

深基坑工程的空间性状分析*

Spatial behavior analysis of deep excavation

俞建霖 龚晓南

(浙江大学土木工程学系, 杭州, 310027)

文 摘 用三维空间有限单元法研究了基坑开挖过程中围护结构变形、土压力的空间分布及基坑的几何尺寸效应, 并与按二维平面问题分析的结果进行了比较。通过对杭州市某基坑工程的实例分析, 验证了对基坑工程进行三维分析的必要性以及计算模式的合理性。

关键词 深基坑工程, 空间性状, 围护结构变形, 土压力。

中图分类号 TU 476.4

作者简介 俞建霖, 男, 1972 年生, 1997 年获浙江大学岩土工程专业博士学位。现为浙江大学土木系岩土工程研究所讲师。主要从事基坑工程的性状研究、监测和既有建筑物加固、纠倾工作。

Yu Jianlin Gong Xiaonan

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract In this paper, 3-D FEM is used to analyse the spatial distribution of deformation, earth pressure and the size effect of deep excavation, and the results calculated with 3-D FEM and 2-D FEM are compared. Finally, through an excavation case in Hangzhou, the necessity of 3-D analysis and the reasonableness of the calculating model were verified.

Key words deep excavation, spatial behavior, the deformation of retaining wall, earth pressure.

1 引 言*

近年来,随着城市建设的发展,高层建筑不断兴起,产生了大量的基坑开挖工程。由于基坑工程的复杂性,采用常规分析方法很难反映出诸多的影响因素。因此,目前多采用数值方法来研究基坑工程的整体性状。深基坑是一个具有长、宽、深的三维空间结构,且长度与宽度往往处于同一数量级;但在以往的设计和 研究中,人们常常将其简化为二维平面应变问题进行分析计算。随着人们对基坑空间效应认识的不断深入以及计算机容量和运算速度的不断提高,基坑工程的三维空间性状日益得到人们的关注^[1]。

本文采用空间有限元分析方法,利用无限元来满足边界条件,用接触面单元来模拟土与围护结构的共同作用,研制了能考虑土与围护结构的相互作用及施工过程的深基坑工程三维有限元分析程序。对基坑开挖引起的围护结构变形、土压力的空间分布和基坑的几何尺寸效应进行了分析研究,并与按二维平面应变问题计算的结果进行了对比。

2 有限元分析的模式

(1) 基坑开挖一般属临时性工程,工期较短,故按不排水条件进行总应力分析,且不考虑由于围护结构施工对土体扰动的影响。

(2) 围护结构及支撑均按弹性材料考虑。土体采用空间八结点等参元,本构关系可采用线弹性模型或 Duncan - Chang 非线性弹性模型,支撑采用梁单元。

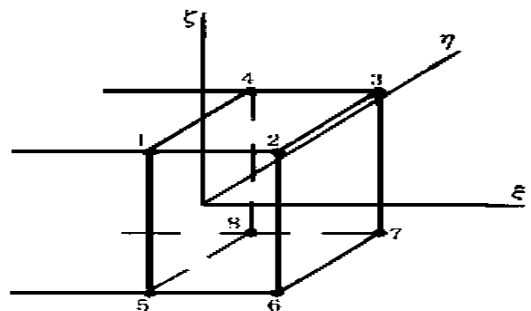


图 1 空间八结点无限元

Fig. 1 Spatial 8 - node infinite domain element

(3) 对于基坑开挖问题,其真实的边界条件应是无穷远处的位移为零,采用常规有限元分析方法难以实现这一点,而无限元可通过取有限的甚至很小的计算范围,实现无穷远处位移为零的边界条件;同时采用无限元可以减少划分网格的数量,从而节约机时,在提高计算精度和速度方面有明显的优越性,这种优越性对于分析三维问题尤为突出。本文采用空间八结点无限

* 国家自然科学基金重点资助(No. 59738160)、地矿部岩土工程开放研究实验室课题基金(KF008)及杭州市城乡建委资助项目。
到稿日期:1998 - 04 - 30。

元,其形函数为

$$\left. \begin{aligned} \text{a) 当 } \xi \geq 0 \text{ 时} \\ N_i = (1 + \xi)(1 + \eta)/4 \quad i = 2,3,6,7 \\ N_i = (1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta)/4 \quad i = 1,4,5,8 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{b) 当 } \xi < 0 \text{ 时} \\ N_i = \frac{(1 + \xi)(1 + \eta)}{4(1 + \zeta)} \quad i = 2,3,6,7 \\ N_i = \frac{(1 + \xi)(1 + \eta)}{4(1 + \zeta)} \quad i = 1,4,5,8 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

上述形函数满足当 $\xi = -1$ 时,实际单元中与它对应的界面趋向负无穷远。

空间八结点无限元的位移函数为

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^8 M_i u_i \\ v &= \sum_{i=1}^8 M_i v_i \\ w &= \sum_{i=1}^8 M_i w_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 M_i 为位移函数,可选为: $M_i = M_i^0 (\frac{r_i}{r})$, M_i^0 取

0 时 N_i 的表达式;常数 $\alpha = 1$,通常取 $\alpha = 1$ 或 2 ; r 为衰减半径,指计算点到衰减中心的距离; r_i 为结点 i 的衰减半径。假设衰减中心坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,计算点坐标为 (x, y, z) ,则

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (4)$$

这样选择的位移函数既能满足连续条件,也满足当 $r \rightarrow \infty$ 时,位移分量 $u, v, w \rightarrow 0$ 的边界条件,由此可推导出无限元的单元刚度矩阵^[2]。

(4) 由于混凝土和土体的变形模量有很大的差异,为了模拟围护结构与土之间的共同作用,必须在两者之间设置接触面单元。二维分析中常采用古得曼 (Goodman) 单元,可将其推广到三维。设接触面单元应力和位移之间的关系为

$$\{ \sigma \} = [\sigma_x, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}]^T = [K] \{ W \} \quad (5)$$

式中 $\{ W \}$ 为接触面上左右两片的相对位移(见图 2),其表达式为

$$\{ W \} = \begin{Bmatrix} \mu \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}_{\text{左}} - \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}_{\text{右}} \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} u_{\text{左}} \\ v_{\text{左}} \\ w_{\text{左}} \end{Bmatrix} = N_1 \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{Bmatrix} + N_4 \begin{Bmatrix} u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} + N_5 \begin{Bmatrix} u_5 \\ v_5 \\ w_5 \end{Bmatrix} + N_8 \begin{Bmatrix} u_8 \\ v_8 \\ w_8 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} u_{\text{右}} \\ v_{\text{右}} \\ w_{\text{右}} \end{Bmatrix} = N_2 \begin{Bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{Bmatrix} + N_3 \begin{Bmatrix} u_3 \\ v_3 \\ w_3 \end{Bmatrix} + N_6 \begin{Bmatrix} u_6 \\ v_6 \\ w_6 \end{Bmatrix} + N_7 \begin{Bmatrix} u_7 \\ v_7 \\ w_7 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式(5)中的刚度矩阵 $[K]$ 为

$$[K] = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{xz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 K_x, K_{xy}, K_{xz} 分别为接触面的法向、 y 向和 z 向切向刚度系数。

K_x, K_{xy}, K_{xz} 及 N_i 表达式见文献[3]。由式(5),根据虚功原理,即可推得三维接触面单元的刚度矩阵。

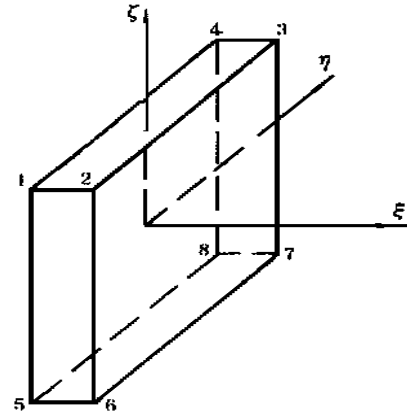


图 2 接触面单元

Fig. 2 Contact element

(5) 空间八结点线性等参元在计算具有弯曲变形一类问题是“过刚”的,也就是说,在相同力偶作用下,计算模型的变形比实际结构的变形要小,如果单元的长宽比很大就可能使计算结果失真。采用非协调元在每个单元中引入 9 个附加自由度来改善线性等参元的精度是有效的,但相应增加了计算量。由于围护结构单元的模量较大,易产生过刚现象,可采用非协调元;而对于土体单元,因模量较小,可采用线性等参元。这样即可减小计算量,又不失精度。非协调元未凝聚的位移场可取为下式。

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^8 N_i u_i + (1 - \xi^2) u_9 + (1 - \xi^2) u_{10} + (1 - \xi^2) u_{11} \\ &= \sum_{i=1}^8 N_i u_i \\ v &= \sum_{i=1}^8 N_i v_i + (1 - \xi^2) v_9 + (1 - \xi^2) v_{10} + (1 - \xi^2) v_{11} \\ &= \sum_{i=1}^8 N_i v_i \\ w &= \sum_{i=1}^8 N_i w_i + (1 - \xi^2) w_9 + (1 - \xi^2) w_{10} + (1 - \xi^2) w_{11} \\ &= \sum_{i=1}^8 N_i w_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(6) 计算步骤: 计算土体在自重状态下的初始应力场,并将初始位移置零; 将相应部位的土单元置换成围护结构单元、接触面单元和无限元; 计算每级开

挖面上各结点的等效结点力,将其反作用在开挖面上,并将开挖面以上的单元置换为空气单元; 计算变化后的位移场与应力场; 进行下一级开挖,重复,步骤直至坑底。

基于以上模式,作者研制了考虑基坑开挖的空间效应、土与结构物相互作用及施工过程的深基坑工程三维有限元分析程序^[4]。

3 基坑工程的空间性状分析

本节主要讨论基坑开挖过程中围护结构位移和土压力的空间分布效应,并将其结果同按平面问题分析的结果进行比较。标准算例取基坑长度 $2L = 40\text{m}$,宽度 $2B = 40\text{m}$,开挖深度 $H = 10\text{m}$,围护结构厚度 $D = 0.8\text{m}$,插入深度为 10m ,弹性模量折减后取 $E = 25000\text{MPa}$,泊松比 $\nu = 0.17$ 。支撑弹性模量 23000MPa ,共设有两层支撑,第一层支撑中心位于地表下 3.3m ,截面为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$,第二层支撑中心位于地表下 6.7m ,截面为 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$,支撑水平间距均为 10m 。为了便于寻找定性规律,土体采用线弹性模型, $\gamma = 17.5\text{kN/m}^3$, $E = 4\text{MPa}$, $\nu = 0.49$ 。基坑分三次开挖,分别挖至地表下 3.3m , 6.7m , 10m 。因基坑平面形状为矩形,利用对称性,取其四分之一进行计算。三维有限元网格划分见图 3。

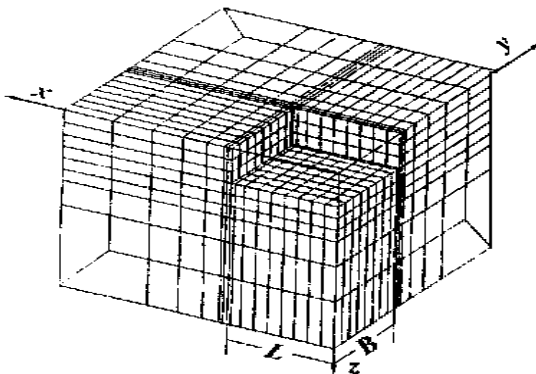


图 3 有限元网格划分图
Fig. 3 Mesh of finite elements

3.1 围护结构位移的空间分布

图 4 为围护结构的水平位移放大 100 倍后的空间分布图。由图中可见:在基坑深度方向上,围护结构的最大水平位移发生在基坑底部附近,这与二维分析的结果是一致的;在沿基坑边方向上,基坑边角处围护结构的水平位移较小,随后逐步增大,至基坑中部达到最大值。但位移的变化率有明显的差异:在基坑边角附近约 $5\text{m}(L/4)$ 处,由于另一侧围护结构的约束作用,水平位移增长较慢;在 $5 \sim 15\text{m}(L/4 \sim 3L/4)$ 处,约束作用减弱,位移急剧增长;在 $15 \sim 20\text{m}(3L/4 \sim L)$ 处,位移增长到一定值后逐渐趋于稳定。

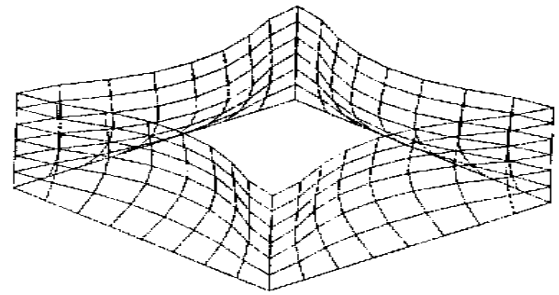


图 4 围护结构水平位移空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of horizontal displacement

3.2 土压力的空间分布

表 1 说明主动土压力的分布与水平位移呈现出相反的规律。由表 1 可见:基坑边角 ($X = 20\text{m}$) 附近的主动土压力最大,然后逐步减小,到基坑中部达到最小值,但均大于按二维平面问题分析的结果。主动土压力的变化率亦呈现与水平位移相反的规律。

表 1 主动土压力的空间分布 单位:kN
Table 1 Spatial distribution of active earth pressure

深度 (m)	X=0m	X=5m	X=10m	X=15m	X=20m	平面问题
1.67	16.8	19.8	25.1	29.8	31.9	16.2
5.00	65.9	70.0	77.9	86.0	90.0	54.8
8.33	116.5	121.2	131.0	141.0	146.2	106.3
11.67	173.5	178	187.5	197.2	201.8	162.7
15.00	241.5	244.0	251.2	256.5	258.0	226.4
18.33	322.0	321.5	320.0	321.2	320.5	281.7

表 2 说明了被动土压力的分布规律与水平位移相似,在基坑边角附近的被动土压力最小,然后逐步增大,在基坑中部达到最大值,但均小于按二维平面问题分析的结果。

表 2 被动土压力的空间分布 单位:kN
Table 2 Spatial distribution of passive earth pressure

距坑底深度 (m)	X=0m	X=5m	X=10m	X=15m	X=20m	平面问题
1.67	124.5	121.2	102.3	85.3	80.5	127.8
5.00	164	156.8	145.9	137	135.9	171.7
8.33	201.2	195.0	187.3	166.4	160.3	221.8

在以下的研究中,保持基坑的宽度 ($2B = 40\text{m}$) 和支撑的水平间距不变,分别改变基坑的长度 ($2L$) 和深度 (H),以研究基坑几何尺寸对围护结构的水平位移和土压力的影响。

3.3 基坑几何尺寸对土压力的影响

表 3 反映了基坑中部剖面 ($X = 0\text{m}$) 的主动土压力与基坑长宽比 (L/B) 关系。由表 3 可见,随着基坑长宽比的增大,主动土压力不断减小,并逐步趋近与按二维平面问题分析的结果。由于位移、主动土压力和被动土压力之间存在着对应关系,可以预见,随着基坑长宽比的增大,被动土压力也将逐步增大,并接近于按二维问题计算的结果。

表3 X=0 剖面主动土压力与基坑几何尺寸的关系

单位:kN

Table 3 The relationship between active earth pressure (X=0m) and the size of excavation

深度 (m)	L/B=1.0	L/B=1.5	L/B=2.0	L/B=2.5	L/B=3.0	L/B=4.0	平面问题
1.67	16.8	16.6	16.5	16.4	16.3	16.3	16.2
5.00	65.9	65.5	64.2	63.3	63.0	62.6	54.8
8.33	116.5	115.0	114.1	110.5	109.8	109.5	106.3
11.67	173.5	169.4	169.2	167.9	167.9	167.5	162.7
15.00	241.5	234.0	230.5	228.7	227.9	226.7	226.4
18.33	322.0	307.5	307.5	305.5	304.8	299.5	281.7

3.4 基坑几何尺寸对围护结构水平位移的影响

图5表示了不同开挖深度下,围护结构长边最大水平位移与基坑长宽比的关系。图中各算例的计算参数见表4,图中虚线表示各算例按二维平面问题分析(基坑宽度相同)时围护结构的最大水平位移。

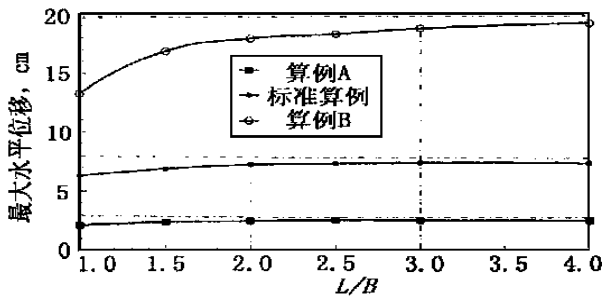


图5 基坑长宽比与长边最大水平位移的关系
Fig. 5 The relationship between L/B and the maximum displacement on the of length (L) side

表4 各算例计算参数

Table 4 Parameters for each case

算例	基坑开挖深度 (m)	围护结构插入深度 (m)	第一层支撑到地表距离 (m)	第二层支撑到地表距离 (m)
算例 A	5	5	1.3	0
标准算例	10	10	3.3	6.6
算例 B	15	15	0	10

由图5可见,由于基坑的空间作用,按三维问题分析的围护结构最大水平位移小于按二维平面应变问题的结果,且前者随着基坑长宽比的增大而不断增大,并逐步趋近于后者。若将图5中两者相接近时基坑的长宽比称为临界长宽比,则相对于上述3个算例,临界长宽比分别为1,2,3。由此可见,在基坑宽度相同的情况下,随着开挖深度的增加,基坑的临界长宽比(或

临界长度)也不断增加,两者存在着近似线性的关系。

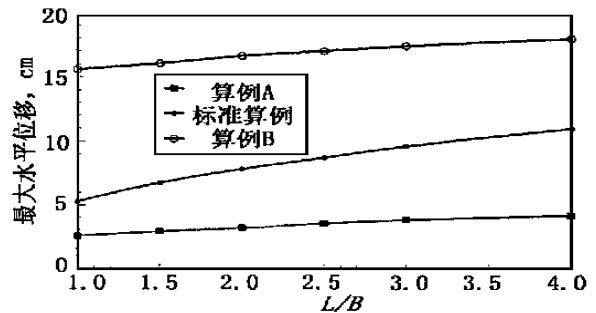


图6 基坑长宽比与短边最大水平位移的关系
Fig. 6 The relationship between L/B and the maximum displacement on the width (B) side

图6表示不同开挖深度下围护结构短边的最大水平位移与基坑长宽比的关系。从图可见,随着基坑长宽比的增大,围护结构短边的最大水平位移也不断增大,两者成线性增长关系。这与长边最大水平位移的变化趋势截然不同。

4 工程实例分析

本节用作者编制的程序对杭州市某高层公寓基坑进行非线性弹性分析,并与实测结果进行对比。

该基坑平面为173.3m x 29m的狭长矩形(图7),开挖深度7.1m。围护结构主要采用φ426沉管灌注桩排桩墙加现浇钢筋混凝土支撑体系。沉管灌注桩中心距为1.0m,桩长13.0m,桩顶位于地表下1.5m。钢筋混凝土支撑中心位于地表下3.5m,水平间距约9m,截面为600mm x 600mm。在基坑底部局部土体采用水泥搅拌桩进行改良,加固区宽度为3.5m,深度为4.0m。

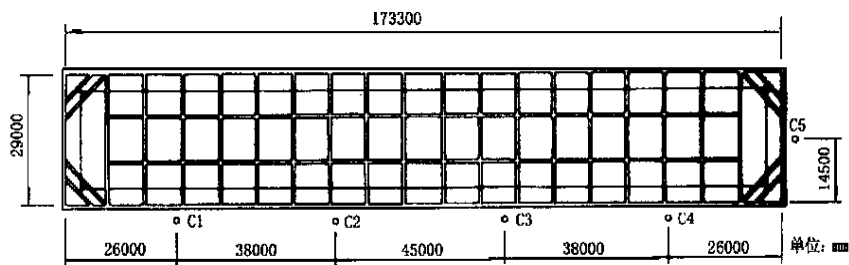


图7 基坑围护结构体系平面布置图
Fig. 7 Plan of retaining structure for deep excavation

表 5 各土层分布及 Duncan - Chang 模型计算参数
Table 5 Soil profile and parameters for Duncan - Chang model

土 层	厚度 (m)	c (kN/m ³)	c (kPa)	R_f	K	K_{ur}	N	0	f	
粉质粘土	2	19.2	24	24.8	0.85	200	350	0.7	0.3	0.495
淤泥质粉质粘土	25	18.0	17.7	11.4	0.8	50	150	0.6	0.3	0.495
粉质粘土	6	18.2	29	12.8	0.85	100	300	0.6	0.3	0.495

土体模型采用 Duncan - Chang 非线性弹性模型,对处于卸荷状态的土体采用卸荷模量。地基各土层分布及模型计算参数见表 5。 $\phi 426$ 沉管灌注桩排桩墙按等刚度原则转化为地下连续墙,弹性模量 $E = 24000\text{MPa}$, $\nu = 0.20$ 。水泥搅拌桩取弹性模量 $E = 40\text{MPa}$, $\nu = 0.25$ 。基坑开挖分三步进行,分别开挖至地表下 1.5m,3.5m,7.1m。在计算边界设置无限元,具体有限元网格划分限于篇幅从略。

在基坑开挖过程中进行深层土体水平位移的监测,共埋设了 5 根测斜管 (C1 ~ C5),测斜管的平面布置如图 7 所示。

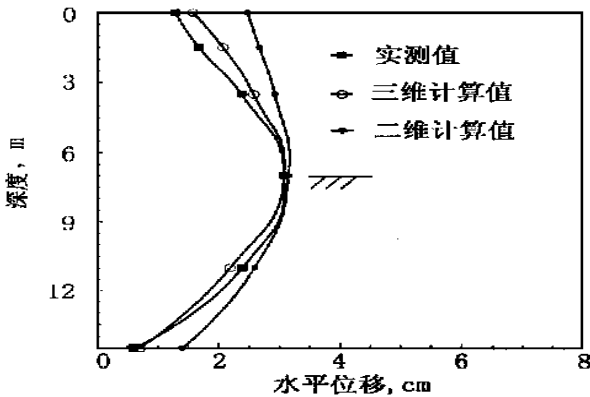


图 8 C3 孔水平位移曲线

Fig. 8 Horizontal displacement curve in hole C3

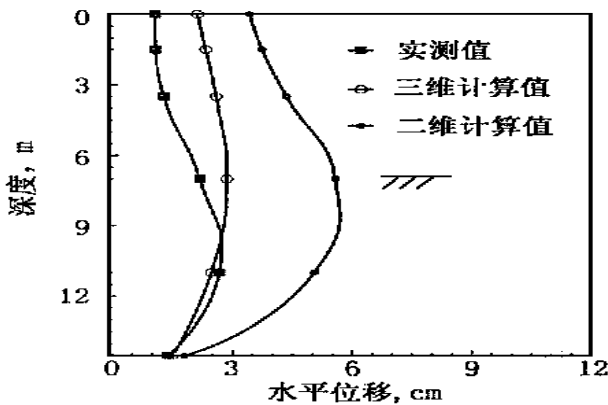


图 9 C5 孔水平位移曲线

Fig. 9 Horizontal displacement curve in hole C5

图 8 ~ 图 9 分别为 C3, C5 孔的水平位移曲线。从图中可以发现: 两测斜孔按三维问题分析的水平位移计算值与实测值均吻合得较好; 由于基坑属狭长条形,长宽比为 6,因此 C3 孔按二维和三维问题分析的结

果与实测值都较接近,而 C5 孔按二维问题分析的水平位移比按三维问题分析的结果和实测值都要大得多。由此说明基坑工程进行三维分析是很有必要的; 通过此工程实例也验证了本程序有限元分析模式的合理性。

5 结 论

(1) 围护结构的水平位移和土压力分布具有明显的空间效应: 基坑边角处围护结构的水平位移和被动土压力较小,随后逐步增大,至基坑中部达到最大值。而主动土压力的变化规律则反之。由此说明基坑边角附近的空间作用较强,而中部较弱。

(2) 随着基坑长宽比的增大,基坑中剖面的主动土压力不断减小,被动土压力不断增大并逐步趋近与按二维平面应变问题分析的结果。

(3) 随着基坑长宽比的增大,围护结构长边的最大水平位移不断增大,空间效应减弱。其间存在着一临界长宽比,当基坑长宽比超过临界长宽比后,其最大水平位移已接近于按二维平面应变问题分析的结果。在基坑宽度相同的情况下,临界长宽比(或临界长度)与开挖深度近似成线性增长关系。

(4) 随着基坑长宽比的增大,围护结构短边的最大水平位移与基坑长宽比亦呈线性增长关系。

(5) 通过对杭州市某基坑的工程实例分析证明了基坑工程进行三维分析是很有必要的,同时也证明了作者所采用计算模式的合理性。

参 考 文 献

- 1 Ou C Y, Chiou D C, Wu T S. Three dimensional finite element analysis of deep excavation. Journal of geotechnical engineering, ASCE, 122(5): 337 ~ 345.
- 2 朱百里,沈珠江等编著. 计算土力学. 上海:上海科学技术出版社,1990.
- 3 顾淦臣,董爱农. 钢筋混凝土面板堆石坝的三维有限元分析. 见:第 3 届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集,1988.
- 4 俞建霖. 软土地基深基坑工程数值分析研究[博士学位论文]. 浙江大学,1997.
- 5 俞建霖. 基坑周围地表沉降量的性状分析. 见:第 5 届全国地基处理学术讨论会论文集. 北京:中国建筑工业出版社,1997.