的有效应力参数进行计算， $c'$ 、 $\phi'$ 值分别采用三轴CU试验参数 $c'_{cu}$ 和 $\phi'_{cu}$ ，土体的其他基本参数按照本场地的岩土工程勘察报告取用。中风化岩岩层完整，厚度大，且距基坑底覆土较厚，假定为弹性材料。加固土参数根据经验取值， $c'=120$  kPa， $\phi'=27^\circ$ 。各土层HS模型所需参数见表2。

表2 土层HS力学参数

Table 2 HS mechanical parameters of soil layers

层序	$E_{ur}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{50}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{oed}^{\text{ref}}$ /MPa	$P_{c0}^{\text{min}}$ /kPa	$m$	$V_{ur}$
①	24	8.0	8.0	10	0.6	0.20
②-2	21	6.8	6.8	47.6	0.90	0.25
②-6	17.1	5.7	5.7	63	0.95	0.25
④-1	450	150	150	200	0.5	0.20
加固土	360	120	120	10	0.5	0.20

地下连续墙和各层逆作楼板材料为C30钢筋混凝土，采用one layer shell弹性单元模拟，弹性模量 $E=30$

GPa；抗侧墙材料为 C35 钢筋混凝土，采用 3D shell 弹性单元模拟，弹性模量  $E=31.5$  GP。所截取计算剖面中连续墙和抗侧墙墙高分别为 29.8 m 和 33.7 m，抗侧墙布置为  $9\text{ m} \times 8\text{ m}$ ，纵横向数量为  $3 \times N$  ( $N$  为在基坑内的排数， $N=1, 2, 3$ )。其中  $N=3$  排抗侧墙建立的有限元模型如图 5 所示。

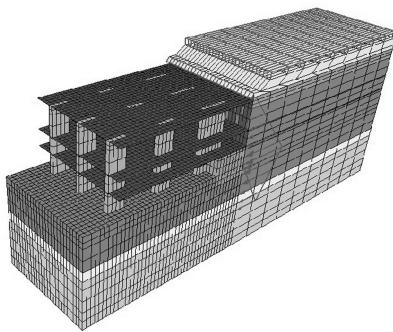


图 5 有限元模型

Fig. 5 FEM model

## (2) 地下水及地面荷载

根据勘察报告，地下水位取地表下 2.0 m。考虑到施工周期较长，作用于围护墙上的水压力参照上海市基坑工程技术规范<sup>[8]</sup>推荐的稳态渗流计算方法，水压通过以时间为自变量的 load 函数施加，可以体现随基坑内土体的开挖，作用于围护墙外的压力逐渐增大的特性。地面超载按常规取 20 kPa。

## 3.3 计算工况

根据实际情况，划分为 5 个工况：

工况 1：坑内及地下连续墙外卸载区土方普遍挖至-2.0 m，并已做好地下连续墙和抗侧墙，坑内被动区土体加固；

工况 2：挖土至-4.9 m；

工况 3：施做负一层楼板(B1)，并挖土至-10.0 m；

工况 4：施做负二层楼板(B2)，并挖土至-13.9 m；

工况 5：施做负三层楼板(B3)，并挖土至-18.3 m。

## 4 计算结果分析

### 4.1 连续墙水平位移

各情况下地下连续墙在工况 5 时的水平位移如图 6 所示。

从图中可以看出，a、b、c 三种情况墙体最大水平位移均发生在墙顶端，墙底端基本没有发生位移，位移曲线近似线性。说明墙体嵌固深度满足要求，变形类似于悬臂式支挡结构。曲线 d 则明显与曲线 a、曲线 b、曲线 c 不同，墙体最大侧移没有出现在顶端，而是在墙体中部基坑开挖面以上，符合典型的深厚软土中内支撑开挖基坑变形的规律。a、b、c、d 墙体最大水平位移分别为：81.3, 65.7, 56.6, 35.4 mm，相

对于基坑开挖深度 (16.3 m, 从连续墙墙顶算起) 为 4.99%, 4.03%, 3.47%, 2.17%。b、c、d 墙体最大水平位移分别为 a 的 80.8%、69.6%、43.5%。可见，增加抗侧墙的排数可明显减少围护墙体的侧向位移，这是因为随着抗侧墙排数的增加，其整体抗侧刚度随之增加，所提供的抗侧力增大。同时也可以看出，抗侧墙的增加有合理的排数，当超出后，对于抗侧刚度的增加，连续墙的侧向位移趋于收敛，即情况 d。总的来说，a、b、c 情况下墙顶水平位移比较大，建议加设临时支撑。

需要指出的是，对于情况 d，其假定逆作楼板末端为固定端，即连续墙的水平向为刚性铰支撑，这与坑边逆作施工工艺不符，以此计算出来的连续墙侧向变形偏小，增加了工程的风险。

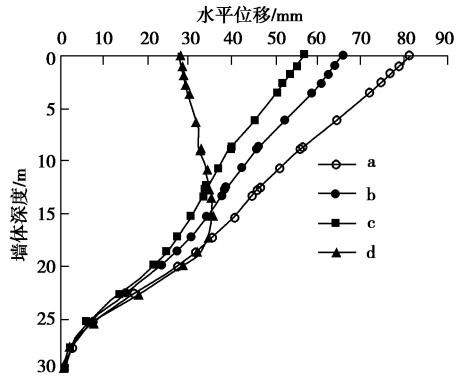


图 6 连续墙水平位移

Fig. 6 Lateral displacements of diaphragm walls

### 4.2 抗侧墙水平位移

各情况下抗侧墙在工况 5 时的水平位移如图 7 所示。

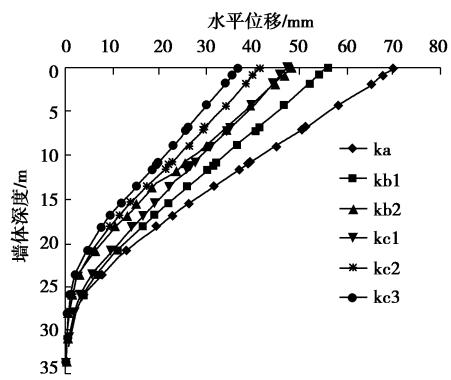


图 7 抗侧墙水平位移

Fig. 7 Lateral displacements of resisting lateral walls

最大水平位移分别为：70.2 mm (ka)、55.9 mm (kb1)、48.5 mm (kb2)、47.3 mm (kc1)、41.6 mm (kc2)、36.7 mm (kc3)，可以看出，随着抗侧墙排数的增加，位移逐渐减小，其中 kb1、kc1 的位移分别为 ka 的 79.6%、67.4%。而且，对于同一种情况，靠近

连续墙的抗侧墙位移较大, 远离则小, 如  $kc2$ 、 $kc3$  的位移分别为  $kc1$  的 87.9%、77.6%。从图中也可以看出, 各抗侧墙水平位移单向增加, 且最大位移均发生在顶部, 说明抗侧墙作为悬臂构件承受水平推力。和图 6 中 a、b、c 连续墙水平位移相比较, 可以推断, 抗侧墙、楼板、连续墙组成的格构式支挡体系, 整体上类似于悬臂式支挡结构, 表现为绕最内侧抗侧墙趾向坑内转动的性状。

#### 4.3 抗侧墙压应力

工况 5 完成后, 各情况下抗侧墙的压应力如图 8。

可以看出, 随着抗侧墙排数增加, 压应力逐渐减小, 其中  $kb1$ 、 $bc1$  的应力分别为  $ka$  的 80.6%、68.7%。就同一种情况而言, 越远离坑壁抗侧墙压应力越小, 如  $kc2$ 、 $kc3$  的应力分别为  $kc1$  的 64.1%、56.6%。这个规律和抗侧墙的水平位移向一致, 说明各抗侧墙受水平力不均衡, 靠近坑壁的受力较大。

从计算结果看,  $ka$ 、 $kb1$  最大压应力大于 C35 混凝土的抗压强度设计值 16.7 MPa, 建议把混凝土强度提高两个等级, 达到 C45 或以上。

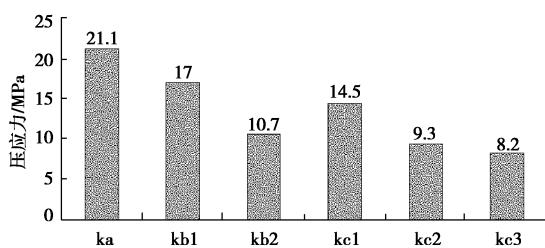


图 8 抗侧墙压应力

Fig. 8 Compressive stress of resisting lateral walls

#### 4.4 地面沉降

基坑开挖到底后地面沉降见图 9。a、b、c、d 的最大沉降量依次为 52.2, 41.7, 35.8, 29.0 mm, b、c、d 最大沉降量分别为 a 的 79.9%、68.6%、55.6%。可见, 和连续墙的变形规律一样, 增加基坑内抗侧墙的排数可明显减小墙后地面沉降, 并最终收敛于情况 d。作为简化处理, 情况 d 未考虑抗侧墙的弱化, 计算得

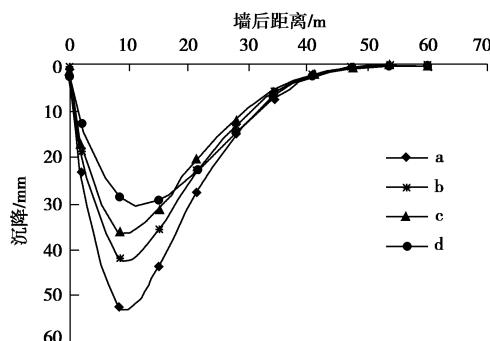


图 9 地面沉降

Fig. 9 Curves of ground settlement

到的地面沉降偏小, 增加了工程的风险。另外也可以看出, 墙后距离超过 45 m 后, 地面沉降已不明显, 这个距离大约是开挖深度的 2.5 倍。

## 5 结 论

通过对东平广场深基坑坑边逆作几种剖面形式的数值模拟和对比分析, 可以得到以下结论:

(1) 坑边逆作施工过程中, 内部结构在水平向尚未构成整体, 所能提供的抗侧力有限, 抗侧墙、楼板、连续墙组成的格构式支挡体系, 整体上类似于悬臂式支挡结构, 表现为绕最内侧抗侧墙趾向坑内转动的性状。

(2) 基坑内增加抗侧墙的排数, 可明显减小连续墙的侧移和墙后地面沉降。和 1 排抗侧墙相比, 当采用 2 排、3 排抗侧墙时, 连续墙水平位移及墙后沉降可减小约 20%、30%。总的来说, 墙顶水平位移比较大, 建议加设临时支撑。如果忽略抗侧墙的弱化, 简化各层逆作楼板末端为固支, 计算得出的连续墙侧移及地面沉降偏小, 增加了工程的风险。

(3) 随着抗侧墙排数增加, 压应力逐渐减小, 靠近坑壁的抗侧墙压应力较大。根据计算结果, 建议靠近坑壁的一排抗侧墙混凝土强度提高到 C45 或以上。

## 参 考 文 献:

- [1] 李斯海, 张自然, 丁毅深. 大基坑顺作/逆作复合工法在厦门市某基坑的应用[J]. 福建建设科技, 2011(6): 1 - 4. (LI Si-hai, ZHANG Zi-ran, DING Yi-shen. The application of normal and reverse compound construction in deep excavation in Xiamen[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2011(6): 1 - 4. (in Chinese))
- [2] 郑信荣, 王飞飞. 大型深基坑顺、逆作结合施工技术[J]. 建筑施工, 2011, 33(4): 256 - 258. (ZHENG Xin-rong, WANG Fei-fei. Construction technology for large foundation pit with combination of normal and reversed construction method[J]. Building Construction, 2011, 33(4): 256 - 258. (in Chinese))
- [3] 李 伟. 顺逆结合的施工技术在地铁车站十字换乘段工程中的应用[J]. 建筑施工, 2010, 32(4): 297 - 299. (LI Wei. Ordinal and reversed construction technology applied to cross transfer section in metro station project[J]. Building Construction, 2010, 32(4): 297 - 299. (in Chinese))
- [4] 徐 军. 集合“顺作”与“逆作”优点的“半逆作”法工艺设计及施工探讨[J]. 建筑施工, 2004, 26(4): 286 - 288. (XU Jun. Study of design and construction with semi-reversed construction method combined with advantages of normal and reversed construction method[J].)

- Building Construction, 2004, **26**(4): 286 – 288. (in Chinese))
- [5] 钱川国, 庄剑锋, 王志国. “半顺半逆作法”基坑开挖施工过程的有限元分析[J]. 建筑施工, 2006, **28**(11): 866 – 868. (QIAN Chuan-guo, ZHUANG Jian-feng, WANG Zhi-guo. Finite element analysis of foundation pit excavation processes with “semi normal and semi reversed construction method[J]. Building Construction, 2006, **28**(11): 866 – 868. (in Chinese))
- [6] 王旭军. 上海中心大厦裙房深大基坑工程围护墙变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(2): 421 – 431. (WANG Xu-jun. Analysis of retaining wall deformation for deep and big foundation pits of podium in Shanghai tower[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 421 – 431. (in Chinese))
- [7] 杜建成, 张利民. 广州地区软土应力应变特性研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1997, **1**(1): 24 – 28. (DU Jian-cheng, ZHANG Li-min. Study on the stress – strain behavior of soft clay of Guangzhou[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science Edition), 1997, **1**(1): 24 – 28. (in Chinese))
- [8] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. Shanghai: Shanghai Urban Construction and Communications Commission, 2010. (in Chinese))

(本文责编 明经平)