

# 地基不均匀沉降对上部结构影响的 三维弹性支承分析法

王 晖 吴胜发 孙作玉

(广州大学土木工程学院,广东广州 510405)

**【摘要】** 地基不均匀沉降是导致建筑工程事故的主要原因之一。为了研究地基不均匀沉降对上部结构内力、变形、周期等影响,提出了将地基(或基础)模拟为三维弹性支座的有限元分析方法,将上部结构和地基基础进行整体分析。以深圳市少年宫“水晶石”大厅结构为例,运用有限元软件 ANSYS,将三维弹性支承分析法与常用的固定支座法和竖向弹性支承分析法进行了对比分析,验证了三维弹性支承分析法的合理性,从而得出了一些有益的结论,可供设计人员参考。

**【关键词】** 不均匀沉降;三维弹性支承;上部结构;有限元分析

**【中图分类号】** TU 433

## Analysis of the Influence of Ground Unequal Settlement on the Structure with Three-dimensional Elastic Support Model Method

Wang Hui Wu Shengfa Sun Zuoyu

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong 510405 China)

**【Abstract】** Some engineering problems are caused by ground unequal settlements. In order to investigate the influence of the ground unequal settlements on the superstructure, a finite element method simulating ground(or pile ground) is developed by three-dimensional elastic support, which could integrally analyze the interaction among structure, foundation and ground. The comparative analysis among three-dimensional elastic support, the elastic support model and immobility model for the example of the Crystal Stone Lobby of Juvenile Palace in Shenzhen is done by the ANSYS software of FEM. The method has been proved rationality. Some important conclusions will give advice to structural design.

**【Key Words】** unequal settlement; three-dimensional elastic support; superstructure; FEM

### 0 引言

地基土质条件复杂、地基降水以及上部建筑结构荷载不均匀等因素都将导致建筑结构的基础产生不均匀沉降,从而引起建筑结构的倾斜,或者一些构件的开裂甚至破坏。地基不均匀沉降是引起土木、建筑工程事故的主要原因之一<sup>[1]</sup>。

为了研究基础的不均匀沉降对上部结构的影响,传统的方法是将柱脚与基础的连接处作为固端或固定铰支座,人为地给某柱脚支座以支座沉降,以此模拟不均匀沉降的产生。由于支座不均匀沉降导致内力重新分布,而内力的变化又反过来影响其支座的沉降值。这是一个反复迭代计算的过程。显然,固定支座法不能完全反映实际结构变形和内力的分布结果。天津大学的刘畅<sup>[2]</sup>等人提出了地

基不均匀沉降对上部结构影响的竖向弹性支承分析法,即在结构的每根柱下加上一个弹簧,用弹簧来模拟地基(或基础)对上部结构的作用。该方法与传统方法相比,优点在于考虑了地基刚度及地基与上部结构相互作用的过程,缺点在于竖向弹性支承法只考虑了竖向作用而不计两个水平方向的影响,在风、地震等水平荷载作用时不能更好地描述实际情况。同济大学的董军<sup>[3]</sup>等人从理论上分析了地基不均匀沉降引起上部结构损坏的非线性全过程,但由于材料各异、计算繁琐等问题,目前距离普遍实用还有较大的距离。姜晨光<sup>[4]</sup>等人根据工程实测得出的基础不均匀沉降和上部结构倾斜角间的数学关系式表明,建筑物的上部倾斜随差异沉降的增大而增大,但这种增大不是无限制的。

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(020592)

作者简介:王 晖,1963年生,女,汉族,黑龙江人,副教授,主要从事结构工程的教学与研究。E-mail:sunzuoyu@163.com

深圳市少年宫位于深圳市福田区,它是深圳市跨世纪重点建设项目中的四大文化设施之一,是一座科技型现代少年宫。“水晶石”大厅处于该建筑群的核心位置,作为少儿科学殿堂和青少年素质教育基地,其结构绝不允许由于地基不均匀沉降而导致裂缝、倾斜等破坏。本文提出了将地基(或基础)模拟为三维弹性支座的有限元分析方法,运用大型有限元软件 ANSYS,以“水晶石”大厅结构为例进行了对比分析。计算表明,三维弹性支承分析法分析地基不均匀沉降对上部结构内力、变形、周期等影响的结果是合理的。

## 1 计算模型

### 1.1 ANSYS 建模及模拟单元的选择

本文选取“水晶石”大厅建筑作为计算分析地基不均匀沉降对上部结构内力、变形、周期等影响的算例。“水晶石”大厅是深圳市少年宫建筑群中一个独立的结构单元<sup>[5]</sup>。“水晶石”大厅建筑体形复杂,该部分总高为 30.5 m,直径 50 m,主体承重结构由三根劲性钢筋混凝土(SRC)圆柱(直径分别为 1.8 m 和 1.6 m)托起一个椭球体。椭球体的长、短轴分别为 36 m、28 m、14 m,内部为多功能演出大厅。椭球体下部为 SRC 梁板结构及高强度钢筋混凝土弧墙结构,上部为钢管穹框架结构。围绕该主体结构是由 16 根直径为 750 mm 的钢管柱组成的圆形支承。钢管柱高 28.5 m,四周由钢结构箱型环梁连接,柱顶用辐射状布置的钢结构箱型梁与椭球体上部钢管穹框架铰接。本文以杆系模型为基础,劲性钢筋混凝土(SRC)圆柱、椭球体下部 SRC 梁、箱型环梁、上部钢管穹框架全部选用空间梁单元 beam189,钢管柱用管单元 pipe20,板用壳单元 shell63,柱顶钢结构箱型梁与椭球体上部钢管穹框架的铰接用不承受弯矩的杆单元 link8 来模拟。用有限元软件 ANSYS 对“水晶石”大厅结构建模,其有限元模型见图 1。

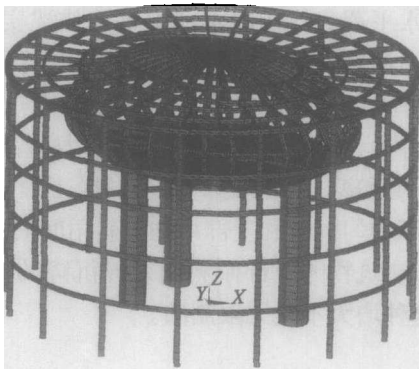


图 1 有限元分析模型

### 1.2 三维弹性支承模型

在有限元软件 ANSYS (Modeling and meshing guide. ANSYS Inc, 1994)中,没有现成的三维弹性支承单元,但它提供了一系列线性、非线性和弹簧阻尼等连接单元,可以用若干个组合来实现基础的三维弹性支承。三维弹性支承计算模型是在每根柱下加两个水平方向和一个竖直方向弹簧用来模拟地基(或基础)对上部结构的作用,三个弹簧均选用线性 nbin14 单元。这样,一个支座由三个单元所组成,三单元不相交的各自节点(A、B、C)约束所有自由度,交点处节点(O)约束转动自由度,三维弹性支承模型见图 2。显然,固定支座模型相当于三维弹性支承模型的柱下弹簧支座刚度为无穷大时的情形。

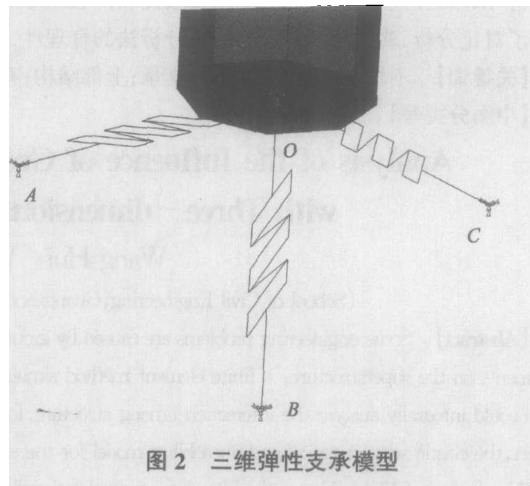


图 2 三维弹性支承模型

### 1.3 计算内容

采用固定支座模型、竖向弹性支承模型和三维弹性支承模型分别对整体结构进行有限元计算,比较地基不均匀沉降对底层各柱的附加沉降及上部结构内力、变形、周期的影响。底层各柱编号为 1~19 (见图 3)。先计算固定支座模型在自重作用下各柱的基底反力,再假设各柱均产生 20 mm 的初始沉降便可得到各柱下弹簧初始刚度。该结构形状比较特殊,主体承重结构是三根劲性钢筋混凝土圆柱。其中,柱 17 承受的荷载最大。在相同条件下,它相对于其它柱更容易产生不均匀沉降。据《建筑地基基础设计规范》的有关规定<sup>[7]</sup>,对框架结构的特征变形是限制与相邻柱的沉降差,并以柱距的某一比例来表示,由该规范计算得出,柱 17 的最大不均匀沉降允许值为 63.8 mm,通过调整柱 17 下弹簧的刚度,给柱 17 施加 40 mm 的不均匀沉降值。在竖向和水平荷载作用下进一步分析地基不均匀沉降对上部结构的影响,水平荷载为风荷载,其标准值由规范<sup>[8]</sup>计算得出,基本风压取 0.84 kN/m<sup>2</sup>。地面粗糙度按 C 类计算。

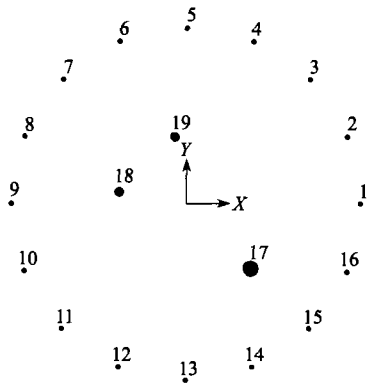


图3 底层柱编号

## 2 计算结果比较分析

### 2.1 不同支座模型柱脚产生的附加沉降

采用不同的支座模型计算,柱脚的沉降值有所不同。各柱因17柱不均匀沉降40 mm而产生的附加沉降值见表1。当降低柱17下弹簧刚度产生不均匀沉降时,在竖向荷载作用下采用

竖向弹性支承模型和三维弹性支承模型其它各柱均产生了附加沉降,且后者产生的附加沉降值小于前者产生的附加沉降值。但两者差值不大。当有水平荷载作用时,采用三维弹性支承模型,柱15和柱17产生的附加沉降值比竖向弹性支承模型产生的附加沉降值要大。这是由于实际建筑物地基不可能完全刚性,水平弹簧发生变形的缘故。由表1可看出,当柱17沉降时,并不是所有柱的附加沉降值是增加的,5号柱和9号柱的附加沉降值反而减少。这是由于17号柱产生不均匀沉降后,结构不但有向下变形的趋势,同时结构也发生了向某个方向的整体倾斜。17号柱产生不均匀沉降时,与其相邻柱的附加沉降值会增加,且随着其与支座沉降柱的距离减小而增加。显然,与其相距最近的15号柱产生的附加沉降值最大,这一特性同时也反应了地基基础与上部结构共同作用的过程。

表1 17柱沉降时各柱附加沉降值

mm

支 座 模 型		1 柱	5 柱	9 柱	13 柱	15 柱	17 柱	18 柱	19 柱
竖向弹性支承模型	重力荷载	1.55	-0.54	-0.53	1.55	2.04	1.98	0.21	0.21
	重力与风组合荷载	1.89	-0.65	-0.65	1.89	2.48	6.29	0.26	0.26
三维弹性支承模型	重力荷载	1.47	-0.45	-0.45	1.47	1.92	1.94	0.19	0.20
	重力与风组合荷载	1.80	-0.55	-0.56	1.79	2.53	6.35	0.24	0.24

注:表中“-”号表示支座沉降的减少

### 2.2 柱脚轴力变化分析

对于各种支座模型,结构底层部分柱在17号柱沉降与非沉降时的轴力变化百分比见表2。由表2可以看出,采用不同的支座模型计算时,各柱的轴力均发生变化,且三维弹性支承模型的变化幅度最小,

不管采用何种支座模型,产生沉降的17号柱的轴力均减小。与17号柱相距较远的5号柱和9号柱轴力减少,随着各柱与沉降柱的距离减小不均匀沉降对轴力的影响增加,这与附加沉降的变化趋势殊途同归。

表2 17柱沉降时各柱的轴力变化比值

%

支 座 模 型		1 柱	5 柱	9 柱	13 柱	15 柱	17 柱	18 柱	19 柱
固定支座模型	重力荷载	8.78	-2.87	-2.87	8.88	11.59	-3.44	1.09	1.09
	重力与风组合荷载	7.40	-2.69	-2.68	7.77	9.99	-2.90	1.01	0.96
竖向弹性支承模型	重力荷载	8.12	-2.52	-2.61	8.13	10.19	-3.19	1.03	1.03
	重力与风组合荷载	8.31	-2.25	-3.18	9.21	10.77	-3.32	1.38	0.92
三维弹性支承模型	重力荷载	6.44	-2.17	-2.17	7.94	9.81	-3.13	0.96	0.96
	重力与风组合荷载	8.01	-2.11	-2.60	8.81	10.23	-3.24	1.26	0.90

### 2.3 顶部环形梁轴向应变

对于不同的支座模型,外筒钢框架顶部环形梁在不同的荷载作用下的最大轴向应变见表3。在竖向荷载作用下,上部结构水平方向运动以整体结构的平动为主,所以上部结构的轴向应变值较小,当支

座有水平方向支承时,这种效果更明显。在水平荷载作用下,上部结构有倾斜趋势,相应的顶部梁的轴向应变增大。总体来看,三类支座模型对顶部梁的轴向应变影响不大,但三维弹性支承模型使上部结构内力的变化更灵敏。

表3 不同支承模型顶部梁的最大轴向应变 ( $\times 10^{-5}$ )

支座模型	重力	重力与风荷载组合
固定支座模型	1.053	1.244
竖向弹性支承模型	1.052	1.406
三维弹性支承模型	1.044	1.405

#### 2.4 不同支座模型对结构周期的影响

模态分析的结果见表4。结构的自振周期较好地反应了三类支座模型各自的特性,三维弹性支承模型使结构变得更“柔”,即结构的刚度变得更小。由于  $T \propto \sqrt{m/k}$ ,所以三维弹性支承模型的结构自振周期最大。模态分析结果进一步验证三维弹性支承模型的合理性,为结构的动力计算奠定了基础。

表4 结构自振周期 s

支座模型	$T_1$	$T_2$	$T_3$
固定支座模型	1.337 1	1.065 2	0.826 9
竖向弹性支承模型	1.409 6	1.117 5	0.827 1
三维弹性支承模型	1.438 6	1.169 0	0.873 8

#### 2.5 支座转动约束对上部结构的影响

无论是固定支座模型、竖向弹性支承模型还是三维弹性支承模型,在计算时均没有考虑支座的扭转变形。在实际建筑物中,诸如“十”字形、“井”字形、“剪刀叉”形等结构形式在水平荷载作用下,支座可能发生转动。为了观察支座的扭转作用效果,分别释放竖向弹性支承模型和三维弹性支承模型的3个转动约束,在重力和风荷载组合作用下考虑地基不均匀沉降对上部结构的影响。计算结果表明,与施加转动约束相比,17柱沉降时,各柱附加沉降值明显减少,外框架顶部环形梁的最大轴向应变也减小,但结构的自振周期和X向侧位移分别是有转动约束的约2.5倍和2倍。这是结构变“柔”的缘故。底层柱的轴力则部分增加,部分减小。总体说来,三维弹性支承模型比竖向弹性支承模型变化幅度要小。由此,我们不难看出,采用三维弹性支承模型分析地基不均匀沉降对上部结构的影响是偏于安全的。

### 3 结论与建议

本文通过对计算结果的对比分析验证了三维弹

性支承模型的合理性。大量的算例表明,用三维弹性支承模型来分析地基不均匀沉降对上部结构的影响具有如下特点:

1) 三维弹性支承模型施加地基不均匀沉降是通过改变弹簧的刚度来模拟的,而固定支座模型相当于在柱底施加了拉力来产生沉降,这对底层柱的受力特性是完全不同的。

2) 调整弹簧的刚度也就是考虑了地基刚度的变化,从而可以反应软弱地基的沉降特性。

3) 附加沉降值的变化规律很好地反应了地基基础与上部结构的共同作用过程及基础的相互影响结果。

4) 水平弹簧的设置可以考虑支座的微小水平变形,当在水平荷载作用下时,三维弹性支承模型能更准确的反应地基不均匀沉降对上部结构的影响。

对于地基条件复杂或者承受较大水平荷载的建筑物,在设计考虑结构可能产生的不均匀沉降的影响时,应分别考虑三个方向的支承刚度,必要时可以考虑扭转刚度的变化。本文提出的三维弹性支承分析方法及分析得出的主要结论可供设计人员参考。

#### 参 考 文 献

- 1 范锡盛,王跃. 建筑工程事故分析及处理实例应用手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 1~5
- 2 刘畅,郑刚. 地基不均匀沉降对上部结构影响的弹性支承分析法. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 124~128
- 3 董军,邓洪洲,马星,等. 地基不均匀沉降引起上部钢结构损坏的非线性全过程分析. 土木工程学报, 2000, 33(2): 101~106
- 4 姜晨光,荷勇,任荣. 建筑基础沉降与上部结构倾斜的联合监测与分析. 城市勘测, 2001(2): 36~38
- 5 黄囊云,周福霖,徐忠根,等. 一座混合空间结构地震模拟试验设计及抗震性能分析. 华南建设学院西院学报, 2000, 8(1): 11~19
- 6 GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范.
- 7 GB 50009—2001 建筑结构荷载规范

收稿日期: 2005-03-10