

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0649-07

复杂环境深基坑施工过程的模拟分析

陈俊生^{1,2}, 莫海鸿^{1,2}, 刘叔灼^{1,2}, 万 顺^{1,2}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要: 为了评估复杂环境下基坑工程施工的可行性, 提出了将工程地质的场地整体稳定性分析、基坑边线附近地层稳定性分析引入基坑施工过程模拟的分析方法。通过地层分析与三维有限元计算的有机结合, 对复杂环境基坑工程的施工可行性作出评估。使用上述方法对一个典型工程实例的分析, 验证了地层分析结合有限元方法的可行性, 说明场地稳定性分析有助于了解工程场地及其周边区域的地层情况。采用与实际情况相同的起伏岩、土层面进行计算, 能更真实地模拟基坑支撑体系的实际状态, 为今后复杂周边环境、复杂地质条件基坑的分析提供了一个新的思路。

关 键 词: 复杂环境; 深基坑; 地层稳定分析; 三维有限元

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Simulation of construction process of deep foundation pit in complex environment

CHEN Jun-sheng^{1,2}, MO Hai-hong^{1,2}, LIU Shu-zhuo^{1,2}, WAN Shun^{1,2}

(1. Department of Civil and Traffic Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640 China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A compound method which includes integral site stability analysis, stratum stability analysis of foundation pit boundary and 3D finite elements is proposed to evaluate the feasibility of deep foundation pit project in complex environment. A typical foundation pit project is used to evaluate the feasibility of the compound method. The analysis results indicate that the ground stability analysis is useful to understand the stratum situation of project site and adjacent area. In 3D finite elements, undulate stratum can simulate the supporting system more accurately. The compound method brings a new analysis method for foundation pit project in complex environment and complex geological conditions.

Key words: complex environment; deep foundation pit; stratum stability analysis; 3D finite elements

1 引 言

随着城市地下空间开发和高层建筑的建设, 地下建(构)筑物日益增多, 新建地下工程不可避免地与原有地下建(构)筑物相互影响。近年来, 有不少学者采用三维有限元方法对不同支护形式的基坑工程进行了分析和研究, 建立了同时考虑基坑围护结构、土体与地下管线变形耦合作用的模型, 对地下管线保护措施了几种方法进行了数值分析^[1-6]。

众所周知, 土体是一种具有分布不均匀、层面交错的天然地质体, 即土层一般都处于起伏, 甚至层间交错的状态。在已有的基坑工程三维有限元分析中, 较少考虑岩、土层的起伏状态, 一般以地层

条件最差的地质钻孔为基础, 采用水平层面进行有限元分析, 由此可能使初始地应力场与实际存在较大差异, 支护结构的变形及内力与实际值之间有一定偏差。对于周边环境及地质条件复杂的基坑工程, 单独采用有限元方法在一定程度上已经不能满足工程的需要。

本文在已有基坑工程三维有限元分析方法的基础上, 参考大型工程中常用的地质建模方法^[7-9], 提出了将地质建模、工程地质的地层稳定性分析引入基坑施工过程模拟的分析方法, 通过地层稳定性分析与三维有限元计算的有机结合, 对复杂环境基坑工程的施工可行性作出评估, 也为今后类似工程的模拟分析提供新的思路。

收稿日期: 2008-11-10

第一作者简介: 陈俊生, 男, 1979 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土及地下结构领域的教学和研究工作。E-mail: jschen@scut.edu.cn

2 模拟分析的过程

2.1 场地整体稳定性分析

场地整体稳定性分析的目的在于从工程地质的角度，从地层起伏状态判断需要进行基坑施工的场地是否会因基坑施工而产生不同土层之间、或岩与土层之间的整体滑动，导致基坑支护结构本身可能承受较大的土压力，基坑周边地下建（构）筑物、管线产生过大的位移。场地整体稳定性分析的步骤如下：

（1）利用三维数据可视化软件 Surfer，将位置分散的钻孔点所揭示的各地层插值为连续的数据点信息（图 1，角部轮廓线为基坑边线），初步分析地层起伏情况。

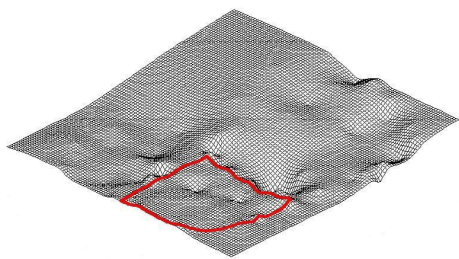


图 1 地层面密集数据点信息
Fig.1 Dense data information of stratum

（2）将步骤（1）密集数据点信息导入逆向工程软件 Imageware 形成点云，利用点云重建场地的地层面（图 2），然后将地层面导入三维 CAD 软件 Unigraphics，以云图的形式显示整个地层面的倾角（图 3），从整体上评价场地的稳定性。为通过密集数据点信息重建得到的地层曲面。

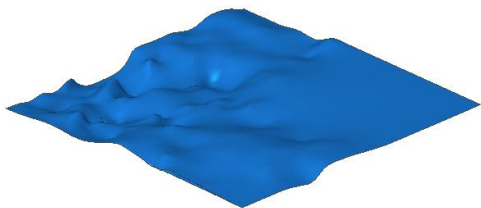


图 2 地层曲面重建结果
Fig.2 Rebuilding result of stratum

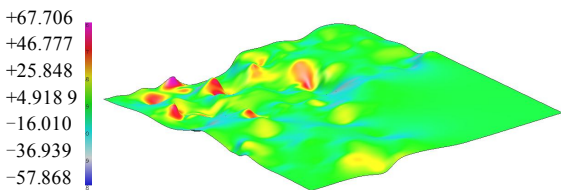


图 3 地层面倾角云图(单位: °)
Fig.3 Inclination angle nephogram of stratum(unit: °)

2.2 基坑边线附近地层稳定性分析

对基坑边线附近地层稳定性分析目的在于更充分地了解基坑边线附近的地层起伏状态，对拟定的基坑设计方案提出建议。

基坑开挖是否对基坑边线附近地层产生不利影响与地层面的倾角和倾向有关。如图 4 所示，地层面 1 的倾向为向基坑内，若地层面 1 倾角大于地层 1 与地层 2 之间的内摩擦角，则基坑开挖会引起地层沿基坑内滑动，除了主动的土压力以外，还可能向基坑支护结构施加滑动力；对于地层面 2，倾向为向基坑外，基坑开挖不会引起地层沿基坑内滑动，而且土压力可能小于主动土压力。

尤其需要对基坑边线附近地层稳定性分析的情况就是“吊脚桩”基坑支护结构。一般情况下，基坑支护结构应嵌入基坑底以下一定深度，以提供足够的被动土压力，防止支护结构下部失稳（图 4）；如果某场区基岩埋藏较浅，基坑深度较大，基坑底部附近为中、微风化岩层，且岩层完整性好、强度高，在这种情况下使用“吊脚桩”可能是较佳的方案（图 5）。能否使用“吊脚桩”支护，需要利用适当的分析方法，确定“吊脚桩”以下岩层是否会因为基坑开挖造成顺层滑动，影响基坑以及周边建筑物的安全。

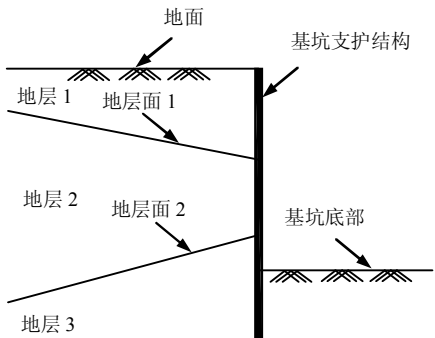


图 4 地层面倾角云图
Fig.4 Inclination angle nephogram of stratum

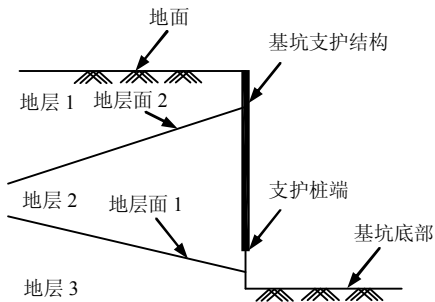


图 5 基坑支护结构长度与基坑深度的关系
Fig.5 Relation between length of supporting structure and depth of foundation pit

在获得了场地整体稳定性分析步骤(1)的密集数据点信息后,进行基坑边线附近地层稳定性分析的步骤如下:将上述密集数据点信息导入地图图形软件 Global Mapper,利用地层剖面显示功能,显示不同剖面线上地层的起伏形状(图6),计算地层倾角,评价该剖面上地层的稳定性,对采用的基坑支护形式和长度提出建议。

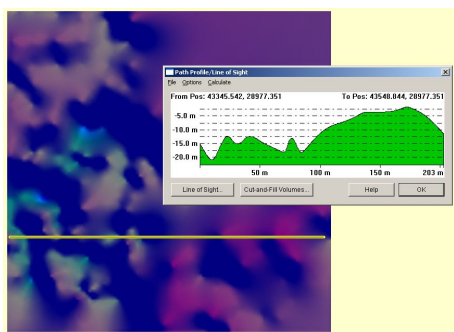


图6 地层剖面

Fig.6 Cross-section of stratum

2.3 基坑施工过程的三维数值模拟分析

基坑施工过程的三维数值模拟分析是基坑设计计算的重要手段。当基坑工程周边环境复杂时,在有限元计算中采用场地整体稳定性分析建立的起伏的地层曲面(图2),能有效地计算基坑施工对基坑本身及基坑周边环境的影响。

3 典型工程实例

现以广州雅居乐地产珠江新城项目基坑工程为例,结合 Surfer、Global Mapper、Unigraphics 和岩土工程有限元软件 Midas/GTS,介绍复杂环境基坑施工过程模拟分析的具体过程。

3.1 基坑工程概况

本项目基坑采用 $\phi 1\ 200\ \text{mm}@1\ 500\ \text{mm}$ 人工挖孔桩+3道环梁内支撑支护体系,平面尺寸及环梁内支撑布置如图7所示,基坑支护结构的详细情况见表1。

3.2 场地周边环境情况

本项目场地周边环境较为复杂,东、南、西、北方向均有已建或在建的地下建(构)筑物。场地周边已建或在建的建(构)筑物如图8所示,详细情况见表2。

3.3 场地整体稳定性分析

3.3.1 地质资料收集

对本项目进行场地整体稳定性分析需要扩大分析范围,以掌握整个场区的地质情况。在已经掌握本项目岩土工程勘察报告的基础上,收集了广州新

烟草大楼基坑、广州富力基坑的地质资料,共计148个钻孔(图9),用以分析场区的地质情况。

3.3.2 土层参数

本次分析的土层参数见表3。岩土工程勘察报告并无直接提供弹性模量值,本项目根据岩土工程勘察报告提供的压缩模量平均值 E_s ,在初定弹性模量 $E=(3\sim 5)E_s$ 的基础上,结合已有工程经验,从而获得各土层弹性模量的取值。

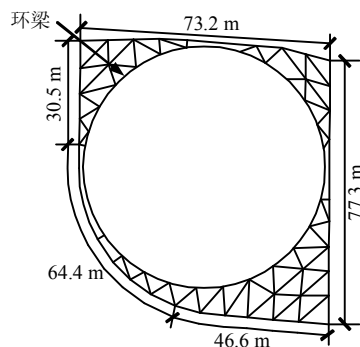


图7 雅居乐基坑平面图

Fig.7 Plan of AGILE foundation pit

表1 雅居乐基坑详细情况

Table 1 Detailed situation of AGILE foundation pit

项目	详细情况	数值
基坑深度/m		25.5
基坑面积/ m^2		5 487.0
各道支撑中心标高/m (基坑顶面标高为 ± 0.00)	第1道撑标高	-2.0
	第2道撑标高	-7.7
	第3道撑标高	-14.2

注:支护形式采用人工挖孔桩($\phi 1\ 200\ \text{mm}@1\ 500\ \text{mm}$)+环梁内支撑。

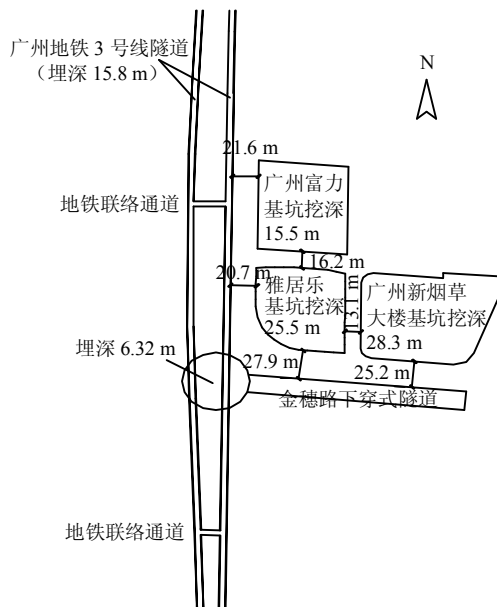


图8 雅居乐基坑周边环境图

Fig.8 Surrounding environment of AGILE foundation pit

表 2 雅居乐基坑周边情况汇总
Table 2 Detailed surrounding environment of AGILE foundation pit

方向	工程名称	与本项目 基坑距离 / m	开挖 深度 / m	支护形式	工程进度
东	广州新烟草大楼基坑	13.1	28.3	人工挖孔桩 ϕ 1 200 mm@1 500 mm, 桩间预应力锚索(间距为 1.5 m)	局部已施工至 ± 0.00 m, 基坑尚未回填
南	金穗路下穿式隧道	27.9	6.32	明挖, 箱形框架, 墙厚 0.5 m	已经使用近 10 年
西	广州地铁三号线隧道	20.7	15.8	矿山法三心圆隧道, 衬砌总厚度: A1 型为 0.45 m, A2 型为 0.55 m	正在运营
北	广州富力基坑	16.2	15.5	钻孔桩 ϕ 1 000 mm@1 125 mm, 桩间预应力锚索(间距为 2.2 m)	基坑施工完毕, 正在进行桩基施工

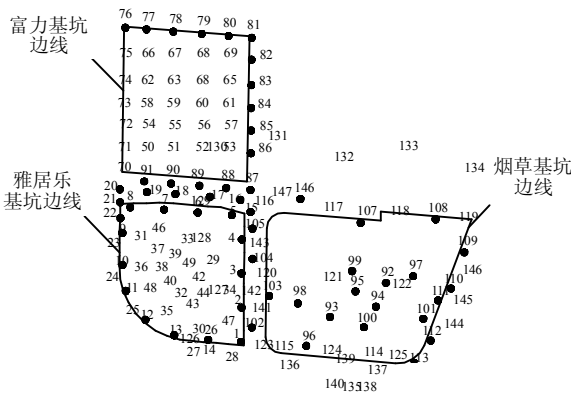


图 9 钻孔分布图
Fig.9 Distribution of boring holes

表 3 土层参数
Table 3 Stratum parameters

地层名称	直剪		重度 $\gamma / (\text{kN/m}^3)$	弹性模量 E / MPa
	$\varphi / (^{\circ})$	c / kPa		
①-1 杂填土	10	8	16.0	14
②-2 粗砂	28		18.0	30
③-1 粉质黏土	15	24	19.5	25
③-2 粉质黏土	16	28	20.0	25
④-1 全风化细砂岩	18	32	20.5	2 000
④-2 强风化细砂岩	26	120	21.0	4 000
④-3 中风化细砂岩	28	250	22.0	6 000
④-4 微风化细砂岩	32	800	23.5	10 000

3.3.3 各地层三维地形处理结果

通过分析可知, 本项目场地地层 15 m 以上主要为土层和风化岩层, 15 m 以下主要为中、微风化岩层, 由于基坑开挖深度为 25.5 m, 具有采用“吊脚桩”支护形式的可能性。

为节省篇幅, 这里仅显示最为关心的基坑底部附近地层面(即微风化细砂岩层顶面)的三维地形图(图 10, 角部轮廓线为基坑边线)。

通过 Unigraphics 的计算, 微风化细砂岩层顶面与水平面之间的倾角云图如图 11 所示(空缺位置为

基坑)。由于 Unigraphics 对倾角正负的定义很难判别岩面是否向基坑内倾斜, 因此, 由图 11 的倾角数值可判别场区岩面的起伏程度, 未能判别岩面是否向基坑内倾斜。从图 11 可知, 整个场区微风化细砂岩层顶面倾角绝对值范围在 $0 \sim 67.7^{\circ}$, 岩面起伏较大。

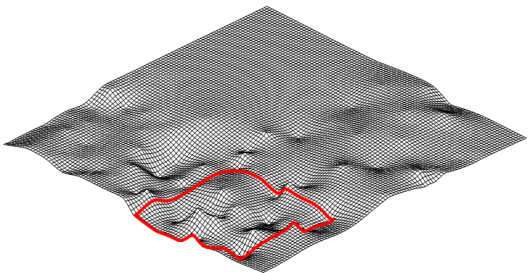


图 10 微风化细砂岩层顶面三维地形图
Fig.10 3D geographical map of top surface of slightly weathered sandrock

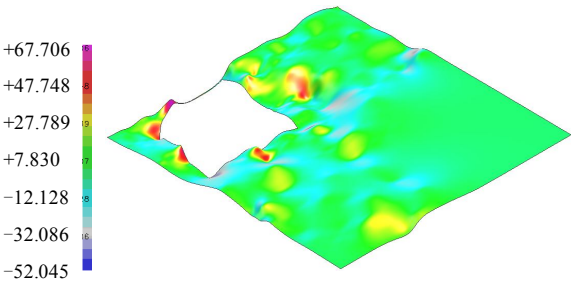


图 11 微风化细砂岩层顶面倾角(单位: $^{\circ}$)
Fig.11 Inclination angle of top surface of slightly weathered sandrock (unit: $^{\circ}$)

3.4 基坑边线附近地层稳定性分析

图 12 为微风化细砂岩层剖面位置。为节省篇幅, 仅显示 1-1 剖面的地层起伏形态(图 13), 倾角计算结果汇总于表 4。

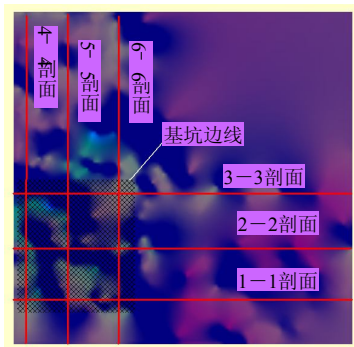


图 12 微风化细砂岩层顶剖面位置
Fig.12 Cross-section position of slightly weathered sandrock

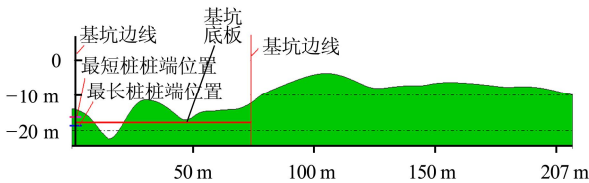


图 13 1—1 剖面
Fig.13 Cross-section 1—1

表 4 微风化细砂岩层剖面倾角计算结果
Table 4 Inclination angle of top surface of slightly weathered sandrock

剖面	位置	倾角 / (°)	剖面	位置	倾角 / (°)
1—1	基坑东侧	20	4—4	基坑南侧	15
1—1	基坑西侧	20	4—4	基坑北侧	28
2—2	基坑东侧	29	5—5	基坑南侧	5
2—2	基坑西侧	28	5—5	基坑北侧	5
3—3	基坑东侧	-5	6—6	基坑南侧	10
3—3	基坑西侧	1	6—6	基坑北侧	-8

注：倾角符号为正号时表示向基坑内方向，倾角符号为负号时表示向基坑外方向。

由表 4 可知，在基坑 2—2、4—4 剖面处，基坑边微风化细砂岩层顶面倾角分别为 29° 和 28°，已经超过中风化细砂岩的内摩擦角（表 3），且倾向指向基坑内，不宜直接采用图 5 的“吊脚桩”方案，应通过计算确定支护桩长度。基坑其他剖面中风化细砂岩与微风化砂岩界面倾角均不大于 28°，故可初步判断在这些剖面上采用“吊脚桩”方案可行。

3.5 基坑施工过程的三维数值模拟分析

3.5.1 地层模型

经过地层分析，在有限元模型里面需要包含的地层有②—2 粗砂、③—1 粉质黏土、③—2 粉质黏土、④—1 全风化细砂岩、④—2 强风化细砂岩、④—3 中风化细砂岩、④—4 微风化细砂岩（图 14）。

3.5.2 支护结构参数及本构关系

本次分析的支护结构参数如表 5 所示。

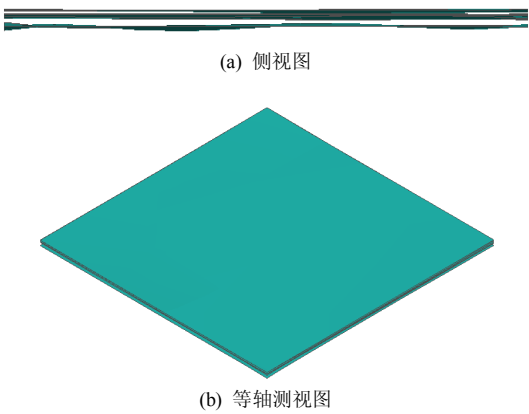


图 14 各地层模型
Fig.14 Stratum model

表 5 支护结构参数
Table 5 Parameters of supporting structure

基坑名称	结构名称	截面尺寸 / mm	材料
雅居乐基坑	放射撑	宽 800，高 1 000	C30 混凝土
雅居乐基坑	腰梁	宽 1 200，高 1 000	C30 混凝土
雅居乐基坑	环梁	宽 2 600，高 1 000	C30 混凝土
雅居乐基坑	支护桩	φ1 200@1 500	C30 混凝土
广州富力基坑	基坑支护	φ1 000@1 125	C30 混凝土
广州新烟草大楼基坑	基坑支护	φ1 200@1 500	C30 混凝土

3.5.3 分析工况

本次分析主要分为 6 个工况，即 6 个施工步，具体如表 6 所示，支撑标高为支撑中心的标高。

表 6 分析施工步
Table 6 Construction procedure in analysis

编号	工况	简述（标高均为建筑标高）
1	初始应力场计算	本工况是岩土工程分析的第 1 步，在整个分析模型内只有岩、土体。
2	地铁隧道、富力基坑、烟草基坑开挖计算	周边地下建（构）筑物的施工对整个场区的地应力分布产生影响，是需要考虑的因素。
3	雅居乐基坑第 1 次开挖	基坑开挖至-2.6 m，施工第 1 道支撑（标高-2.0 m）
4	雅居乐基坑第 2 次开挖	基坑开挖至-8.3 m，施工第 2 道支撑（标高-7.7 m）
5	雅居乐基坑第 3 次开挖	基坑开挖至-14.8 m，施工第 3 道支撑-14.2 m
6	雅居乐基坑第 4 次开挖	基坑开挖至-25.5 m

3.5.4 有限元网格

整体有限元网格如图 15 所示（图中土层网格以半透明的方式显示）。雅居乐基坑支护结构如图 16 所示。整体模型共有 202 555 个单元，35 196 个节点。

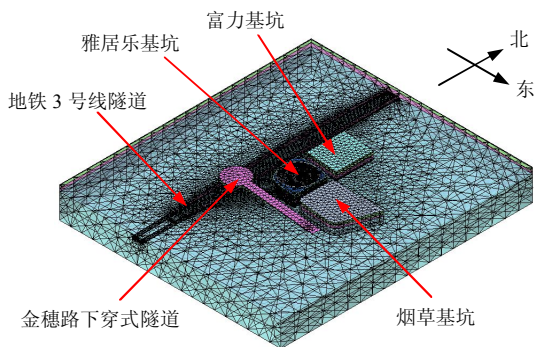


图 15 整体模型有限元网格

Fig.15 Finite element mesh of whole model

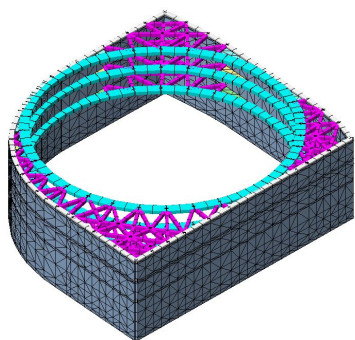


图 16 雅居乐基坑支护结构有限元网格

Fig.16 Finite element mesh of supporting structure of AGILE foundation pit

3.5.5 计算结果

计算结果中包含场地整体位移、基坑支护结构位移、基坑支护内支撑结构内力、广州地铁 3 号线隧道位移、重要地下管线位移。在这里仅列出场地整体位移及广州地铁 3 号线隧道位移，东西向位移结果以向东为正，南北向位移结果以向北为正。计算结果见表 7。

表 7 场区整体位移计算结果汇总表
Table 7 Analysis results of site displacements

工况	东西向		南北向	
	位移极值 / mm	位移极值位置	位移极值 / mm	位移极值位置
3	4.2	富力基坑西侧	3.4	雅居乐基坑东北角附近
4	-12.8	雅居乐基坑东侧附近	13.5	雅居乐基坑南侧
5	21.8	雅居乐基坑西侧	-21.8	雅居乐基坑北侧
6	22.0	雅居乐基坑西侧	-20.6	雅居乐基坑北侧

由表可见，雅居乐基坑施工引起场区位移较小，在“吊脚桩”支护位置，岩、土层没有发生顺层滑动的情况。

本项目基坑施工对广州富力基坑、广州新烟草大楼基坑的影响见表 8，这里仅显示工况 6 的情况。

表 8 雅居乐基坑施工对周边基坑工程影响汇总表
Table 8 Effects on other foundation pit engineering due to AGILE foundation pit construction

项目	与本项目的相对位置	方位	位移极值 / mm	位移最大值位置
广州富力基坑	北边	东西向	4.50	基坑西侧
		南北向	1.60	基坑南侧
广州新烟草大楼基坑	东边	东西向	1.48	基坑西侧
		南北向	0.60	基坑北侧

从表可知，雅居乐基坑施工引起广州富力基坑、广州新烟草大楼基坑的位移最大值不超过 4.5 mm，影响程度较小。

本项目基坑施工对广州地铁 3 号线隧道的影响见表 9，这里仅显示工况 6 的情况。

表 9 广州地铁 3 号线隧道位移汇总表
Table 9 Displacements of tunnel of Guangzhou Metro Line 3

项目	最大值 / mm	最大值位置
水平位移	2.1	东边靠近雅居乐基坑的衬砌
竖直沉降	1.5	东边靠近雅居乐基坑的衬砌

从表可知，基坑施工对广州地铁 3 号线隧道影响较小，在允许值范围内。

4 结 论

通过一个典型工程实例，结合本文提出的地质建模、工程地质的地层稳定性分析及三维有限元综合方法，得到如下结论：

(1) 场地整体稳定性分析、基坑边线附近地层稳定性分析有助于了解工程场地及其周边区域的地层情况。

(2) 在基坑施工过程的三维数值模拟分析中，采用与实际情况相同的起伏岩、土层面进行计算，能更真实地模拟基坑支撑体系的实际状态。

(3) 将地层分析与三维有限元计算的有机结合，能对基坑工程的施工可行性作出评估，对基坑支护结构设计提出合理建议。

参 考 文 献

- [1] 崔宏环, 张立群, 赵国景. 深基坑开挖中双排桩支护的三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 662—666.
CUI Hong-huan, ZHANG Li-qun, ZHAO Guo-jing. Numerical simulation of deep foundation pit excavation with double-row piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(4): 97—101.

- [2] 侯永茂, 王建华, 陈锦剑. 超大型深基坑开挖过程三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1374—1377.
HONG Yong-mao, WANG Jian-hua, CHEN Jin-jian. 3D FEM analysis of over size & deep excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(Sup.): 1374—1377.
- [3] 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.
RUI Rui, XIA Yuan-you. Construction scheme design for deep foundation pit constructed by “top-down” method based on 3D FEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1391—1395.
- [4] 沈磊, 陆余年, 岳建勇. 超大深基坑变形特征的数值模拟及其实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 538—542.
SHEN Lei, LU Yu-nian, YUE Jian-yong. Deformation characteristics of oversized deep foundation pit: comparison of numerical simulation with the instrumentation results [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(4): 538—542.
- [5] 赵杰, 邵龙潭. 深基坑土钉支护的有限元数值模拟及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 984—988.
ZHAO Jie, SHAO Long-tan. Numerical simulation and stability analysis of soil nailing support for deep foundation pit by FEM[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 984—988.
- [6] CHUNGSIK YOO, DONGYEOB LEE. Deep excavation-induced ground surface movement characteristics—A numerical investigation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(2): 231—252.
- [7] 朱良峰, 任开蕾, 潘信, 等. 地质实体模型的三维交互与分析技术研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1959—1963.
ZHU Liang-feng, REN Kai-lei, PAN Xin, et al. Study on 3D-interaction and analytical techniques for solid models of geological entities[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1959—1963.
- [8] 朱良峰, 潘信. 地质断层三维构模技术研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 274—278.
ZHU Liang-feng, PAN Xin. Study on 3D-interaction and analytical techniques for solid models of geological entities[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 274—278.
- [9] 李明超, 胡兴娥, 安娜, 等. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1355—1360.
LI Ming-chao, HU Xing-e, AN Na, et al. 3-D geological modeling and visual analysis of landslide mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1355—1360.

第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会第一号通知

“第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会”由中国力学学会岩土力学专业委员会主办、温州大学和浙江大学共同承办, 将于2010年11月在浙江温州召开。

会议主题: 岩土力学数值分析与解析新方法

会议的专题: ①岩土本构模型与参数研究; ②岩土工程重大工程实例; ③岩土试验与测试技术; ④环境岩土工程; ⑤土动力学与土工抗震数值分析方法。

重要日期: ①论文征稿截止日为2010年4月30日; 会议挑选部分优秀论文在《岩土力学》增刊、《浙江大学学报》(工学版)上出版(EI检索), 其余论文将以《温州大学学报》增刊形式发表; ②2010年5月31日前通知审稿专家审稿意见; ③2010年6月30日前通知录用结果等事宜。

联系方式: 浙江省温州市茶山高教园区温州大学建筑与土木工程学院, “第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会”组委会, 邮编: 325035. E-mail: wzjgxy@wzu.edu.cn, wzjgxy@126.com。

联系人: 孙林柱(0577—86689616, 13706659656); 王军(0577—86689687, 15968795938); 孙宏磊(0571—888208774, 13758217424); 余闯(0577—86689619, 15868717768); 丁光亚(0577—86689609, 15058753768)。