

文章编号:1673-9469(2016)03-0013-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2016.03.003

## 偏压异型深基坑支护结构内力和变形分析

钱叶琳<sup>1,2</sup>, 欧强<sup>2</sup>, 高海云<sup>3</sup>, 王洁<sup>1</sup>, 吕卫柯<sup>1</sup>, 汪亦显<sup>2</sup>

(1. 安徽路桥工程集团有限责任公司, 安徽合肥 210029; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009; 3. 合肥市重点工程建设管理局, 安徽合肥 230001)

**摘要:**以合肥地铁1号线、2号线换乘站大东门地铁偏压异型深基坑工程为背景,采用FLAC<sup>3D</sup>建立数值计算模型模拟开挖施工过程,考虑支护结构与土体的相互作用,计算和对比分析偏压异型深基坑地下连续墙的内力和变形,得到其分布规律。结果表明:深基坑支护结构异型点的主应力比直臂部分的主应力大,而且应力集中现象也较为明显,水平方向的变形比同等条件下直臂部分也要大,异型部分的受力和变形都是深基坑的最不利情况。

**关键词:**异型;深基坑;地连墙;内力;变形;FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号:TU47

文献标识码:A

### Analysis of internal force and deformation for unsymmetrically loading and irregular deep foundation pit

QIAN Yelin<sup>1,2</sup>, OU Qiang<sup>2</sup>, GAO Haiyun<sup>3</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, LV Weike<sup>1</sup>, WANG Yixian<sup>2</sup>

(1. Anhui Road & Bridge Group Co., Ltd, Anhui Hefei 210029, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Anhui Hefei 230009, China; 3. Hefei key project construction administration, Anhui Hefei 230001, China)

**Abstract:** This paper takes HeFei Metro Line1, Line2 subway transfer station deep excavation engineering as the background, using FLAC<sup>3D</sup> to establish the model, simulating the process of excavation, what's more, the supporting systems of deep foundation pit are analyzed, considering the interaction between supporting structure and soil, calculating and analysing of the diaphragm wall internal forces and deformation, and by comparing the calculation results of various working conditions, the distribution law of the unsymmetrically loading and irregular diaphragm wall of internal force and deformation were obtained. The calculation and analysis results showed that the main stress of deep foundation pit supporting structure of irregular is bigger than the straight arm's, and the stress concentration phenomenon is more obvious, the horizontal deformation is larger than the arm's under the same conditions, the force and deformation for unsymmetrically loading and irregular is worst case in deep pit. The results of the study which is for future subway station deep foundation pit engineering design, construction provide the basis necessary reference.

**Key words:** irregular; deep foundation pit; diaphragm wall; internal force and deformation; FLAC<sup>3D</sup>

在地铁车站深基坑建设中,通常都采用地下连续墙支护来确保深基坑施工期间的安全和基坑周边建筑物的稳定。因此,对于地下连续墙的研究分析具有重要的价值<sup>[1-2]</sup>。国内外很多学者对

单片地连墙进行了研究和分析<sup>[3-15]</sup>,得到了很多研究成果,为偏压异型地连墙的研究提供了有益的参考。然而,异型地连墙与单片地连墙无论在结构形式还是在受力特性上都存在很大的差

收稿日期:2016-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304057);合肥市重点工程建设局科技支撑项目(2013CGAZ0771);安徽省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(2013YF-27);武汉市城建委科技计划项目(201620)

作者简介:钱叶琳(1980-),男,安徽青阳人,硕士,高级工程师,从事岩土及路基工程方面的研究。

别<sup>[16-20]</sup>。本文基于合肥市地铁1号线、2号线换乘站大东门偏压异型深大基坑工程。采用FLAC<sup>3D</sup>对合肥地铁大东门偏压异型深大基坑的支护结构内力和变形进行数值模拟,据此分析基坑外土体的变形、支护结构的内力和变形等,为偏压异型基坑开挖和安全生产提供指导依据。

### 1 偏压异型深基坑数值模拟分析

#### 1.1 工程概况

拟建大东门地铁车站东北侧有古井假日酒店(29层)、古井赛特商城(5层),站东南侧有省交通投资集团公司(4~6层)。建筑物距离车站主体较近,赛特商城距离车站主体最近处仅为5m。施工过程中,若围护结构产生较大位移或土体坍塌,会对已有建筑的稳定性产生不利影响,并且会引起基坑土体变形及地面沉降;同时建筑物对相邻一侧基坑侧壁产生附加荷载,增加了支护结构的受力,不利于支护结构的稳定。根据工程施工方案,基坑采用逆作法施工。在不影响计算精度要求下,本基坑拟分为六步进行模拟开挖。

#### 1.2 模型建立

模型坐标原点取在1号桩中心点,地表 $z=0$ ,模型X轴方向(垂直1号线主体基坑轴线)为390m,Y轴方向(平行1号线主体基坑轴线)300m,Z轴方向(垂直向上)长100m,即模型尺寸390m×300m×100m。土层、地下连续墙、顶板、中间板、底板均采用实体单元,实体单元采用四面体单元,离散后的单元数为297495个,节点数为51250个。离散后的计算模型如图1所示。

#### 1.3 初始应力场及边界条件

假定岩体为均质、连续的各项同性体,岩体的自重应力场如下:

$$\sigma_z = \gamma \cdot H \tag{1}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z \tag{2}$$

式中: $\mu$ —泊松比; $H$ —岩体至地表的距离,m; $\gamma$ —上覆岩层容重,N/m; $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 分别为X、Y、Z方向的自重应力场,MPa;

此外,深基坑还受到圣大国际酒店100kPa、圣大国际裙楼30kPa、金利银路酒店30kPa等建筑物的偏压作用,模拟计算过程中建筑偏压均按均布荷载作用到地表相应位置。在充分考虑边界效应的情况下,模型四周及底面滚支承约束。

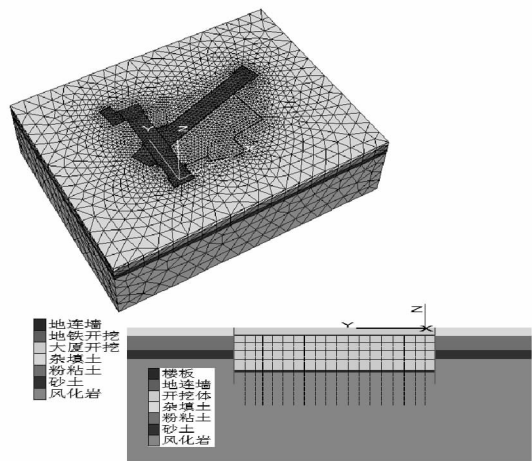


图1 离散后的计算模型

Fig.1 The calculation model of the discrete

#### 1.4 计算参数选取

基坑范围内主要土层为粉质粘土:填土①层、杂填土①1层、粘土②层、粉质粘土②1层、粉土②2层、粉细砂②3层、淤泥质粉质粘土②4层,对土体选取适当合理的力学参数是保证计算可靠的重要条件。计算中土体采用Mohr-Coulomb本构模型,其基本力学参数如表1所示,其中土体弹性模量按经验取压缩模量的3倍,泊松比由土体侧压系数反算,本构模型均采用线弹性模型。

表1 土层基本力学参数

Tab.1 The basic mechanical parameters of soil

地层名称	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量 /GPa	泊松比	粘结力 /kPa	内摩擦角 /°	抗拉强度 /kPa
杂填土	1700	0.0036	0.41	18	8	1
粉质粘土	1980	0.03	0.32	30	15	37
砂土	2050	0.045	0.30	0	25	0
风化岩	2200	1	0.26	35	35	220

## 2 模拟结果

### 2.1 偏压异型深基坑支护结构内力分析

图 2 为各监控点的大主应力曲线图,监控点 1 和监控点 2 是偏压异型的典型,监控点 7 和监控点 11 是直臂的代表。在偏压荷载作用下,随着基坑的开挖,各点的大主应力都呈现逐渐增长的趋势,在异型点处大主应力增长较快,各工况下的大主应力均大于直臂部分的大主应力,表现出较为明显的应力集中现象,直臂部分大主应力虽然也在增长,但是增长的速率较为缓慢。在工况 6 的监控点 1、2 的大主应力达到 4.5 MPa 左右,而此时监控点 7、11 的大主应力却只有 1.5 ~ 1.8 MPa 左右,增加了近 200%,增幅较大。

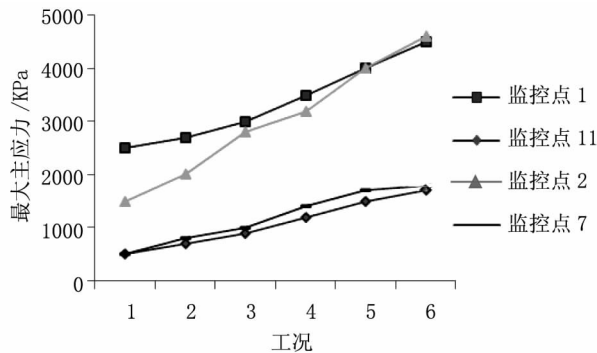


图 2 各监控点大主应力模拟结果  
Fig.2 Simulation results of the maximum principal stress

图 3 为各监控点的主应力差曲线图,同样可知异型点 1、2 的主应力差较直臂监控点 7、11 的主应力差大,在基坑开挖的过程中,主应力差越大,意味着该点的受力状况越复杂,对地下连续墙的异型点来说,也就是应力集中越明显,是整个基坑的薄弱环节,在工况 6 的测点 1、2 的主应力差为 30 MPa 左右,点 7、11 的主应力差为 10 MPa 左右,增加了 200%,增幅较大。

通过分析可知,地下连续墙交叉点、围护结构与主体结构接触以及深浅基坑交界处均存在较大的主应力,说明这些地方存在应力集中现象,建议在主体结构满足设计要求的前提下,在维护结构施作(即地下连续墙施工)的时候,在应力集中部位(特别是异型处)可选用有效的连接或接触措施,如选用半刚性节点,设置柔性层等,允许主体结构与支护结构的少量变形,以缓解应力集中现象,避免地下连续墙遭受破坏。

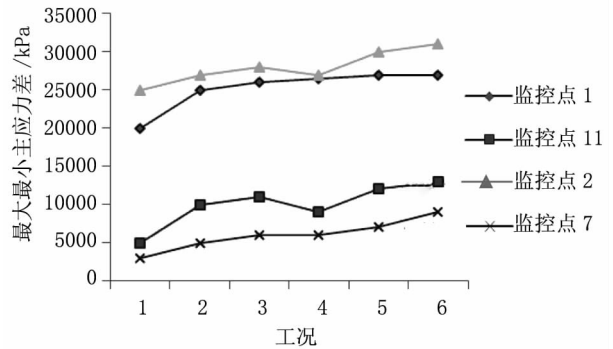


图 3 各工监控点主应力差模拟结果  
Fig.3 Simulation results of the principal stress difference

### 2.2 地下连续墙随开挖深度的水平变形

图 4 所示为各工况各监控点沿墙体埋深的水平位移变化规律曲线。基坑开挖施工对周围建筑物产生扰动,使土体、围护结构及基坑桩体等产生附加变形和内力。随着深度的加大,地连墙围护结构水平变形不断增大,墙体向基坑内不断发展变形,形态上呈凸肚状。受周边建筑附加偏压环境的影响,凸肚略低于开挖坑底标高,并随开挖深度的加大,凸肚逐渐向下移动。该现象在异型处表现的十分明显,而在直臂部分则没有这么突出。

### 2.3 基坑开挖对地下连续墙围护结构水平变形的影响分析

根据各工况模拟计算结果,对图 4 所示的地下连续墙监控点沿墙体埋深的水平位移进行了数据监控采集,图 5 为各开挖工况的剖面位移等值云图。

由图 5(a)可知地下连续墙在偏压作用下位移的基本规律:靠近偏压侧的地连墙各项位移均大于远离偏压侧的地连墙各项位移,而且在近偏压的异型处出现了最大位移,且由异型点处大致呈椭圆弧状向外发散,异型点是该基坑的薄弱环节;由图 5(b)分析,在开挖到第 2 工况的时候,在几个异型处都出现了较大的位移,且由该异型处向外发散位移逐渐减小。

由图 5 可以看出,在基坑刚开挖时,水平位移最大的土体出现在异型处,对于偏压异型基坑来说,在没有采取任何加固的辅助施工措施前,最危险的就是偏压异型处,因为土的抗剪摩擦力及支护结构可能满足不了悬挂的要求。在进行数值模拟时,异型地连墙周围认为已经注浆加固,在开挖

的过程中,由图5可看出水平最大位移仍然出现在异型处,可见在开挖之前进行注浆是必要的。随着基坑开挖深度的增加,我们可以看到,异型处的水平位移虽然在逐渐增加,但每一步开挖完成

后,发生最大水平位移的土体为基坑离地表处。这是由于支护结构随着基坑开挖的不断变形,给土体水平变形提供了可能。

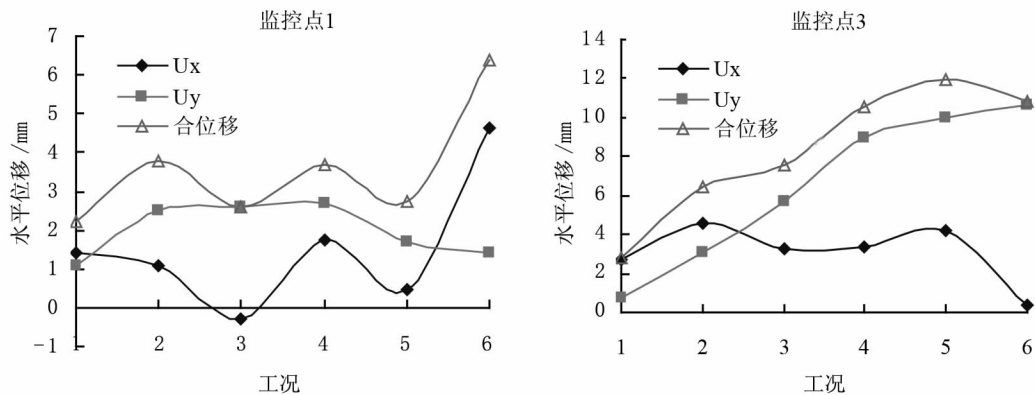
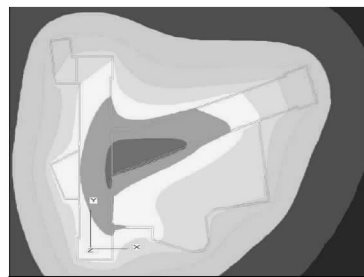
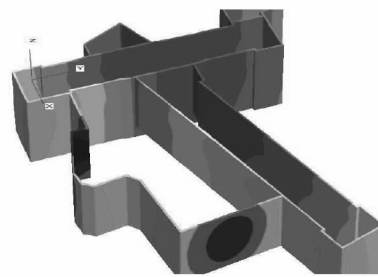


图4 各工况地连墙监测点沿埋深水平位移曲线

Fig.4 Horizontal displacement variation law of each condition along the wall depth



(a) 地表剖面俯视图各点位移云图



(b) 3D局部视图各点位移云图

图5 各开挖工况的剖面位移等值云图

Fig.5 Contour of displacement of each condition on sectional view

### 3 结论

1) 基坑开挖对周围建筑物产生扰动,使土体、围护结构及基坑桩体等产生附加变形和内力。随着深度的加大,地连墙围护结构水平变形不断增大,墙体向基坑内不断发展变形,形态上呈凸肚状。受周边建筑附加偏压环境的影响,凸肚略低于开挖坑底标高,并随开挖深度的加大,凸肚逐渐向下移动。

2) 基坑开挖对地连墙受力状态影响,支护结构在横向荷载作用下,支护结构产生横向位移或挠曲,并与地连墙、主体结构协调变形。异型处的主应力易出现应力集中现象,异型处的大主应力可达直臂部分主应力的3倍,导致地连墙局部出现塑性区,降低地连墙的抗力。

3) 偏压基坑开挖应采用主动加固方式,即“先加固、后开挖”的方式加固地层及建(构)筑物。

#### 参考文献:

- [1] 翁其平, 王卫东, 周建龙. 超深圆形基坑逆作法“两墙合一”地下连续墙设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(5): 188 - 194.
- [2] 丁勇, 王平艺, 李鹏飞. 基于BOTDA的地下连续墙分布式变形监测技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(Z2): 500 - 503.
- [3] 孙峰, 徐杨青, 张婧雯. “两墙合一”地下连续墙竖向承载力设计计算研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(Z2): 154 - 155.
- [4] 徐杨青, 刘国锋, 盛永清. 深基坑嵌岩地下连续墙隔渗效果分析与评价方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2905 - 2910.
- [5] 侯永茂. 格形地下连续墙竖向承载特性研究[J]. 岩土

- 工程学报,2012,34(4):701-708.
- [6]姜忻良,徐炳伟.狭长基坑中地下连续墙的简化计算模型[J].工程力学,2009,26(Z1):31-36.
- [7]李二兵,谭跃虎,张尚根.深基坑围护中地下连续墙变形的解析计算[J].解放军理工大学学报,2004,5(2):57-60.
- [8]沈健,王卫东,翁其平.圆形基坑地下连续墙分析方法研究[J].岩土工程学报,2008,30(Z):280-285.
- [9]王卫东.承重地下连续墙与高层建筑桩箱基础基地及共同作用的理论研究和实测研究[D].上海:同济大学,1996.
- [10]王卫东.地下连续墙沉降计算[J].岩土工程学报,1999,21(1):122-125.
- [11]王卫东.承重地下连续墙与桩筏基础共同作用计算研究[J].结构工程师,1999(2):39-43.
- [12]POULOS H G, DAVIS E H. The settlement behavior of single axially loaded incompressible piles[J]. Geotechnique, 1968,18(2):351-371.
- [13]丁勇春,王建华,褚衍标.地下连续墙施工力学机理三维数值分析[J].岩土力学,2007,28(8):1757-1761.
- [14]陈有亮,李林,刘井学.某深基坑地下连续墙开挖变形有限元分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(2):320-325.
- [15]芮瑞,夏元友.基于三维有限元的地下连续墙深基坑逆作法施工方案设计[J].岩土力学,2008,29(5):1391-1395.
- [16]戴国亮,龚维明,周香琴.单室井筒式地下连续墙水平承载力试验与计算方法研究[J].建筑结构学报,2012,33(9):67-73.
- [17]戴国亮,周香琴,刘云忠.井筒式地下连续墙水平承载能力模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(Z2):185-190.
- [18]戴国亮,周香琴,龚维明.超深地下连续墙水平承载力试验研究[J].公路,2011(4):8-12.
- [19]杜春涛,张建新,王瑞琪.超大逆作基坑地下连续墙变形分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(3):43-45.
- [20]刘云波,朱有奇,杨德,等.非对称基坑开挖监测位移下数值对比分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(2):40-43.

(责任编辑 王利君)

(上接第12页)算的结果一致,当轴力小于 $0.4A_f$ 时,由于小变形假定带来影响可以忽略不计,此时理论解与有限元大变形和小变形的计算结果基本相等。

2)初始扭转缺陷对于加劲十字形轴压杆而言十分不利,当轴压力一定时,初始扭转角越大,则构件跨中的扭转位移就越大,且初始扭转角构件跨中的扭转位移基本呈正相关关系。

3)轴力与构件跨中的扭转位移之间存在明显的 $P \sim \delta$ 效应,随着轴力的增大,构件跨中扭转位移的增长率也不断提高。轴力的增加会使得扭转角增大,而扭转角的增大又会反过来导致Wagner效应增大,加剧扭转。

#### 参考文献:

- [1]张爱林,于劲,徐敏,等.钢异形柱结构体系的发展前景和研究计划[C]//庆祝刘锡良教授八十华诞暨第八届全国现代结构工程学术研讨会.2008.中国天津.
- [2]黄慧娟,王元清,麻建锁,等.钢结构工程住宅设计及其

经济性分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2007,24(1):20-23.

- [3]TAHIR M M. Experimental investigation of short cruciform columns using universal beam sections[J]. Construction and Building Materials, 2009,23(3):1354-1364.
- [4]NGIAN S P. Wind-moment design of semi-rigid un-braced steel frames using cruciform column (CCUB) section[J]. International Journal of Steel Structures, 2015,15(1):115-124.
- [5]NADERIAN H R, RONAGH, AZHARI M. Torsional and flexural buckling of composite FRP columns with cruciform sections considering local instabilities[J]. Composite Structures, 2011, 93(10):2575-2586.
- [6]于劲. 钢异形柱结构体系抗震性能的理论分析与试验研究[D].北京:北京工业大学,2010.
- [7]李正超. 初始扭转对十字形截面压杆稳定性能的影响研究[D].苏州:苏州科技学院,2014.
- [8]陈骥,钢结构稳定理论与设计[M].第4版.北京:科学出版社,2008.

(责任编辑 李军)