

# 空旷房屋抗震设计

刘大海 杨翠如 钟锡根

地震出版社

1989

# 空旷房屋抗震设计

刘大海 杨翠如 钟锡根

地震出版社

1989

## 空旷房屋抗震设计

刘大海 杨翠如 钟锡根

责任编辑：蒋乃芳

---

地质出版社 出版

北京复兴路63号

北京朝阳小红门印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

---

850×1168 1/32 7.625 印张 207 千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数 00001—10000

ISBN 7-5028-0214-2/T·5

(602) 定价：4.00元

## 抗震设计丛书编委会

**主 编：**叶耀先

**副主编：**周炳章 魏 珽

**委 员：**文良谟 叶耀先 刘大海

沈世杰 宋绍先 周炳章

周锡元 胡庆昌 胡德祥

徐宗和 谢君斐 蒋莼秋

蓝 天 裘民川 魏 珽

# 目 录

## 第一章 抗震设计原则

|                     |        |
|---------------------|--------|
| 第一节 抗震设防标准          | ( 1 )  |
| 一、房屋重要性类别           | ( 1 )  |
| 二、抗震设计水准            | ( 2 )  |
| 三、地震动参数             | ( 3 )  |
| 第二节 抗震概念设计          | ( 4 )  |
| 一、合理的结构总体布置         | ( 5 )  |
| 二、多道抗震防线概念的应用       | ( 6 )  |
| 三、恰当的结构选型           | ( 8 )  |
| 四、加强结构的整体性          | ( 10 ) |
| 五、消除或强化薄弱环节         | ( 11 ) |
| 六、合理调配强度、刚度和延性的比例关系 | ( 11 ) |
| 七、轻材料的应用            | ( 13 ) |
| 八、考虑非结构性部件的影响       | ( 13 ) |
| 第三节 地震作用计算方法        | ( 14 ) |
| 一、地震作用方向            | ( 14 ) |
| 二、水平地震作用的计算方法       | ( 15 ) |
| 三、竖向地震作用的计算方法       | ( 17 ) |
| 四、地震反应谱             | ( 18 ) |
| 第四节 结构选型            | ( 19 ) |

## 第二章 单层空旷砖房

|             |        |
|-------------|--------|
| 第一节 震害概况    | ( 20 ) |
| 一、房屋结构特征    | ( 20 ) |
| 二、震害程度      | ( 21 ) |
| 三、主要震害现象    | ( 22 ) |
| 四、震害特点      | ( 24 ) |
| 五、典型震例      | ( 25 ) |
| 第二节 结构布置和选型 | ( 28 ) |

• ■ •

|                  |        |
|------------------|--------|
| 一、平面和体形          | ( 28 ) |
| 二、构件选型           | ( 29 ) |
| 三、构造柱的布置         | ( 33 ) |
| 四、圈梁的布置          | ( 34 ) |
| 第三节 横向抗震计算       | ( 35 ) |
| 一、结构动力特性         | ( 35 ) |
| 二、构件抗推刚度         | ( 37 ) |
| 三、质量集中系数         | ( 41 ) |
| 四、力学模型           | ( 43 ) |
| 五、空间分析法          | ( 45 ) |
| 六、两质点法           | ( 57 ) |
| 七、分块法——空间分析的简化计算 | ( 63 ) |
| 八、例题             | ( 78 ) |
| 第四节 纵向抗震计算       | ( 82 ) |
| 一、计算原则           | ( 82 ) |
| 二、门厅部分的纵向计算      | ( 82 ) |
| 三、观众厅部分的纵向计算     | ( 83 ) |
| 四、舞台部分的纵向计算      | ( 83 ) |
| 五、例题             | ( 83 ) |
| 第五节 构件及节点抗震构造    | ( 86 ) |
| 一、圈梁             | ( 86 ) |
| 二、构造柱            | ( 88 ) |
| 三、组合砌体柱          | ( 89 ) |
| 四、屋架与砖墙的连接       | ( 91 ) |
| 五、山墙与屋面构件的连接     | ( 92 ) |
| 六、附墙烟囱           | ( 92 ) |

### 第三章 钢筋混凝土空旷房屋

|            |        |
|------------|--------|
| 第一节 震害概况   | ( 94 ) |
| 第二节 结构总体设计 | ( 96 ) |
| 一、防震缝的位置   | ( 96 ) |
| 二、抗侧力体系    | ( 96 ) |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 三、观众厅与休息廊的高度协调····· | (100) |
| 四、舞台口框架·····        | (101) |
| 五、挑台的支承结构·····      | (102) |
| 六、地基和基础·····        | (103) |
| 第三节 横向抗震计算·····     | (104) |
| 一、构件抗推刚度·····       | (104) |
| 二、空间结构横向整体分析·····   | (110) |
| 三、分块计算法·····        | (114) |
| 四、非对称结构的扭转振动分析····· | (130) |
| 第四节 纵向抗震计算·····     | (133) |
| 一、整体计算·····         | (134) |
| 二、分片计算·····         | (135) |
| 第五节 变形验算·····       | (139) |
| 一、弹性位移·····         | (139) |
| 二、弹塑性位移·····        | (140) |
| 第六节 竖向地震作用的计算·····  | (142) |
| 第七节 构件及节点抗震构造·····  | (143) |
| 一、构件抗震等级·····       | (143) |
| 二、框架梁·····          | (144) |
| 三、框架柱·····          | (147) |
| 四、梁柱节点·····         | (151) |
| 五、填墙框架·····         | (152) |
| 六、抗震墙·····          | (153) |
| 七、竖向支撑·····         | (154) |

## 第四章 门架结构空旷房屋

|                    |       |
|--------------------|-------|
| 第一节 震害概况·····      | (156) |
| 第二节 结构布置和构件选型····· | (157) |
| 一、建筑平面布置·····      | (157) |
| 二、门架选型·····        | (157) |
| 三、门架尺寸·····        | (158) |
| 四、支撑体系·····        | (160) |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 五、围护墙.....          | (163) |
| 第三节  房屋横向抗震计算.....  | (164) |
| 一、跨变结构地震反应的特点.....  | (164) |
| 二、质量的集中.....        | (165) |
| 三、单跨门架地震作用效应.....   | (167) |
| 四、对称三铰门架计算公式.....   | (169) |
| 第四节  房屋纵向抗震计算.....  | (175) |
| 一、质量的集中.....        | (175) |
| 二、柱列的抗推刚度和侧移柔度..... | (175) |
| 三、柱列纵向基本周期.....     | (176) |
| 四、水平地震作用.....       | (176) |
| 第五节  杆件和节点抗震构造..... | (177) |
| 一、门架梁柱节点.....       | (177) |
| 二、梁顶铰节点.....        | (178) |
| 三、柱脚铰节点.....        | (178) |
| 四、基础拉杆.....         | (180) |
| 五、支撑节点.....         | (181) |
| 六、围护结构与门架的连接.....   | (183) |

## 第五章  多层空旷房屋

|                  |       |
|------------------|-------|
| 第一节  震害概况.....   | (186) |
| 第二节  结构总体设计..... | (191) |
| 一、防震缝的设置.....    | (191) |
| 二、结构选型.....      | (192) |
| 三、屋面支撑系统.....    | (194) |
| 四、地基和基础.....     | (199) |
| 第三节  横向抗震计算..... | (199) |
| 一、空间结构整体分析.....  | (199) |
| 二、平面结构分析.....    | (203) |
| 三、顶层变形集中效应.....  | (210) |
| 四、例题.....        | (214) |
| 第四节  纵向抗震计算..... | (220) |



|                  |       |
|------------------|-------|
| 一、计算原则.....      | (220) |
| 二、计算方法.....      | (220) |
| 第五节  抗震构造措施..... | (224) |
| 一、屋架与柱头的连接.....  | (224) |
| 二、顶层排架柱.....     | (226) |
| 三、框架梁、柱及节点.....  | (228) |
| 四、顶层柱间支撑节点.....  | (228) |
| 五、围护墙.....       | (229) |
| 参考文献.....        | (230) |

# 第一章 抗震设计原则

空旷房屋系指剧院、电影院、展览馆、健身房之类高大而空旷的房屋。一般影剧院由前厅、观众厅、舞台三部分所组成，有时观众厅两侧还有休息廊。平面形状凹进凸出，立面高低错落，整个房屋的体形比较复杂，而且结构特殊，常由单层排架结构、多层砖混结构或多层框架结构组合而成。所以，空旷房屋的地震反应独特，地震造成的破坏部位和破坏状况，与一般结构不同。进行这类结构的抗震计算和构造加强措施时，应针对其结构特点采取不同的处理方法。

## 第一节 抗震设防标准

### 一、房屋重要性类别

建筑物的使用性质各不相同，地震破坏所造成的后果轻重不一。有些建筑物的破坏仅造成经济上的损失，而某些建筑物的破坏就有可能造成大量人员伤亡，或在政治上造成严重影响。因此，对于各种用途建筑物的抗震设防，不能采取同一标准，应该根据其破坏后果的严重程度加以区别对待。为此，《建筑抗震设计规范(GBJ11-89)》（简称《抗震规范》）将建筑物按其用途的重要性划分为四类：①甲类建筑，指特别重要的建筑；②乙类建筑，指重要的建筑；③丙类建筑，指一般建筑；④丁类建筑，指次要建筑。

空旷房屋是人们聚集活动的公共场所，一旦遭受地震破坏，就有可能造成大量人员伤亡，后果严重。根据《抗震规范》的建筑分类原则，空旷房屋一般应该属于乙类建筑。

《抗震规范》关于建筑抗震设防标准有这样的具体规定：对于甲类建筑以外的其他各类建筑，进行抗震计算时，均采取相应于该建筑所在地区设防烈度的小震或大震地震参数，不进行重要

性系数的调整；但在抗震构造措施方面，应依其用途的重要性予以区别对待。这是因为大量的地震经验表明，就当今抗震水平而言，根据震害经验总结出来的抗震构造措施，是提高建筑物抗震能力的最有效、最经济的办法。

对于乙类建筑，《抗震规范》规定：当设防烈度不高于9度时，经城市抗震防灾规划或有关部门批准后，抗震构造可比所在地区的设防烈度提高一度考虑，设防烈度为9度时可适当提高。空旷房屋属乙类建筑，故应遵守上述规定。

## 二、抗震设计水准

### （一）规范设计思想

由于地震的随机性和多发性，一幢建筑物在其使用年限内有可能遭遇多次不同烈度的地震。用概率观点来说，遭遇最多的应该是低于所在场地基本烈度的小震，但也不可排除遭遇高于基本烈度的大震的可能。所以，当前一些主要国家的抗震设计规范，均采取多水准设防作为指导思想。

#### 1. 外国规范

日本现行抗震设计规范的指导思想是采取两阶段设计概念：建筑物遭遇在其使用年限内可能重复发生多次的中等强度地震时，不致产生明显震害；遭遇在其使用年限内可能发生不多于一次的强烈地震时，不至于倒塌。

美国建筑抗震设计规范草案ATC-3及麻省抗震设计规范提出的建筑抗震设计思想是：抵抗小地震时结构无损伤；抵抗中等地震时不破坏；抵抗大地震时不倒塌。

#### 2. 我国规范

我国《抗震规范》的设计指导思想是：小震不坏、中震可修、大震不倒。并相应提出三个水准的设防要求。

第一水准：当遭遇较常发生的小于本地区设防烈度的地震时，建筑物不损坏，以满足正常使用的要求。据此，地震期间结构应始终处于弹性工作状态。

第二水准：当遭受等于本地区设防烈度的地震时，建筑物可能产生轻微损坏，不须修理或稍加修理即可恢复使用。此时，结构将进入弹塑性工作阶段，依靠其变形能力和吸能能力来抗御地震。因此，需要控制结构的层间变形，以避免产生不易修复的震害。

第三水准：当遭受极少可能发生的、高于本地区设防烈度的大地震时，避免建筑物倒塌或发生影响生命安全的严重破坏。

## （二）抗震设计阶段

为了简化工程的抗震设计，《抗震规范》实际采用的是简化了的两阶段设计。

第一阶段设计：首先按第一水准的地震参数（小震），求出结构在弹性状态下的地震作用效应，然后将它与恒荷载等其它荷载效应组合，并采取经抗震调整系数调整后的构件抗力，进行构件截面的抗震强度验算。对建筑进行的第一阶段设计，保证了第一水准的强度要求和隐含的第二水准变形要求。各类空旷房屋都必须进行此第一阶段的抗震设计。

第二阶段设计：通过验算结构薄弱环节的变形，并采取相应的构造措施，以满足第三水准（大震）的要求。

一般的空旷房屋不需进行此第二阶段的设计，仅对一些大型的或存在薄弱部位的空旷房屋，才需要作此第二阶段抗震设计。

## 三、地震动参数

根据两阶段设计概念和弹性反应谱理论，《抗震规范》对结构第一阶段强度设计和第二阶段变形验算分别给出地震影响系数的具体值（表1.1）。规范中用来表示地震动大小的地震影响系数，在数值上等于地震系数 $K$ 和反应谱形状系数（或称动力系数） $\beta$ 的乘积。地震系数 $K$ 就是地震时地面运动加速度峰值与重力加速度的比值，《中国地震烈度表(1980)》已对相应于各基本烈度的地震系数取值作出了规定。又根据对我国几十个城镇潜在震源、地震活动性和地震传播规律的研究和概率统计，作为第一阶段设

计依据的众值烈度（小震）地震系数，可取工程所在地区设防烈度地震系数的1/3；用于第二阶段设计的大震地震系数，对应于设防烈度的7，8，9度，分别约取众值烈度地震系数的6，5，4倍。例如，设防烈度为7度时，第一阶段设计用的水平地震影响系数最大值为 $\alpha_{max} = \frac{1}{3} K\beta = \frac{1}{3} \times 0.125 \times 2.25 \approx 0.08$ ；第二阶段用的水平地震影响系数最大值为 $\alpha_{max} = 6 \times 0.08 \approx 0.50$ 。

表1.1                      两阶段设计的水平地震影响系数最大值 $\alpha_{max}$

| 结 构 类 别   | 抗 震 设<br>计 阶 段 | 抗震验算内容  | 设 防 烈 度 |      |      |
|-----------|----------------|---------|---------|------|------|
|           |                |         | 7 度     | 8 度  | 9 度  |
| 各 类 结 构   | 第一阶段           | 结构弹性强度  | 0.08    | 0.16 | 0.32 |
| 存在薄弱部位的结构 | 第二阶段           | 结构弹塑性变形 | 0.50    | 0.90 | 1.40 |

## 第二节    抗震概念设计

近几年来，随着地震经验的不断总结和抗震工作的逐步深化，结构的抗震概念设计愈来愈受到人们的普遍重视。

地震是一种随机振动，有着难于把握的不确定性。建筑物的动力反应，同样由于构件轴向变形、P- $\Delta$ 效应、非结构性部件的影响、材料特性的时效、地基与结构共同工作、阻尼随变形而变化等难于考虑的因素而变得很复杂，以致人们对地震的破坏作用了解甚浅，抗震设计仍处在低水平，远未达到科学的严密程度。此外，一个国家的抗震设计规范，主要是根据本国的震害经验和研究成果制定的，难免存在着一定的片面性和局限性，同时也不可能概括多种多样建筑物的所有情况，而且规范规定只是对工程设计的最低要求，许多问题需要设计者结合工程具体情况去考虑，去解决。因此，在现阶段，要使建筑物具有尽可能好的抗震性能，首要的，应该是从大的方面入手，也就是要做好概念设计。大的

方面没有把握好，计算工作再细致，局部构件做得再强，地震时建筑物还具有可能发生严重破坏，甚至倒塌。

所谓概念设计，就是在进行结构抗震设计时，要着眼于结构的总体地震反应，按照结构的破坏机制和破坏过程，灵活运用抗震设计准则，全面地合理解决结构设计中的基本问题，既注意总体布置上的大原则，又顾及到关键部位的细节，从根本上提高结构的抗震能力。结构的抗震概念设计包括以下几方面内容。

### 一、合理的结构总体布置

#### （一）房屋体形要简单

国内外多次地震经验表明，房屋体形不规则，平面上凸出凹进，立面上高低错落，均不利于抗震，往往造成比较严重的震害。因此，房屋体形要简单，已成抗震设计的基本原则之一。

影剧院等空旷房屋的各个部分，由于功能要求不同，体量大小各异，以致整个房屋平面很难做成矩形，各部分屋盖也难于做成同一高度。不过，确定建筑方案时，还是应该尽可能地将房屋平面和体形做得简单一些。譬如，在满足各项使用功能的前提下，使观众厅与门厅、舞台部分等宽，使观众厅两侧休息廊的屋盖与观众厅柱顶位于同一高度。

#### （二）结构力求对称

震害调查和理论分析都指出，非对称结构即使在地面平动分量作用下也会发生扭转振动，从而造成比较严重的破坏。所以，整个建筑或其独立单元应力争做到结构对称，质心与刚心重合或偏离甚少。

对于空旷房屋，即使舞台部分与观众厅既不等宽又不等高，也不要为了避免复杂体形，而在舞台与观众厅相接处设置防震缝。宁可采取其他措施来消除或减轻复杂体形所带来的附加震害。因为，此处设缝后，观众厅和门厅部分的联合体将会因结构的极不对称而在地震时发生严重的扭转破坏。

#### （三）强度和刚度应连续均匀变化

近些年来国内外的弹塑性时程分析结果表明，即使是单层结构，其构件的抗推刚度和“屈服强度比”（按构件实际截面和配筋计算出的屈服剪力与该截面地震剪力的比值）沿竖向若有突变，在突变部位会因出现较大的“塑性变形集中”而发生严重破坏甚至倒塌。在确定结构方案时，应该尽量避免这种情况。例如，观众厅两侧休息通廊的屋盖，应尽可能与观众厅屋盖在高度上拉平。如果前者略低于后者，休息通廊框架上再伸出小柱来支托观众厅屋架，那末，与下面的框架相比较，伸臂小柱抗推刚度和屈服强度比的突然减小会引起地震时的塑性变形集中，从而使小柱因过量变形而破坏，导致观众厅屋盖下塌的严重后果。

## 二、多道抗震防线概念的应用

### （一）设置多道防线的必要性

一次强烈地震的持续时间，少则几秒，多则几十秒。长时间的地面运动将对建筑物产生多次往复冲击，造成累积式的破坏。如果建筑物仅设置一道抗震防线，该防线一旦破坏，接踵而来的持续的地震动就会造成建筑物的倒塌。如果设置了第二道乃至第三道抗震防线作为后备，就足以抵挡持续地震动的袭击，保证建筑物最低限度的安全。1968年智利地震中，一幢三层教学楼由于在框架间设置了竖向钢支撑，强烈地面运动使柱间支撑斜杆全部严重弯曲，但破坏轻微的框架保证了房屋的安全。

### （二）第一道防线的构件选择

砖墙、框架、抗震墙、竖向支撑、填充墙等构件都可以用来抗御水平地震作用。然而，由于他们在结构中的受力条件不同，地震后果也就不一样。一般情况下，应优先选择不负担重力荷载的竖向支撑或填充墙，或者选用轴压比不太大的抗震墙之类的构件，作为第一道抗震防线的抗侧力构件。不宜采用轴压比很大的框架柱兼作第一道防线的抗侧力构件。因为房屋倒塌的最直接原因，是承重构件竖向承载能力的降低。前一方案中，第一道防线构件若有损坏，并不影响整个结构的竖向承载能力；而后一方案的

抗侧力构件万一有损坏，框架柱的竖向承载能力就会大幅度降低，当下降到低于所负担的重力荷载时，就会危及整个结构的安全。

如果因条件所限，框架是整个结构中唯一的抗侧力体系时，就应该采用“强柱弱梁”型延性框架。在水平地震作用下，梁的屈服先于柱的屈服，首先用梁的变形去消耗输入的地震能量，使柱退居到第二道防线的地位。

### (三) 抗侧力体系中赘余杆件的利用

结构抗震设计的最主要目标是防倒塌。由于建筑物在其使用期内可能遭受的强烈地震动具有很大的不确定性，按预期地震动进行设计的建筑物，遇到更强烈的或者具有不同特性的地震时，就很难避免破坏。为了使结构在出现较重破坏的情况下仍然是一个稳定的结构，不致变成一个机动体系而丧失稳定，比较好的办法是在静定结构之间增设一些赘余杆件，使之联成一个超静定结构。这些杆件与主体结构的线刚度比值应该大于它们之间的屈服强度比值，并通过恰当配筋使其具有极好的延性。遭遇地震时，这些杆件先于主体结构发生屈服，利用它的塑性变形来消耗尽可能多的地震能量。这就是利用非主要杆件的破坏来保护结构中的主要杆件。例如，如图1.1所示，将两片或多片单肢抗震墙用水平抗弯梁连成多肢抗震墙，或者用水平梁将抗震墙与同一平面内的框架连为

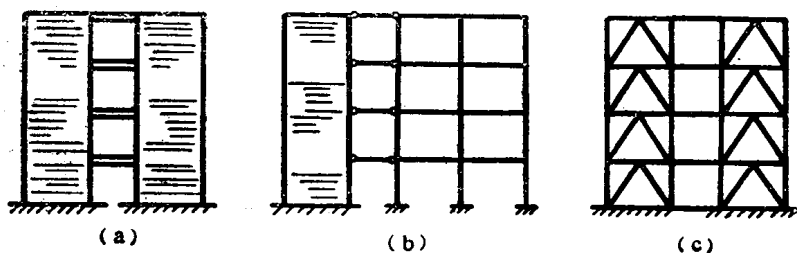


图1.1 带赘余杆件的结构并联体

(a)多肢抗震墙；(b)墙-框架并联体；(c)并联竖向支撑



并联体，并事先将早期出现的塑性铰的位置设置在各层连梁的两端(图1.1a, b)。对于两片以上的竖向支撑，同样可以用水平抗弯钢梁将它们连成并联体(图1.1c)，以提高他们的抗震能力。

这种通过对结构动力特性的适当控制，利用超静定结构赘余杆件的耗能 and 内力重分布，从一种结构体系过渡到仍然稳定的另一种结构体系，是对付高烈度地震的一种经济、有效的新方法，是增多抗震防线的又一有效措施。

### 三、恰当的结构选型

#### (一) 合适的结构类别

地震经验表明，就结构材料而言，钢筋混凝土结构的抗震性能优于砖结构；砖结构中，配筋砌体结构优于无筋砌体；配筋砌体中，组合砌体结构又优于在砌体灰缝内直接配置钢筋的做法。就构件型式而言，墙体的抗震性能优于框架或排架；筒体的抗震性能优于单片墙体；空间框架优于平面框架。确定结构方案时，应在满足经济、实用的前提下优先考虑抗震性能较好的结构类别。

#### (二) 超静定次数要多

静定结构的杆件受力和传力路线单一，一根杆件破坏后，整个结构就将因传力路线中断而失效。超静定结构在超负荷状态下工作时，破坏首先发生在赘余杆件上，该杆件在出现塑性铰的过程中消耗一部分地震输入能量。其后果仅仅是降低了结构的超静定次数，整个结构仍不失为一个稳定体系，仍然具有较好的抗震能力。结构的超静定次数愈多，所消耗地震输入能量的就愈多，抗震可靠度也就愈高。就平面结构而言，框架的抗震性能优于排架；刚接框架优于半刚接和铰接框架；多肢并联抗震墙优于多片的单肢抗震墙；交叉腹杆(双系)支撑体系优于单腹杆支撑体系；带支撑框架优于单一框架。

#### (三) 耐震的屈服机制

结构的屈服机制可以划分为两个基本类型：楼层机制(S-机制)和总体机制(O-机制)。楼层机制是指结构在侧力作用下，