



# 高层建筑结构设计

## 第3章 荷载和地震作用

西安建筑科技大学土木工程学院

史庆轩





## 本章主要内容:

- 3.1 竖向荷载（简要介绍）
- 3.2 风荷载（重点）
- 3.3 地震作用（简要介绍，抗震课讲授）



## 第3章 高层建筑结构的荷载和地震作用

高层建筑结构主要承受**竖向荷载**和**水平荷载**。



与多层建筑结构有所不同，高层建筑结构——

- 1) 竖向荷载效应远大于多层建筑结构;
- 2) 水平荷载的影响显著增加，成为其设计的主要因素;
- 3) 对高层建筑结构尚应考虑竖向地震的作用。



## 3.1 竖向荷载

### 1、恒荷载

恒荷载是指各种结构构件自重和找平层、保温层、防水层、装修材料层、隔墙、幕墙及其附件、固定设备及其管道等重量，其标准值可按构件及其装修的设计尺寸和材料单位体积或面积的自重计算确定。

材料容重可从《荷载规范》查取；固定设备由相关专业提供。



## 2、活荷载

### (1) 楼面活载

1) 楼面均布活荷载的标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数，可按《荷载规范》的规定取用。

2) 在荷载汇集及内力计算中，应按未经折减的活荷载标准值进行计算，楼面活荷载的折减可在构件内力组合时取用。

3) 计算活荷载产生内力时，可不考虑活荷载的不利布置，按活荷载满布进行计算，然后将所得梁跨中截面和支座截面弯矩乘以1.1~1.3的放大系数。

### (2) 屋面活载

1) 屋面均布活荷载的标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数，可按《荷载规范》的规定取用。

2) 有些情况下，应考虑屋面直升机平台的活荷载。



## (3) 屋面雪荷载

1) 屋面水平投影面上的雪荷载标准值:

$$S_k = \mu_r S_0$$

$S_0$ 为基本雪压, 系以当地一般空旷平坦地面上统计所得50年一遇最大积雪的自重确定, 按《荷载规范》取用;  $\mu_r$ 为屋面积雪分布系数, 可按《荷载规范》取用。

2) 雪荷载的组合值系数、频遇值系数、准永久值系数按雪荷载分区 I、II 和 III 的不同由《荷载规范》查取。

3) 雪荷载不应与屋面均布活荷载同时组合。

## (4) 施工活荷载

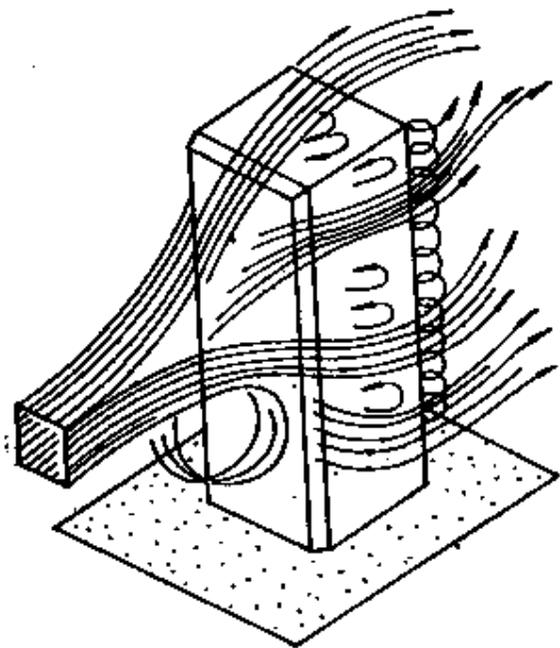
施工活荷载一般取  $1.0\sim 1.5\text{kN/m}^2$ 。



## 3.2 风荷载

空气从气压大的地方向气压小的地方流动就形成了风，与建筑物有关的是靠近地面的流动风，简称为近地风。

当风遇到建筑物时在其表面上所产生的压力或吸力即为建筑物的风荷载。



风荷载 → 标准地貌  
标准风速  
风向  
风的动力作用  
建筑外型  
建筑高度

对高层建筑，一方面风使建筑物受到一个基本上比较稳定的风压，另一方面风又使建筑物产生风力振动。（静力 + 动力）



## 3.2.1 风荷载标准值

主体结构计算时，垂直于建筑物表面的风荷载标准值

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$$

式中  $w_k$ ——风荷载标准值 (kN/m<sup>2</sup>);

$w_0$ ——基本风压 (kN/m<sup>2</sup>);

$\mu_s$ ——风荷载体型系数，应按《荷载规范》第 7.3 节的规定采用;

$\mu_z$ ——风压高度变化系数;

$\beta_z$ ——高度 $z$ 处的风振系数。

风荷载作用面积取垂直于风向的最大投影面积

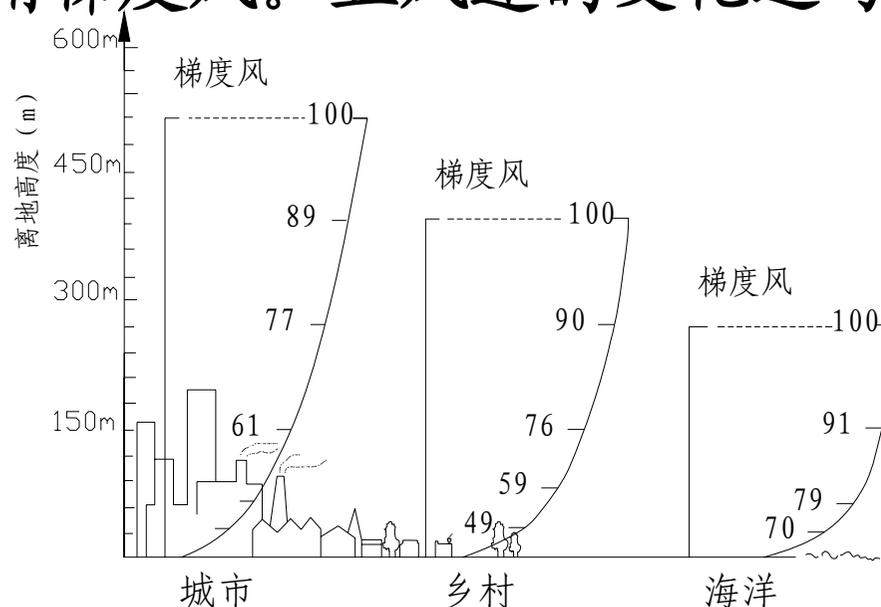
### 1、基本风压

我国《荷载规范》规定，基本风压系以当地比较空旷平坦地面上离地10m高，统计所得的50年一遇10分钟平均最大风速 $v_0$  (m/s) 为标准，按风速确定的风压值，但不得小于0.3kN/m<sup>2</sup>。特别重要的高层建筑，取100年。



## 2、风压高度变化系数

风速大小与高度有关，一般近地面处的风速较小，愈向上风速逐步加大。当达到一定高度时(300~500m)，风速不受地表影响，达到所谓梯度风。且风速的变化还与地面粗糙程度有关。



风压沿高度的变化规律一般用指数函数表示，即

$$v_z = v_H \left( z/H \right)^\alpha$$

$H$   $v_H$ ——分别为标准高度（如10m）及该处的平均风速；

$\alpha$  ——地面粗糙度系数；地表粗糙程度愈大， $\alpha$ 值则愈大；



风压高度变化系数：为某类地表上某空高度处的风压与基本风压的比值，该系数取决于地面粗糙程度指数。现行规范将地面粗糙程度分为四类：

- A类—指近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；
- B类—指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋稀疏的乡镇、城市郊区；
- C类—指有密集建筑群的城市市区；
- D类—指密集建筑群且房屋较高的城市市区。

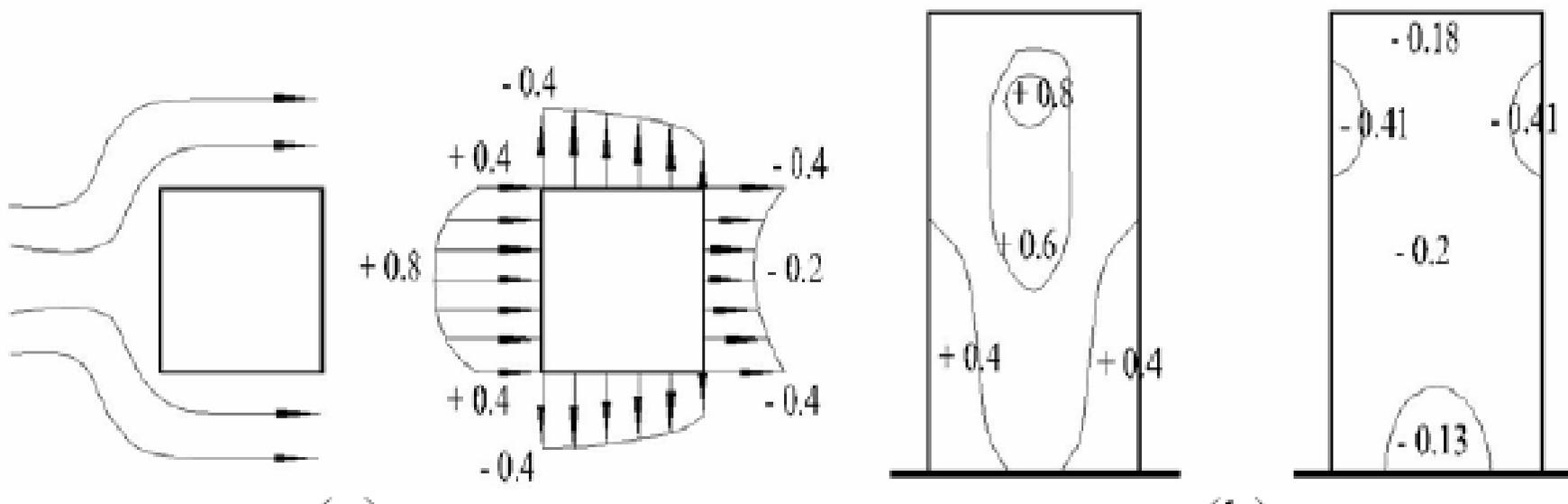
表 3.2.1 风压高度变化系数  $\mu_z$

离地面或海平面 平均高度 (m)	地面粗糙度类别				离地面或海平面 平均高度 (m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D		A	B	C	D
≥450	3.12	3.12	3.12	3.12	70	2.20	1.86	1.45	1.02
400	3.12	3.12	3.12	2.91	60	2.12	1.77	1.35	0.93
350	3.12	3.12	2.94	2.68	50	2.03	1.67	1.25	0.84
300	3.12	2.97	2.75	2.45	40	1.92	1.56	1.13	0.73
250	2.99	2.80	2.54	2.19	30	1.80	1.42	1.00	0.62
200	2.83	2.61	2.30	1.92	20	1.63	1.25	0.84	0.62
150	2.64	2.38	2.03	1.61	15	1.52	1.14	0.74	0.62
100	2.40	2.09	1.70	1.27	10	1.38	1.00	0.74	0.62
90	2.34	2.02	1.62	1.19	5	1.17	1.00	0.74	0.62
80	2.27	1.95	1.54	1.11					



### 3、风荷载体型系数

(1)风压分布系数反映了风压与体型的关系。



迎风面的风压力在建筑物的中间偏上为最大，两边及底下最小；侧风面一般近侧大，远侧小，分布也极不均匀；背风面一般两边略大，中间小。

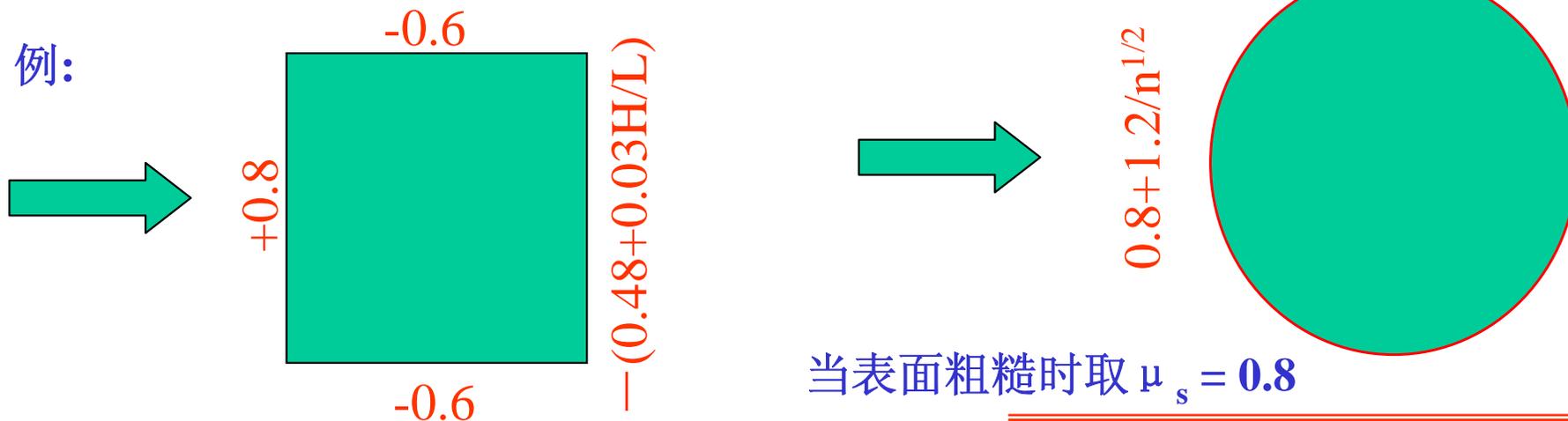


(2) **定义**: 风荷载体型系数是指风作用在建筑物表面所引起的压力(吸力)与原始风速算得的理论风压的比值。表示建筑物表面在稳定风压下的静态压力分布规律, 主要与建筑物的**体型与尺度**有关。

(3) **计算**: 在计算风对建筑物的整体作用时, 只需按各表面的平均风压计算, 即采用各个表面的平均风荷载体型系数计算。

(4) **风荷载体型系数的确定**: 根据设计经验和风洞试验

### 1) 单体风压体型系数





### 2) 群体风压体型系数

对建筑群，尤其是高层建筑群，当房屋相互间距较近时，由于漩涡的相互干扰，房屋某些部位的局部风压会显著增大。

《高规》规定，当多栋或群集的高层建筑相互间距较近时，宜考虑风力相互干扰的群体效应。一般可将单体建筑的体型系数乘以相互干扰增大系数，该系数可参考类似条件的试验资料确定，必要时宜通过风洞试验确定。

### 3) 局部风压体型系数

在计算风对建筑物某个局部表面作用时，要采用局部风荷载体型系数，用于验算围护结构及玻璃等强度和构件连接强度。

檐口、雨篷、遮阳板、阳台等水平构件计算局部上浮风荷载时，风荷载体型系数不宜小于2.0。设计建筑幕墙时，应按有关的标准规定采用。



## 4、风振系数

### (1) 风速特点:

风速的变化可分为两部分：一种是长周期的成分，其值一般在10min以上；另一种是短周期成分，一般只有几秒钟左右。因此，为便于分析，通常把实际风分解为**平均风（稳定风）**和**脉动风**两部分。稳定风周期长，对结构影响小；脉动风周期短，对结构影响大。

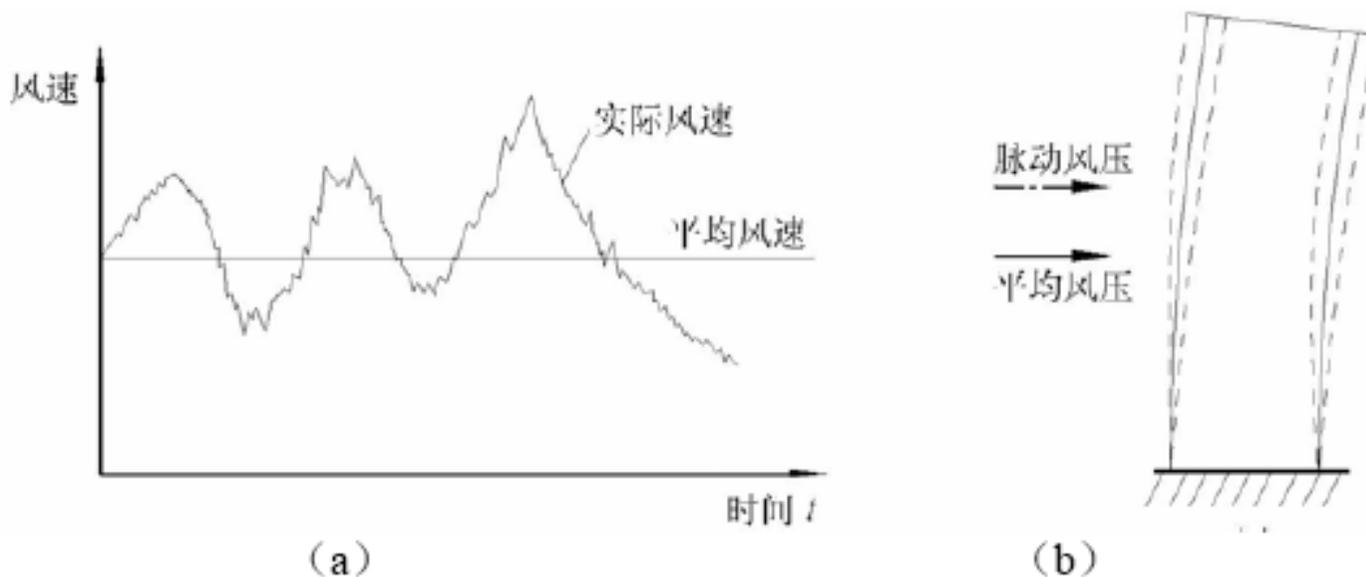


图 3.2.3 平均风压和脉动风压



(2) **风动力效应**：对高度较大、刚度较小的高层建筑，脉动风压会产生不可忽略的动力效应，设计中必须考虑，目前采用加大风荷载的办法来考虑这个动力效应，即对风压值乘以风振系数。

《高规》规定：对基本自振周期 $T_1$ 大于0.25s的结构，以及高度大于30m且高宽比大于1.5的高柔房屋均应考虑脉动风压对结构产生的风振影响。

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi v \varphi_z}{\mu_z} \quad (3.2.8)$$

$\xi$ —脉动增大系数，可按表 3.2.2 采用；

$v$ —脉动影响系数，外形、质量沿高度比较均匀的结构可根据结构总高度  $H$  及其与迎风面宽度  $B$  的比值按表 3.2.3 采用；

$\varphi_z$ —振型系数，可由结构动力计算确定，计算时可仅考虑受力方向基本振型的影响；对于质量和刚度沿高度分布比较均匀的弯剪型结构，也可近似采用振型计算点距室外地面高度  $z$  与房屋高度  $H$  的比值，即  $\varphi_z = H_i / H$ ， $H_i$  为第  $i$  层标高； $H$  为建筑总高度。



表 3.2.2 脉动增大系数

$w_0 T_1^2 (kNs^2/m^2)$	地面粗糙度类别				$w_0 T_1^2 (kNs^2/m^2)$	地面粗糙度类别			
	A类	B类	C类	D类		A类	B类	C类	D类
0.06	1.21	1.19	1.17	1.14	2.00	1.58	1.54	1.46	1.39
0.08	1.23	1.21	1.18	1.15	4.00	1.70	1.65	1.57	1.47
0.10	1.25	1.23	1.19	1.16	6.00	1.78	1.72	1.63	1.53
0.20	1.30	1.28	1.24	1.19	8.00	1.83	1.77	1.68	1.57
0.40	1.37	1.34	1.29	1.24	10.00	1.87	1.82	1.73	1.61
0.60	1.42	1.38	1.33	1.28	20.00	2.04	1.96	1.85	1.73
0.80	1.45	1.42	1.36	1.30	30.00	—	2.06	1.94	1.81
1.00	1.48	1.44	1.38	1.32					



在按表 3.2.2 确定脉动增大系数时, 结构基本自振周期  $T_1$  可由结构动力学计算确定。对比较规则的高层建筑结构, 也可采用近似公式计算:

钢结构  $T_1 = (0.10 \sim 0.15)n$

钢筋混凝土框架结构  $T_1 = (0.08 \sim 0.1)n$

钢筋混凝土框架-剪力墙和框架-核心筒结构  $T_1 = (0.06 \sim 0.08)n$

钢筋混凝土剪力墙结构和筒中筒结构  $T_1 = (0.05 \sim 0.06)n$

或 钢筋混凝土框架和框剪结构  $T_1 = 0.25 + 0.53 \times 10^{-3} \frac{H^2}{\sqrt[3]{B}}$

钢筋混凝土剪力墙结构  $T_1 = 0.03 + 0.03 \frac{H}{\sqrt[3]{B}}$

式中:  $n$  为结构层数;  $H$  为房屋总高度 (m);  $B$  为房屋宽度 (m)。

表 3.2.3 高层建筑的脉动影响系数  $U$

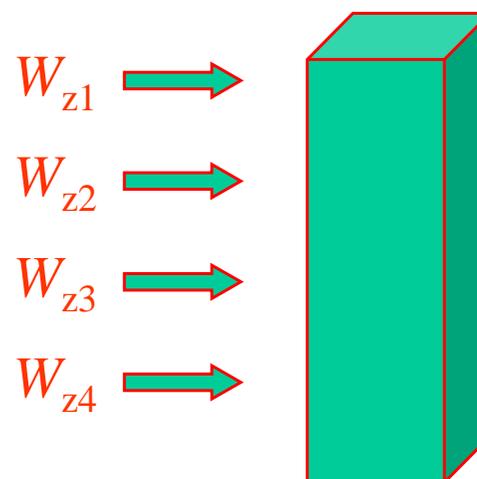
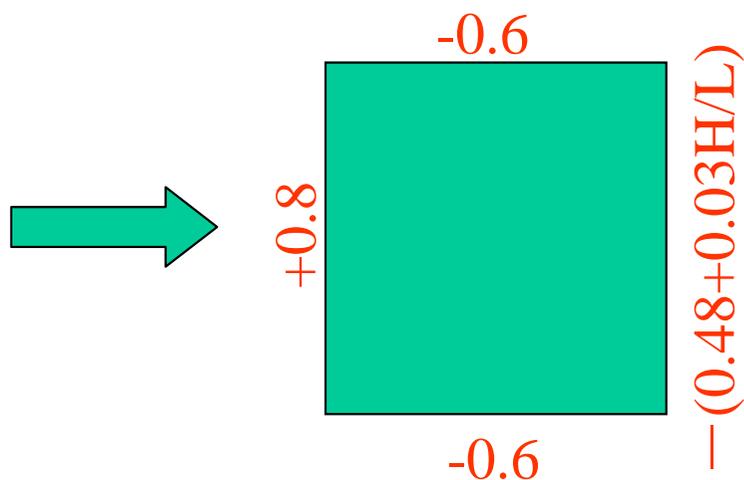
$H/B$	粗糙度类别	总 高 度 $H$ (m)						
		$\leq 30$	50	100	150	200	250	300
$\leq 0.5$	A	0.44	0.42	0.33	0.27	0.24	0.21	0.19
	B	0.42	0.41	0.33	0.28	0.25	0.22	0.20
	C	0.40	0.40	0.34	0.29	0.27	0.23	0.22
	D	0.36	0.37	0.34	0.30	0.27	0.25	0.24
1.0	A	0.48	0.47	0.41	0.35	0.31	0.27	0.26
	B	0.46	0.46	0.42	0.36	0.36	0.29	0.27
	C	0.43	0.44	0.42	0.37	0.34	0.31	0.29
	D	0.39	0.42	0.42	0.38	0.36	0.33	0.32

### 3.2.2 总风荷载

总风荷载为建筑物各表面上承受风力的合力，是沿建筑物高度变化的线荷载。通常按x、y两个互相垂直的方向分别计算总风荷载。

z高度处的总风荷载标准值按下式计算：

$$W_z = \beta_z \mu_z w_0 (\mu_{s1} B_1 \cos \alpha_1 + \mu_{s2} B_2 \cos \alpha_2 + \dots + \mu_{sn} B_n \cos \alpha_n)$$





### 例题

【例题】某高层建筑剪力墙结构，上部结构为38层，底部1-3层层高为4m，其他各层层高为3m，室外地面至檐口的高度为120m，平面尺寸为30m×40m，地下室采用筏形基础，埋置深度为12m，如图3.2.4(a)、(b)所示。已知基本风压为 $w_0 = 0.45 \text{ kN/m}^2$ ，建筑场地位于大城市郊区。已计算求得作用于突出屋面小塔楼上的风荷载标准值的总值为800kN。为简化计算，将建筑物沿高度划分为六个区段，每个区段为20m，近似取其中点位置的风荷载作为该区段的平均值，计算在风荷载作用下结构底部（一层）的剪力和筏形基础底面的弯矩。

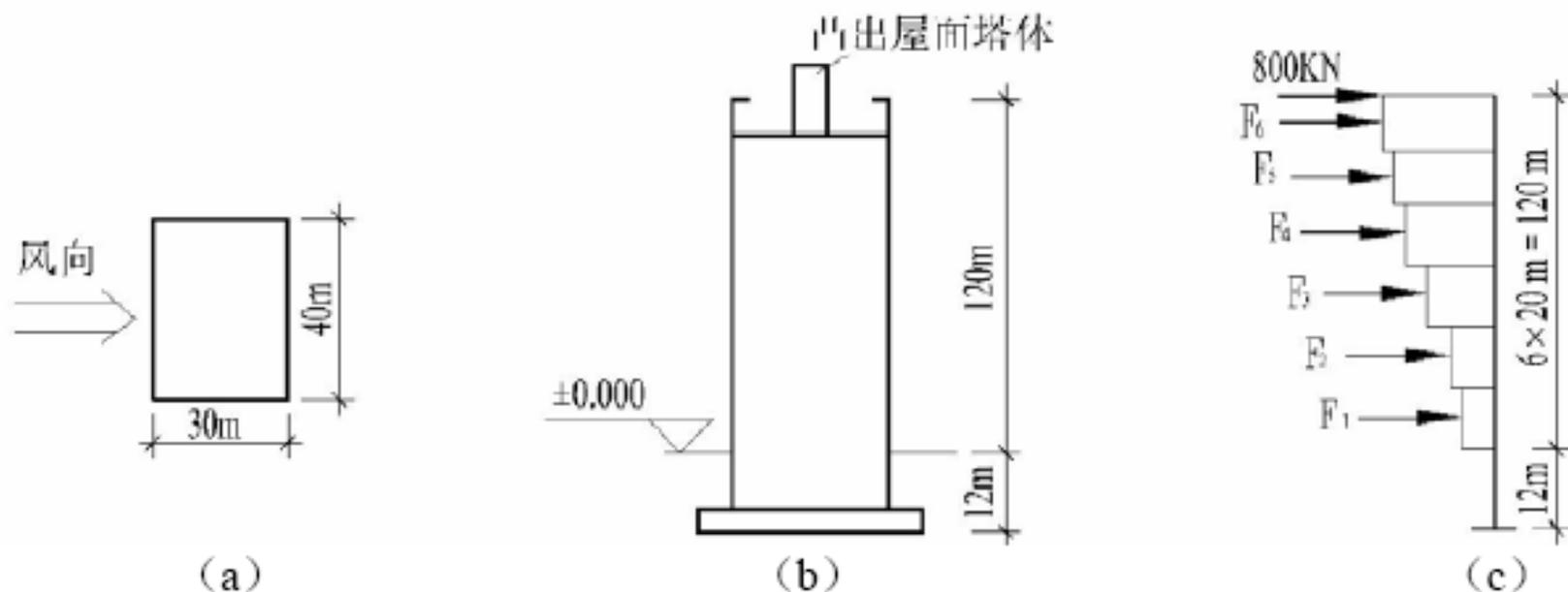


图 3.2.4 高层结构外形尺寸及计算简图



解：(1) 基本自振周期：根据钢筋混凝土剪力墙结构的经验公式，可得结构的基本周期为：

$$T_1 = 0.05n = 0.05 \times 38 = 1.90s$$

$$w_0 T_1^2 = 0.45 \times 1.9^2 = 1.62 \text{ kN} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^2$$

(2) 风荷载体型系数：对于矩形平面，由附录 1 可求得

$$\mu_{s1} = 0.80$$

$$\mu_{s2} = -\left(0.48 + 0.03 \frac{H}{L}\right) = -\left(0.48 + 0.03 \times \frac{120}{40}\right) = -0.57$$

(3) 风振系数：由条件可知地面粗糙度类别为 B 类，由表 3.2.2 可查得脉动增大系数  $\xi = 1.502$ 。脉动影响系数  $\nu$  根据  $H/B$  和建筑总高度  $H$  由表 3.2.3 确定，其中  $B$  为迎风面的房屋宽度，由  $H/B=3.0$  可从表 3.2.3 经插值求得  $\nu = 0.478$ ；由于结构属于质量和刚度沿高度分布比较均匀的弯剪型结构，可近似采用振型计算点距室外地面高度  $z$  与房屋高度  $H$  的比值，即  $\varphi_z = H_i / H$ ， $H_i$  为第  $i$  层标高； $H$  为建筑总高度。则由式 (3.2.8) 可求得风振系数为：

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi \nu \varphi_z}{\mu_z} = 1 + \frac{\xi \nu}{\mu_z} \cdot \frac{H_i}{H} = 1 + \frac{1.502 \times 0.478}{\mu_z} \cdot \frac{H_i}{H}$$

(4) 风荷载计算：风荷载作用下，按式 (3.2.1) 可得沿房屋高度分布的风荷载标准值为：

$$q(z) = 0.45 \times (0.8 + 0.57) \times 40 \mu_z \beta_z = 24.66 \mu_z \beta_z$$

按上述公式可求得各区段中点处的风荷载标准值及各区段的合力见表 3.2.4，如图 3.2.4(c)所示。



表 3.2.4 风荷载作用下各区段合力的计算

区段	$H_i$ (m)	$H_i/H$	$\mu_z$	$\beta_z$	$q(z)$ (kN/m <sup>2</sup> )	区段合力 $F_i$ (kN)
突出屋面						800
6	110	0.917	2.15	1.306	69.24	1384.8
5	90	0.750	2.02	1.267	63.11	1262.2
4	70	0.583	1.86	1.225	56.19	1123.8
3	50	0.417	1.67	1.179	48.55	971.0
2	30	0.250	1.42	1.126	39.43	788.6
1	10	0.083	1.00	1.060	26.14	522.8

在风荷载作用下结构底部一层的剪力为

$$V_1 = 800 + 1384.8 + 1262.2 + 1123.8 + 971.0 + 788.6 + 522.8 = 6853.2 \text{ kN}$$

筏形基础底面的弯矩为

$$M = 800 \times 132 + 1384.8 \times 122 + 1262.2 \times 102 + 1123.8 \times 82 + 971.0 \times 62 + 788.6 \times 42 + 522.8 \times 22 = 600266.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



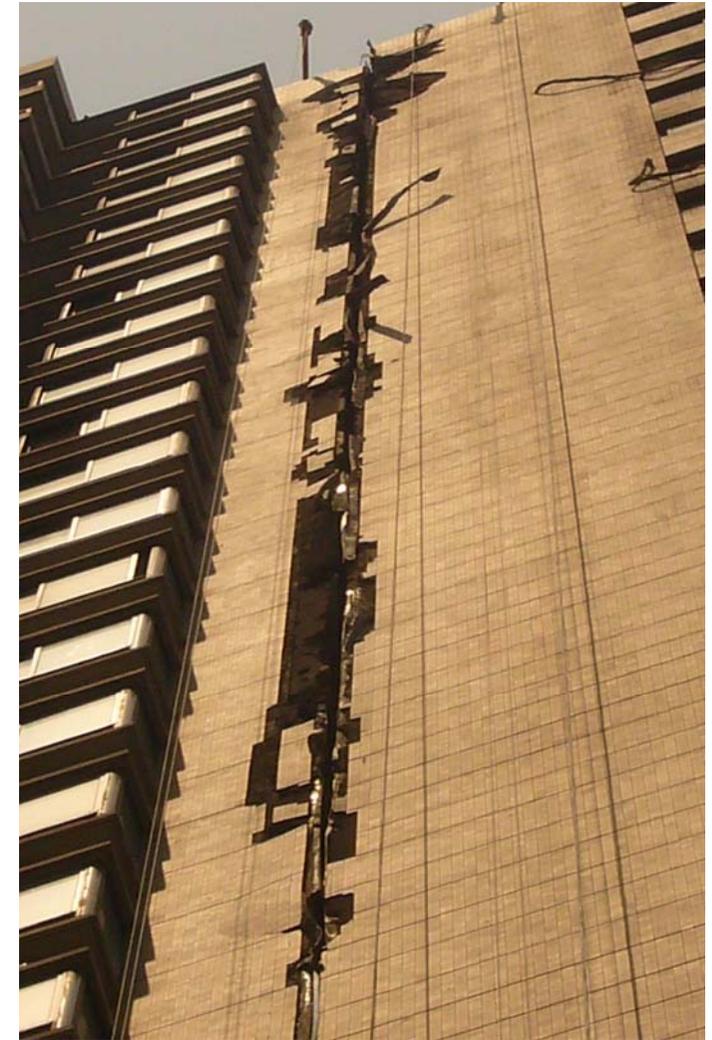
## 3.3 地震作用



16层钢筋混凝土住宅,地震时其中一栋倾倒,底层柱间距大、数量少(7~10m)是造成倾倒的主要原因。



12层钢筋混凝土大楼,自楼梯间相接处分裂,东侧6层以下全部塌陷,西侧5层以下全部倒塌,柱间距介于8米到10米,且柱子数量偏少。



汶川地震对西安高层建筑的影响





## 3.3.1 计算原则

### 1、抗震设防分类

抗震设计的高层建筑应根据使用功能的重要性，破坏后产生的经济损失、政治和社会影响及在抗震救灾中的作用，分为甲、乙、丙三个抗震设防类别：

(1) **甲类建筑**：特别重要的建筑。严重后果和经济损失重大；目前国内尚无按甲类设计的高层建筑；

(2) **乙类建筑**：指重要的建筑。地震时功能不能中断或需尽快恢复、人员大量集中公共建筑或其他重要建筑，如国家级、省级的广播电视中心、通讯枢纽、大型医院等；

(3) **丙类建筑**：除上述以外的一般高层民用建筑。



## 2、设防烈度

- (1) 甲类建筑应专门研究,按照高于本地区抗震设防烈度计算地震作用,其值应按批准的地震安全性评价结果确定。
- (2) 乙、丙类建筑应按抗震设防烈度计算地震作用。且6度抗震设防时也应进行地震作用计算。

## 3、地震作用计算原则

- (1) 一般应在结构两个主轴方向分别考虑水平地震作用计算;有斜交抗侧力构件时,应分别计算各抗侧力构件方向的水平地震作用;
- (2) 质量和刚度分布明显不对称、不均匀的结构,应计算双向水平地震作用下的扭转影响;其他情况,应计算单向水平地震作用下的扭转影响;
- (3) 8度、9度抗震设计时,高层建筑中的大跨度和长悬臂结构,应考虑竖向地震作用;
- (4) 9度抗震设计时的高层建筑应计算竖向地震作用。



## 4、地震作用计算方法

(1)宜采用振型分解反应谱法。质量和刚度不对称、不均匀的结构以及高度超过100m的时，应采用考虑扭转耦联振动影响的振型分解反应谱法；

(2)高度不超过40m，以剪切变形为主，刚度与质量沿高度分布比较均匀时，可采用底部剪力法；

(3)7~9度抗震设防时，甲类、高度较大的乙、丙类、竖向不规则、质量沿竖向分布特别不均匀、复杂的等高层建筑结构，宜采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算。

设防烈度、场地类别	建筑高度范围
8度Ⅰ、Ⅱ类场地和7度	>100m
8度Ⅲ、Ⅳ类场地	>80m
9度	>60m



## 5、地震作用的计算方法

### (1) 反应谱法

#### 1) 振型分解反应谱法

不考虑扭转影响；  
考虑扭转耦联振动影响。

#### 2) 底部剪力法

### (2) 动力时程分析法

## 5、动力时程分析方法

是将地震动记录或人工地震波作用在结构上，直接对结构运动方程积分，求得结构任意时刻地震反应的方法。上世纪50年代借助地震记录和计算机而提出，是目前理论上最精细的分析方法。但还存在很多问题，如计算模型、地震动的输入、非线性恢复力模型等可分为线性动力时程分析和非线性动力时程分析两种。



动力时程分析时，应按场地类别和设计地震分组选用不少于二组实际地震记录和一组人工模拟地震波，其平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符；地震波的持续时间不宜小于结构基本自振周期的3~4倍，也不宜少于12s，时间间隔可取0.01s或0.02s；且按照每条时程曲线计算所得的结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法求得的底部剪力的65%，多条时程曲线计算所得的结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法求得的底部剪力的80%。

输入最大地震加速度按下表采用；结构地震作用效应可取多条时程曲线计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值。

表 3.3.2 弹性时程分析时输入地震加速度的最大值

设防烈度	7 度	8 度	9 度
加速度最大值 ( $cm/s^2$ )	35 (55)	70 (110)	140

注：7 度、8 度时括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地震区



**谢谢大家!**

---