

深基坑开挖数值模拟分析及实测对比

宋德鑫

中亿丰建设集团股份有限公司 江苏 苏州 215008

【摘要】：敏感环境条件下深基坑开挖对周边环境的影响已成为各参建方乃至社会各界重点关心的问题，随着深基坑开挖计算分析软件的日益成熟及在土层参数及本构模型选取方面积累的大量经验，采用多种手段进行的数值模拟计算分析已在工程实践中广泛应用。本文通过一个基坑实例，分别采用同济启明星深基坑支挡结构设计软件、Plaxis 二维有限元及迈达斯 GTS-NX 三维有限元对基坑开挖工况进行模拟计算，采用不同手段分析了基坑开挖对基坑周边环境的影响，重点阐述了各种计算手段的利弊及计算结果的差异，并把各种模拟计算结果和实测数据进行了对比。结果表明：上述三种计算结果基本能与现场实测结果吻合，具有较高的可信度，可以用于指导基坑设计方案的选型及基坑施工。

【关键词】：深基坑；数值模拟分析；有限元；弹性支点法

引言

随着城市建设的迅速扩张，土地资源日益紧张，地下空间的开发利用已越来越受重视，超大、超深规模的深基坑工程如同雨后春笋般涌现，基坑周边环境越来越复杂^[1]。基坑周边环境的保护要求也日益严格，基坑设计单位在基坑开挖前不仅要围护结构的变形进行预测，还需要对基坑开挖对周边环境的影响进行预测，并根据周边环境的保护要求来选择合适的支护形式。这就要求设计单位需根据地区工程经验采用多种计算手段进行对比分析，综合评估。目前，常用计算分析手段包括竖向弹性支点法^[2]、二维有限元及三维有限元。笔者以苏州市某办公研发大楼基坑为例，分别采用竖向弹性支点法、二维有限元及三维有限元进行模拟计算，并与基坑开挖后实测数据进行对比分析，重点讨论各计算手段的利弊及与实际监测结果的差异，为基坑开挖对周边环境影响的预测提供借鉴。

1 工程概况

本项目位于苏州市相城区，蠡塘河路北，澄阳路东。地下二层，基坑面积约 1.92 万 m²，周长 560m，基坑开挖深

度为 10.1~11.4m。

1.1 周边环境条件

本基坑南临蠡塘河路，路边有燃气管、雨水管等管线；基坑西侧存在一幢 2-3 层生产用房及一幢 6 层办公楼，其中 2-3 层生产用房下设一层地下室，距本基坑约 5.0m，均为天然基础；基坑北侧为某装饰公司内部绿化带及内部道路，北侧东段存在一幢 3F 研发楼，天然地基，距本基坑约 13m；基坑东侧红线外为一条南北向河道，距本基坑约 15-19m，河道宽约 10.2m，河水深约 1-2m，河道水位标高约 1.2m。基坑周边环境条件复杂，基坑周边建筑及道路管线为本基坑开挖需重点监控保护的對象。

1.2 地质概况

本基坑涉及主要土层的物理力学指标如表 1 所示。

1.3 水文概况

对本基坑有影响的地下水主要为潜水及微承压水。潜水主要赋存于填土层中，稳定水位标高为 1.19-1.44m。微承压水主要贮存于④A 粉土夹粉质黏土层中，稳定水头标高在 0.90m 左右。

表 1 土层物理力学参数指标

层号	土层名称	层厚 /m	含水量	压缩模量	重度 γ/(kN·m ⁻³)	固结快剪		渗透系数	
			w/(%)	E(MPa)		Ck/(kPa)	φk/(°)	Kv/(cm/s)	KH/(cm/s)
①	素填土	0.5~2.8	33.2	3.85	18.34	10.0	5.0	4.9E-05	5.1E-05
②	粘土	1.8~4.0	26.3	7.40	19.48	53.7	14.2	1.5E-07	2.3E-07
③	粉质粘土	2.8~4.8	29.6	6.49	18.86	32.8	13.7	3.6E-06	5.5E-06

④	粉质粘土	6.3~12.7	31.6	5.28	18.59	27.8	14.4	4.1E-06	6.6E-06
④A	粉土夹粉质粘土	0.7~2.9	32.6	8.54	18.41	7.5	19.2	4.2E-05	6.4E-05
⑤	粉质粘土	1.6~8.7	32.1	5.10	18.53	26.8	14.5	3.7E-06	6.1E-06
⑥1	粘土	1.0~3.6	26.6	7.39	19.36	49.2	13.4	7.4E-07	1.1E-07
⑥2	粉质粘土	3.2~7.4	31.1	6.37	18.64	26.9	14.5	4.5E-06	5.5E-06
⑥3	粉质粘土	1.0~9.0	31.8	5.15	18.57	28.1	14.2	4.6E-06	6.2E-06
⑥4	粉质粘土	2.5~6.6	28.7	6.75	19.00	35.3	14.2	6.6E-06	7.2E-06

2 支护结构设计

本基坑采用明挖顺做施工，主要采用钻孔灌注桩+三轴水泥土搅拌桩止水帷幕+一道钢筋砼支撑的支护形式，基坑围护剖面如图1。

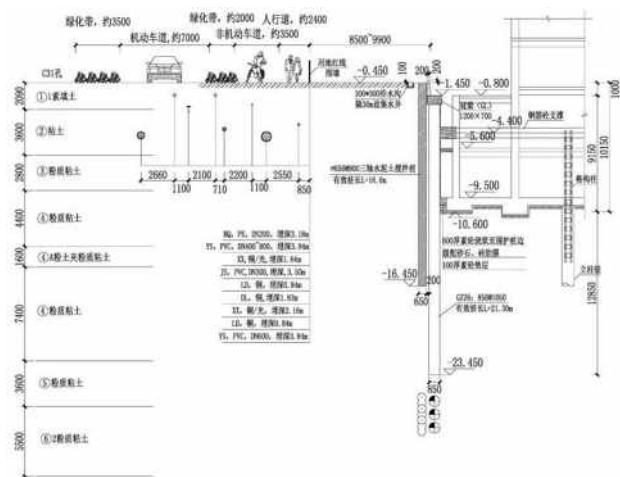


图1 基坑围护剖面图

3 计算分析

3.1 弹性支点法

根据现行基坑规范^[2]，采用弹性支点法，即支撑简化成弹性支座，被动土体等效于土弹簧，坑内土体水平反力系数根据土体水平基床系数确定^[3]，采用《同济启明星深基坑支护结构设计软件》FRWS9.0版，计算结果如图2。

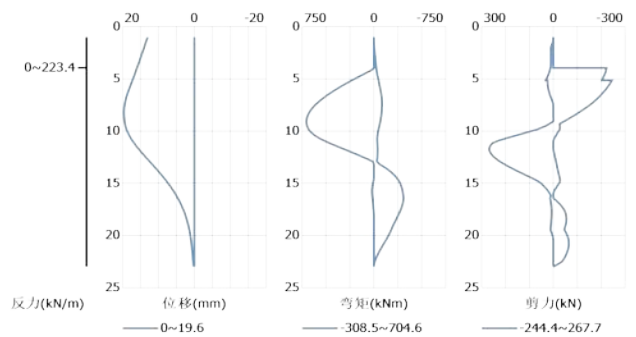


图2 基坑开挖内力变形包络图

3.2 二维有限元分析

二维数值分析中采用 Plaxis 软件，为了较准确的反映基坑开挖卸载对周围建筑物等产生的附加变形影响，计算分析采用了平面弹塑性有限元分析方法，土体采用小应变硬化土模型，计算结果如图3。

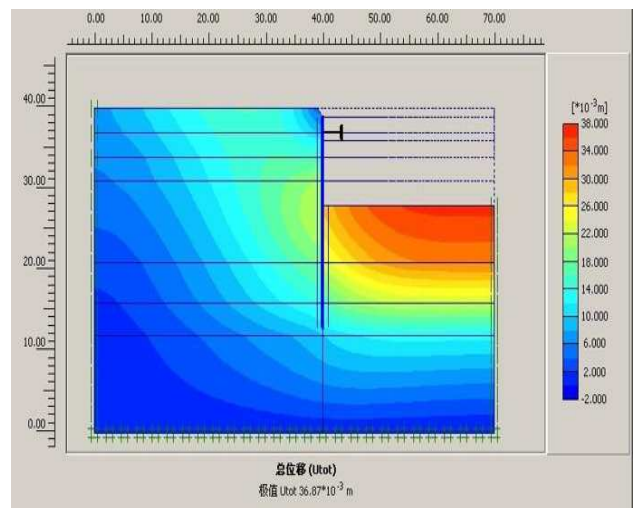


图3 基坑开挖总位移云图

3.3 三维有限元分析

考虑时空效应，建立三维有限元模型，采用修正莫尔-库伦（Modified Mohr-Coulomb）模型-HS模型，建筑物采用3D实体单元，围护桩采用2D板单元，支撑及圈梁采用1D梁单元。计算中假定土体为各向同性体，考虑土与围护结构的共通作用及分层开挖。

通过试算，确定模型尺寸为295m×260m×40m，系统模型共163125个节点，178479个单元，计算结果如图4。

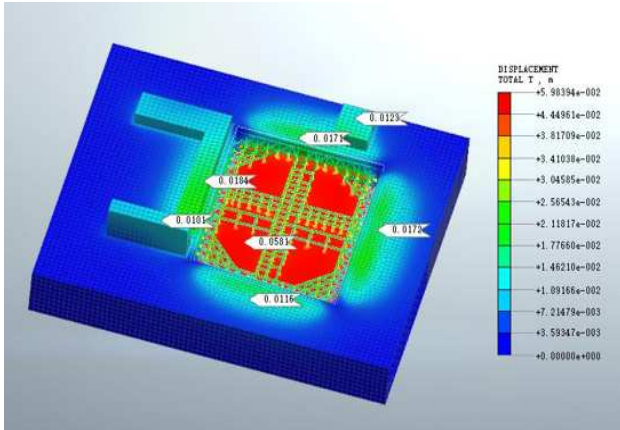


图4 基坑开挖总位移云图

根据上述三种计算分析结果对比，三种计算结果较相近但也有些区别。启明星计算过程简单，无法考虑基坑开挖的时间及空间效应，采用弹性支点法计算的变形往往比实测要小，由图3可知，采用弹性支点法计算的围护结构桩身位移为19.6mm。二维连续介质有限元方法能考虑土体与围护结构的共同作用，能分工况模拟土体开挖卸荷回弹对围护结构的变形影响，但基坑开挖时典型的时间、空间问题，二维连续介质有限元无法考虑基坑时空效应^[4]。二维有限元属于平面问题，无法考虑基坑的阳角效应及长边效应。由图4可知，围护桩水平最大位移约22mm，坑外最大沉降约16mm，基坑底部最大回弹量约38mm。三维连续介质有限元能较好的模拟基坑的空间尺寸效应，能考虑土与围护结构及周边建筑物等的共同作用，能较准确的反映基坑与周边建筑物或构筑物的协同变形，能根据根据施工顺序模拟分段开挖工况，但三维有限元对基坑的时间效应目前还没有较好的模拟办法，特别是在软土地区，土体的含水率高、强度低，土体具有较大的流变性。随着时间的推移，主要体现在土体的应力松弛及蠕变上^[5]。基坑暴露的时间越长，基坑周边的变形越大。由图5可知，基坑周边建筑最大变形约18mm，基坑周边最大沉降约14mm，基坑底最大回弹量约58mm，围护桩最大水平位移约27.5mm。

4 实测与模型计算结果对比分析

4.1 现场实测

从桩基施工到基坑回填历时约9个月，整个过程较为顺利，监测数据均未预警，基坑开挖到底照片如图5。根据监测总结报告，本基坑共布设桩顶水平位移及沉降监测点36个，最大沉降量为16.62mm，桩顶最大水平位移为28.9mm，共布设道路沉降监测点17个，最大沉降为13.68mm，共布设建筑沉降监测点33个，最大沉降为12.25mm，共布设管线沉降监测点27个，管线最大沉降为12.67mm，共布设地下水水位监测点13个，最大水位下降量为460mm，共布设土体深层水平位移10个，最大深层土体水平位移为29.6mm。

4.2 监测结果与模型数值分析结果对比

取代表性监测点，图6为最终工况下围护桩实测深层土体水平位移与计算模拟围护桩水平位移对比示意图。



图5 基坑开挖到底现状图

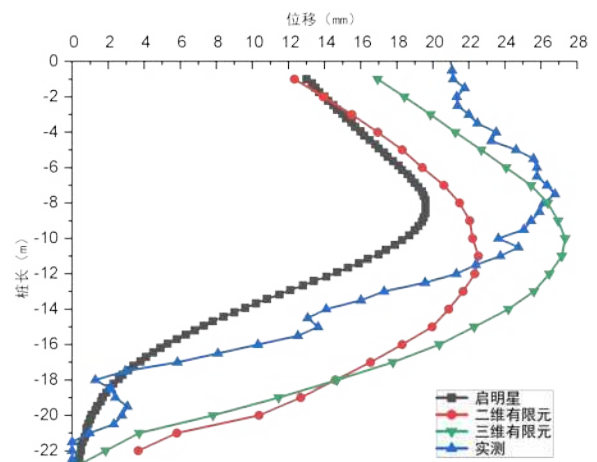


图6 模型分析桩身位移与实测位移对比

由上图可见，三种计算结果与实测值变形趋势基本一致，采用弹性支点法计算的结果与有限元及实测数据明显偏

小, 主要是因为启明星是基于二维平面弹性支点法进行的, 无法考虑基坑的时间及空间效应, 也无法考虑土体的流变特性。二维 Plaxis 有限元计算的桩身位移较启明星计算结果大, 但桩身下部位移较其他计算结果大, 主要原因是二维有限元无法考虑基坑的空间效应, 围护桩与土体共同作用, 坑内土体产生了较大的卸荷回弹。迈达斯 GTS-NX 三维有限元计算结果与实测值基本相近, 主要是因为三维有限元能考虑基坑的空间效应, 模拟计算更贴近实际开挖卸荷工况, 由于三维有限元没有考虑拆撑工况, 所以基坑实测桩顶变形与上述其他几种计算结果均偏大。

5 结论

(1) 敏感环境条件下的深基坑环境条件多变、地质条

件复杂、开挖工况繁絮, 由于各种计算手段均存在一定的局限性, 单一的计算方法已不能较准确反映基坑开挖对周边环境的影响, 采用多种方法对比分析、综合评估是必要的。

(2) 三维有限元能较好的模拟基坑开挖的空间效应, 在具有成熟的本构模型相关参数经验的基础上能较准确的反应基坑开挖对周边环境的影响。

(3) 由于目前计算手段无法考虑土体的蠕变效应, 基坑实测变形往往比模拟计算结果偏大, 合理安排施工顺序、减少深基坑暴露时间对控制基坑变形有利。

(4) 本基坑面积较大, 开挖深度较深, 由于施工速度较快, 基坑周边及围护结构实测变形与模拟计算结果基本相吻合, 围护结构选型合理, 可为类似项目提供借鉴。

参考文献:

- [1] 蒋永强.复杂环境条件下深基坑空间效应分析及环境共生综合评价研究[D].重庆大学,2015
- [2] JGJ 120-2012,建筑基坑支护技术规程(附条文说明)[S].
- [3] 李志高,吴小将.差异环境保护等级下基坑变形计算方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2008(05):1074-1080.
- [4] 刘爱华,黎鸿,罗荣武.时空效应理论在软土深基坑施工中的应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):571-576.
- [5] 门燕青.各向异性软土深基坑坑底抗隆起稳定性分析[D].山东科技大学,2011.

作者简介: 宋德鑫, 1986 年生, 男, 汉族, 陕西安康人, 本科, 工程师, 从事岩土工程设计工作。