

文章编号:1005-0523(2012)02-0051-06

# 上海自然博物馆基坑地下连续墙变形研究

李岩松<sup>1</sup>, 邹吉聪<sup>2</sup>

(1. 上海科技馆自然博物馆管理处, 上海 200127; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**新建上海自然博物馆基坑工程为深大异形坑中坑工程, 周围环境复杂, 施工风险大。利用三维有限元模拟方法, 计算内外坑开挖过程中外坑地下连续墙的变形, 选取模型中内外坑地下连续墙5种不同间距处的计算结果与现场监测数据对比, 得出内外坑连续墙间距小于20 m时外坑连续墙最大水平位移随内外坑间距增大而增大, 但当内外坑地连墙间距大于20 m时, 内外坑地连墙间距变化对外坑连续墙最大水平位移影响不大; 该工程坑中坑内坑开挖对外坑地连墙水平变形影响较小。

**关键词:**深大异形基坑; 坑中坑; 地连墙; 数值模拟

**中图分类号:**TV551.4+2

**文献标志码:**A

随着城市地下空间的发展, 城市当中出现了多种地下综合开发的基坑工程, 这些基坑有着“深、大、异形”等特点, 甚至是坑联坑、坑中坑。由于基坑工程的这些新特点, 加上城市中各种环境较为复杂, 与传统基坑工程相比增加了基坑工程的风险, 对其支护结构也提出了更高的要求。地连墙是基坑支护结构的重要组成部分, 研究基坑开挖过程中地连墙的变形, 对于预测施工风险、保证施工安全具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

坑中坑基坑工程中内坑开挖对于控制整个基坑的稳定是不利的, 若考虑不周全可能引发重大工程事故。龚晓南<sup>[3]</sup>曾呼吁坑中坑工程应该考虑内坑开挖对外坑围护结构稳定和变形的影响, 但目前针对坑中坑基坑的研究相对较少。潘卫成<sup>[4]</sup>对比了不同内坑支护技术对外坑支护的影响, 结合施工经验对内坑围护结构的选取提出一些建议; 陈乐意<sup>[5]</sup>、申明亮<sup>[6]</sup>运用数值模拟方法, 探讨了开挖计算深度的选取、内坑位置对围护结构水平位移的影响和对各区域土体应力变化的影响。其余则更多关注于电梯井、集水井等小型内坑的支护设计、监测与施工技术。

本文以新建上海自然博物馆与地铁13号线共建深大异形坑中坑基坑为背景, 在基坑开挖深度和地下连续墙插入深度一定的条件下, 通过数值模拟与实际监测数据研究该异形坑中坑基坑工程地下连续墙的变形特点。

## 1 工程概况

上海自然博物馆拟建场地位于上海市静安区, 西傍慈溪路, 东临大田路, 南为北京西路, 北枕山海关路, 基坑开挖面积约15 240 m<sup>2</sup>, 最大开挖长度(南北向)为150 m, 最大开挖宽度(东西向)为100 m, 开挖深度为17.3 m。自博馆地下室底板结合轨道交通13号线明挖区间段南北向穿越, 地下室北侧有南北向13号线自然博物馆站, 南部有一轨道交通盾构始发井, 基坑平面位置如图1所示, 剖面图如图2所示。

该场地内除南北向穿越的轨道交通13号线明挖区间外, 与自然博物馆基坑同期施工的还有地铁13号线车站、地铁南端头井、地铁北端头井基坑等共8个基坑。立面上地铁13号线区间段基坑在自然博物馆基坑的基础上再落深开挖7.688 m, 两基坑共建顺作开挖形成坑中坑基坑。工程位于市中心城区, 周边环境极其复杂。其中, 大田路东侧雕塑公园内有500 kV世博变电站和10 kV变电站, 世博变电站距本工程基坑

收稿日期: 2011-12-05

基金项目: 上海市科学技术委员会资助项目(10231200702)

作者简介: 李岩松(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为工程技术研究和管理。

边约48 m,10 kV变电站距本工程基坑边约20 m;场地西侧为上海市育才中学教学楼及63弄居民楼多层房屋,房屋多为3~5层砖木结构和混凝土框架结构,为解放前建筑,房屋距基坑围护墙边最近距离约10 m,故场地西侧保护等级最高。



图1 自然博物馆基坑位置示意图  
Fig.1 Location of museum pit

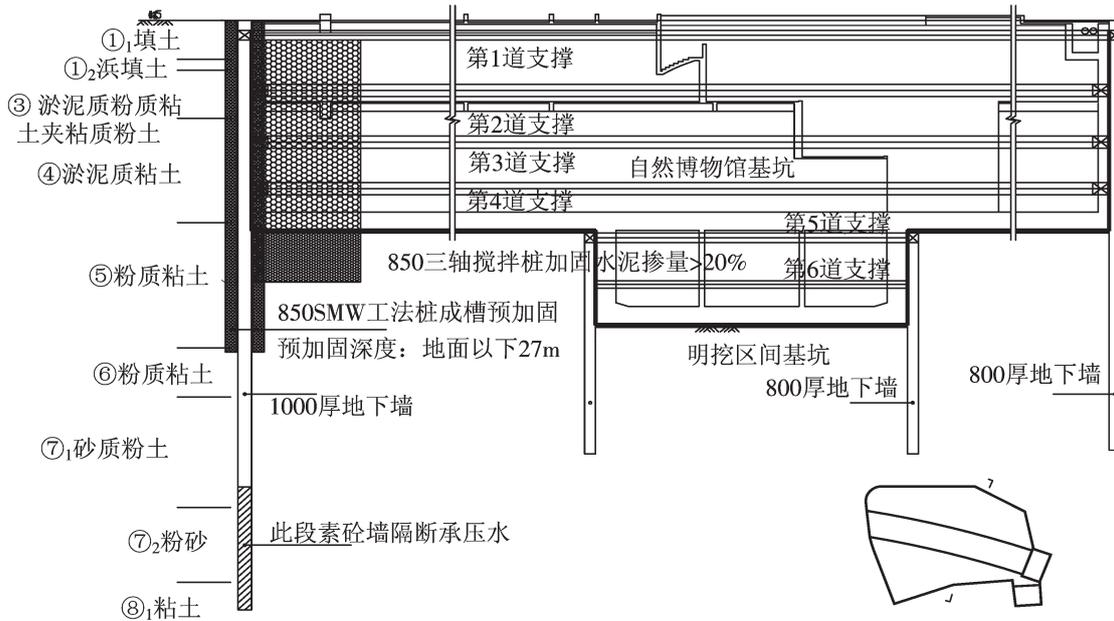


图2 基坑典型横剖面图  
Fig.2 Cross section of pit

坑中坑基坑地下连续墙的受力情况如图3。其中 $E_a, E_p$ 分别为外坑地下连续墙墙后、墙前土压力,  $E'_a$ ,

$E_p'$ 为内坑地下连续墙墙后、墙前土压力,各土压力采用朗肯土压力理论计算,地面超载为 $q$ , $F_i$ 为支撑轴力。由图3可知,坑中坑基坑与常规基坑的不同之处,一是在于外坑开挖时内坑连续墙的存在有助于控制外坑连续墙变形;二是在于内坑的二次开挖形成的侧向卸载,使得两墙之间的土体在特定条件下由外坑开挖时的被动区变成内坑开挖时的主动区,当开挖内坑时,作用在外坑地下连续墙上的被动土压力( $E_p$ )较内坑开挖之前有所减小,并最终会反映到连续墙变形上。而 $E_p$ 的变化与内、外坑地下连续墙之间的距离密切相关。

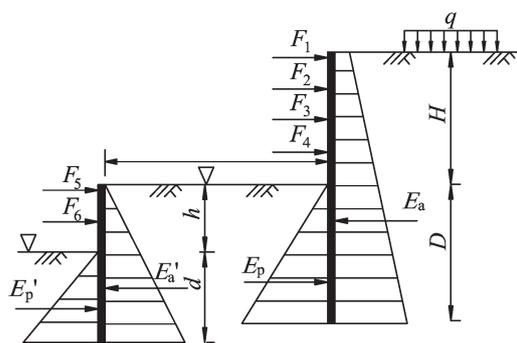


图3 坑中坑基坑地下连续墙受力示意图

Fig.3 Forces acting on the continuous wall of pit-in-pit excavation

## 2 工程地质情况

根据勘察资料,拟建场地位于正常地层沉积区。在所揭露深度100.32 m范围内的地基土属第四纪上更新世Q3至全新世Q4沉积物,主要由饱和粘性土、粉性土及砂土组成。土层性质见表1。

表1 主要土层的物理力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of main soil

土层序号	土层名称	土层厚度/m	固快峰值		土层重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	无侧限抗压强度 $q_u/\text{kPa}$	静止侧压力系数 $K_0$
			C/kPa	$\phi/(\circ)$				
①	杂填土	1.5			19.0	/		
②	褐黄~灰黄色粉质粘土	1.9	17	21.5	18.4	5.36	128	0.48
③	灰色淤泥质粉质粘土夹粘质粉土	5.3	9	16.5	17.6	3.36	39	0.49
④	灰色淤泥质粘土	8.2	13	10.5	16.8	2.27	39	0.58
⑤	灰色粉质粘土	10.4	17	14.0	18.1	4.27	90	0.49
⑥	暗绿~草黄色粉质粘土	3.5	44	15.5	19.5	6.58	230	0.46
⑦ <sub>1</sub>	草黄~灰黄色砂质粉土	8.7	4	30.5	18.5	12.26	/	0.37
⑦ <sub>2</sub>	灰黄~灰色粉砂	6.4	0	32.5	18.6	13.09	/	0.34
⑧ <sub>1</sub>	灰色粘土	14.1	27	16.5	17.8	5.14	/	0.47

## 3 支护结构简介

1) 自然博物馆基坑。大基坑围护采用两墙合一1 000 mm与800 mm厚地下连续墙,永久使用阶段作为主体结构地下室外墙的一部分。西侧墙厚1.0 m、墙深48 m,墙底穿越⑦层承压水层进入⑧<sub>1</sub>层粘土层;东侧墙厚0.8 m、墙深35 m,墙底位于⑦层承压水层;北侧墙厚0.8 m、墙深35~44 m,墙底位于⑦层承压水层。基坑支撑采用竖向4道钢筋混凝土支撑体系,第1道支撑截面为800 mm×800 mm,其余3道支撑主梁截面均为1 200 mm×1 000 mm。分4层开挖,开挖深度分别为5.7,9.9,13.7,17.3 m。

自然博物馆基坑桩基均采用钻孔灌注桩,工程桩桩径均为 $\phi$  800,立柱桩桩径非栈桥区分别为 $\phi$  800、 $\phi$  850,栈桥区为 $\phi$  900。

2) 轨道交通明挖段。轨道交通明挖段开挖深度约为24.988 m,桩基为 $\phi$  800钻孔灌注桩,主要为抗拔桩。基坑围护采用800 mm厚地下连续墙。此坑中坑地墙底埋深35 m,墙顶标高位于自然博物馆基坑底,落深较大,施工时采用C20素混凝土从低地墙顶面浇至地面。

车站中间段局部落深基坑采用竖向两道支撑体系,第1道为1 000 mm×800 mm砼支撑,第2道为 $\phi$  609钢支撑。

3) 南端头井基坑。南部端头井开挖深度约为26.188 m,为轨道交通始发井,围护采用1 000 mm厚地下连续墙,墙深48 m。

### 4 连续墙变形数值模拟

#### 4.1 有限元模型建立

自然博物馆基坑深、大、异形,且存在坑中坑开挖情况,内外坑地下连续墙间距随基坑位置变化。若坑中坑距离外坑围护结构间距较小,在开挖内坑的过程中,内坑连续墙产生的水平变形可能会传递到外坑连续墙上,因此,内外坑连续墙间距会直接影响坑中坑式基坑工程的变形稳定性。因基坑形状不规则,计算时运用Plaxis 3D Foundation建立三维模型,西侧外坑连续墙深度48 m,内基坑围护结构为落深地连墙,落深段深度为35 m,内基坑宽度为24 m,外坑开挖深度为17.3 m,内基坑开挖深度为25 m,根据基坑开挖步骤,自然博物馆基坑四道混凝土撑,分4层开挖;13号线明挖基坑两道支撑,分两层开挖。模型中土体采用硬化塑性模型(HS),地下连续墙采用墙单元(WALL)模拟,坑内支撑采用梁单元(BEAM)模拟,基坑底板采用地板单元(FLOOR)模拟<sup>[7]</sup>。

模型中各土层的计算参数按照表1取值,连续墙、内支撑的计算参数如表2,表3所示,自然博物馆基坑底板厚度  $d=1.5\text{ m}$ ,轴向刚度  $E_A=4.5\times 10^7\text{ kN}$ 。计算时完全模拟开挖步骤,模型如图4所示。

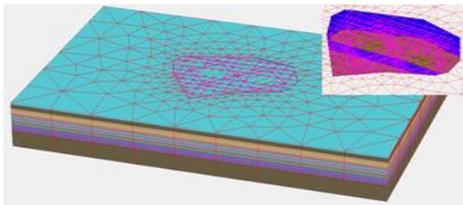


图4 模型三维网格图  
Fig.4 3D mesh model

表2 模型连续墙计算参数

Tab.2 Parameters of continuous model wall

墙截面等效厚度/m	弹性模量 $E/\text{kPa}$	重度 $\omega/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松比 $\nu$
西侧:1.0	$3\times 10^7$	25	0.15
其余:0.8	$3\times 10^7$	25	0.15

表3 模型支撑计算参数

Tab.3 Parameters of model support

截面尺寸/m×m	截面积/ $\text{m}^2$	弹性模量 $E/\text{kPa}$	重度 $\omega/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松比 $\nu$
外坑第1道:0.8×0.8	0.64	$3\times 10^7$	25	0.15
外坑第2~4道:1.2×1.0	1.2	$3\times 10^7$	25	0.15
内坑第1道:1.0×0.8	0.8	$3\times 10^7$	25	0.15
内坑第2道:Φ609 钢( $t=16$ )	$2.98\times 10^{-2}$	$2\times 10^8$	78	0.3

#### 4.2 计算结果分析

基坑西侧保护等级最高,故西侧连续墙变形为关注重点,提取西侧内坑外坑地连墙间距分别为10,15,20,30,50 m处的结果(对应基坑位置如图5所示),得到间距为15 m处每层开挖时地连墙的变形如图6所示。可知开挖至外基坑底时,外坑地下连续墙的最大水平位移随着开挖深度的增加而增加,且发生位置逐

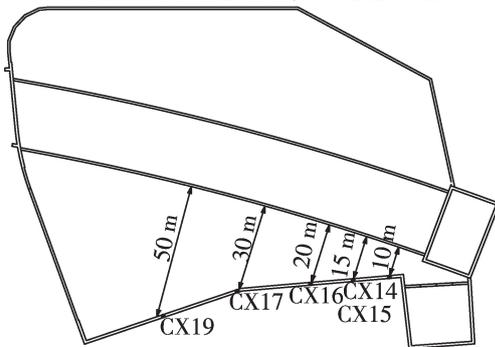


图5 结果分析示意图  
Fig.5 Result analysis schemes

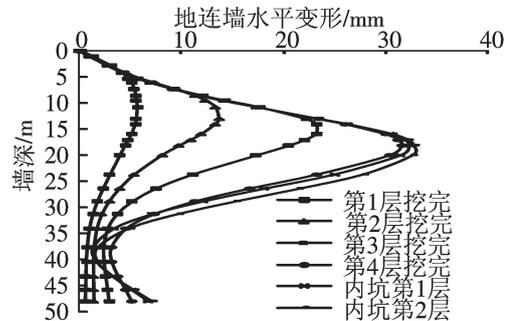


图6 开挖地连墙变形计算结果(15 m)  
Fig.6 Calculating results of excavating continuous wall (15 m)

渐下移,最大水平位移出现在开挖面以下0~2 m的位置。当外坑开挖至-13.7 m和-17.3 m时最大水平位移增幅较大,分别达到了70.6%和34.6%。而内坑开挖对外坑地连墙的变形影响较小,开挖至内坑底时变形仅增长4.2%。

内外坑连续墙间距为10,20,30,50 m时地下连续墙的最大水平位移变化规律与图6相似,但最大水平位移量值有所变化。计算得不同地墙间距各开挖工况最大水平位移变化规律见图7。由图7可知,基坑开挖到外坑底时,当内外坑地连墙间距小于20 m时,外坑地下连续墙的最大水平位移随地下连续墙间距的增大而增大,当内外坑地连墙间距大于20 m时,内外坑间距对外坑地下连续墙的最大位移影响不大;开挖至内坑底时,外坑地连墙变形增长很小。

### 5 自然博物馆坑中坑式基坑开挖实测分析

实际工程中地连墙水平位移监测点中的CX14,CX15,CX16,CX17和CX19五点(对应内外坑连续墙间距分别为9.5,14,21,27,48 m,图4),根据现场监测数据整理各层开挖的地连墙实际水平位移变化如图8所示。

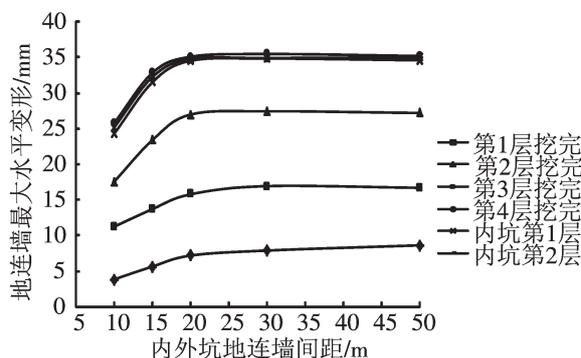


图7 连续墙最大水平位移随内外坑间距变化曲线  
Fig.7 Curves of maximum horizontal displacement of continuous wall with the changing distance of internal and external pit

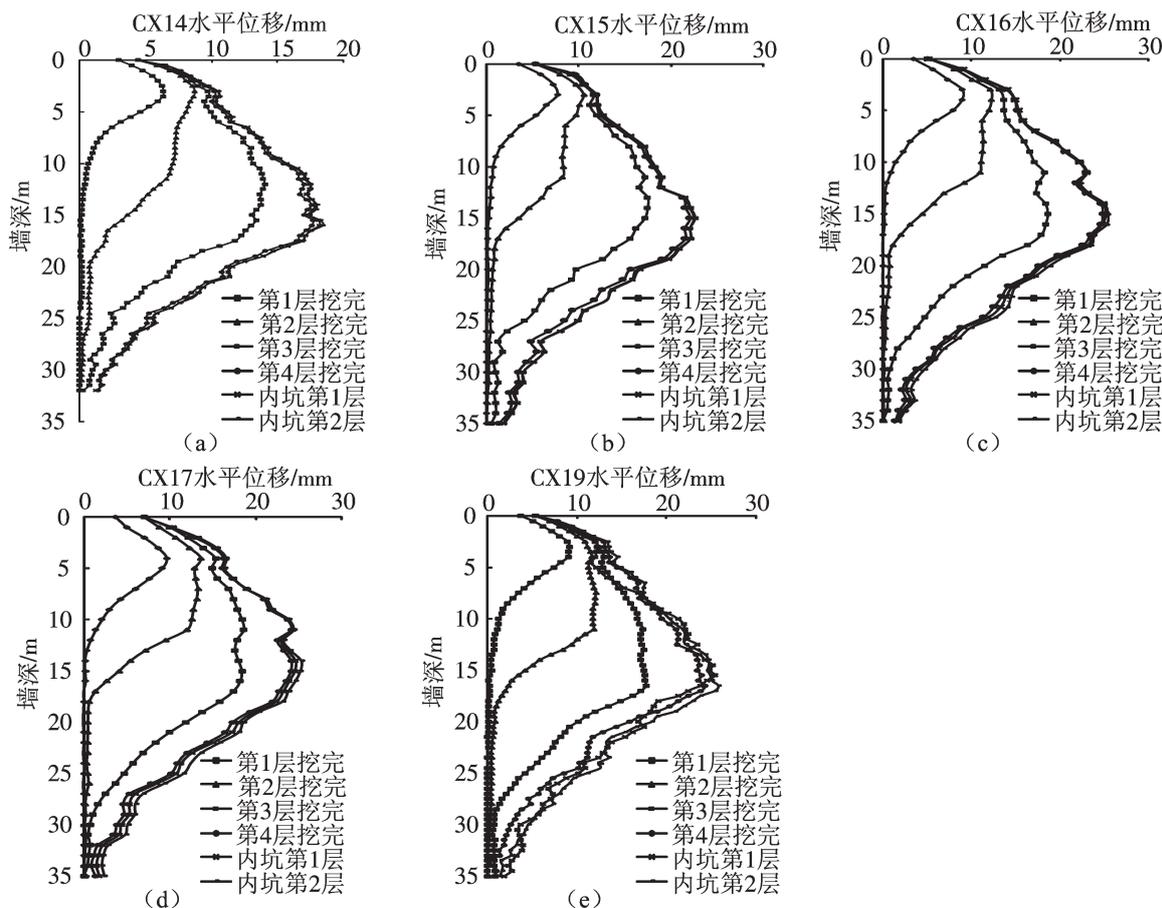


图8 现场监测连续墙实际水平位移  
Fig.8 Displacement of on-the-spot monitoring data

从实测连续墙变形图中可得出以下结论:

1) 变形随着开挖的进行而逐渐增加,墙体的最大变形值位于基坑开挖面附近,这与软土地区深基坑地连墙变形特征相一致<sup>[8]</sup>。

2) 支撑施作完成位置连续墙的侧向后续变形较小,这也是连续墙的一般变形规律。

3) 开挖第3层土时,地下连续墙的变形增量较大,与前文数值分析结论一致,分析原因认为,第3层土主要为淤泥质粘土,土体强度低,压缩性大,开挖产生的变形大。

4) 数值模拟所得地连墙变形规律与实测数据较为吻合,数值模拟预测的连续墙变形结果对于控制工程安全是有利的,内坑开挖对外坑地连墙变形影响较小。图9同样反映出当内外坑间距大于20 m

时,内外坑连续墙间距变化对外坑地连墙最大水平变形影响不大。

## 6 结语

通过对自然博物馆坑中坑式基坑工程中连续墙随内外坑间距变化的开挖模拟计算,与实际监测数据相对比,可以得出如下结论:

1) 数值模拟与实际工程监测得到的连续墙水平变形规律基本一致。

2) 基坑开挖第3层土过程中地连墙水平变形较大,在施工中要严格遵循“分层、分块、留土护壁、对称限时开挖、快速支撑”的总原则,坚决贯彻先撑后挖,减少基坑无支撑的暴露时间,保证基坑施工及周围环境的安全。

3) 在本工程中,坑中坑内坑开挖对外坑地连墙水平变形影响较小;当内外坑间距小于20 m时,外坑地连墙最大水平变形随内外坑连续墙间距增加而增大,但当内外坑间距大于20 m时,内外坑连续墙间距变化对外坑地连墙最大水平变形影响不大。

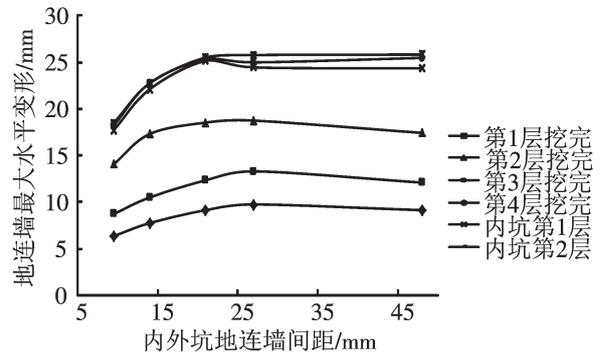


图9 实测连续墙最大水平位移随内外坑间距变化曲线  
Fig.9 Curves of maximum horizontal displacement of continuous wall with the changing distance of internal and external pit

## 参考文献:

- [1] 上海市行业标准编写组. 上海地铁基坑工程施工规程(SZ-08-2000)[S]. 上海, 2000.
- [2] 刘国斌, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2009: 2-8.
- [3] 龚晓南. 关于基坑工程的几点思考[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 99-108.
- [4] 潘卫成. 坑中坑的支护及对大基坑支护的影响[C]//太原: 第九届全国地基处理学术讨论会, 2006: 397-399.
- [5] 陈乐意, 李镜培, 梁发云. 坑中坑对基坑围护结构水平位移影响数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 59-61.
- [6] 申明亮, 廖少明, 周小华, 等. 坑中坑基坑应力场的参数化分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 188-191.
- [7] 郭印, 苏强, 杨静, 等. 基坑开挖对相邻建筑影响的三维有限元模拟分析[J]. 工程勘察, 2010(S1): 252-256.
- [8] 王建华, 徐中华, 陈锦剑, 等. 上海软土地区深基坑连续墙的变形特性浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 485-489.

(下转第107页)

- [8] 周晓娟. 基于DEA方法的地方高校投入产出分析[J]. 山西财经大学学报, 2011, 33(1): 250-252
- [9] 薛健, 吴国蔚. 基于投入产出分析的贸易对产业产出影响效应模型研究[J]. 工业技术经济, 2010, 29(1): 61-63
- [10] 陈明. 江西省实际使用外商投资时空变化及原因分析[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(6): 87-90.
- [11] 史焕平. 江西金融发展与经济增长的实证研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(3): 13-17.

## Input-Output Analysis on Information Industry in Jiangxi Province

Huang Hui, Han Shengjuan, Mao Xin

(School of Economics and Management, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Based on National Economy Industrial Classification and the related research on information industry classification, the paper stratifies and combines the related sub-industries. The information industry is divided into information manufacture and information service industries, and the classification standard of information industry is determined. In accordance with this standard, the paper recalculates the input-output table of 144 departments in Jiangxi province in 2007 and compiles the input-output table of 5 departments. The analysis on the relationship of economy shows that the development of information industry in Jiangxi is heavily dependent on information services. Industry-related analysis shows that information industry plays a restrictive role in regional economic development.

**Key words:** information industry ; input-output

(上接第 56 页)

## A Research on the Deformation of Continuous Wall in the Foundation Pit of Shanghai Natural History Museum

Li Yansong<sup>1</sup>, Zou Jicong<sup>2</sup>

(1. Management Office of Natural History Museum, Shanghai Science and Technology Museum, Shanghai 200127, China;  
2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The foundation pit project of newly built Shanghai Natural Museum is a project of irregular deep-pit excavation, with complex surrounding environment and great construction risk. Using three-dimensional finite element simulation method, deformation of the external pit underground continuous walls is calculated in the process of internal and external pit excavation. Calculation results of five different spacing of internal and external pit of underground continuous walls in the model are selected to make a comparison with on-the-spot monitoring data. The result is that the maximum horizontal displacement, when the distance between the pit wall of the internal and external pit continuous walls is less than 20m, will increase with the increasing distance between the internal and external pit. However, when the the distance between the internal and external pit continuous walls is more than 20m, the effect of maximum horizontal displacement is little, pit-in-pit excavation in this project has little influence on deformation of external pit continuous walls.

**Key words:** irregular deep-large excavation; pit-in-pit excavation; continuous wall; numerical simulation