

# 富水砂层中连续墙成槽与周边建筑物相互影响数值分析

张跃明

(广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

**摘要:** 针对在建筑物密集区的富水砂层中进行连续墙成槽的情况, 选取周边典型的的不同种类基础的建筑物, 采用有限元数值分析软件, 建立模型, 用专门针对连续墙成槽的泥浆模拟模块模拟成槽的过程。根据计算结果, 分析不同种类建筑物对槽壁变形和稳定性的影响和成槽过程对周边各类建筑物基础变形、受力的影响, 同时分析采取加固措施后的效果, 得出规律性的认识。

**关键词:** 地下连续墙; 成槽; 富水砂层; 临近建筑物

**中图分类号:** TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0182-08

**作者简介:** 张跃明(1982-), 男, 河南洛阳人, 毕业于同济大学地下系, 硕士, 工程师, 主要从事地下工程等方面的工作。E-mail: zhangyueming@dtjy.com。

## Numerical simulation of mutual influence of surrounding buildings and diaphragm wall trench construction in water-rich sand stratum

ZHANG Yue-ming

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** According to different surrounding building conditions, the forming process of diaphragm wall trench construction in water-rich sand stratum is analyzed by means of the method of finite element numerical simulation. In the process, the module of simulating mud is used. According to the calculated results, the mutual influence of different buildings and diaphragm wall trench construction is investigated. The effects of reinforcement measures are also analyzed, and the relevant rules are obtained.

**Key words:** diaphragm wall; trench construction; water-rich sand stratum; surrounding building

## 0 引言

城市中连续墙成槽施工除了满足槽壁自身的强度和稳定性的要求, 还要满足周边环境的变形控制要求, 以减小对临近建(构)筑物的影响。前者主要是保证在进行连续墙成槽时采取合理的措施, 以保证成槽施工过程中的安全, 后者要考虑因成槽导致地层过大变形导致临近建(构)筑物发生过大变形, 从而影响建(构)筑物的安全。若不采取适当的措施加以控制, 将引起临近建(构)筑物的损害, 造成严重的经济损失和巨大的社会影响。因此, 合理地预测和评价连续墙成槽对临近建(构)筑物的影响就显得尤为重要。

连续墙成槽施工时的应力状态变化较为复杂。正常施工状况下, 在稳定的泥浆中成槽, 会使得连续墙单元周围土体的应力状态由原来的  $K_0$  状态改变至稳定的液压平衡状态。由于稳定的泥浆液压与原先沟槽内的水、土压力并不一致, 并且液压通常较小, 因此, 引起连续墙沟槽周围一定范围内的土体的侧向总压力减小, 土体应力重新分配, 从而导致沟槽单元附近的

土体发生侧向变形, 进而导致地表沉降, 当连续墙周围存在建(构)筑物时, 将会导致建(构)筑物的沉降<sup>[1]</sup>。

连续墙成槽施工引起的地表沉降和临近建筑物沉降已经引起工程界的关注, 但由于开挖过程复杂, 且实测资料较少, 相关研究成果也较少。

Cowland 和 Thorley<sup>[2]</sup>的研究表明, 连续墙槽段开挖至主体开挖之前阶段的总变形量可高达主体开挖总变形量的 40%~50%。Clough 和 O'Rourke<sup>[3]</sup>根据位于砂土、软一中等硬度黏土及硬到很硬黏土地层中的多个基坑工程案例的沉降观测资料研究发现, 连续墙槽壁开挖引起的最大地表沉降量与沟槽深度的比值可达 0.15%, 地表沉降的影响范围达到两倍左右的沟槽深度。例如, 香港工程实例的连续墙槽壁深度为 37 m, 其产生的地表沉降高达到 50 mm, 其它工程案例的地表沉降一般介于 5~15 mm。

欧章煜<sup>[4]</sup>发现台北捷运工程中单一槽段施工引起

的最大地表沉降约为 0.05% 倍的槽段开挖深度, 沉降影响范围约为 1.0 倍的槽段开挖深度, 最大沉降量约为 10~15 mm。多幅连续墙槽段连续施工引起的最大地表沉降为 0.07% 倍的槽段开挖深度, 沉降的影响范围约为 1.0 倍的槽段开挖深度。

Budge-Reid 等<sup>[5]</sup>统计了香港地铁港岛线由连续墙成槽施工引起的建筑物沉降, 表明连续墙成槽施工引起的建筑物沉降与建筑的基础埋深存在一定的关系。建筑物的基础埋深越浅, 受连续墙成槽施工引起的建筑物沉降越大, 反之则越小。

本文以南昌地铁一号线土建五标子固路站、子固路-八一馆站明挖区间、八一馆站基坑项目为依托, 计算车站、明挖区间连续墙成槽稳定及对周边建筑结构产生的影响, 采取保护措施的效果等, 进行深入分析研究, 提出可行性建议。

1 工程背景

本项目位于南昌市中心最繁华的商业地带, 车站、明挖区间基坑距离周边建筑物极近, 且基坑开挖深度范围的地层为砾砂、圆砾等, 地下水位在地下 2~5 m, 为典型的富水砂层区。

子固路站基坑长约 201.7 m, 宽约 18.4 m, 深度约为 18.3 m。车站结构采用明挖顺作法施工, 围护结构采用 800 mm 厚连续墙+3 道内支撑的支护形式。

子固路站-八一馆站明挖区间基坑长约 382.5 m, 宽约 11.8~19.4 m, 深度约 16.6~18.3 m。采用明挖顺作法施工, 围护结构采用 800 mm 厚连续墙+3 道支撑的支护形式。

八一馆站基坑长约 167.75 m, 宽约 22.1 m, 深约 23.4 m。采用全盖挖逆作法施工, 围护结构采用 1000 mm 厚连续墙。

2 选取受影响建筑物

本项目范围内受影响建筑物较多, 本文选取具有代表意义的一些建筑进行分析。

选取典型的摩擦桩基类型建筑物, 选取典型的端承桩基类型建筑物, 选取典型的条基、筏基类型建筑物, 计算分析连续墙槽壁稳定和对建筑物基础的影响。

具体选取情况如下:

(1) 选取子固路站东北侧的工商银行宿舍楼(混凝土 23 层) 计算分析, 该建筑有一层地下室, 主体桩为人工挖孔扩底灌注桩, 桩径为 1000~2200 mm, 桩长约为 3.5 m, 围护结构为直径 900 mm 挖孔扩底灌注桩, 桩长约为 10.3 m。主体桩基距连续墙 3.59~4.62 m, 建筑物围护桩距连续墙 2.33~3.54 m, 地下室距连续

墙 3.35~4.50 m。

(2) 选取明挖区间附近的外贸局营业厅, 5 层砖混结构, 基础为条形基础, 基础埋深约为 1.2 m, 建筑物距区间连续墙 6.2~6.47 m。

(3) 选取明挖区间附近的南昌市商厦, 为 9 层混凝土结构, 基础为钻孔灌注桩, 桩径为 480~1200 mm, 桩长为 15.2 m, 建筑物距区间连续墙 5.9~6.8 m。

(4) 选取八一馆站附近的伟业大厦, 为 7 层混凝土结构, 有 1 层地下室, 基础为筏板基础, 埋深约 5 m, 基础底处于粉质黏土层, 距连续墙 3.71~7.86 m。

3 计算软件、模型选取

选取功能强大的岩土分析软件 PLAXIS, 该软件是由荷兰 Delft 研究所开发的有限元计算程序。该程序界面友好, 建模简单, 自动进行网格剖分。土的本构模型有线弹性、莫尔-库仑、软土模型、硬化模型和软土流变等模型, 可以模拟施工步骤, 进行多步计算, 后处理简单方便。

选取弹塑性 Mohr-Coulomb 土体模型, 该模型包括 5 个输入参数, 即: 表示土体弹性的  $E$  和  $\nu$ , 表示土体塑性的  $\varphi$  和  $c$ , 以及剪胀角  $\psi$ 。

受土工数据的限制, 无法使用进一步的高级分析模型, 而用 Mohr-Coulomb 模型来分析是相对较快而且简单的, 也会减小计算结果的误差。

建筑物、连续墙、支撑、桩基用线弹性模型来模拟, 接触面强度折减因子  $R_{inter}$  取 0.72。

4 子固路站槽段开挖影响

4.1 工程地质条件

根据地勘报告, 选取地层参数如表 1 所示。

表 1 子固路站岩土参数表

Table 1 Soil parameters								
地层	层厚 /m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\varphi$ /( $^{\circ}$ )	$c$ /kPa	渗透系数 /( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	变形模量 $E_s$ /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa
① 杂填土	4.8	19	8	10	0.0001	20	0.34	
③ <sub>6</sub> 圆砾	7	21.5	40		110	50	0.3	
③ <sub>6-j</sub> 砾砂	1.9	20.5	38		110	60	0.3	
⑤ <sub>1-1</sub> 强风化泥质粉砂岩	0.7	22	33	38		33	0.28	
⑤ <sub>1-2</sub> 中风化泥质粉砂岩	11.3	24.6	36	293		520	0.25	9.6
⑤ <sub>1-3</sub> 微风化泥质粉砂岩		24.8	39	498		750	0.25	14

4.2 工况设定

由于连续墙周边有大量建筑物存在, 在成槽过程中会对槽壁产生附加的侧压, 槽内泥浆压力抵抗不了水土压力和附加侧压时会失稳, 从而给周边建筑物带来不利影响。

本报告选用 PLAXIS 数值软件对工商银行边的连

续墙成槽稳定进行计算分析,槽内用重度  $11 \text{ kN/m}^3$  的流体来模拟泥浆,生成泥浆压力。

第一步:生成初始应力场,工商银行建筑物施工完成;如图 1 所示。

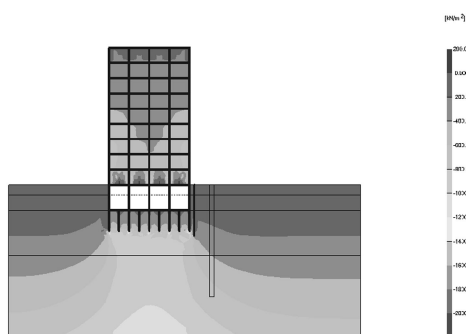


图 1 模型图 (一)

Fig. 1 Model I

第二步:开挖槽段,泥浆护壁,槽壁受泥浆压力作用;如图 2 所示。

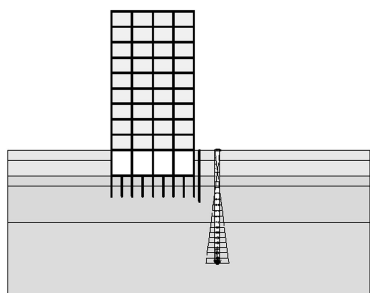


图 2 模型图 (二)

Fig. 2 Model II

#### 4.3 计算结果分析

在槽段开挖过程中,槽壁沿竖向在顶部和中部出现了较大的水平位移(图 3),约有  $18 \text{ mm}$ ,槽壁顶部出现了较大的竖向位移(图 4),约有  $16 \text{ mm}$ 。

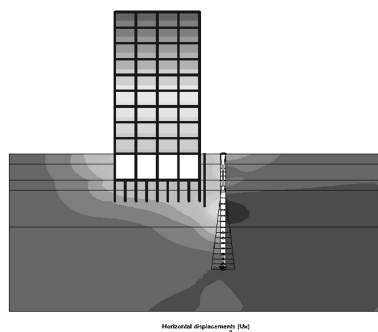


图 3 地层水平位移云图

Fig. 3 Horizontal displacements

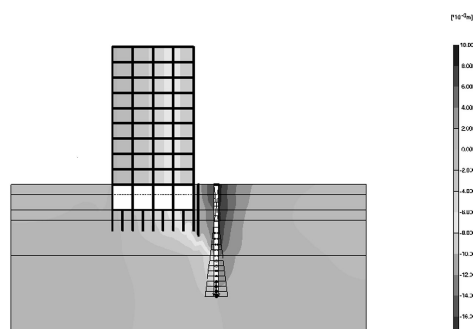


图 4 地层沉降云图

Fig. 4 Vertical displacements

从土体塑性区开展图(见图 5)来看,槽壁土体沿竖向中下部出现了一些塑性区,必定会导致槽壁失稳,需要对槽壁进行加固处理。

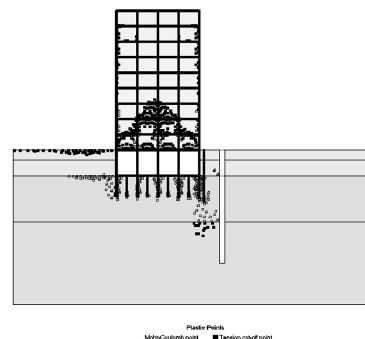


图 5 土体塑性区图

Fig. 5 Plastic zone

连续墙成槽过程中,距离槽壁最近的桩基沉降为  $14.7 \text{ mm}$ ,距离槽壁最远的桩基沉降为  $1 \text{ mm}$ ,沉降差为  $13.7 \text{ mm}$ ,如图 6 所示。距离槽壁最近的桩基水平位移最大为  $17 \text{ mm}$ (图 7)。

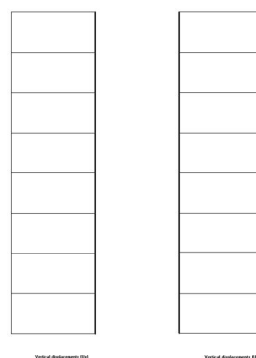


图 6 桩基沉降图

Fig. 6 Vertical displacements

连续墙成槽过程中,距离槽壁最近的桩基最大弯矩约为  $689.99 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,最大剪力约为  $244.65 \text{ kN}$ ,如图 8 所示。

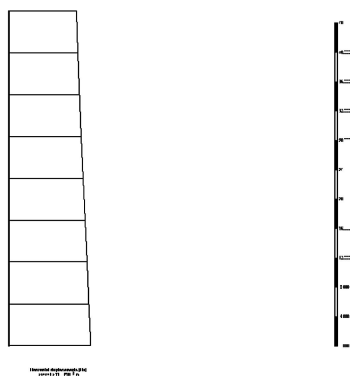


图 7 桩基水平位移图

Fig. 7 Horizontal displacements

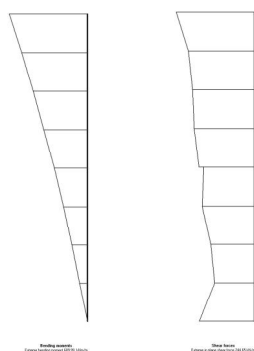


图 8 桩基弯矩、剪力图

Fig. 8 Bending moments and shear forces

4.4 槽壁加固后计算分析

靠建筑物槽壁外侧用 1 排  $\Phi 850@600$  三轴搅拌桩对槽壁进行加固, 搅拌桩进入岩层, 靠基坑内侧, 搅拌桩穿过填土层加固。模型见图 9。

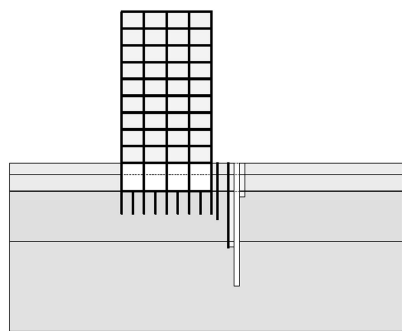


图 9 模型图 (三)

Fig. 9 Model III

塑性开展区如图 10 所示, 可看出, 由于采用了搅拌桩加固, 槽壁处没有出现塑性区, 槽壁稳定。

采取加固措施后, 连续墙成槽过程中, 距离槽壁最近的桩基沉降为 8.64 mm, 距离槽壁最远的桩基沉降为 0.24 mm, 沉降差为 8.4 mm。距离槽壁最近的桩

基水平位移最大约为 10.89 mm。

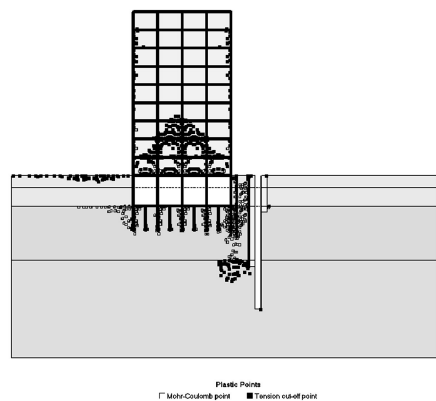


图 10 土体塑性区图

Fig. 10 Plastic zone

连续墙成槽过程中, 距离槽壁最近的桩基最大弯矩约为 443 kN·m, 最大剪力约为 160.8 kN。

5 子固路—八一馆站明挖区间槽段开挖影响

5.1 工程地质条件

根据地勘报告, 选取地层参数见表 2。

表 2 子固路—八一馆站明挖区间岩土参数表

Table 2 Soil parameters								
地层	层厚 /m	重度 $\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$\varphi$ /(°)	$c$ /kPa	渗透系数 /(cm·s <sup>-1</sup> )	变形模量 $E_s$ /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa
①1 杂填土	2.9	19	8	10	0.0001	20	0.34	
③5 砾砂	1.1	19.5	36		110	40	0.3	
③6 圆砾	6	20	40		110	50	0.3	
③7 卵石	3.6	21.5	38			60	0.3	
⑤1-1 强风化泥质粉砂岩	1.6	22	33	38		33	0.28	
⑤1-2 中风化泥质粉砂岩	22.5	36	312			520	0.25	10

5.2 工况设定

第一步: 生成初始应力场, 外贸局营业厅、南昌市商厦建筑物施工完成。

第二步: 开挖槽段, 泥浆护壁, 槽壁受泥浆压力作用。

5.3 计算结果分析

在外贸局营业厅附近槽段开挖过程中, 槽壁沿竖向在顶部和中上部出现了较大的水平位移, 约有 35 mm (图 11); 槽壁沿竖向出现了连续的较小的竖向位移, 约有 10 mm (图 12)。

从土体塑性区开展图 (图 13) 来看, 槽壁土体沿竖向中下部出现了一些塑性区, 必定会导致槽壁失稳, 需要对槽壁进行加固处理。

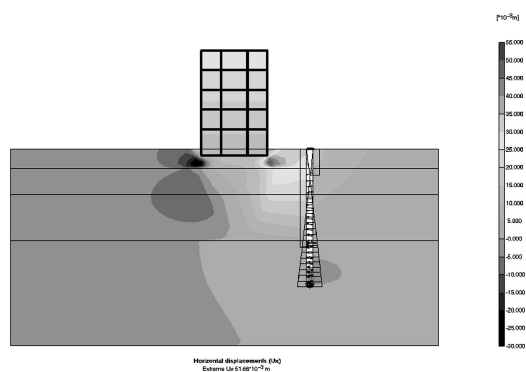


图 11 地层水平位移云图

Fig. 11 Horizontal displacements

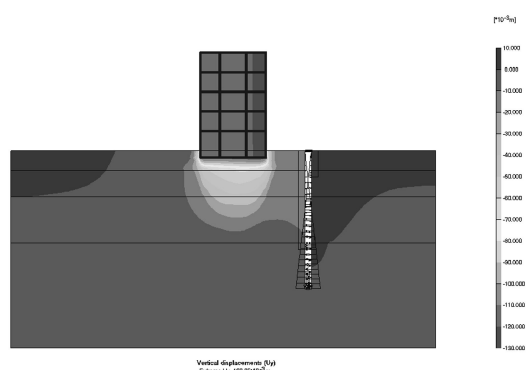


图 12 地层沉降云图

Fig. 12 Vertical displacements

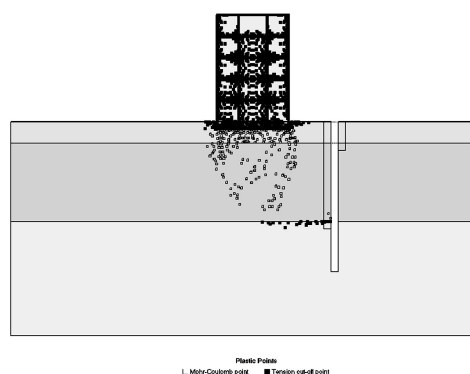


图 13 土体塑性区图

Fig. 13 Plastic zone

连续墙成槽过程中, 距离槽壁最近的条基沉降为 183 mm, 距离槽壁最远的条基沉降为 167.8 mm, 沉降差为 15.2 mm。距离槽壁最近的条基水平位移最大为 23.67 mm。

在南昌市商厦附近槽段开挖过程中, 槽壁沿竖向在顶部和中上部出现了较小的水平位移, 最大约有 7 mm (图 14); 槽壁沿竖向出现了连续的较小的竖向位

移, 最大约有 6 mm (图 15)。

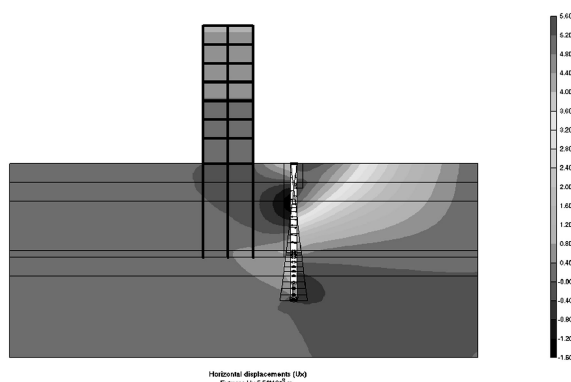


图 14 地层水平位移云图

Fig. 14 Horizontal displacements

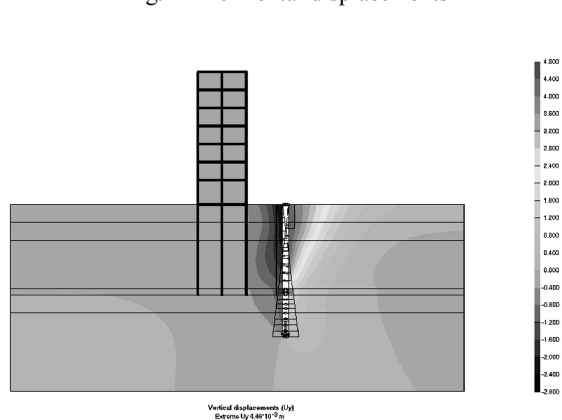


图 15 地层沉降云图

Fig. 15 Vertical displacements

从土体塑性区开展图 (图 16) 来看, 沿槽壁土体没有出现塑性区, 槽壁稳定。

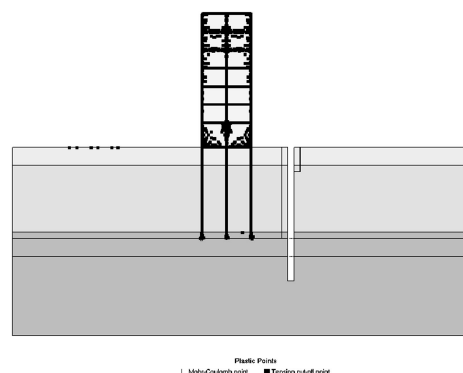


图 16 土体塑性区图

Fig. 16 Plastic zone

连续墙成槽过程中, 距离槽壁最近的桩基沉降为 0.59 mm, 距离槽壁最远的桩基沉降为 0.12 mm, 沉降差为 0.47 mm。距离槽壁最近的桩基水平位移最大为 0.71 mm。

连续墙成槽过程中，距离槽壁最近的桩基最大弯矩约为 65.23 kN·m，最大剪力约为 30.07 kN。

5.4 槽壁加固后计算分析

对外贸局营业厅靠建筑物槽壁外侧用 1 排  $\phi 850@600$  三轴搅拌桩内插型钢对槽壁进行加固，搅拌桩进入岩层，靠基坑内侧，用搅拌桩穿过填土层加固。

计算结果显示，由于采用了搅拌桩加固，槽壁处没有出现塑性区，槽壁稳定。

采取加固措施后，连续墙成槽过程中，距离槽壁最近的条基沉降为 14.06 mm，距离槽壁最远的桩基沉降为 5.36 mm，沉降差为 8.7 mm。距离槽壁最近的桩基水平位移最大约为 12.50 mm。

6 八一馆站槽段开挖影响

6.1 工程地质条件

根据地勘报告，选取地层参数如表 3 所示。

表 3 八一馆站岩土参数表

Table 3 Soil parameters

地层	层厚 /m	重度 $\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\varphi$ /( $^{\circ}$ )	c /kPa	渗透系数 /( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	变形模量 $E_s$ /MPa	泊松比	抗压强度 /MPa
①1 杂填土	3.8	19	8	10	0.0001	20	0.34	
③1 粉质黏土	2.8	19.2	20	60		50	0.3	
③5 砾砂	2.2	20.5	34		110	55	0.3	
③6 圆砾	6.2	21.5	38		110	50	0.3	
⑤1-1 强风化泥质粉砂岩	0.5	22	33	38		33	0.28	
⑤1-2 中风化泥质粉砂岩	9.3	24.6	39	320		520	0.25	10
⑤1-3 微风化泥质粉砂岩	9.3	24.8	40	498		750	0.25	15

6.2 工况设定

- 第一步：生成初始应力场，伟业大厦施工完成；
- 第二步：开挖槽段，泥浆护壁，槽壁受泥浆压力作用。

6.3 计算结果分析

在槽段开挖过程中，槽壁沿竖向在中上部出现了较大的水平位移，约有 18 mm（图 17）；槽壁沿竖向出现了连续的较小的竖向位移，约有 14 mm（图 18）。

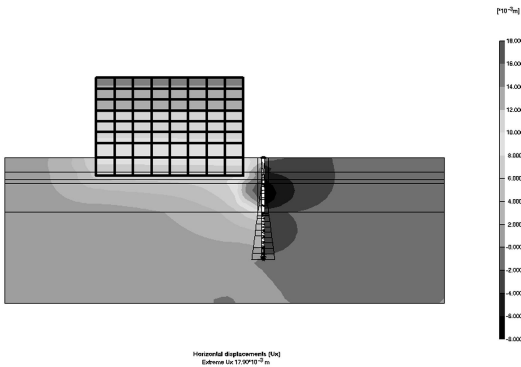


图 17 地层水平位移云图  
Fig. 17 Horizontal displacements

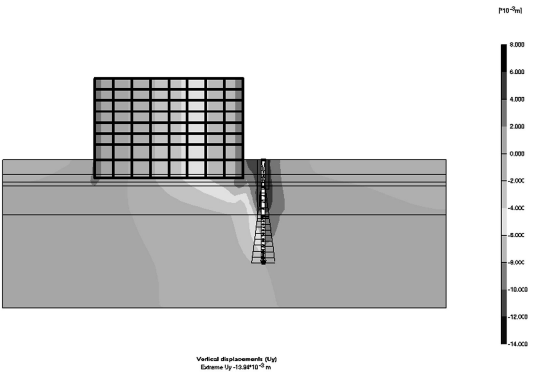


图 18 地层沉降云图  
Fig. 18 Vertical displacements

从土体塑性区开展图（图 19）来看，槽壁土体沿竖向中部出现了一些塑性区，必定会导致槽壁失稳，需要对槽壁进行加固处理。

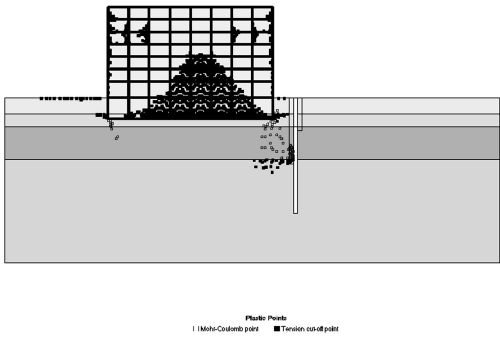


图 19 土体塑性区图  
Fig. 19 Plastic zone

连续墙成槽过程中，距离槽壁最近的筏板基础沉降为 12.84 mm（图 20），距离槽壁最远的筏板基础沉降为 -3.84 mm，沉降差为 16.68 mm。距离槽壁最近的筏板基础水平位移最大为 12.87 mm。

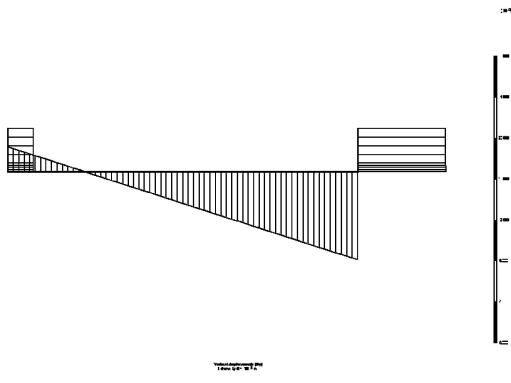


图 20 基础沉降图  
Fig. 20 Vertical displacements

6.4 槽壁加固后计算分析

靠建筑物槽壁外侧用 1 排  $\phi 850@600$  三轴搅拌桩内插型钢对槽壁进行加固，搅拌桩进入岩层，靠基坑

内侧，用搅拌桩穿过填土层加固。

可看出，由于采用了搅拌桩加固，槽壁处没有出现塑性区，槽壁稳定（图 21）。

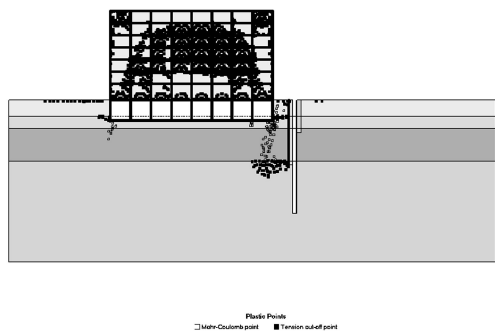


图 21 土体塑性区图

Fig. 21 Plastic zone

采取加固措施后，连续墙成槽过程中，距离槽壁最近的筏基沉降为 7.88 mm（图 22），距离槽壁最远的筏基沉降为-1.92 mm，沉降差为 9.8 mm。距离槽壁最近的桩基水平位移最大约为 9.68 mm。

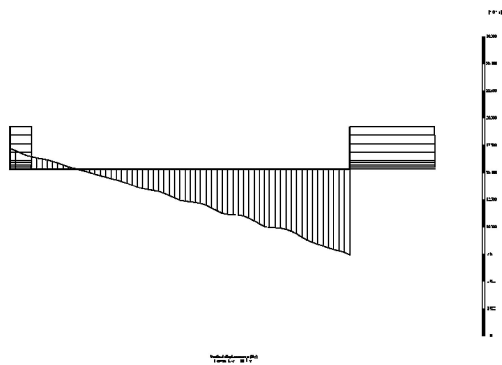


图 22 基础沉降图

Fig. 22 Vertical displacements

7 计算结果汇总

将上述计算结果整理如表 4 所示。

8 结论与建议

目前，在饱和含水砂层中的连续墙施工是地下工程的一大难题，对连续墙成槽的不利影响主要有：

（1）在破碎、胶结性差的砂层中成槽容易引起槽壁坍塌。

（2）采用抓斗抓进成槽施工时，由于抓斗作业时上下提斗易对槽壁产生机动压力，且施工形成的槽段断面较大，从力学角度是不稳定的。

（3）由于地下水位高，稳定水位埋深浅，泥浆对槽壁的支撑压力较小，槽壁的稳定性不高。

表 4 计算结果汇总表

Table 4 Calculated results

	中国工商银行	外贸局营业厅	南昌市商厦	伟业大厦
结构型式	混凝土 23	混 5	混凝土 9	混凝土 7
基础型式	1 层地下室，灌注桩	条型基础	灌注桩	1 层地下室，筏板
基底土质	圆砾层	杂填土	中风化泥质粉砂岩	粉质黏土
与围护墙位置关系	距围护墙	距围护墙	距围护墙	距围护墙
	3.59~4.62 m	6.2~6.47 m	5.9~6.8 m	3.71~7.86 m
加固措施	1 排水泥土搅拌桩	1 排水泥土搅拌桩 内插型钢		1 排水泥土搅拌桩 内插型钢
槽壁稳定性	加固前	槽壁土体沿竖向中部出现了一些塑性区	槽壁土体沿竖向中部出现了一些塑性区，槽壁稳定	槽壁土体沿竖向中部出现了一些塑性区
	加固后	槽壁处没有出现塑性区，槽壁稳定		槽壁处没有出现塑性区，槽壁稳定
桩基弯矩/剪力 (kN·m)、(kN)	加固前	689.99/244.65	65.23/30.07	
	加固后	443/160.8		
基础水平位移/mm	加固前	17	23.67	0.71
	加固后	10.89	12.5	9.68
基础差异沉降/mm	加固前	13.7	15.2	0.47
	加固后	8.4	8.7	9.8

（4）在富水砂层中进行泥浆循环成槽施工，由于地下水、砂粒混入泥浆中，引起泥浆性能恶化，对槽壁的稳定增加了不安定因素。

在周边环境复杂的场地进行连续墙成槽，更会对成槽及周边建筑物产生不利影响。本文通过模拟富水砂层的土层性质，调整土层与结构物接触面参数，模拟护壁泥浆及加固体的特性等，经过大量的数值分析，得出在富水砂层中连续墙成槽与周边建筑物相互影响的结论如下：

（1）临近的条形基础、筏板基础、摩擦桩基类型的建筑物对连续墙成槽稳定影响较大，在槽壁土体内都出现了较连续的塑性区，必定会导致槽壁失稳，需要在槽壁外侧采取水泥土搅拌桩（内插型钢）加固。

（2）连续墙成槽过程中会使条基、筏板基础类建筑物基础产生较大的位移，采取水泥土搅拌桩（内插型钢）可以有效控制周边土体位移，较好的降低建筑物基础位移。

（3）连续墙成槽过程中会使摩擦桩基类建筑物基础产生较大的位移和附加内力，严重时会使桩基断裂，采取水泥土搅拌桩（内插型钢）可以有效控制周边土体位移，较好的降低建筑物基础位移和附加内力。

（4）端承桩基建筑物对连续墙成槽稳定影响较小，槽内土体基本稳定。

（5）对建筑物采取搅拌桩（内插型钢）的被动加固措施并不能很好的控制建筑物基础的差异沉降，还

需要在施工过程中对建筑物基础进行注浆加固等主动加固措施。

#### 参考文献:

- [1] 刘国斌, 王卫东, 等. 基坑工程手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Foundation Pit Handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] COWLAND J W, THORLEY C B B. Ground and building settlement associated with adjacent slurry trench excavation[C]// Proceedings of the Third International Conference on Ground Movements and Structures, University of Wales Institute of Science and Technology, Geddes J.D., ed., Pentech Press, London, English, 1985: 723 - 738.
- [3] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE, New York, 1990: 439 - 470.
- [4] 欧章煜. 深开挖工程分析设计理论与实务[M]. 台北: 科技图书股份有限公司, 2004.
- [5] BUDGE-REID A., CATER R W, STOREY F G. Geotechnical and construction aspects of the Hong Kong Mass Transit Railway system[C]// Proceedings of the Second Conference on Mass Transportation in Asia, Singapore, 1984: 30p

(本文责编 李运辉)