

文章编号:1673-9469(2008)03-0015-04

## 基于 FLAC - 3D 的深基坑开挖过程数值分析

杨宝珠, 仲晓梅

(天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384)

**摘要:**以天津市某一深基坑工程为例, 基于 FLAC - 3D 数值分析软件, 进行了不同开挖时间和空间的数值模拟计算, 并与开挖监测结果进行对比, 分析了深基坑开挖过程中围护结构变形、支撑轴力、坑底回弹及工程桩承载性状等参数的时空效应。

**关键词:**深基坑工程; 时空效应; 数值分析

**中图分类号:** TU470

**文献标识码:** A

### Numerical analysis of deep excavation on FLAC - 3D

YANG Bao-zhu, ZHONG Xiao-mei

(Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Taking a deep excavation in Tianjin for example, the numerical simulations are progressed under different excavation time and space basing on the numerical analysis software FLAC - 3D in this paper. The measured data is compared and the changes of horizontal displacement of wall, supporting force, bottom soil upheaval, and bearing capacity of piles during excavation with time and space were analyzed

**Key words:** deep excavation; space - time dependent effect; numerical analysis

随着基坑工程的不断实践, 实测发现支护结构上承受的土压力、支撑轴力、基坑变形等随时间而变化, 而且这些变化除了与土性、支护结构参数相关外, 还与基坑的开挖方式、时间、开挖次序等施工参数相关。在基坑开挖过程中, 每步开挖的空间尺寸、围护墙无支撑暴露面积和时间等施工参数对基坑变形具有明显的相关性, 基坑工程的三维空间性状日益受到人们的关注<sup>[1-3]</sup>。

本文基于 FLAC - 3D 数值分析软件, 以天津市某一深基坑工程为例, 对开挖过程中围护结构变形、支撑轴力、坑底回弹及工程桩承载性状等进行不同开挖时间和空间的数值模拟计算, 并与开挖监测结果进行了对比, 为设计和施工提供有益的参考。

### 1 工程概况

本工程位于天津市河北区, 地面 31 层, 地下 2 层, 基坑开挖深度为 8.5m, 采用钻孔灌注桩做围护

结构、水泥土搅拌桩做止水帷幕, 围护桩桩底深度 18.6m。基坑开挖时在地面下 1.0m 采用了临时内支撑体系, 在长度方向的中部设置三根钢支撑梁, 其中一根带膨胀节, 角部为斜撑。支护结构见图 1。基坑开挖整个过程中进行了变形和支撑轴力的监测工作。工程场地各土层计算参数见表 1。

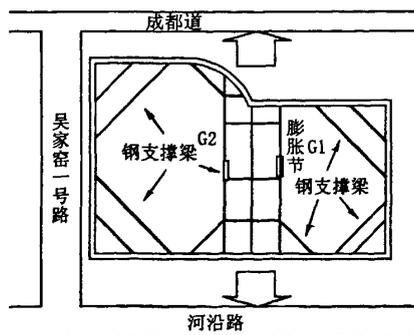


图1 基坑工程示意图  
Fig.1 Sketch of deep excavation

收稿日期: 2008 - 05 - 23

基金项目: 天津市科技创新专项资金项目资助

作者简介: 杨宝珠(1961 - ), 女, 天津人, 副教授, 从事土木工程的教学和科研工作。

表 1 土层计算参数

Tab.1 Soil properties

土层	厚度(m)	重度(kN/m <sup>3</sup> )	摩擦角(°)	粘聚力(kPa)	剪切模量(MPa)	体积模量(MPa)
素填土	4.5	19.63	26	12.6	1.315	3.946
粘土	0.85	19.53	22.7	24	1.413	5.416
粉质粘土	2.1	19.37	25.6	12.9	1.575	5.1
粉土	5.5	19.79	29.5	15.5	1.564	4.365
粉质粘土	2.15	19.40	25.9	20.0	1.553	5.029
粉质粘土	1.45	20.23	21.5	16.5	1.154	4.861
粉质粘土	5.8	20.32	22.1	14.0		6.158
粉质粘土	2.2	20.37	30.1	16.4		7.543
粉质粘土	25.45	19.99	24.8	12.6		6.596

## 2 数值计算分析

### 2.1 计算模型

分析采用 FLAC-3D 数值计算软件<sup>[4]</sup>。土的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型;水泥土桩、钢支撑和工程桩采用线弹性模型;接触模拟采用 FLAC 内置的 interface 接触模型。

从施做围护桩到开挖结束分为七个计算工况。工况 1:基坑开挖,施做围护桩、止水、格构柱、环梁;工况 2:环梁处施做钢支撑;工况 3:预应力钢支撑东侧开挖至基底;工况 4:三根主撑部分开挖至基底;工况 5:西侧靠近河沿路开挖宽 12m,深至设计深度;工况 6:西侧由南向北开挖宽 23m,深至设计深度;工况 7:剩下部分开挖至基底。本文比较真实的模拟了基坑挖土卸荷各工况和水平支撑系统各工况的全过程。

### 2.2 计算结果分析

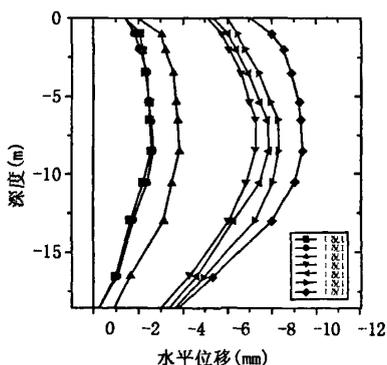


图2 不同工况围护墙 $W_4$ 测点水平位移曲线  
Fig.2 Curves of horizontal displacement of supporting wall ( $W_4$ ) in different steps

1)围护墙体水平位移分析。图2为基坑中部位置  $W_4$  测点的墙体水平位移曲线,由图2可见,各开挖工况下墙体水平最大位移几乎都发生在基坑开挖面(8.5m)附近,且沿深度水平位移呈中间大两端小的趋势,这与基坑实际监测结果是一致的。

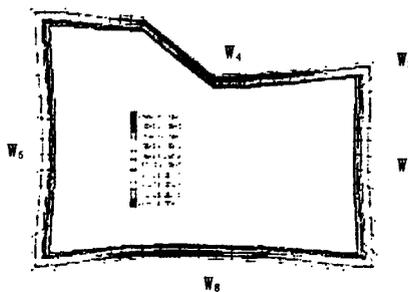


图3 基坑开挖完后围护结构变形图

Fig.3 Structural deformation of building envelope after excavation

图3可见,围护墙的最大侧向位移发生在基坑长边中部,最大值位于基坑开挖面位置,为9.5mm,最大侧向位移与该处开挖深度的比值为0.112%; $W_4$ 较 $W_8$ 点的值略小。 $W_1$ 与 $W_5$ 为围护墙两短边的中间位置, $W_1$ 的最大侧向位移只有4.8mm,与开挖深度的比值为0.056%。另外,随着距离角点位置越近,最大位移值越小,但位移的变化率有明显的差异,在基坑边角附近水平位移增长最慢,可能与另一侧围护结构的约束作用有关。施工时应很好地注意这一情况,加强基坑长边中部位置的支撑。

2)水平钢支撑梁轴力分析。在基坑长边中部设置了三根钢支撑梁,见图1。其中G1采用了带膨胀节的钢支撑梁,预加了518kN的预压应力。

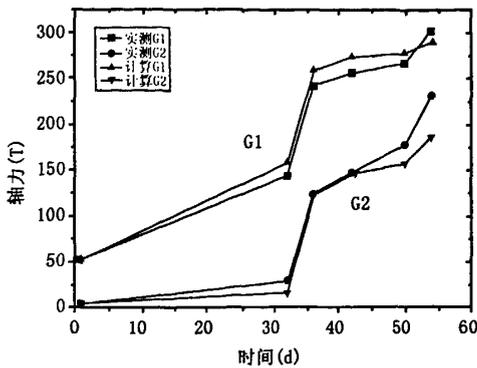


图4 水平钢支撑轴力实测与计算对比图  
Fig.4 Comparison of axial force between field test data and simulation results

表 2 钢支撑梁实测和计算轴力变化情况表  
Tab. 2 Variation of observed and calculated axial force of steel beam

钢支撑测点	预压力 (kN)	开挖通过支撑梁前变化量/kN	开挖通过支撑梁后变化量(kN)	最大轴力 (kN)
G1 实测	518	1739	1159	3015
G1 计算	518	1780	1134	2914
G2 实测	0	1582	832	2325
G2 计算	0	1380	525	1905

图 4 和表 2 为开挖过程中水平支撑梁实测和计算轴力的对比。可见,随着开挖的进行各支撑轴力都有比较大的增加,但增长趋势基本相同,G1 和 G2 的实测值与计算值符合得比较好;开挖经过支撑梁所在的位置时,梁轴力会有比较大的增加,经过梁以后轴力变化趋于缓和;有预应力的钢支撑梁要比没有预应力的梁能承受更大的压力。因此,实际工程时,全部支护结构的主要梁若使用带膨胀节的钢支撑梁,预压力可以大一些;但仅有少数使用时,预压力应更大一些,以免发生失稳、屈服等破坏。

3)基底隆起变形分析。在基底沿长度方向选取了一个中部量测断面,共 6 个点,依次为 K1 至 K6,计算的回弹隆起量见表 3。

由表 3 可见,开挖完成后,基坑最大隆起发生在基坑的中间位置 K3 处;空间方面,从各个开挖分区来看,最大回弹也都发生在本区的中间位置;靠近坑壁处的隆起量最小,分析是墙体水平变位较小,且靠近墙边的土体受到了墙体约束的原因。

但笔者在其它工程中也曾实测过墙边有较大隆起的情况,可能是由于随着开挖深度的增加,基坑内外压力差增大,引起了支护结构的较大变形与坑外土体的位移,基坑周围土体在自重下使墙边坑底土向上隆起,加大了该处的回弹量。

该基坑深度为 8.5m,按照顺挖法基坑回弹量的经验公式<sup>[5]</sup>,估算得到的隆起量应该在 42.5 - 85mm 范围之内,而模拟计算结果中最大的基坑隆起为 33.77mm,基本接近,该值可作为现场施工判断基坑稳定性的一个重要指标。

表 3 各工况下基底隆起回弹量(mm)  
Tab.3 Bottom upheaval in different steps (mm)

工况	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	3.15	7.54	8.06	7.91	7.73	3.69
2	3.18	7.54	8.06	7.92	7.74	3.7
3	3.05	7.53	8.36	9.46	27.99	24.88
4	3.53	9.1	30.31	33.05	32.97	25.25
5	14.3	17.93	32.69	33.37	33.04	25.15
6	22.2	32.16	33.58	33.48	33.06	25.1
7	22.85	32.78	33.77	33.58	33.09	25

4)开挖对工程桩承载性状的影响。对于带有工程桩的深基坑的开挖,以往研究桩基对基坑开挖卸荷变形的影响较多,而考虑基坑开挖对桩基承载性状影响的研究较少。本文选取三个不同开挖深度,分析了开挖卸荷对工程桩承载力和桩土相对位移的影响。工况 1:没有开挖( $h/H = 0$ );工况 2:开挖一半深度( $h/H = 0.5$ );工况 3:完全开挖( $h/H = 1.0$ )。其中,  $h$  为基坑每工况下的开挖深度,  $H$  为基坑深度。

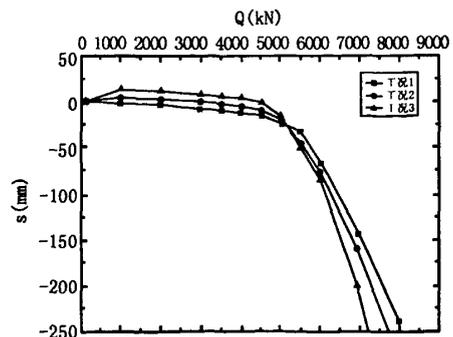


图5 不同开挖深度下桩的荷载-位移(Q-s)曲线  
Fig.5 Q-S curves of piles in different excavation depth

图5为不同开挖深度下桩的荷载-位移曲线,由图可以看出,工况2、3在开挖底面处土体都产生了不同程度的回弹;各工况的 $Q-s$ 曲线均有明显地拐点,根据拐点法可确定出桩的极限承载力。随着开挖深度的增加,极限承载力在逐渐减小,当开挖到一半深度时,极限承载力约减小了10%,当开挖到基底后,极限承载力约减小了20%。

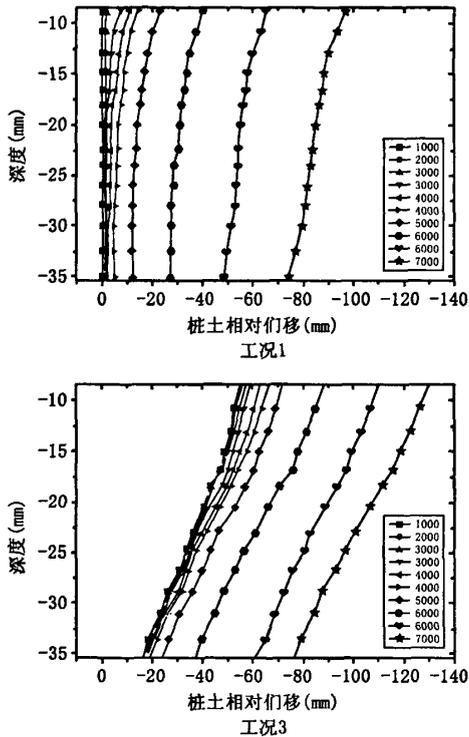


图6 不同工况下桩土相对位移曲线

Fig. 6 Distribution of pile-soil relative displacement in different steps

图6为在不同开挖深度下的桩土相对位移对比曲线,土体在三个开挖状态时,与各自极限荷载

对应的桩土相对位移分别为22.5mm、39mm和63.5mm。随着开挖深度的增加,相对位移递增趋势越来越快,开挖深度为一半时增加了73.3%,而完全开挖后增加了182.2%。因此,工程桩设计以及地面试桩时应考虑基坑开挖卸荷对桩的影响,避免出现桩基承载力不足等问题。

### 3 结论

1) 基坑开挖应考虑开挖过程的时空效应,用FLAC-3D数值计算软件能很好地模拟基坑开挖过程,所得计算结果与实测结果吻合较好。

2) 围护墙体最大侧向位移发生在开挖面附近,并且沿基坑长度中间部位位移大,靠近边角处位移渐小;整个基坑或各个开挖分区,基底隆起最大值发生在本区的中间位置,边角处最小,这点可能与有些软土基坑或支护不好的基坑有所不同;轴力的变化和开挖是否经过支撑梁部位有很大的关系,预应力支撑能承受更大的压力。

3) 基坑开挖对工程桩承载性状有影响。随着开挖深度的加大,单桩承载力在逐渐减小,与极限承载力对应的桩土相对位移在逐渐增大。

#### 参考文献:

- [1] 赵锡宏,李蓓,杨国祥.大型超深基坑工程实践与理论[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 高文华,杨林德,沈蒲生.软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J].土木工程学报,2001,34(5):90-95.
- [3] 俞建霖,龚晓南.基坑工程变形性状研究[J].土木工程学报,2002,35(8):86-90.
- [4] 刘波,韩彦辉.FLAC原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [5] 董建国,赵锡宏.高层建筑地基基础-共同作用理论与实践[M].上海:同济大学出版社,1997.

(责任编辑 刘存英)