

多层及高层建筑结构空间分析程序  
TBSA (5.0版)



技术手册

中国建筑科学研究院  
高层建筑技术开发部

多层及高层建筑结构空间分析程序

TBSA (5.0 版)

# 技 术 手 册

中国建筑科学研究院

高层建筑技术开发部

1996年1月

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	(1)
第一节 高层建筑结构的特点.....	(1)
第二节 结构计算的基本假定.....	(2)
第三节 计算机程序的发展.....	(6)
第四节 三维杆件空间分析方法 .....	(10)
<b>第二章 程序总体设计</b> .....	(16)
第一节 设计基本原则 .....	(16)
第二节 对高层建筑结构程序的基本要求 .....	(18)
<b>第三章 数据准备</b> .....	(26)
第一节 总体参数 .....	(26)
第二节 计算简图的确定 .....	(34)
第三节 荷载输入 .....	(58)
第四节 特殊情况下的变通处理 .....	(64)
<b>第四章 内力分析</b> .....	(80)
第一节 风荷载和地震作用计算 .....	(80)
第二节 荷载效应和地震作用效应的组合 .....	(95)
第三节 杆件——薄壁杆件空间分析方法.....	(103)
第四节 计算功能的选择.....	(129)
第五节 框架——剪力墙结构框架剪力的调整.....	(137)
<b>第五章 截面设计</b> .....	(141)
第一节 截面设计的一般原则.....	(141)
第二节 框架柱设计.....	(145)
第三节 框架梁设计.....	(150)
第四节 剪力墙墙肢设计.....	(161)

第五节	连梁设计·····	(169)
第六章	计算结果的分析·····	(172)
第一节	输出结果的大致判断·····	(172)
第二节	若干问题说明·····	(176)

# 第一章 概述

## 第一节 高层建筑结构的特点

高层建筑结构不同于低层和单层结构,不能简单套用低层结构的原有概念。设计人员需对高层建筑结构的特点作进一步的了解。

### 一、高层建筑结构受力特点

#### (一)空间整体作用

实际的房屋建筑都是空间结构,是空间受力的,简化为平面框架计算只适用于最简单的情况。因此,次梁的端弯矩、梁的扭矩在设计中都应考虑,柱和墙的轴力不能简单按荷载面积计算。这些将在下面有关部分说明。

#### (二)水平力起控制作用

高层建筑由于地震和风产生的内力往往大于竖向荷载产生的内力,因此组合内力分布不同于低层建筑。如梁的端部正弯矩可能大于跨中弯矩;梁的剪力要考虑上、下方向;上层柱可能出现大偏心受压情况等等。

#### (三)柱、墙的轴向变形影响

由于层数多、高度大,墙、柱轴向变形逐渐积累,对内力产生明显影响,设计人员必须决定是否考虑施工过程模拟的问题。

### 二、高层建筑结构配筋的特点

#### (一)梁的配筋

由于框架梁端负弯矩可能大于跨中,所以端部负钢筋多于跨中,正钢筋有时也可能多于跨中。梁的剪力比较均匀,而且可能上下反号,所以用钢箍作为抗剪配筋,一般不设弯起钢筋。

#### (二)柱的配筋

高层建筑竖向荷载很大,柱截面多由轴压比控制,多数情况下是构造配筋,上部楼层可能出现大偏心受压而产生计算配筋。

由于柱截面较大,按规范要求配置的箍筋数量也大,肢数多,直径粗,间距较密。

#### (三)剪力墙配筋

##### 1. 墙肢

剪力墙模型化为薄壁杆件,其大部墙段都是偏心受压。位于周边的墙段,

由于受弯曲应力的影响,局部产生偏心受拉,这时端部配筋会较多,属于正常情况。

由于墙内纵向分布钢筋承受了一部分弯矩,剪力墙的端部纵向钢筋在多数情况下为构造配置。

顶部楼层剪力墙由于竖向荷载较小而弯矩较大,有可能出现大偏心受压甚至偏心受拉的情况。

## 2. 连梁

在全高中部三分之一区段楼层中,连梁的弯矩、剪力较大,往往剪压比超出限值或纵向钢筋超出最大配筋率。这由于连梁跨度小而截面高度较大。在设计中常常要通过调整洞口尺寸、考虑连梁弹塑性变形的刚度折减来解决。

## 第二节 结构计算的基本假定

高层建筑是一个复杂的空间结构。它不仅平面形状多变,立面体型也各种各样,而且结构型式和结构体系各不相同。高层建筑中,有框架、剪力墙和筒体等竖向抗侧力结构,又有楼板将它们连为整体。这样一种高次超静定、多种结构型式组合在一起的三维空间结构,要进行内力和位移计算,就必须进行计算模型的简化,引入不同程度的计算假定。简化的程度视所采用的计算工具,按必要和合理的原则决定。

### 一 弹性工作状态

高层建筑结构的内力与位移按弹性方法计算。在非抗震设计时,在竖向荷载和风荷载作用下,结构应保持正常使用状态,结构处于弹性工作阶段;在抗震设计时,结构计算是对多遇的小震(低于设防烈度 1.5)进行的,此时结构处于不裂的弹性阶段。所以,从结构整体来说,基本上处于弹性工作状态,按弹性方法进行计算。

但对于某些局部构件,由于按弹性计算所得的内力过大,出现截面设计困难,配筋不合理的情况。因此,在某些情况下可以考虑局部构件的塑性变形内力重分布,对内力适当予以调整。例如,框架梁可以对弹性计算的梁端弯矩适当调幅,减少 20~30%,同时加大跨中弯矩,使配筋较为均匀、合理。又如剪力墙的连接梁,剪力墙与框架之间的连梁,由于梁高跨比大,剪力与弯矩计算值过大,设计往往无法解决,此时,允许考虑连梁由于塑性变形而产生的刚度降低。连梁刚度降低后,计算的弯矩和剪力可以减少。连梁的刚度折减系数可以按具体情况决定,但考虑到连梁的塑性变形能力十分有限,刚度折减系数不应小于

0.55。

对于罕遇地震的第二阶段设计,绝大多数结构不要求进行内力与位移计算,“大震不倒”通过构造要求予以保证。实际上由于在强震下结构已进入弹性阶段,多处开裂、破坏,构件刚度已难以确切给定,内力计算已无重要意义。

## 二 高层建筑结构应考虑整体共同工作

在低层建筑设计中,常采用将整个结构划分为若干平面结构,按间距分配荷载,然后逐片平面结构独立进行分析,这种设计方法对高层建筑结构不适用。

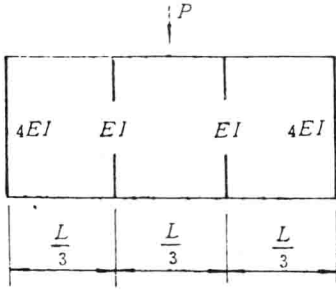
高层建筑结构在风力和地震作用下,楼层的总水平力是已知的,但这水平力如何分配到各片框架、各片剪力墙却是未知的。由于各片抗侧力结构的刚度、形式不相同,变形特征也不一样,所以不能简单地按荷载面积、间距分配,否则,会使刚度大、起主要作用的结构所分配的水平力过小,偏于不安全(图 1—1)。

由于高层建筑中楼板在自身平面内的刚度是很大的,几乎不产生变形,在不考虑扭转影响时,同层各构件水平位移相同,剪力墙结构中各片墙的水平力大致按其等效刚度  $EI_{eq}$  分配;框架结构中各片框架的水平力大致按其抗推刚度  $D$  分配;框架—剪力墙和筒体结构则受力较为复杂,要进行专门的计算。如果平面不规则、不对称,要考虑扭转的影响,则计算要更细致。

当采用计算机进行计算时,有可能对高层建筑结构进行整体协同工作分析,甚至将整个结构作为三维空间体系分析,这样就可以得到比较准确可靠的计算结果。

## 三 楼板在自身平面内的刚度为无限大,平面外的刚度可以不考虑

高层建筑进深大,剪力墙、框架等抗侧力结构的间距远小于进深,楼面的整体性较好,楼板如同水平放置的深梁,在平面内的刚度非常大。所以在内力和位移计算中,楼板一般可以作为刚性隔板,在平面内只有刚体位移——平移和转动,不改变形状(图 1—2)。



按受荷面积分配 16.6% 33% 33% 16.6%  
按协同工作分配 40% 10% 10% 40%

图 1—1 水平力的分配

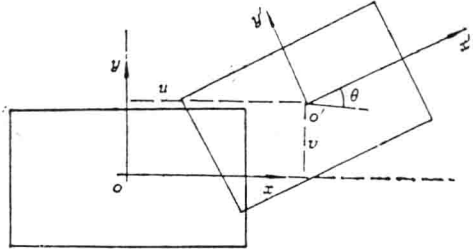


图 1—2 楼面的位移

采用了刚性楼面的假定后,楼面上任一点的位移就可以用坐标原点的三个位移  $u$ 、 $v$ 、 $\theta$  来表示,一旦  $u$ 、 $v$ 、 $\theta$  决定之后,楼面上任一剪力墙、柱的位移便可确定,从而未知数大大减少,计算大为简化。

由于计算中采用了楼板刚度无限大的假定,所以楼面构造就要保证楼板刚度无限大。一般情况下,现浇楼面可以满足要求;框架—剪力墙结构采用装配式楼面时,必须加现浇面层。

在下列情况下,楼板变形比较显著,楼板刚度无限大的假定不适用。这时,对采用刚性楼面假定的计算结果应加以修正,或采用考虑面内刚度的计算方法。

1. 楼面有很大的开洞或缺口,宽度削弱;
2. 平面上有较长的外伸段;
3. 底层大空间剪力墙结构的转换层楼面;
4. 楼面的整体性较差。

相对于抗侧力结构的刚度,楼板的出平面刚度比较小,一般情况下可以不考虑其作用。但在无梁楼盖中,由于没有框架梁,楼板起等效框架梁的作用,这时楼板的平面外刚度即作为等效框架梁的刚度。

#### 四 在计算中应考虑墙和柱子轴向变形的影响

由结构力学可知,计算结构位移的公式为:

$$\delta_{ij} = \int \frac{M_i M_j}{EI} ds + \int \frac{N_i N_j}{EA} ds + \int \frac{V_i V_j}{GA} ds$$

通常在低层建筑结构分析中,只考虑弯矩项,因为轴力项影响很小,剪切项一般可不考虑。但对于高层建筑结构,情况就不同了。由于层数多,高度大,轴力值很大,再加上沿高度积累的轴向变形显著,轴向变形会使高层建筑结构



的内力数值与分布产生显著的改变。

如图 1—3 所示的框架,在各层相等楼面均布荷载作用下,不考虑柱的轴向变形时,各层梁的弯矩分布大致相同,梁端有较大负弯矩(图 1—3a),实际上由于中柱轴力比边柱大一倍,中柱轴向压缩变形也大于边柱,相当于梁的中支座产生支座沉陷,中支座上方梁端负弯矩自下而上逐层减少,到上部楼层还可能出现正弯矩(图 1—3b)。所以,高层建筑结构不考虑墙、柱轴向变形会使计算结果产生显著的偏差。

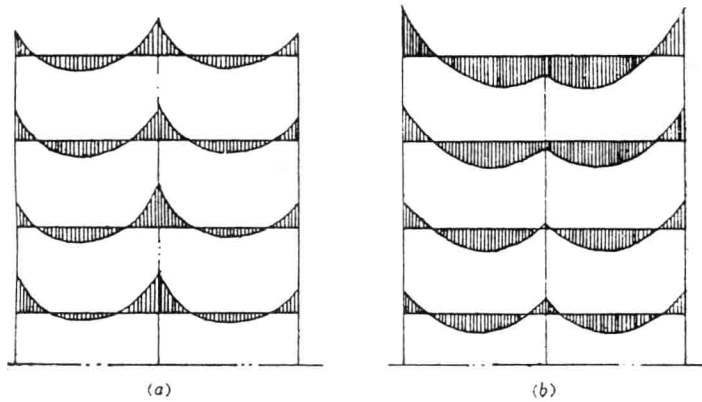


图 1—3 柱轴向变形对框架内力分布的影响

高层建筑结构分析时,对于简化的手算方法,除考虑各杆件的弯曲变形外,对于高宽比大于 4 的结构,宜考虑柱和墙的轴向变形的影响;剪力墙宜考虑剪切变形。

采用计算机时,如用平面抗侧力结构空间协同工作分析方法,应考虑梁的弯曲与剪切变形,对柱、墙应考虑弯曲、剪切和轴向变形;采用杆件系统三维空间分析时,除上述变形外,梁、柱、墙均应考虑扭转变形,墙肢还应考虑截面翘曲。

常用计算方法所考虑的变形因素见表 1—1,考虑因素的多少,代表计算方法的精确程度,考虑的因素较多,计算的结果也较为符合实际情况。

轴向变形的影响在结构计算中应当考虑,但是,结构所受的竖向荷载并不是在结构完成后一次施加的。特别是,占绝大部分的结构自重是在施工过程中逐层施加的,轴向压缩变形已在施工过程中分阶段完成,并在各层标高处找平,实际上并不完全类似于图 1—3b 的情况。

所以,在考虑轴向变形影响时,要考虑施工过程分层施加竖向荷载这一因素,不能简单按一次加载考虑,否则会出现一些不合理的计算结果,如邻近剪力墙和筒体的上层框架柱,在竖向荷载作用下出现拉力;上层框架梁出现过大的弯矩与剪力等。

工程设计中常用计算方法所考虑的变形因素 表 1—1

计 算 方 法		构 件		
		梁	柱	剪力墙和筒体
简化的手算方法		弯 曲	弯 曲 轴 向 <sup>①</sup>	弯 曲 剪 切 轴 向 <sup>①</sup>
计 算 机 方 法	平面抗侧力结构空间协同工作分析	弯 曲 剪 切	弯 曲 剪 切 轴 向	弯 曲 剪 切 轴 向
	三维空间杆件系统分析	弯 曲 剪 切 扭 转	弯 曲 剪 切 轴 向 扭 转	弯 曲 剪 切 轴 向 扭 转 翘 曲

① 表示有必要和有可能时考虑。

### 第三节 计算机程序的发展

用于多层和高层建筑物结构内力分析和配筋计算的程序在我国经历了三个发展阶段,它是随着我国高层建筑结构和计算机技术的发展而发展起来的(图 1—4)。

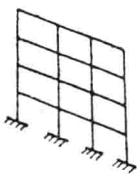
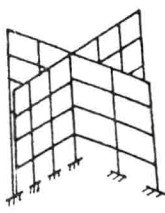
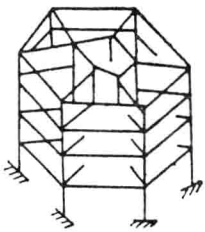
阶 段	I	II	III
分析方法	单片平面框架分析	协同工作分析	三维空间分析
年 代	1975年以前	1975~	1980~
简 图			
适 用 范 围	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 平面非常规则的单纯结构（纯框架结构、纯剪力墙结构）</li> <li>• 名片框架（剪力墙）大体相似</li> <li>• 一般不用于高层结构</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 平面规则</li> <li>• 由平面框架和平面剪力墙组成的框架、剪力墙和框架剪力墙结构</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 任意平面、任意体型</li> <li>• 由梁、柱、剪力墙组成的任意结构体系</li> </ul>

图 1—4 结构分析程序的发展

### 一、单片平面框架分析程序

在 70 年代以前,计算机容量很小,一般内存在 16K—32K 左右,计算速度低,只能对单片平面框架进行计算。实际建筑都是空间整体的,划分为若干平面结构进行计算只是一种粗略的处理,以适应当时计算机的水平。这种方法只适用于平面及体型十分规则、结构单一(纯框架或纯剪力墙结构)的情况,所以高层建筑结构不采用平面框架计算程序进行分析。(图 1—5)。

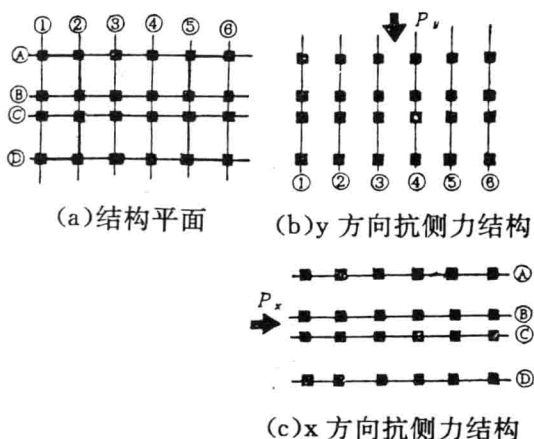


图 1—5 高层建筑结构简化计算图形

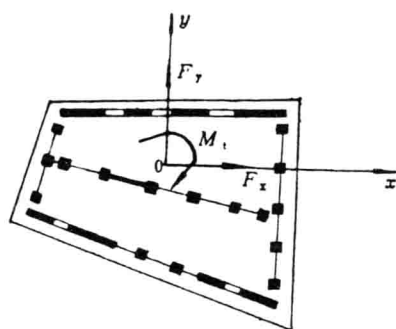


图 1—6 平面抗侧力结构空间协同工作的计算图形

## 二、高层建筑结构空间协同工作的分析方法

基本计算图形与手算方法大致相同,高层建筑结构划分为若干片正交或斜交的平面抗侧力结构,但对任一方向的水平荷载和水平地震作用,所有正交和斜交抗侧力结构均参加工作,由空间位移协调条件进行水平力的分配。(图 1—6)。

协同工作分析广泛应用于框架、框架—剪力墙和剪力墙结构等由平面抗侧力结构组成且布置较为规则的结构计算。

高层建筑结构是复杂的空间结构,人为地划分为平面结构进行分析,必然存在一些不足,主要是:

- (1) 适应范围受限制,只能用于平面较为简单规则,可以划分为平面框架或平面剪力墙的结构;
- (2) 同一柱(墙)分别属于纵向或横向的不同框架,轴向力计算值各不相同,存在轴向变形不协调的问题。
- (3) 前后处理功能较弱,数据准备工作量大。

### 三、三维空间分析程序

80年代初,高层建筑结构布置日益复杂,同时筒体结构等以空间整体作用为特征的结构开始应用,这些工程不能再划分为平面结构计算,因而采用杆件—薄壁杆件系统三维空间分析成为必然的发展。这种方法将高层建筑结构视为杆件(梁、柱)和薄壁杆件(墙)的集合,空间杆件每端有6个自由度、薄壁杆件每端有7个自由度(多一个截面翘曲角),按矩阵位移法直接由单元刚度矩阵形成总刚度矩阵后求解。除引入楼板面内刚度无限大假定以减少一部分未知量外,不再引用其它简化假定(图1—7)。

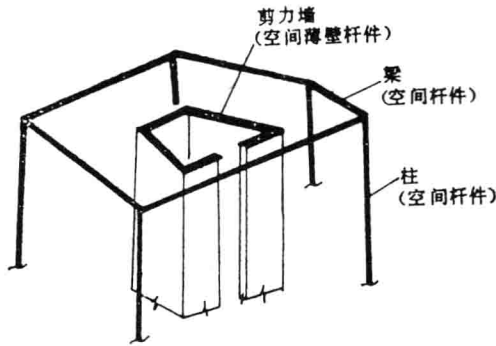


图1—7 杆件—薄壁杆件系统三维空间分析计算图形

这一方法适应性广,比较准确。1980年开始先后用于深圳国际贸易中心(50层,高160m)、北京中央彩电大楼(27层,112m,9度设防)和解放军总通讯楼(18层,9度设防),并进行了彩电大楼和通讯楼的有机玻璃模型试验,验证了其正确性。

由于空间分析要求很大的计算机容量,80年代中期以前,主要用于大中型计算机(如SATS程序)。

1987年,实现了在IBM PC系列微机上应用的三维空间程序,目前,它可以在微机上计算300层的复杂平面、体型的高层建筑结构(每层可以达1000根墙、柱,2000根梁),从而实现了高层建筑计算方法的普及问题。

这类程序目前已经商品化,有代表性的微机程序如建研院结构所的TB-SA,至1995年底,用户已达3000家,遍及全国各省市和港澳地区。TB-SA面向工程设计人员,全部采用汉字显示,菜单操作;几何数据全部图形化输入,自

动导荷载,从而不必再填数据表,结束了填表上机的手工操作时代。该程序有严密的数据检查功能和防止误操作功能;并且有各种图形显示、输出功能,符合设计习惯。因而得到广泛应用,被评为 1991 年全国首届微机软件优秀产品。

#### 第四节 三维杆件空间分析方法

##### 一、概 述

如上节所述,协同工作分析方法只适用于结构布置较为规则的情况,而且由于分片计算,使柱的内力出现一些矛盾。近年来,由于筒体结构和复杂平面、体型高层建筑的广泛应用,新结构体系的出现,都使得高层建筑结构无法再划分为若干平面抗侧力单元进行计算了,因而有必要采用整体的空间分析方法。

三维杆件空间分析方法就是将高层建筑结构作为空间杆件系统,直接采用位移法进行分析,概念清楚,方法简捷,适应性广。

高层建筑建筑可以由两类杆件组成:

一般空间杆件——梁、柱;

薄壁空间杆件——剪力墙。

梁、柱为线形杆件,在空间受力情况下,每端有 6 个自由度:三个方向的平移  $u, v, w$  和三个转角  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ;相应也有 6 个杆端力:  $N_x, V_y, V_z, M_x, M_y, M_z$  (图 1—8)。

剪力墙的厚度小,截面尺寸较大,作为薄壁杆件处理,除上述 6 个自由度外,还要考虑截面的翘曲角  $\theta_w$ ,对应着第 7 个杆端力——双力矩  $B_w$ 。(图 1—9)。

双力矩是薄壁杆件特有的内力,由图 1—9 可以说明:象剪力墙这样大截面尺寸而壁厚很小的构件,当它受到扭转时,即使截面总弯矩为零、总轴力为零,但其截面仍有正应力出现,必须加以考虑。因为扭转时截面不再能保持平面,发生了翘曲。由于截面翘曲,产生了翘曲正应力,这些正应力在截面分布与其扇性坐标有关,有正有负,总合力为零、总合力矩为零,但在截面各部分的应力不为零,在各墙段上产生较大的轴力和弯矩,设计中必须考虑(图 1—10)。

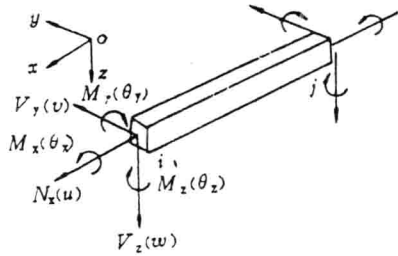


图 1—8 空间杆件

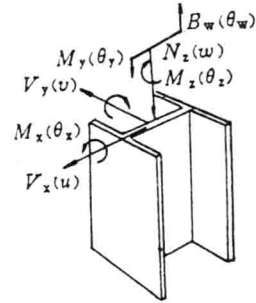


图 1—9 薄壁杆件

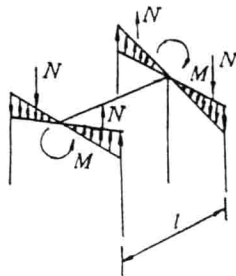


图 1—10 双力矩

为表示翘曲正应力的分布大小,以各墙段的力矩  $M_i$  乘以它们的内力臂  $l_i$  为标志,称为双力矩  $B_w = \sum M_i l_i (\text{kN} \cdot \text{m}^2)$  来表达。

与平面框架位移法分析类似,空间杆件也可以得到杆端位移和杆端力的关系:

$$K_s U_s = P_s$$

式中  $U_s$ 、 $P_s$  分别为杆端位移或杆端力向量,对于梁、柱均为  $1 \times 12$  的列阵;

对于剪力墙为  $1 \times 14$  的列阵;  $K_s$  为杆件刚度矩阵, 对梁、柱为  $12 \times 12$ 、对剪力墙为  $14 \times 14$  的方阵。

将单元刚度矩阵  $K_s$  组集, 即可得到空间分析的位移法方程:

$$K \Delta = P$$

式中  $\Delta$  为各节点未知位移组成的向量。求解这一方程, 即可得到  $\Delta$ , 从而计算构件的内力。由于是空间分析, 所以未知量很多, 第  $i$  层如有  $N_{ci}$  根柱、 $N_{wi}$  个墙肢时, 总未知量  $N_f$  为:

$$N_f = \sum_1^{N_s} (6N_{ci} + 7N_{wi})$$

式中  $N_s$  为层数。

为了减少一部分未知数, 考虑高层建筑结构的特点, 采用了楼板在自身平面内刚度为无限大的假定, 则楼面上的平移  $u, v$  和绕  $z$  轴的转角  $\theta$  成为公共自由度, 这样柱端独立自由度降为 3, 剪力墙肢的独立自由度降为 4, 总未知量  $N_f$  变为:

$$N_f = \sum_1^{N_s} (3N_{ci} + 4N_{wi} + 3)$$

为样, 总未知数可减少 40% 左右。

当然, 在实际工程中应用空间分析时, 由于层数、柱数(墙肢数)都很多, 未知量还是十分庞大的。为进一步减少自由度, 也可以将翘曲作为公共自由度, 此时总未知数减少至:

$$N_f = \sum_1^{N_s} (3N_{ci} + 3N_{wi} + 4)$$

## 二、复杂体型结构的处理

### (一) 楼板面内刚度无限大的假定

目前高层建筑结构分析设计程序的基本假定之一是楼板在自由平面内的刚度无限大, 即楼板在外力作用下只有平移和转动而不产生变形。这样, 楼面的平移自由度  $u, v$  和转动自由度  $\theta_z$  是公共的, 从而大大减少总自由度数量, 并且可以不考虑楼板刚度的处理, 使程序大为简化。在一般情况下, 高层建筑结构的实际受力情况符合上述假定, 由这一前提出发的通用计算程序(例如 TBSA 早期版本), 在工程设计中已得到了广泛的应用(图 1—11)。



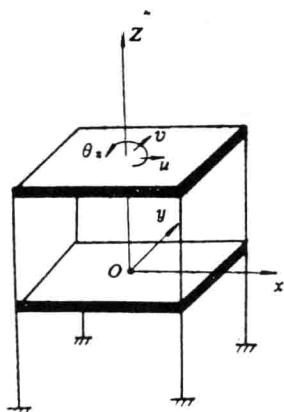
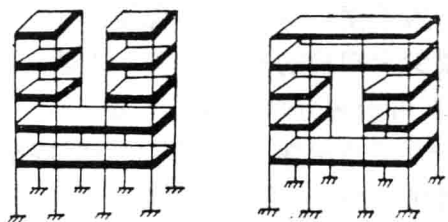
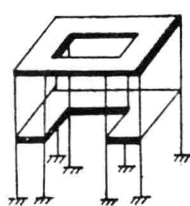


图 1—11 楼面刚性假定

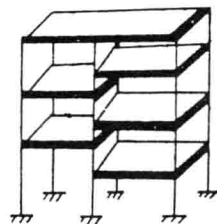


(a) 多塔楼

(b) 连体结构



(c) 楼板大开洞



(d) 错层结构

图 1—12 复杂的高层结构

近年来,由于建筑艺术和建筑功能的要求,使建筑物的平面形状和立面体型日益复杂多变,对于一些工程,不再适用楼板在平面内刚度无限大的假定,例如:

1. 多塔楼大底盘建筑(图 1—12a),塔楼各层楼面往往不在同一标高;即使是同一标高,各塔楼中楼面位移也是独立的,不能按一个整体楼面处理。

2. 连体建筑或立面上开有大洞口的建筑(图 1—12b),洞口两侧的楼面位移也相互独立,不能按一个整体楼面考虑。

3. 楼面开大洞口的建筑(图 1—12c),建筑物内部设置内庭以后,连续多层楼面被削弱,面内变形应予考虑。

4. 错层建筑(图 1—12d),错层两侧楼面相互独立,不能按同一标高作为一个楼层来计算。

因此,上述情况下的复杂建筑结构,不宜直接采用通常的高层建筑结构分析程序来计算。因为在通常计算程序中,同一标高均作为同一楼层,具有相同