

# 无支护基坑侧移空间效应分析

张建辉 赵静力 王道卓

(河北大学建筑工程学院,河北保定 071002)

**【摘要】** 针对基坑变形存在的空间效应,运用有限元分析软件 ANSYS,对无支护结构情况下的基坑开挖过程进行数值模拟,分析了随开挖过程基坑壁侧向位移在水平和深度方向的分布规律,针对基坑坑角变化对基坑位移的影响进行了探讨,并对基坑壁位移的分布函数进行了讨论,得出一些有益的结论,为基坑工程设计与施工提供参考。

**【关键词】** 基坑;空间效应;数值模拟;位移分布;

**【中图分类号】** TU 941

**【文献标识码】** A

doi:10.3936/j.issn.1007-2993.2010.03.003

## Analysis of Three-Dimensional Effects for Lateral Displacement of Non-supported Excavations

Zhang Jianhui Zhao Jingli Wang Daozhuo

(College of Civil Engineering & Architecture, Hebei University, Baoding 071002 Hebei, China)

**【Abstract】** For the three-dimensional effects caused by the excavation, the finite element software ANSYS is used to simulate the excavation process of a foundation pit with non-supporting structure. The distribution of the pit ground lateral displacement with every step of excavation was analyzed. The influence of the different angles of the pit on ground lateral displacement was studied. And, a distribution function of the pit ground lateral displacement was discussed. Some useful conclusions were obtained and the results may provide reference for the excavation design.

**【Key words】** excavation; three-dimensional effects; numerical simulations; distribution of lateral displacement;

### 0 引言

随着城市高层建筑的发展,基坑工程的规模、深度不断增大,这种趋势对基坑的设计计算理论和施工技术提出更高的要求,同时也推动其不断发展。基坑是一个具有一定平面尺度和深度的空间体系,目前,常将其简化为二维平面应变问题,依靠传统的土压力理论及地区性经验进行设计与计算,忽略了基坑变形的三维特征也即空间效应。基坑的空间效应涉及其几何尺度、土层情况及支护结构等多种因素<sup>[1]</sup>,其突出特征之一是基坑角部的强化效应可以显著地减少基坑的变形;若开挖面以下的土体为较硬的土层,挡墙的最大侧向变形很可能发生在开挖面以上,此时如果用适当刚度的支撑体系就可以抑制坑角效应;假如开挖面以下是较厚的软土层,那么挡墙的最大侧向变形很可能发生在开挖面以下,在开挖面以下坑角效应显著增加<sup>[1-2]</sup>。截至目前,基坑空间效应现场

观测研究和数值分析结果,尚不足以全面地对这一特性进行描述<sup>[3]</sup>。作为一空间体系,形状不规则基坑的空间效应将更加明显与复杂,但对这一课题的研究相对比较缺乏。

本文应用有限元分析软件 ANSYS 建立无支护基坑的三维数值模型,土体采用弹塑性本构关系,对基坑开挖过程及其变形进行模拟,分析基坑坑角取不同角度时,基坑开挖引起的土体水平位移的分布与变化规律,进一步探讨基坑坑角的空间效应,为基坑工程设计提供参考。

### 1 数值模型

#### 1.1 土体本构关系

设基坑开挖场地土体的每一土层为均质、各向同性,土体为理想弹塑性材料,采用 Drucker-Prager 弹塑性模型,不考虑土体的排水固结及时间因素。设场区内土体自上至下依次为杂填土、红粘土、白云岩组成。计算时,采用的岩土体参数见表 1<sup>[4]</sup>。

表1 岩土体参数

材料	厚度 /m	弹性模量 /MPa	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
杂填土	2	3	0.22	4	10	2.15
红粘土	12	12.6	0.37	12	21	1.80
白云岩	14	$3.5\times 10^3$	0.25	35	670	2.50

## 1.2 三维数值模型

三维数值模型的建立对计算结果有十分重要的影响。因此,数值模型应尽可能真实地反映工程实际,合理地处理边界条件、土层和外部荷载等,以保证建立模型的正确性,并充分利用结构及荷载的对称性简化计算。对于包括基坑在内的岩土工程问题,边界条件的处理非常重要。根据工程经验,基坑开挖的影响深度为开挖深度的2~4倍,影响宽度为开挖深度的3~4倍<sup>[5-6]</sup>。

本文重点是针对基坑的某一坑角的空间效应进行研究,利用对称性进行简化,取1/4进行计算,因此,取基坑开挖长度、宽度均为40m,开挖深度为8m。选取140m×140m×30m(长×宽×高)的土体区域建立ANSYS模型,见图1。为考察基坑坑角的空间效应,取三种坑角90°、120°、150°进行计算,其中90°、120°的坑角平面见图2。

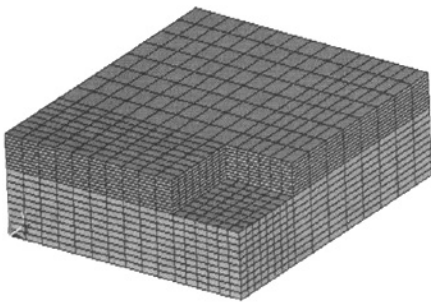


图1 1/4的几何模型和网格划分

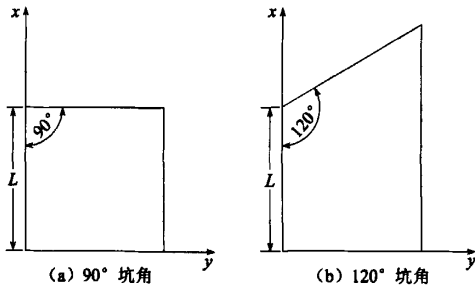


图2 基坑平面图

在建立模型时,采用SOLID45三维实体单元,对土体进行网格划分,此单元具有塑性、潜变、膨胀、应力强化、大变形和大应变的特征,可以用来模拟土体的弹塑性非线性变形;边界条件的处理是基坑底面完全固定,四周的表面分别施加沿法线方向的约束。

## 1.3 基坑开挖过程模拟

为模拟基坑的开挖过程,本文采用分层开挖,按照工程的一般情况,分层厚度为2m,开挖4次,开挖深度8m。在ANSYS中,通过荷载步和杀死单元来模拟基坑分层开挖。程序中的荷载步功能可以实现不同工况间的连续计算,可以用来模拟基坑的连续施工过程。在一个荷载步计算结束后,可直接进行下道工序的施工,如杀死(开挖)单元,模拟的过程中不需重新划分网格,如此继续,一直到施工结束。不足之处在于,计算出来的位移场需减去初始位移场,因其早就结束,对基坑开挖无影响<sup>[4]</sup>。

## 2 计算结果分析

### 2.1 坑角空间效应分析

根据ANSYS的计算结果,分别绘制出坑角 $\beta$ 为90°、120°、150°时的X轴方向坑壁的侧向(Y方向)位移变化曲线,总结变形规律,并将结果进行对比分析。记X为坑壁某点距坑角的水平距离,H为坑壁某点的深度。第2步、4步开挖后,不同H处水平面上坑壁侧移与X的关系,见图3、图4。第4步开挖后,不同X处竖直面上坑壁侧移随深度的变化,见图5。

由图3、图4中的基坑壁侧移曲线,可以看出基坑的变形存在明显的角部硬化效应或空间效应:①对于各种坑角情况,在不同深度处,坑角处( $X=0$ )的侧移均为最小,随着与坑角距离的增大,坑壁侧移逐渐增大;②对于各种坑角情况,在深度H一定的水平面上,侧移曲线整体变化趋势一致,距离坑角越远,坑壁的侧移越大,在接近坑壁中点处达到最大值,且与坑角距离超过30m后,坑壁的侧移增加缓慢或基本不再增加,接近平面应变状态;③对于各种坑角情况,基坑开挖越深,基坑角部位移相对于基坑中部的位移越小,也即角部效应越强。④随着坑角角度的增加,坑壁侧向位移沿X方向变化减小,角部硬化效应逐渐减弱,当坑角为150°时,坑壁侧移沿X方向变化趋向均匀,接近平面应变状态。

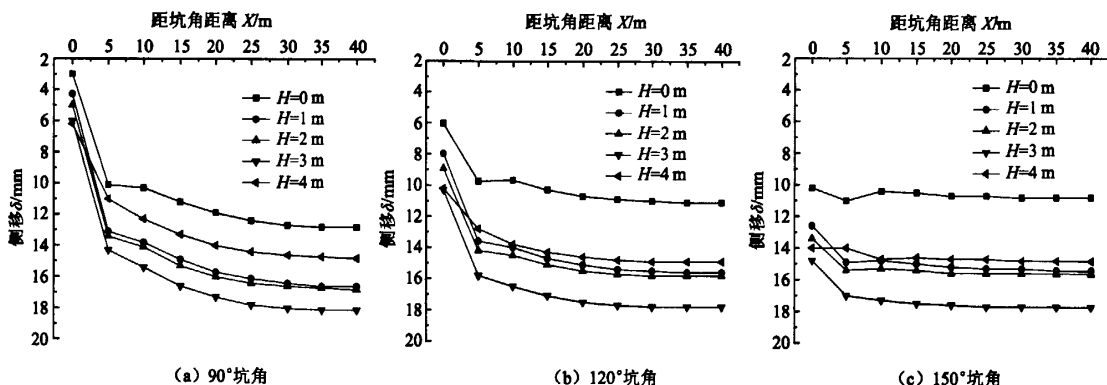


图3 第二步(4m)开挖后侧移比较

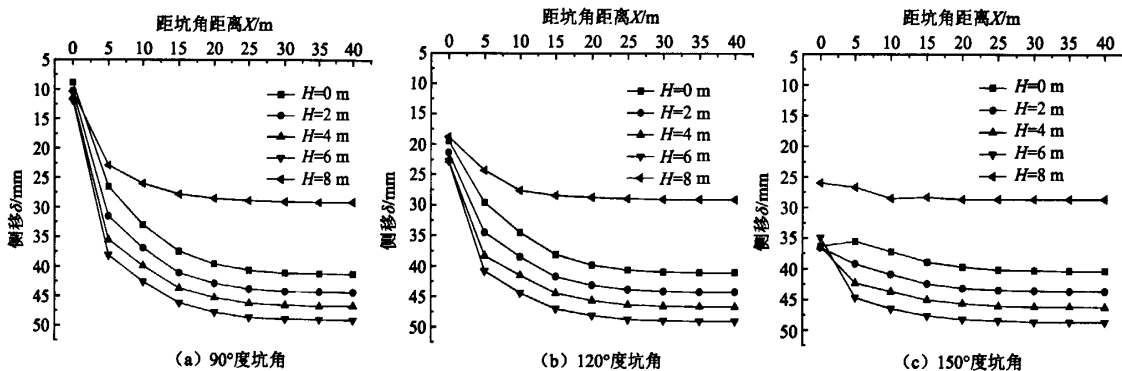


图4 第四步(8m)开挖后侧移比较

由图5可以看出:①对于分层开挖,每次开挖后,开挖面以上坑壁侧移沿深度的变化是先增大后减小,最大水平位移均出现在开挖深度以上1~2m附近处,这与 Lee 等(1998)<sup>[1]</sup>的结论相一致。②各种坑角情况下,随 X 的增大,侧移曲线逐渐集中,坑壁最大侧移基本一致,即坑壁中部受坑角角

度影响最小,距离坑角越近,受坑角角度的影响越大,随着坑角角度的增加坑角处位移增大,开挖到 8 m 时,90°坑角处最大侧移为 12 mm,150°坑角处最大侧移是 36.5 mm,相差 36.5/12≈3 倍,说明坑角角度对基坑角部或空间效应的影响不容忽视。

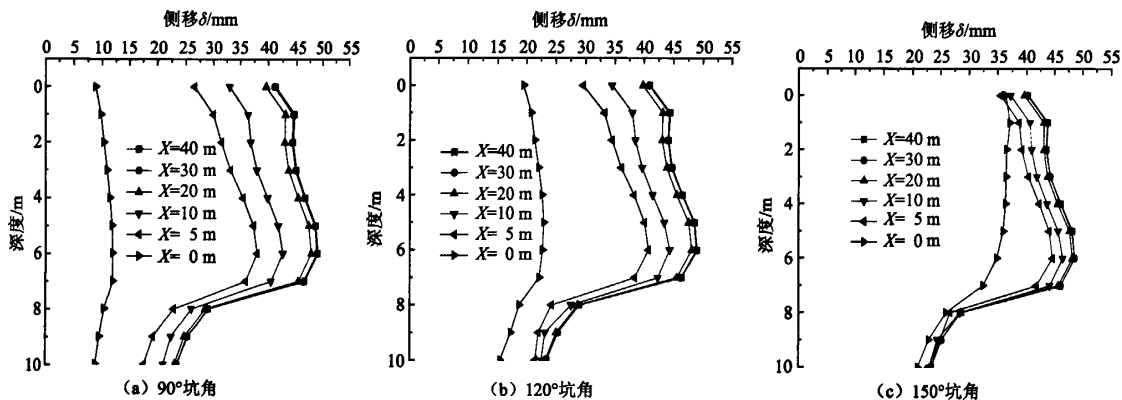


图5 第四步(8m)开挖后侧移

2.2 长深比  $L/H_e$  对最大侧移的影响

基坑开挖深度  $H_e$ 。从 2 m 到 8 m,  $L/H_e$  变化范围从 20 到 5,根据计算结果可知,开挖相同深度时,

不同坑角所对应 X 轴坑壁的最大侧移  $\delta_{max}$  基本一致,而且,90°、120°、150°坑角情况下,  $L/H_e$  和  $\delta_{max}$  的关系曲线基本一致,见图 6。从图中可以看出,随着

$L/H_c$  的减小  $\delta_{max}$  逐渐增大。

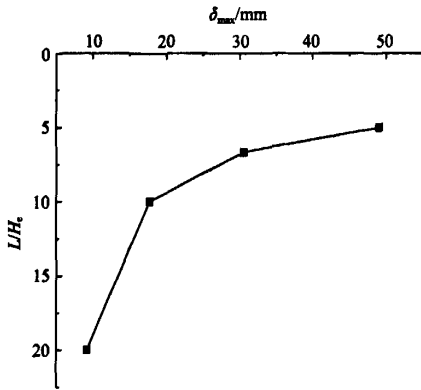


图6 最大侧移和长深比关系曲线

### 2.3 坑壁侧移分布函数分析

2005年以来,Finno<sup>[7]</sup>和Roboski<sup>[3]</sup>应用补余误差函数  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$  ( $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\lambda^2} d\lambda$ ) 对有支护的矩形基坑开挖引起的地表位移进行描述,如下式,指出这一函数可由基坑长度、深度以及最大侧移值决定,并用实测数据进行了拟合论证。

$$\delta(x) = \delta_{max}$$

$$\left( 1 - \frac{1}{2} \times \text{erfc} \left( \frac{2.8 \left[ x + L \left[ 0.015 + 0.035 \ln \frac{H_c}{L} \right] \right]}{0.5L - L \left[ 0.015 + 0.035 \ln \frac{H_c}{L} \right]} \right) \right) \quad (1)$$

本文根据基坑长度、深度以及计算的最大侧移结果,应用上述函数对基坑侧移进行模拟,并将其与本文的计算结果进行对比,以于无支护情况基坑侧移在平行基坑壁方向的分布,进行讨论。

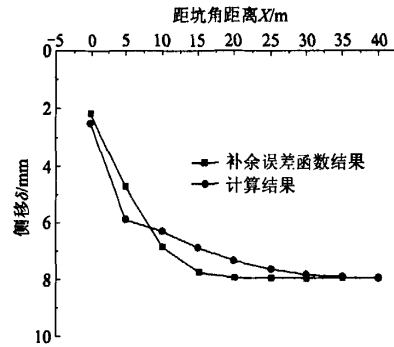
$$\text{设 } T(x) = \frac{2.8 \left[ x + L \left[ 0.015 + 0.035 \ln \frac{H_c}{L} \right] \right]}{0.5L - L \left[ 0.015 + 0.035 \ln \frac{H_c}{L} \right]}$$

当  $H_c$  分别取 2 m、4 m、6 m、8 m, 对应的  $\delta_{max}$  分别等于 8 mm、18.1 mm、30.6 mm、49.1 mm 时,  $\delta(x) = \delta_{max} \left[ 1 - \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(T)] \right] = \frac{1}{2} \delta_{max} (1 + \text{erf}(T))$  误差函数可由双曲正切函数近似计算<sup>[8]</sup>:  $\text{erfc}(x) \approx \text{Tanh}(1.12838x + 0.10277x^3)$ , 所以

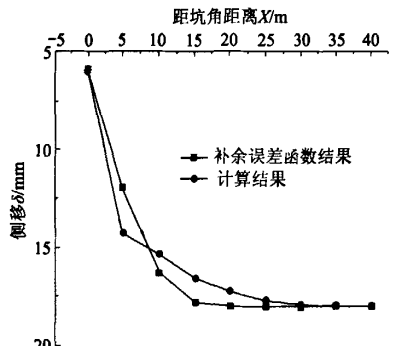
$$\delta(x) = \frac{1}{2} \delta_{max} (1 + \text{erf}(T)) = \frac{1}{2} \delta_{max} (1 + \text{Tanh}(1.12838T + 0.10277T^3))$$

在平行基坑壁方向基坑侧移的计算结果和补余误差函数的结果见图7。从图上可以看出,这一补余误差函数在平行坑壁方向(X方向)给出的侧移

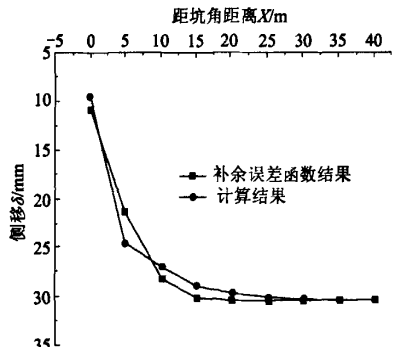
与计算结果相比,总体上变化趋势基本一致。当X



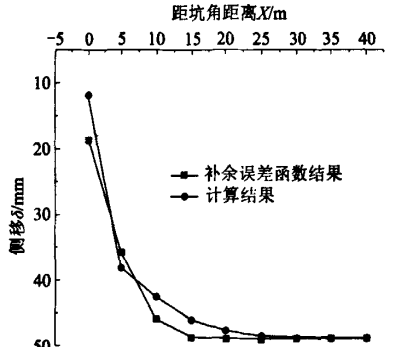
(d)  $H_c=2\text{ m}$



(d)  $H_c=4\text{ m}$



(d)  $H_c=6\text{ m}$



(d)  $H_c=8\text{ m}$

图7 计算结果和补余误差函数比较

三是忽略一些实际因素,如土质的分层、粉喷桩增强体弱排水条件等的影响。

参 考 文 献

[1] 张庆松,李术才,刘松玉. 粉喷桩复合地基沉降的影响因素分析[J]. 土工基础,2006(6):16-19.

[2] 邢皓枫. 高速公路粉喷桩复合地基沉降分析与预测方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2002.

[3] 许友生,黄奕雷,徐献芝. 一种新的粉喷桩处理软土地基的建模方法[J]. 浙江师范大学学报, 2002, 25(3). 242-245.

[4] 饶为国. 桩-网复合地基原理及实践[M]. 北京:中国水利电力出版社,2004.

[5] 卢延浩,刘祖德. 高等土力学[M]. 北京:机械工业出

版社,2006.

[6] 陈 蕾,刘松玉,洪振舜. 排水粉喷桩复合地基固结计算方法的探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 198-203.

[7] 施建勇,邹 坚. 深层搅拌桩复合地基沉降计算理论研究[J]. 岩土力学, 2002, 23, (3): 309-315; 320.

[8] 钱国超. 粉喷桩处治高速公路软土地基的机理与设计方法[D]. 南京:东南大学,1999.

[9] 张庆松,李术才,刘松玉. 粉喷桩复合地基沉降的影响因素分析[J]. 土工基础,2006,2006(6):16-19.

[10] 林 彤. 粉喷桩加固软基的试验研究[J]. 岩土力学, 2000(2):134-137.

收稿日期:2010-02-23

(上接第 122 页)

<10 m 时,随着开挖深度  $H_e$  的增加,函数结果在对应的计算结果上下微浮动;当  $10\text{ m} \leq X \leq 20\text{ m}$  时,函数结果比计算结果偏大;当  $X > 30\text{ m}$  时,作为取相同最大侧移值的必然结果,二者结果一致性较好。基坑角部( $X=0$ )  $H_e=8\text{ m}$  时,补余误差函数的结果偏大较多,由此说明开挖深度越大,坑角效应越明显。无支护情况下基坑壁的侧向位移,在平行基坑壁的水平方向的变化规律,可由式(1)近似描述。

3 结 论

1) 基坑开挖过程中,基坑的变形性状具有十分明显的空间特征,简化为平面应变问题进行计算和设计,必然会带来误差。因此,针对具体工程情况,合理利用空间效应,进行合理设计,在不增加工程投入的前提下,有效减少基坑开挖对周围环境的影响,可以显著提高基坑工程的技术经济指标。

2) 在无支护结构时,基坑坑角在整个基坑深度范围内,同样具有明显的角部硬化效应,基坑角部侧移最小,随后逐步增大,至基坑中部达到最大值;基坑坑角的角度对角部空间效应影响明显,随着角度的增加,空间效应逐渐减弱,相应的基坑壁侧移趋于均匀;在同样土层和坑角角度情况下,基坑越深,角部效应越大,也即基坑角部位移相对于基坑中部的位移越小。

3) 基坑壁( $X$  轴方向)最大位移受坑角角度的影响较小,且随着开挖深度的增加,基坑壁最大位移逐渐增大。

4) 无支护情况下基坑壁的侧向位移,在平行基坑壁的水平方向的变化规律,可由式(1)中的补余误

差函数的近似描述。

参 考 文 献

[1] Lee, F. H., Yong, K. Y., QUAN, K. C. N. and CHEE, K. T. Effect of corners in strutted excavations: Field monitoring and case histories[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 1998, 124(4): 339-348.

[2] Ou, C. Y., Chiou, D. C, WU, T. S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337-345.

[3] Roboski, J. F, Finno, R. J. Distributions of ground movements parallel to deep excavations[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 43(1): 43-58.

[4] 祝 磊,孔思丽,洪宝宁. 基于 ANSYS 对基坑不同支护结构的计算分析[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(1): 152-156.

[5] 秦四清,等. 深基坑工程优化设计[M]. 北京:地震出版社,1998.

[6] 刘健航,侯学渊. 基坑工程手册 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

[7] Finno, R. J, Roboski, J. F. Three-dimensional responses of a tied-back excavation through clay[J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(3): 273-282.

[8] 田锦川,徐乃忠,李凤明. 误差函数  $\text{erf}(x)$  近似计算及其在开采沉陷预计中的应用[J]. 煤矿开采, 2009, 14(2): 33-35.

收稿日期:2010-03-31