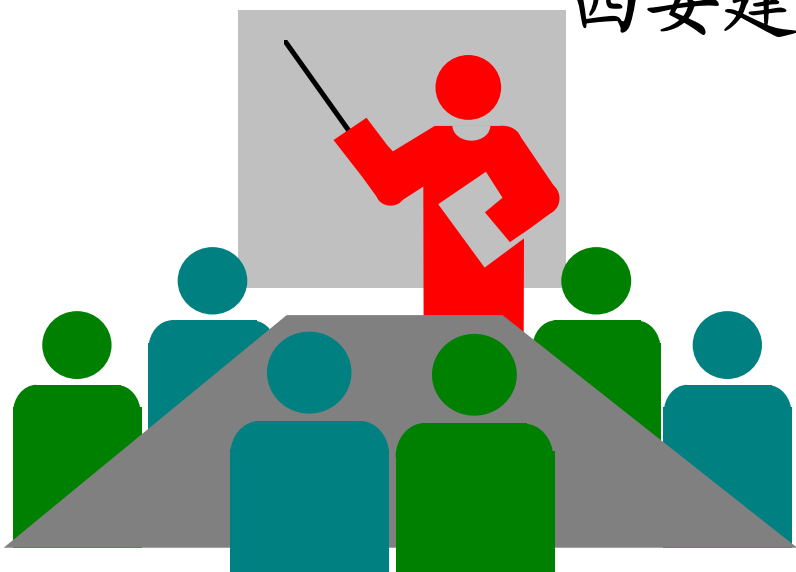




高层建筑设计

第9章 复杂高层建筑设计

西安建筑科技大学：史庆轩





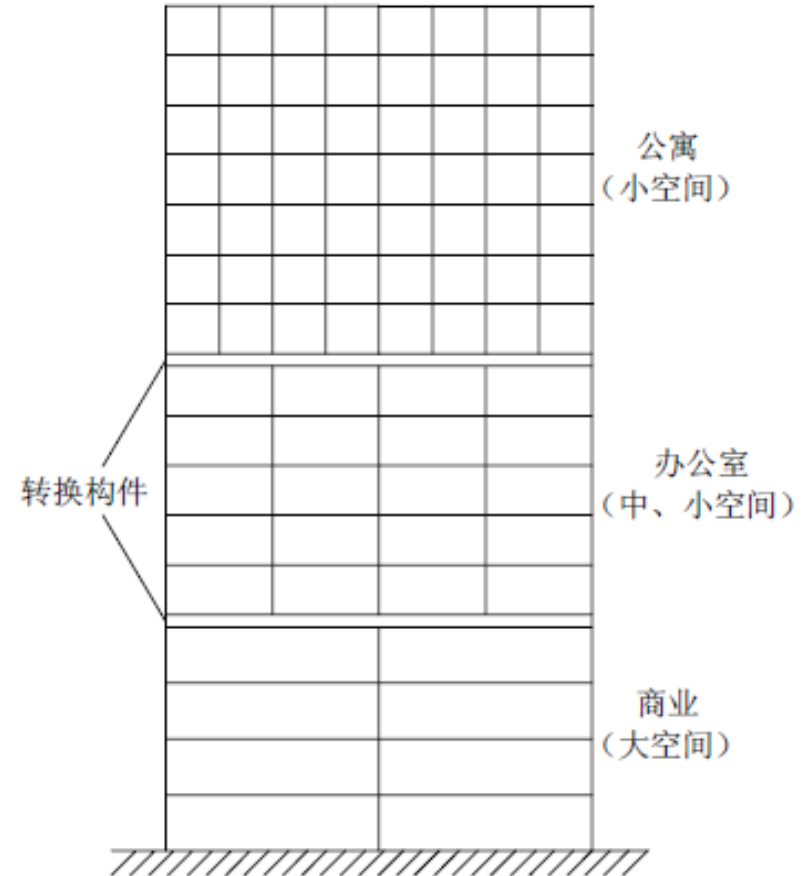
主要内容:

- 9.1 带转换层高层建筑结构
- 9.2 带加强层高层建筑结构
- 9.3 错层结构
- 9.4 连体结构
- 9.5 多塔楼结构



9.1 带转换层高层建筑结构

同一幢高层建筑中，沿房屋高度建筑功能常会发生变化。如图示。为满足不同的使用功能，结构设计时，各部分要采用不同结构。为实现这种结构布置，须在两种结构体系转换的楼层设置水平转换构件，即形成带转层的结构。





9.1.1 转换层的分类及主要结构形式

1. 转换层的分类

(1) 上、下部结构类型的转换。如剪力墙结构中，当底部设置商用房或需要较大空间的公用房间时，可将全部剪力墙或部分剪力墙通过转换层变为框架结构，形成底部大空间剪力墙结构。

(2) 上、下部柱网和轴线的改变。如筒中筒结构中，外框筒为密柱深梁，无法满足较大出入口要求，可沿外框筒周边柱列设置转换层使下部柱的柱距扩大，形成大柱网。

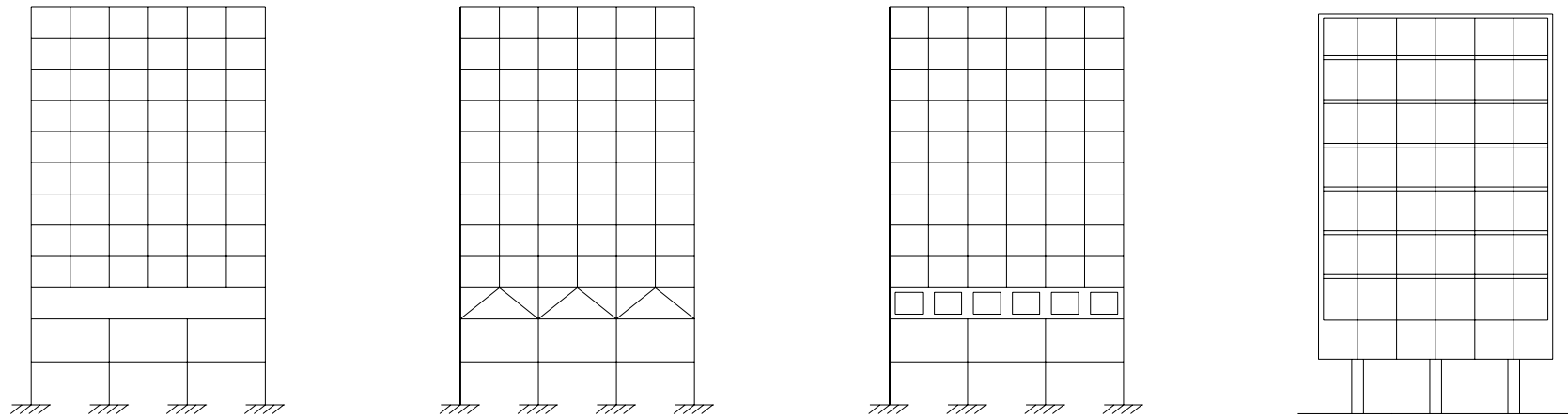
(3) 上、下部结构类型和柱网均改变。如框支剪力墙结构中，上部楼层为住宅，采用剪力墙结构，下部楼层为商用房，采用大空间轴线布置的框架结构。这种结构体系不仅上、下部结构类型不同，且上、下部的轴线也不一定对齐，需要设置转换层来实现力的传递。实际中的带转换层高层建筑结构多为这种情况。



2. 转换层的主要结构形式

从转换层结构的观念来，上部结构与地基之间的基础也是一种转换结构。因此，钢筋混凝土梁式、板式基础结构形式也可作为上部结构之间的转换层结构形式。

转换层结构形式主要有：梁式、斜杆桁架式、空腹桁架式、箱形和板式等。





9.1.2 结构布置

带转换层高层结构，由于转换层刚度较其他楼层刚度大很多，质量也相对较大，造成结构沿高度方向刚度和质量不均匀；另外，转换层上、下部的竖向承重构件不连续，墙、柱截面突变，导致传力路线曲折、变形和应力集中。因此，带转换层高层结构的抗震性能较差，设计时应通过合理的结构布置改善其受力和抗震性能。



1. 底部转换层的设置高度

带转换层高层结构在地面以上的大空间层数一般为2~6层，有些工程已做到7~10层。

研究表明，转换层位置越高，转换层上、下刚度和内力突变越大；此外，转换层位置越高，转换层上部的墙体容易破坏，落地剪力墙易出现受弯裂缝，使框支柱的内力增大，对结构抗震不利。因此，底部大空间框支剪力墙高层结构在地面以上的大空间层数，设防烈度为7度和8度时分别不宜超过5层和3层，6度时其层数可适当增加。对底部带转换层的框架-核心筒结构和筒中筒结构，由于转换层上、下刚度突变不明显，转换层设置高度可适当提高。



2. 转换层上部结构与下部结构的侧向刚度控制

转换层下部的侧向刚度一般小于其上部的侧向刚度，如果二者相差悬殊，会使转换层下部形成柔软层，对结构抗震不利。设计时应控制转换层上、下部结构的侧向刚度比，使其位于合理的范围内。

(1) 底部大空间为 1 层时，转换层上、下部结构等效剪切刚度比可按下式计算

$$\gamma = \frac{G_2 A_2 / h_2}{G_1 A_1 / h_1} = \frac{G_2 A_2}{G_1 A_1} \frac{h_1}{h_2}$$

$$A_i = A_{wi} + C_i A_{ci} \quad (i = 1, 2)$$

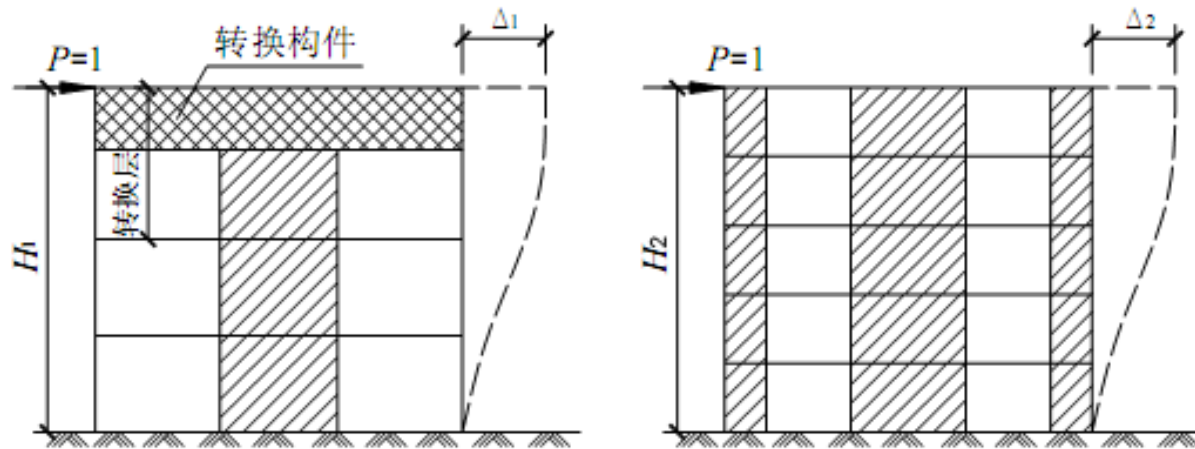
$$C_i = 2.5 \left(\frac{h_{ci}}{h_i} \right)^2 \quad (i = 1, 2)$$

为防止底层刚度突变，刚度比宜接近于 1(较难)，非抗震设计时不应大于 3，抗震设计时不应大于 2。



(2) 当底部大空间层数大于1层时，其转换层上部与下部结构的等效侧向刚度比可按下式计算：

$$\gamma_e = \frac{\Delta_1 / H_1}{\Delta_2 / H_2} = \frac{\Delta_1 H_2}{\Delta_2 H_1}$$



等效侧向刚度比宜接近于**1**；非抗震设计时不应大于**2**；抗震设计时不应大于**1.3**。



3. 转换构件的布置

转换结构构件可采用梁、厚板、桁架、空腹桁架、箱形结构、斜撑等。由于厚板转换层引起竖向质量和刚度严重不均匀，对抗震不利。仅适用于非抗震设计和6度抗震设计；

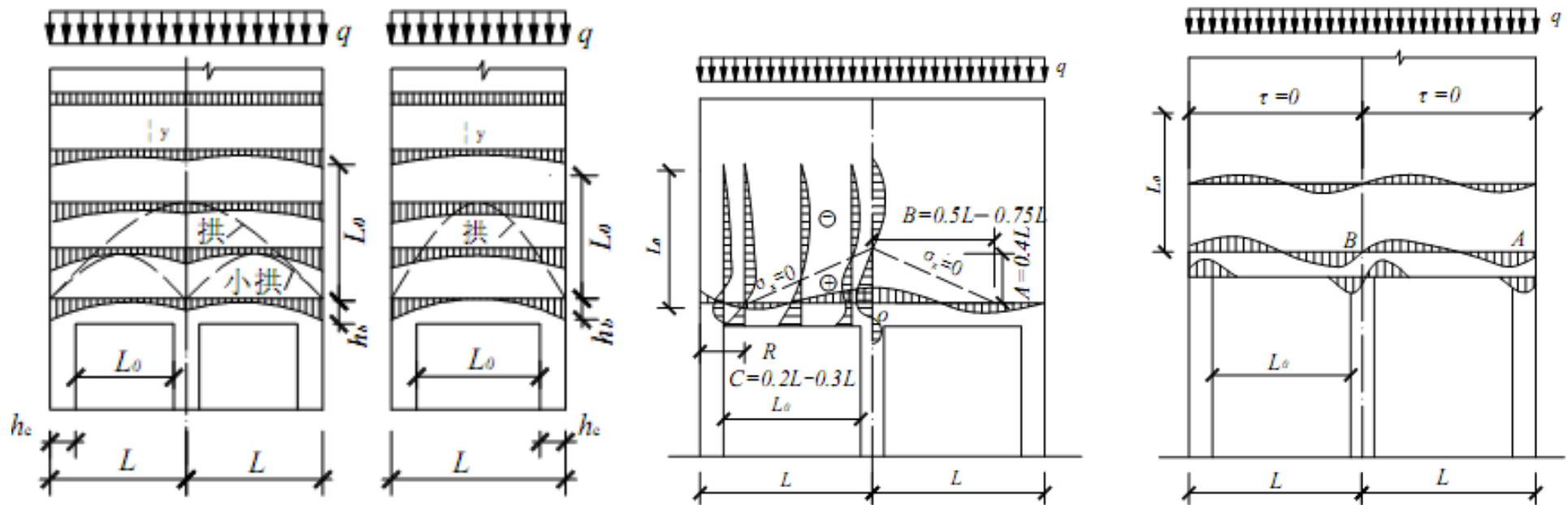
转换层上部的竖向抗侧力构件(剪力墙、柱)宜直接落在转换层的主构件上。但由于上部剪力墙布置复杂，框支主梁承托剪力墙并承托转换次梁及次梁上的剪力墙，其传力途径多次转换，受力复杂。B级高度框支剪力墙结构转换层，不宜采用框支主、次梁方案；A级高度框支剪力墙结构可以采用框支主、次梁方案，但设计中应对框支梁进行应力分析，按应力校核配筋，并加强构造措施。



9.1.3 梁式转换层结构设计

1. 转换梁的受力机理

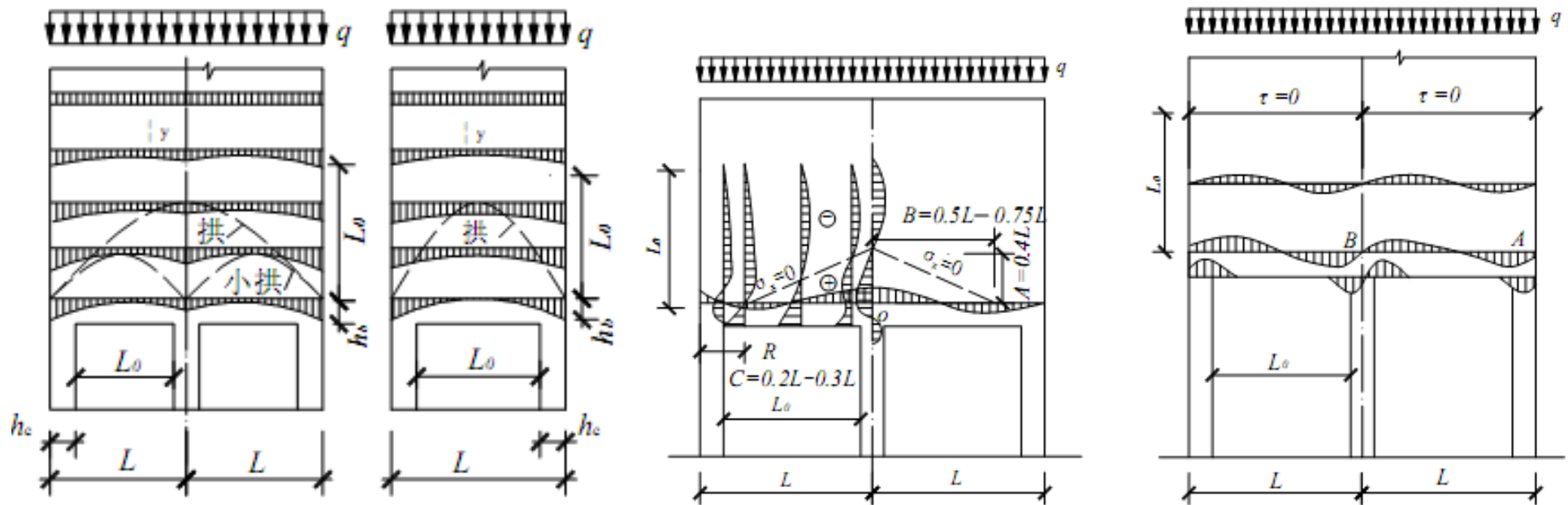
梁式转换层结构是通过转换梁将上部墙(柱)承受的力传至下部框支柱。竖向荷载下,转换梁与上部墙体的界面上,竖向压应力在支座处最大,在跨中截面处最小;转换梁中的水平应力为拉应力。





原因分析：(1) 拱的传力作用，即上部墙体上的大部分竖向荷载沿拱轴线直接传至支座，转换梁为拱的拉杆；

(2) 上部墙体与转换梁作为一个整体共同受力，转换梁处于整体弯曲的受拉区，由于上部剪力墙参与受力而使转换梁承受的弯矩大大减小。因此，转换梁一般为偏心受力构件。



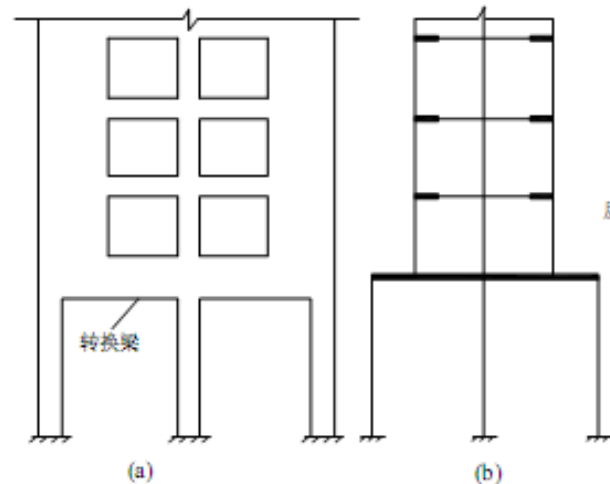


2. 结构分析

梁式转换层结构有两种形式，即托墙和托柱。本节仅简要介绍托墙梁式转换层结构的内力计算方法。

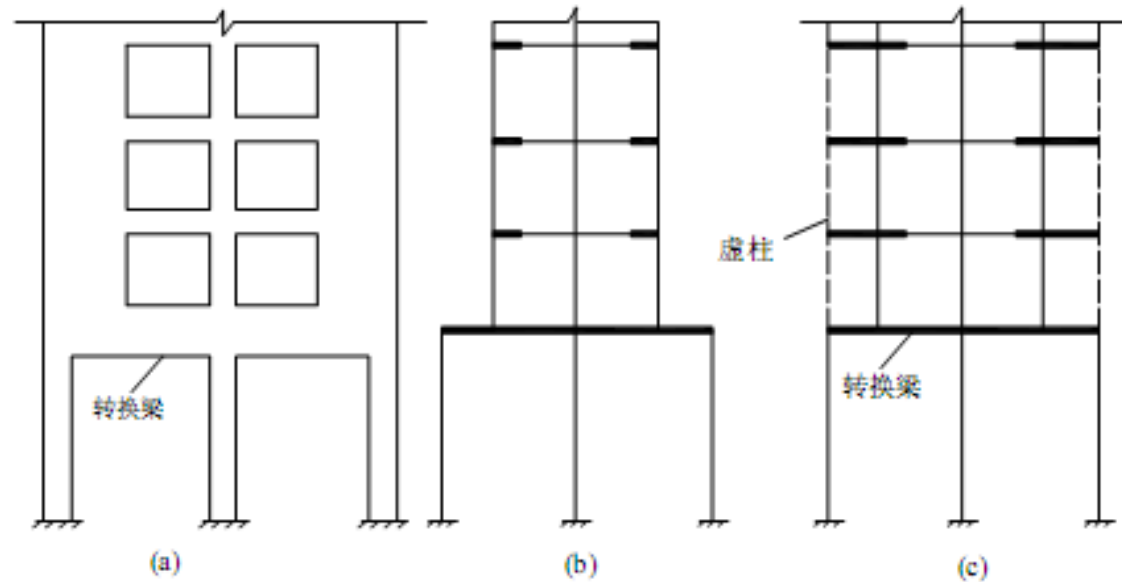
(1) 整体结构分析方法

可直接用三维空间结构分析程序（如TBSA, TAT等）进行整体结构内力分析。采用杆系模型时，墙肢作为柱单元考虑，转换梁按梁模型处理，在上部剪力墙和下部柱之间设置转换梁，墙肢与转换梁连接，如图所示。





但该模型没考虑转换梁与上部墙体的共同工作，所得内力与按有限元计算结果相差较大。为反映转换梁上部墙肢的传力途径，可即增加“虚柱”单元，虚柱的截面宽度取上部墙体厚度，虚柱的截面高度取下部支承柱的截面高度，与虚柱相连接的梁为“刚性梁”。这样，转换梁上部结构竖向荷载通过“刚性梁”按刚度分配给各墙肢及虚柱，再向下部框支柱上传递。





(2) 转换层结构局部应力分析

在整体空间分析基础上，考虑转换梁与上部墙体的共同工作，将转换梁以及上部3~4层墙体和下部1~2层框支柱取出，合理确定其荷载和边界条件，进行有限元分析。

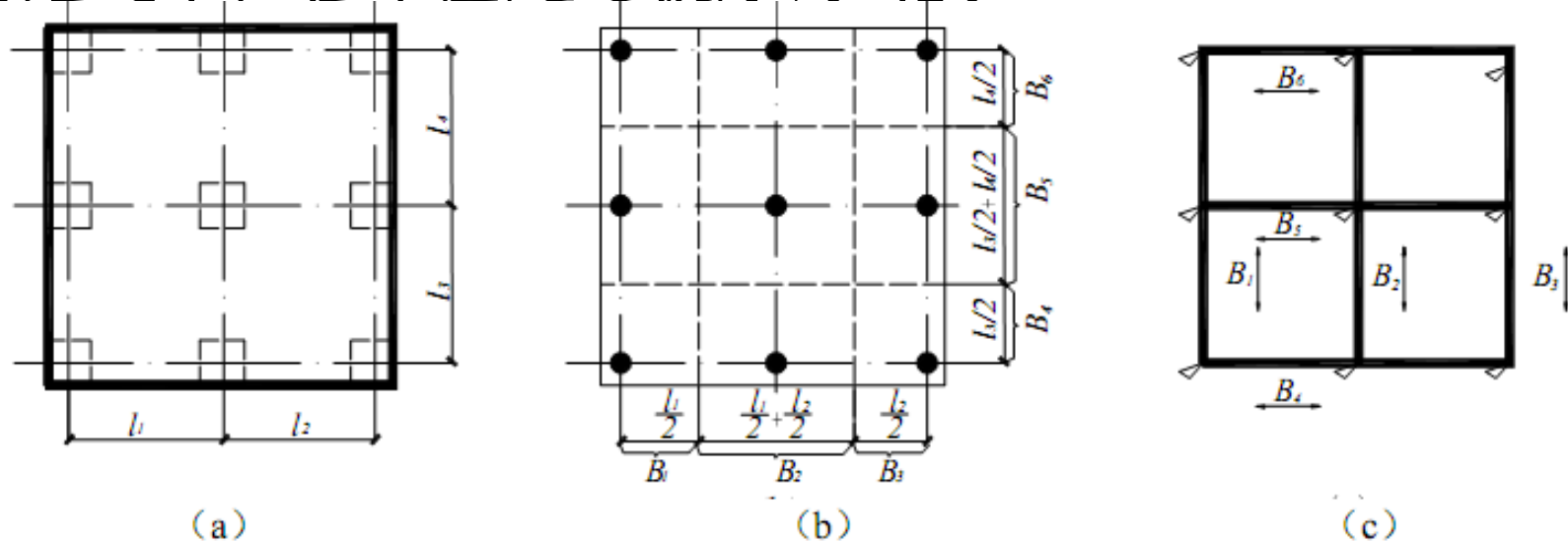


9.1.4 厚板转换层结构设计

1. 结构内力分析

(1) 结构整体计算方法

可采用三维空间结构分析程序(如TBSA、TAT等)进行整体内力分析。由于杆系分析模型不能直接考虑板厚的作用,可将实体厚板转化为等效交叉梁系。梁截面高度可取转换板厚度,梁截面宽度可取为支承柱的柱网间距,即每一侧的宽度取其间距之半,但不应超过板厚的6倍。





(2) 厚板局部应力计算方法

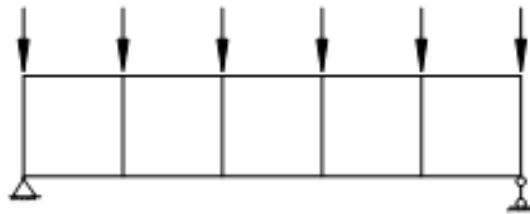
由三维空间结构整体分析，将实体厚板被转化为等效交叉梁系，可得到交叉梁系的弯矩和剪力。此时尚应采用实体三维单元对厚板进行局部应力的补充计算。对厚板来讲，剪切变形不宜忽略，故应采用厚板理论进行分析，一般采用八节点等参单元。



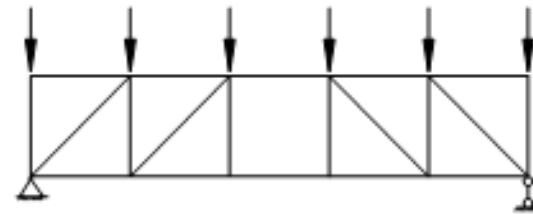
9.1.5 桁架转换层结构设计

1. 桁架转换层的主要结构形式

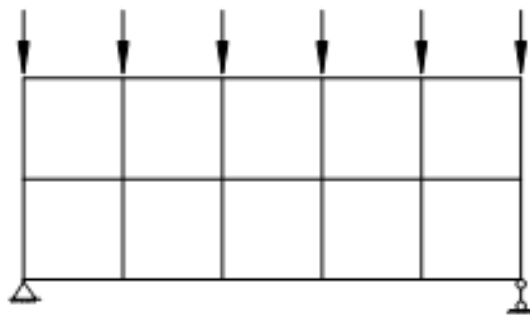
可采用单层或叠层空腹桁架和混合空腹桁架。空腹桁架设置一定数量斜杆后，相当一部分竖向荷载改变传力路径，起到类似拱的传力机构。因此，采用单层或叠层混合空腹桁架作为转换层结构，是一种较为合理的结构方案。



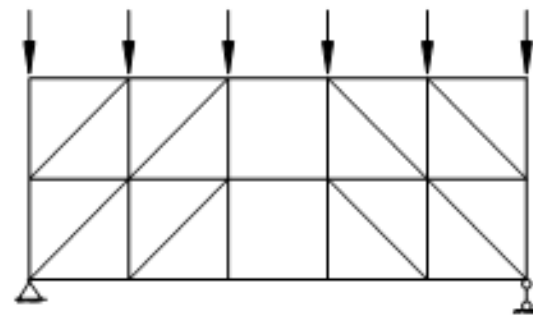
(a)



(b)



(c)



(d)



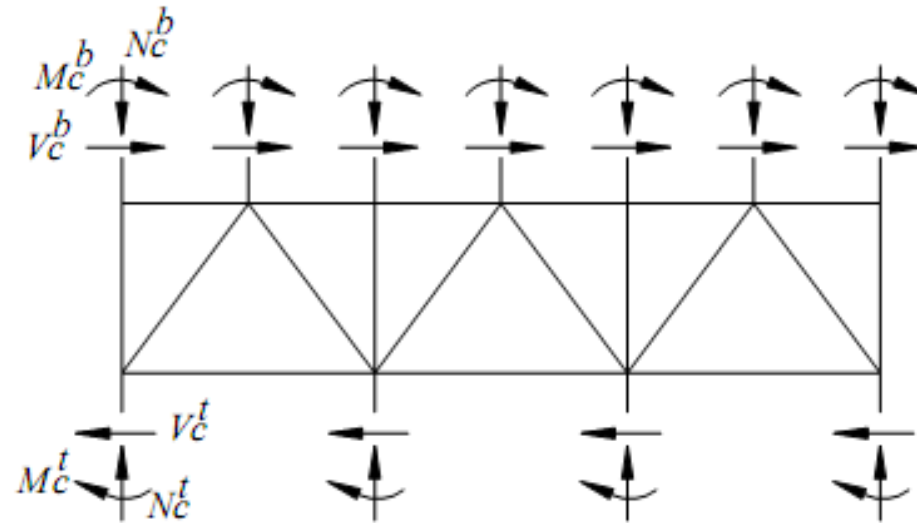
2. 结构内力分析

目前，高层结构分析程序多采用楼盖平面内刚度无穷大的假定，而这种程序无法直接计算楼盖杆件的轴力和轴向变形。桁架转换结构斜腹杆、上、下弦杆存在较大的轴力和轴向变形。上、下弦杆截面配筋，不仅应考虑弯矩、剪力和扭矩的作用，应计及轴力的影响。实际设计中，可采用下述简化方法计算。

(1) 将转换桁架置于整体空间结构中进行整体分析。此时，腹杆作为柱单元，上、下弦杆作为梁单元，按空间协同工作或三维空间结构分析程序计算其内力和位移。由此可得上、下弦杆的弯矩、剪力和扭矩以及腹杆内力。



(2) 将整体分析得到的转换桁架上部柱下端截面内力和下部柱上端截面内力作为转换桁架的外荷载（图），采用考虑杆件轴向变形的杆系有限元程序计算各种工况下转换桁架上、下弦杆的轴力。对各种工况进行组合，得上、下弦杆的轴向力设计值。





9.2 带加强层高层建筑结构

9.2.1 加强层的主要结构形式

当高层结构高度较大、高宽比较大或侧向刚度不足时，可采用加强层予以加强。加强层构件有三种：伸臂、腰桁架和帽桁架、环向构件。

1. 伸臂

当框架-核心筒结构的侧向刚度不满足设计要求时，可沿竖向利用建筑避难层、设备层空间，设置适当刚度的水平伸臂构件，构成带加强层的高层建筑结构。



2. 腰桁架和帽桁架

筒中筒结构或框架-筒体结构，由于内筒与周边柱的竖向变形不同，内、外构件的竖向变形差会使楼盖构件产生变形和相应的应力。为减少内、外构件竖向变形差带来的不利影响，可在内筒与外柱间设置刚度很大的桁架或大梁，以调整内、外构件的竖向变形。

若为减小重力荷载、徐变和温度变形产生的竖向变形差，当30~40层时，一般在顶层设置一道桁架即可显著减少竖向变形差，称其为帽桁架。当高度很大时，除设置帽桁架外，同时在中间某层设置一道或几道桁架，称其为腰桁架。

伸臂与腰桁架、帽桁架可采用相同的结构形式，但二者的作用不同。若将两种作用结合使用，可在顶部及 $(0.5 \sim 0.6)H$ 处设置两道伸臂，综合效果较好。



3. 环向构件

环向构件指沿结构周边布置一层楼或两层楼高的桁架，其作用：(1) 加强周边竖向构件的联系，提高整体性；(2) 协同周边竖向构件的变形，减小竖向变形差。

框筒结构中，刚度很大的环向构件加强了深梁作用，可减小剪力滞后；框架-筒体结构中，环向构件加强了周边框架柱的协同工作，使相邻柱受力均匀。

环向构件可采用实腹环梁、斜杆桁架或空腹桁架。实际中很少采用实腹环梁，多采用斜杆桁架或空腹桁架。

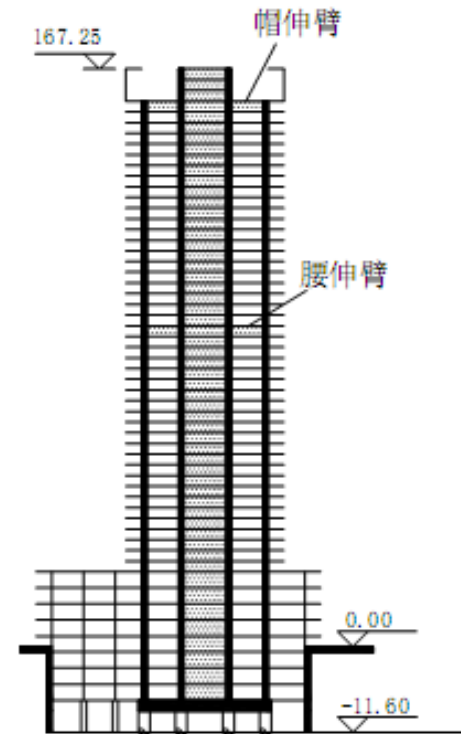
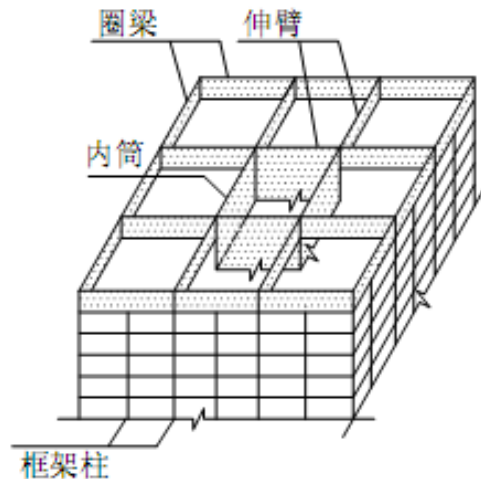
伸臂、腰桁架和帽桁架、环向构件三者如同时设置，宜设置在同一层。



9.2.2 伸臂加强层的作用及布置

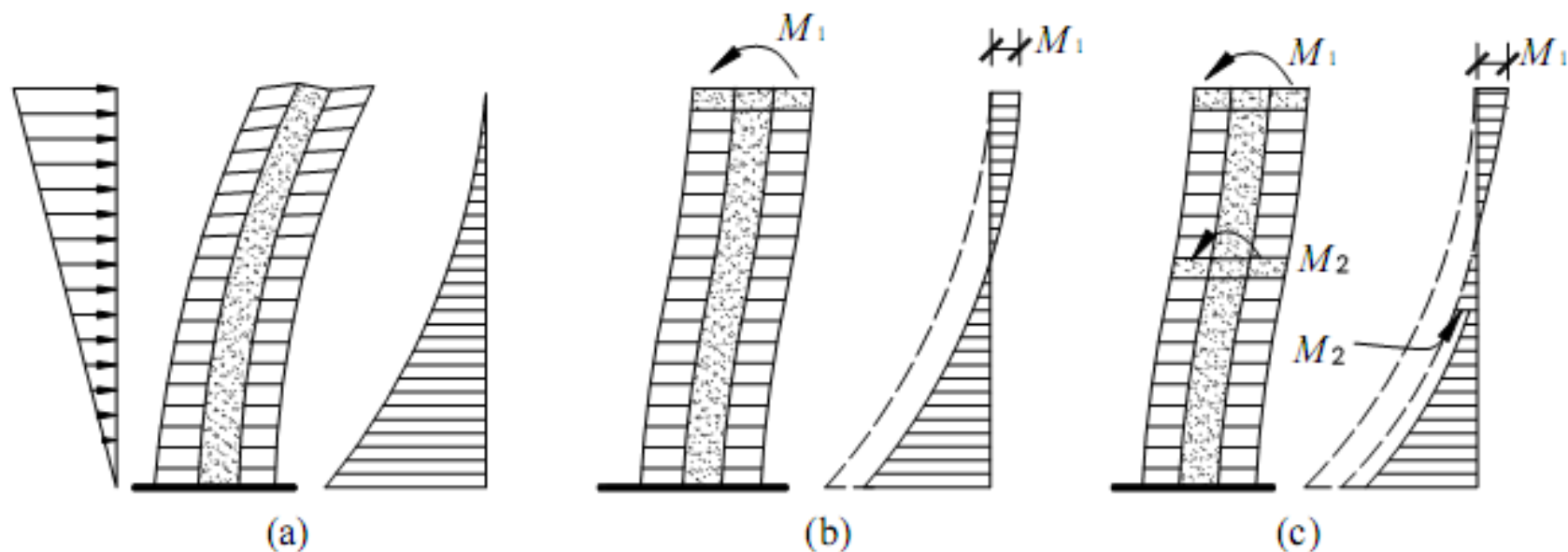
1. 伸臂加强层的作用及对整体结构受力性能的影响

框架-核心筒结构中，采用刚度很大的斜腹杆桁架、或箱形梁、空腹桁架等水平伸臂构件，将内筒和外柱连接，根据控制侧移的需要设置一道、二道或几道水平伸臂构件(或称水平加强层)。





由于水平伸臂构件的刚度很大，结构产生侧移时，它将使外柱拉伸或压缩，从而承受较大的轴力，增大了外柱抵抗的倾覆力矩，同时使内筒反弯，减小侧移。沿结构高度设置一个加强层，相当于在内筒结构上施加了一个反向力矩，可以减小内筒的弯矩。





由于伸臂加强层的刚度比其他楼层的刚度大很多，带加强层高层结构属竖向不规则结构。

在水平地震下，其变形和破坏容易集中在加强层附近，即形成薄弱层；伸臂加强层的上、下相邻层的柱弯矩和剪力均发生突变，柱容易出现塑性铰或产生脆性剪切破坏。加强层的上、下相邻层柱子内力突变的大小与伸臂刚度有关，伸臂刚度越大，内力突变越大；加强层与其相邻上、下层的侧向刚度相差越大，则柱子越容易出现塑性铰或剪切破坏，形成薄弱层。因此，设计时应尽可能采用桁架、空腹桁架等整体刚度大而杆件刚度不大的伸臂构件，桁架上、下弦杆与柱相连，可以减小不利影响。另外，加强层的整体刚度应适当，以减小对结构抗震的不利影响。



2. 伸臂加强层的布置

(1) 沿平面上的布置

水平伸臂构件应尽量使其贯通核心筒，以保证与核心筒的可靠连接。伸臂构件在平面上宜置于核心筒的转角或 T 字节点处，避免平面外弯矩和局部应力集中而破坏。

水平伸臂构件与周边框架的连接宜采用铰接或半刚接。



(2) 沿竖向的布置

加强层合理位置和数量的研究，一般都是以减小侧移为目标函数进行分析和优化。主要结论：①当设置一个加强层时，最佳位置在底部固定端以上 $(0.60 \sim 0.67)H$ 之间，即约结构的 $2/3$ 高度处；②当设置两个加强层时，如果其中一个设在 $0.7H$ 以上，另一个设置在 $0.5H$ 处，效果较好；③设置多个加强层时，侧移减小不与加强层数量成正比；当多于 4 个时，减小侧移的效果不明显。因此，加强层不宜多于 4 个。设置多个加强层时，一般可沿高度均匀布置。

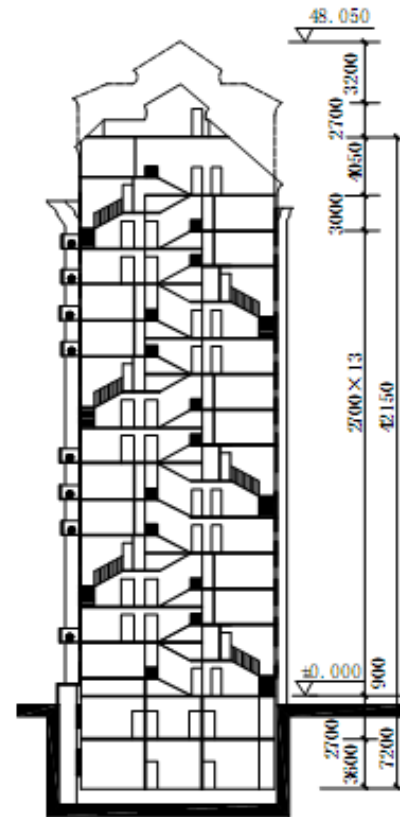
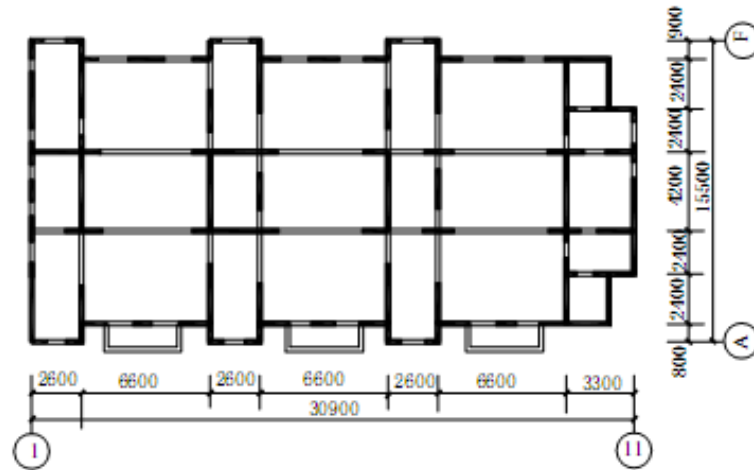
《高规》规定，加强层位置和数量要合理有效，当布置 1 个时，位置可在 $0.6H$ 附近；当布置 2 个时，位置可在顶层和 $0.5H$ 附近；当布置多个时，宜沿竖向从顶层向下均匀布置。



9.3 错层结构

9.3.1 错层结构的应用及适用范围

为了获得多样变化的住宅室内空间，常将同一套单元内的几个房间设在不同高度的几个层面上，形成错层结构。





从受力和抗震性能看，错层结构属竖向不规则结构，对结构抗震不利。(1) 由于楼板分成数块，相互错置，削弱了楼板协同整体受力能力；(2) 由于错层，在一些部位形成短柱，使部分剪力墙的洞口布置不规则，形成错洞剪力墙或叠合错洞剪力墙，对结构抗震不利。

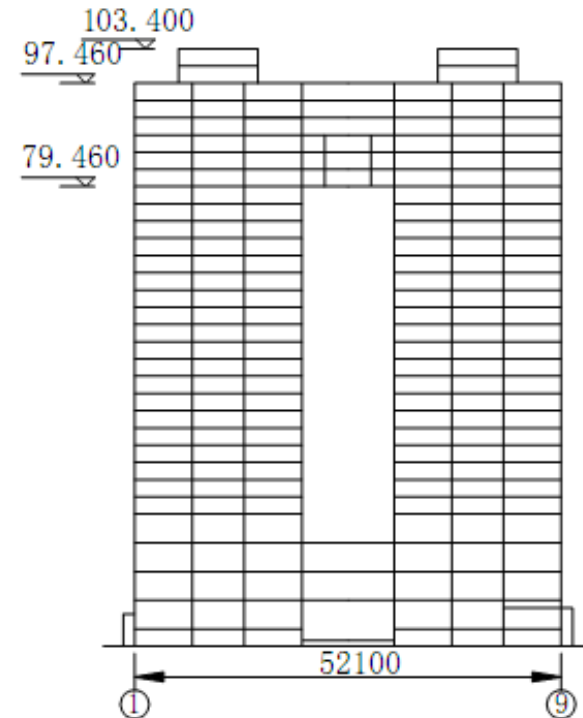
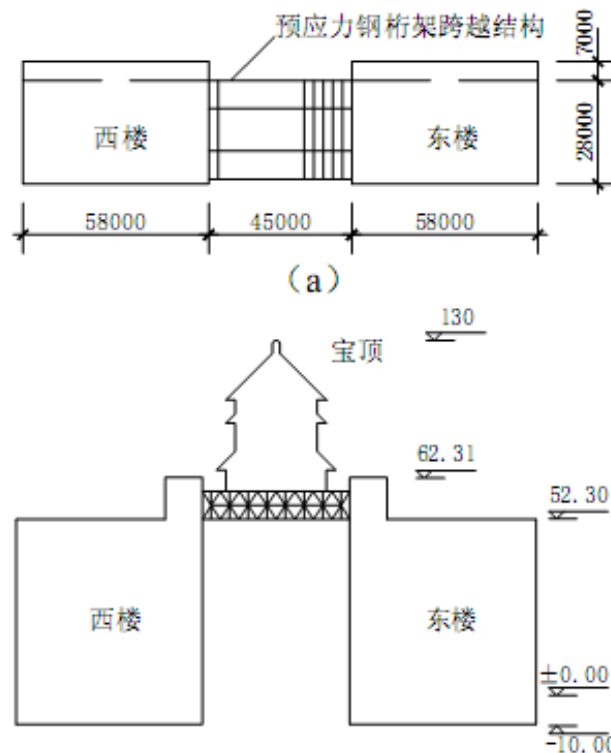
应尽量不采用错层结构，特别是地震区避免采用错层结构。对错层结构，除采取必要的计算和构造措施外，其最大适用高度：7度和8度抗震设计时，错层剪力墙结构的房屋高度分别不宜大于80m和60m；错层框架-剪力墙结构的房屋高度分别不应大于80m和60m。



9.4 连体结构

9.4.1 连体结构的形式及适用范围

连体高层建筑结构主要有两种形式：第一种形式称为凯旋门式，即在两个主体结构的顶部若干层连成整体楼层，连接体的宽度与主体结构的宽度相等或接近，两个主体结构一般采用对称的平面形式。





第二种形式为连廊式，即在两个主体结构之间的某些部位设一个或多个连廊，连廊跨度可达几米到几十米，宽度一般在10m以内。

震害表明，地震区的连体高层建筑破坏严重，主要表现为连廊塌落，或连接部位破坏严重。两个主体结构高度不相等或体型、面积和刚度不同时，连体破坏尤为严重。

连体高层建筑的抗震性能较差。抗震设计时，B级高度不宜采用连体结构，7度、8度抗震设计时，层数和刚度相差悬殊的建筑不宜采用连体结构。为提高整体抗震性能，连体结构各独立部分宜有相同或相近的体型、平面布置和刚度分布，特别是对第一种形式的连体结构，其两个主体结构宜采用双轴对称的平面形式。



9.4.2 结构分析

连体高层建筑的自振振型较为复杂，其前几个振型与单体建筑明显不同，除顺向振型外，还出现反向振型。

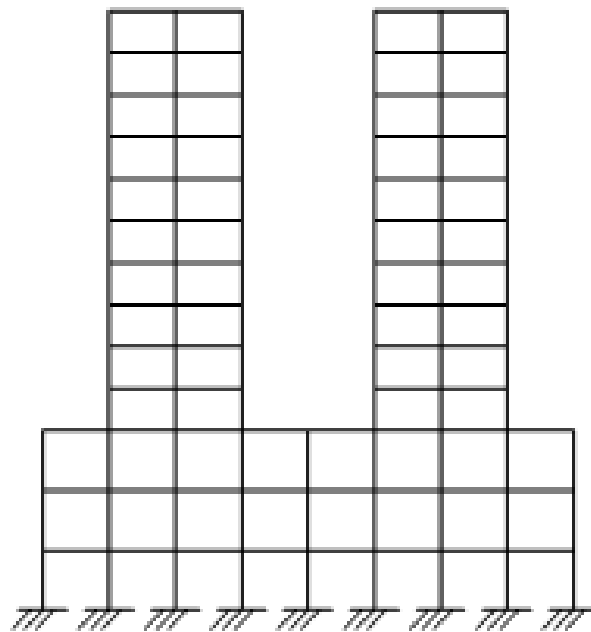
应采用三维空间分析方法进行整体计算，主体结构与连接体均应参与整体分析。架空的连接体对竖向地震的反应比较敏感，尤其是跨度、自重较大时。8度抗震设计时，连接体应考虑竖向地震作用的影响。连接体的竖向地震作用可按振型分解法或时程分析法计算。近似考虑时，连接体的竖向地震作用标准值可取连接体重力荷载代表值的10%，并按各构件所分担的重力荷载值的比例进行分配。



9.5 多塔楼结构

底部几层布置为大底盘，上部采用两个或两个以上的塔楼作为主体结构。

主要特点是在多个塔楼的底部有一个连成整体的大裙房，形成大底盘。对多个塔楼仅通过地下室连为一体，地上无裙房或有局部小裙房且不连为一体的情况，一般不属于大底盘多塔楼结构。





9.5.1 结构布置

大底盘多塔楼结构在大底盘上一层突然收进，属竖向不规则结构。由于大底盘上有两个或多个塔楼，结构振型复杂，会产生复杂的扭转振动，引起局部应力集中，对抗震不利。其结构布置应满足下列要求：

- (1) 为减轻扭转和高振型反应的不利影响，多塔楼建筑结构各塔楼的层数、平面和刚度宜接近。
- (2) 塔楼对底盘宜对称布置，结构质心与底盘质心距离不宜大于底盘相应边长的20%。结构布置时应尽量减小塔楼与底盘的偏心。



(3) 抗震设计时，转换层不宜设置在底盘屋面的上层塔楼内；多塔楼结构中采用带转换层结构，结构侧向刚度突变与内力传递途径改变同时出现，使结构受力更加复杂，不利于结构抗震。转换层宜设置在底盘楼层范围内，不宜设置在底盘以上的塔楼内。





谢谢大家！

