

# 深基坑支护结构空间效应的 三维有限元分析

杨波 冯小波

(武汉水利电力大学 430072)

**【摘要】** 从力学角度利用三维有限元研究空间效应,将计算结果与三维整体有限元分析和一种简化方法比较验证计算方法的合理性,对影响空间效应诸因素(支护桩桩长,支护桩桩间距,支护桩桩径)进行了多方案计算比较,并用实例说明,且从承载力角度和变形角度分析了三种因素中利用空间效应的较有效途径。

**【关键词】** 深基坑; 支护结构; 空间效应; 三维有限元

**【Abstract】** The spatial effect is researched on the protecting structure of retaining pile by the three-dimensional finite element method(3DFEM), and compared with the other methods the better result is obtained.

**【Key words】** deep excavation; protecting structure; spatial effect; three-dimensional finite element method

## 0 引言

结构设计控制分为承载力控制和变形控制。深基坑支护结构设计,由《全国深基坑规范》(送审稿)可见,对任何类型的支护结构,都有严格的承载力控制和稳定验算。而在其中“17. 减少基坑变形对环境的影响的措施”一节中对位移控制标准也有严格要求。

空间效应是指一个基坑空间状态受力,开挖面必然受到另两面的支撑影响。因此,在开挖平面四角的一定范围内受力状态是不同的。空间效应在国内外研究不少。较早的《护坡桩空间受力简化计算》<sup>[1]</sup>就根据经典土压力基本理论及边坡稳定分析方法,提出了简化的空间效应近似公式。《论深基坑支护的空间效应》<sup>[2]</sup>又借助于坑壁土体的三维破坏模式及极限平衡分析理论,探讨了两坑壁端部对坑壁支护结构上土压力的整体屏蔽

作用,提出考虑空间效应的土压力近似公式。但利用三维有限元研究空间效应的还很少。本文利用三维有限元分析研究空间效应影响范围,影响程度,及利用方法。

## 1 有限元分析过程

### 1.1 计算模型

如图 1a, 本文采用三维模型。支护结构利用三维杆件单元模拟, 线弹性材料, 弹性模量  $E$  取 30 000MPa; 土体单元利用三维六面体单元模拟, 线弹性材料, 弹性模量  $E$  取 30MPa, 泊松比取 0.17。支护桩桩距  $bc$ , 距离  $ab$  和  $cd$  为支护桩桩距的一半。图 1b 为支护截面图,  $ab1$  为支护桩。

### 1.2 基本方案

如图 2, 将整个基坑等分为若干段分析, 每段建立如图 1 的力学模型。由端部开始分析。角部支护桩  $a$  由于其垂直方向的坑壁

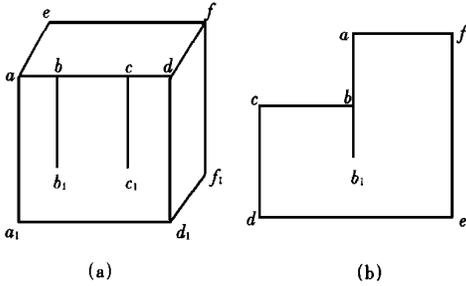


图1 模型图

作用,可近似认为其刚度无穷大,所以假设桩 *a* 水平位移为 0,设置水平约束,而后对模型进行有限元近似,得到桩 *a* 和桩 *b* 的位移和内力。再由模型对桩 *b* 和桩 *c* 进行分析,其中桩 *b* 的位移值由上个计算给出,这样可以得到桩 *c* 的位移和内力。这样依次对桩 *c* 和桩 *d*,桩 *d* 和桩 *e*,桩 *e* 和桩 *f*……计算,当两相邻桩的位移和内力情况基本相同,假设桩 *f* 和桩 *g* 的位移和内力情况基本相同,则桩 *a* 和桩 *f* 的距离为空间效应影响范围。将本文结果和参考文献 [1] 方法以及三维整体有限元分析结果对比,见表 1,可知三者结果十分接近,既验证了参考文献 [1] 简便方法的实用性,又验证了本文模型的正确性。

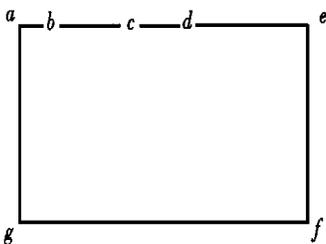


图2 基坑平面图

### 2 多方案比较

决定空间效应影响范围,支护桩的最大位移及最大内力的影响因素很多:支护桩桩径,支护桩间距,支护桩桩长,配筋量,地下水及地质条件等。毫无疑问,在保证支护桩的

位移及内力满足要求的基础上,合理充分地利用空间效应,对支护桩进行设计布置,肯定会有相当的经济效益。

就利用空间效应问题,参考文献 [1] 提出了用空间效应影响系数来反映空间效应下支护桩受力状态的不同,并提出可以通过放大桩距,减小桩径或减少配筋量,改变桩长等方法。《论深基坑支护的空间效应》又借助于坑壁土体的三维破坏模式及极限平衡分析理论,探讨了两坑壁端部对坑壁支护结构上土压力的整体屏蔽作用,提出考虑空间效应的土压力近似公式。但由于借助的坑壁土体的三维破坏模式局限该方法暂不能解决粘性土深基坑的空间效应问题。以上研究都是探讨了深基坑空间效应下土压力的不同,以及简要介绍利用方法,并没有分析利用空间效应设计后基坑支护的变化情况,以及在放大桩距、减小桩径或减少配筋量、改变桩长等方法的长短之处。

传统经典土压力理论与实际情况有所出入,而参考文献 [1] 方法,参考文献 [2] 方法也避免不了这个问题。有限元计算不用考虑土压力取值,避开了此问题。本文主要比较分别采用增大桩距,减小桩径,减少桩长方法来利用空间效应,并与基本方案一起,比较空间效应影响范围,影响程度(支护桩水平位移)。从理论上,假定现有支护设计理论完善,则三种空间效应利用方法是等效的。但实际上,土压力取值不准,设计理论有不少假设,因此三种空间效应利用方法可能不等效。本文分别从变形和承载力角度比较三种方法,分析得出有益的结论。

### 3 工程实例

北京医院急诊室工程:基坑深 8.4m,各土层加权平均后,  $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$ ,  $c = 18 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 25^\circ$ ,  $Q = 20 \text{ kN/m}$ 。据资料,考虑到坑下的摩擦力的作用,设计结果为悬臂式支护桩,桩径 800mm,中距 1.5m,插入深度 3m。

$$b_1 = H \times \cot(45^\circ - \varphi/2) \quad (1)$$

$$k = \frac{x}{H} \times \frac{1 - m \times x \tan \varphi}{m \times x + \tan \varphi} \quad x < b_1 \quad (2)$$

$$k = 1 \quad x \geq b_1 \quad (3)$$

$$m = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) / H \quad (4)$$

公式(1)~(4)为参考文献[1]的简化方法。

式中:  $b_1$  ——空间效应影响范围, m;

$k$  ——空间效应影响系数;

$H$  ——坑深, m;

$X$  ——距坑角距离, m;

$M$  ——相关系数, 量纲一的量。

表1 空间效应影响范围对比表 m

	基坑深 8m	基坑深 9m	基坑深 10m
参考文献 [1] 方法	12.55	14.13	15.70
本文方法	11.88	13.23	14.68
三维整体有限元	12.01	13.82	15.32

#### 4 分析及总结

利用空间效应的目的是在保证变形满足要求的前提下充分发挥支护桩的承载力。为此, 本文主要比较采取利用方法后支护桩的内力和位移, 得出相对较好的方法。

在实际工程设计施工中, 由于现场条件复杂, 不同的方法都有相应的适用性和局限性。例如减小桩长, 若土质不均, 下部插入端土质较好, 若简单减少桩长则不能满足承载力要求。参考文献[1]提出的土压力折减系数, 主要从承载力角度考虑, 而未考虑变形控制。利用空间效应的几种方法中, 就承载力角度和变形角度来看, 作用效果又不同。

增大桩距, 作用在桩上的主动土压力、水压力, 外力因作用面增大而线性增大, 因此在每单根支护桩条件不变下, 其内力和变形也线性增大, 设计思路易懂, 但桩距难以准确确定, 而确定后相反易于施工。

而减少桩径, 作用在桩上的主动土压力、水压力, 外力不变, 对每根单桩而言, 内力情况不变, 但由于断面减小, 变形增大。而且抗

弯刚度与桩径成四次方关系, 也就是变形增大与断面减小呈四次方关系。设计中, 若空间效应影响系数  $k$  乘以 0.8, 则桩径为原来的 0.945 倍, 易于设计, 但不易施工。

改变支护桩长, 作用在桩上的主动土压力、水压力, 外力改变, 同时支护结构设计改变较大, 而且施工较麻烦, 实用性降低很多。

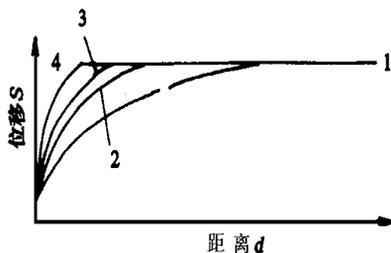
传统方法以为三种方法在承载力和变形上是等效。由表 3 可知采取应用方法后, 支护桩的承载力得到更充分的应用, 而改变桩径后承载力储备最大。由此可知, 此方法较其它两种方法在力学受力上更为合理, 使安全得到最大保证。同理, 由图 3 分析, 三种方法采用后在变形上有差别, 而改变桩距为最佳, 使变形最易满足。

表2 空间效应影响范围对比表 m

	1 基本方案	2 改变桩径	3 改变桩距	4 改变桩长
空间效应影响范围	11.88	8.65	7.76	6.56

表3 ( $M$ )改变影响因素承载力对比表

	距坑角 1.5m	距坑角 3m	距坑角 4.5m	距坑角 6m	距坑角 7.5m	距坑角 9m
基本方案	0.09	0.16	0.25	0.33	0.39	0.45
改变桩径	0.33	0.35	0.40	0.46	0.48	0.50
改变桩长	0.38	0.40	0.45	0.49	0.50	0.50



1——基本方案 2——改变支护桩桩长  
3——改变支护桩桩间距 4——改变支护桩桩径

图3 基坑坑壁水平位移

### 3.2 计算结果分析

由以上算例可以看出,按照本文方法计算的沉降值虽然比按  $n=0.002$  方法计算值更接近实际试桩结果,但它与实际试桩结果还是有区别的,一般比实际试桩略大。这主要有两个原因。(1)桩在设计荷载作用下其桩端阻力所占比例并不与极限状态时的比例相同,而计算时  $\alpha$  值取其极限端阻力与单桩极限承载力的比值,并假设其值不变,因而计算结果略大,且荷载越小,偏差越大。这正符合由大量试桩证明的那样:荷载水平越低端阻力发挥越少。(2)由于试桩周期较短,它所测得的沉降并不是桩的最终沉降量,随着时间的推移,桩沉降量也会略有增加。因此,本文的方法计算的单桩最终沉降量比试桩通常要大一些是合理的。

### 4 结论

桩侧阻力及桩端阻力实际作用位置应在距桩轴线  $D/2$  及  $D/3$  处,以  $n=DL/2$  及  $n=DL/3$  代替  $n=0$  进行计算比按  $n=0.002$  代替  $n=0$  计算更符合实际桩荷载情况,且计算结果也更接近实际情况,在小桩台、轴线桩、稀桩及不同桩长组成的桩基计算中效果尤其显著。因此,这种计算方法在工程应用上更合理,具有更广泛的实用意义。

### 参 考 文 献

- 1 Poulos H G Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design John Wiley and sons 1980.
- 2 刘金砺. 桩基础设计计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990

收稿日期: 1998-10-06

(上接 29 页)

### 5 结 论

(1)本文建立模型于三维基坑整体分析对比,在计算容量要求减小较多,速度增大同时,也具有相当精度。

(2)参考文献[1]提出的护坡桩空间受力简化计算方法经本文分析是简便可行的。

(3)若支护结构设计中采取承载力控制,则利用空间效应方法以改变桩距为好;采取变形控制,则利用空间效应方法以改变桩径为好。

(4)上述对比得出较好方法,并未从施工角度,经济角度综合考虑。

### 6 结束语

深基坑支护结构作整体三维有限元分析,更加合理,但由于计算量过大,要求内存过高,在实际设计中较少使用。而本文方法避免了上述问题,而且能考虑空间效应,与参考文献[1]提出的护坡桩空间受力简化计算

方法吻合较好,具有较强的工程实用价值。由于采用有限元方法,适用于大多数支护类型、土质、各种埋深等。

但不足的是不能模拟开挖过程,不能对施工过程作分析,提出有益建议,而且由于采用软件限制,采用弹性土体单元,于实际有出入,只能有待更好软件。

### 参 考 文 献

- 1 黄强. 护坡桩空间受力简化计算方法. 建筑结构, 1981
- 2 杨雪强, 刘祖德, 何世秀. 论深基坑支护的空间效应. 岩土工程学报, 1998
- 3 余志成, 施文化. 深基坑设计与施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- 4 Qu. C. Y., Chiou. D. C., Wu. T. C journal of geotechnical engineering Threedimensional finit elment method analysis of deep excavations 1996

收稿日期: 1998-08-26