

TU 352.104

H52a

北京市建筑设计研究院学术丛书

建筑结构抗震设计与研究

胡庆昌 著



A0914259

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构抗震设计与研究/胡庆昌著. —北京: 中国建筑工程工业出版社, 1999

(北京市建筑设计研究院学术丛书)

ISBN 7-112-03837-5

I. 建… II. 胡… III. 抗震结构-结构设计 IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 11004 号

北京市建筑设计研究院学术丛书

建筑结构抗震设计与研究

胡庆昌 著

*

中国建筑工程出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京二二〇七工厂印刷 (北京阜外南礼士路)

*

开本: 889×1194 毫米 1/16 印张: 30 $\frac{1}{4}$ 字数: 980 千字

1999 年 9 月第一版 1999 年 9 月第一次印刷

定价: 86.00 元

ISBN 7-112-03837-5

TU·2972 (9110)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言

我院——北京市建筑设计研究院伴随共和国诞生、成长。永茂建筑公司设计部是我院前身。1949年10月1日永茂同仁们兴高采烈地打着门旗参加在天安门广场举行的开国大典，标志着我院的成立。永茂当时是由市政府派副秘书长李公侠直接领导并参与筹建的，是北京市第一家国有建筑设计部门。隶属关系历经多次更迭，1953年改称北京市设计院，1989年更名为北京市建筑设计研究院。开始，永茂的技术干部不足10名，随着首都基本建设形势的发展，设计任务的增多，职工队伍不断壮大，人来人往，调进调出，直至现在，在我院工作过的已有近3700人。

北京作为世界历史文化名城又是共和国的首都，是党、政、军首脑机关的所在地，是各国驻华使馆和一些国家领事馆的集中地；国际、国内的政治、经济、文化、外交等各种会议和交流活动十分频繁，首都的特殊地位、特殊作用需要大规模、高水平、高质量的建筑。面对光荣而艰巨的任务，我院五十年来，历届领导和全体职工兢兢业业，艰苦创业，成就卓著。为文化古都、现代城市的建设，我院科技人员勤思奋笔，至今已设计各类建筑12000万平方米，相当于解放时北京市建筑总面积的6倍。

时势造英雄，首都大规模建设的客观要求，赋予我院得天独厚的发展机遇。尤其在八十年代以前，我院是北京市唯一一家以民用建筑为主的大型建筑设计院，承接设计任务的担子很重。为满足工期的紧迫要求，全院职工常常加班加点，整个设计大楼晚上灯火通亮犹如水晶宫；特别是改革开放以来，思想解放，观念更新，使我们在建筑创作和科学技术的发展上面对世界，大开眼界，更取得了突飞猛进的发展。五十年来，我院设计任务规模之大技术之复杂，使我们这支队伍学先进、钻技术、搞科研，在实践中经受锻炼，茁壮成长，造就了一批杰出人才，建立和完善了一整套管理机制。我们有一大批优秀作品屹立于北京、全国乃至世界各地，有一大批优秀科研成果应用于实践。

我院的五十年，是广大职工努力拼搏的五十年，是欣欣向荣、蓬勃发展的五十年，是为首都建设作出重大贡献的五十年，是为行业发展、设计技术进步取得重大成就的五十年，是各专业技术人才辈出的五十年。这一切成就都是在历届中央的许多领导同志的关心、爱护下，在市委、市政府的直接领导下和市各有关部门及社会各界的大力支持和帮助下所取得的。五十年的光辉历程将光荣地载入史册。

在建筑设计领域里，我院很多同志勤勤恳恳工作数十年，有些同志甚至奉献了一辈子。他们努力繁荣建筑创作，探索设计理论，发展专业技术，进行科学研究，在学术水平、专业理论和实践经验上不乏超常的提高和进步，他们中的不少人已成为这个行业的技术专家，学术权威。他们不愧为设计院的骄傲，设计院的栋梁，不愧为首都建设队伍中的中流砥柱。有些同志不仅在北京，以至在全国都不愧为技术上的排头兵，行业的带头人。几十年来，我院一贯有重视人才，重视科研，重视技术信息，重视技术装备，重视管理的优良传统。为了设计院的发展，一直注意为技术人员创造条件，帮助他们把学术上的独到创见，技术上的重大成就，工作实践中的丰富经验进行提炼总结，著书立说，传播社会，留给后人。我们把这些看作是我们这个院，我们这支队伍，我们这些同志奉献给社会的宝贵财富。

在建国五十周年大庆及我院五十华诞即将来到之际，我们以什么样的态度，以什么样的形式来纪念这个节日呢？

经过认真研究确定，投入必要的人力、物力、财力，集中出版一套学术丛书，包括一本院庆

五十周年纪念集和十本学术著作，请一部分专家学者把他们所取得的学术成就，重大的科学技术成果，编撰出版，奉献给社会。这种方式无疑是隆重、简朴和有意义的。因为这不仅是物质财富创造过程中的经验总结，可供借鉴；同时，也是在创造物质财富过程中进行精神财富创造的重要体现，是精神文明建设的一个组成部分；也是科教兴院方针落实的一个重要方面。据不完全统计，我院历年来正式出版的专著、图集数已过百，并编制出版了大量通用图、试用图及各种内部的技术资料。还有我院的学术期刊《建筑创作》，经常不断地发表一些同志的文章作品。近年来陆续出版了一些专著：如《我的建筑创作道路》（张 铸）、《建筑创作的时代精神》（熊明）、《医院建筑》（赵冬日、陈惠华）、《北京亚运建筑》、《丹下健三》（马国馨）、《伸出式舞台剧场设计》（魏大中等）、《剧场建筑声学设计实践》（项端祈）、《实用建筑声学》（项端祈）、《现代办公楼设计》（翁如璧）、《建筑实录》、《舞台表演建筑》、《国外建筑实例汇编》、《栋梁集》、《居住区规划与环境设计》（白德懋）、《恩济里——小区规划理论与实践》（白德懋）等，最近又出版了《赵冬日大师作品选》、《当代中国著名机构优秀建筑作品丛书——北京市建筑设计研究院专辑》、《城市设计学——理论框架·应用纲要》（熊明）、《城市灾害学原理》（金磊）等。现在，为纪念五十周年院庆，又出版11本书，有建筑创作理论的探讨，有个人作品的选编，有对某类建筑设计实践的总结，国际、国内资料的选编，还有近几年我院方案创作的选编，多年来优秀论文的汇编等等，尽量避免与过去已经出版过的内容有过多的交叉和重复。但由于人力、物力、财力所限，出这11本书已属不易，没能组织更多的同志编撰，尚待今后陆续进行。

这次出版的11本书的书目是：

1. 《北京市建筑设计研究院成立50周年纪念集》（1949—1999）
2. 《创作·理性·发展——北京市建筑设计研究院学术论文选集》
3. 《面向未来的建筑——设计方案精选》
4. 《空间与环境——室内设计作品选》
5. 《商业建筑》
6. 《住宅设计50年——北京市建筑设计研究院住宅作品选》
7. 《音乐建筑——音乐·声学·建筑》
8. 《日本建筑论稿》
9. 《传统与创新——何玉如作品选》
10. 《建筑结构抗震设计与研究》
11. 《魏大中建筑画选》

谨以这套丛书，献给伟大的中华人民共和国建国五十周年，献给建院五十周年。

由于编委会人力和水平所限，丛书的组织、编排等各方面肯定存在不少缺点，甚至还会有这样那样的差错，恳请读者批评指正。

北京市建筑设计研究院学术丛书编委会

一九九九年元月

第一篇 建筑结构抗震概念设计

建筑结构的抗震概念设计

1984年第八届世界地震工程会议上，抗震概念设计问题得到了较多的重视，这有助于掌握明确的设计思想，灵活，恰当地运用抗震设计原则，使设计人员不致陷入盲目的计算工作，从而做到比较合理的抗震设计。

一、抗震设计的不确定性

除了地震地面运动的不确定性外，工程结构方面主要有以下诸因素。

1. 结构分析的影响

影响结构自振周期和动力反应的，有以下因素：质量分布不均匀；基础与上部结构共同工作；节点的非刚性转动；偏心、扭转及 $P-\Delta$ 效应；柱轴向变形以及非结构墙体刚度的影响等。节点非刚性转动的影响可达 5% ~ 10%；高层建筑中柱子的轴向变形可使周期加长 15%，加速度反应降低 8%； $P-\Delta$ 效应可使位移增加 10%。至于非结构墙体的影响就更大，是分析时不能忽视的。

2. 材料的影响

混凝土的弹性模量，随着时间的增长可比施工刚完成时降低 50%，在应变增大时还可能继续降低，这意味着周期可能增长 25%，加速度反应减少 10%。

钢筋混凝土构件的惯性矩 I 一般按毛截面计算，这是不正确的。竖向及侧向荷载的不同，都会影响中和轴的位置；柱配筋的不同可使周期相差达到 40% 左右。

3. 阻尼变化的影响

钢筋混凝土的阻尼系数一般为 2%，但当受震松动后可达 20% ~ 30%。而只要阻尼系数由 2% 增为 10%，可使计算周期相差 50% 左右。

4. 基础差异沉降的影响

按一般荷载设计的框架结构，若地震剪力为 $0.1W$ ；基础差异沉降为 1cm 时，可能造成框架在竖向及地震荷载组合后的弯矩达 70% 的误差，而此误差在设计中一般未予考虑。

5. 地基承载力

考虑地震的随机性及短期突然加载的影响，地基承载力的取值往往提高 30% ~ 50%，这种人为的估计也带来设计上的差异。

再加上地面运动可能的误差幅度，可见，在实际工程设计中，对某一局部过分精细的计算是意义不大的。

二、一些专家学者的观点

美国应用技术局 (ATC) R. Sharpe 工程师认为，至今抗震设计尚不能称为一门科学，有很多问题要靠工程判断。在结构布置上应考虑牢固连接或彻底分离，切忌连又连不牢，分又分不清，他还强调设计中必须考虑非结构构件的不利及有利作用。以下根据加州大学 V.V. Bertero 教授的意见对如何做好抗震设计做些介绍：

1. 抗震设计的基本要求是：

$$\left. \begin{array}{l} \text{刚 度} \\ \text{承载力} \\ \text{稳定性} \\ \text{吸能能力} \\ \text{耗能能力} \end{array} \right\} \text{需要的} \leq \left. \begin{array}{l} \text{刚 度} \\ \text{承载力} \\ \text{稳定性} \\ \text{吸能能力} \\ \text{耗能能力} \end{array} \right\} \text{供给的}$$

困难在于如何可靠地确定“需要量”和真实的估计“供给量”。孤立地考虑上述方程两侧的某一项都会导致不合理与不经济的设计。

近年来，用复杂的三维计算程序可进行数学模型的空间动力分析，但在真实的估计建筑物抗震能力方面，则缺少相应的研究。目前估计建筑结构“供给量”的指标，是根据力学理论及伪静力试验求得的经验公式，并不能真实反映地震时的情况。唯一的方法是通过真实建筑物的整体试验分析，但限于试验条件，在这方面的研究是极少的。

目前除必要的计算外，更重要的是概念设计，包括合理的选型及正确的构造措施。

2. 具体设计上应注意：

减轻自重；平立面尽量简单规则对称；承载力、刚度与延性有适当的比例关系；慎重考虑构件节点与支座的连接强度，钢筋混凝土结构要避免过早的剪切、锚固与受压破坏；设置多道防线；合理控制非弹性区域的部位；上部结构与基础在承载力与刚度方面应相互适应。

3. 抗震规范的局限性

各抗震设计规范都是结合本国或本地区的震害或研究经验制定的，有一定的片面性和局限性。规范只是对设计的最低要求，许多问题要设计者结合具体情况去考虑。

例如，不少美国工程师包括 UBC 规范都倾向于采用延性框架而不用框剪或剪力墙结构。其原因可能是 1964 年阿拉斯加地震中有若干栋框剪结构受到严重破坏，并有一栋倒塌。然而仔细分析，破坏的原因是：整体结构布置上存在概念设计的错误；构造设计上存在问题；材料质量上有问题；以及施工质量不良，特别是接缝部位。1967 年加拉加斯地震中框剪结构表现良好。伯克利分校对剪力墙的试验研究说明，当采取必要的构造措施，即使剪应力达到 $15\sqrt{f'_c}$ psi (UBC 为 $10\sqrt{f'_c}$)，仍具有较大的转动及位移延性，特别是当联肢墙的连接梁有较好延性时，更具有“强柱弱梁”的特点。

又如，不是绝对不能采用短柱，注意构造措施同时使剪应力小于 $10.5\sqrt{f'_c}$ psi，可以做到有较好的延性 ($\mu_\Delta \geq 4$)。

对按规范设计又经受地震的建筑进行统计分析得到：按规范设计的结构，其最大抗侧力能力一般为规范值的 2 倍以上，但按规范 (UBC) 设计的建筑仍遭受严重的结构及非结构破坏，并不能保证不倒塌或不破坏；框架结构往往发生一层压一层的倒塌，而有剪力墙通到基础的结构则不会出现上述倒塌现象。

三、结构体系的塑化过程

塑化过程包括两方面问题，一是屈服机制类别，二是机制形成过程中的屈服历程。(图 1)

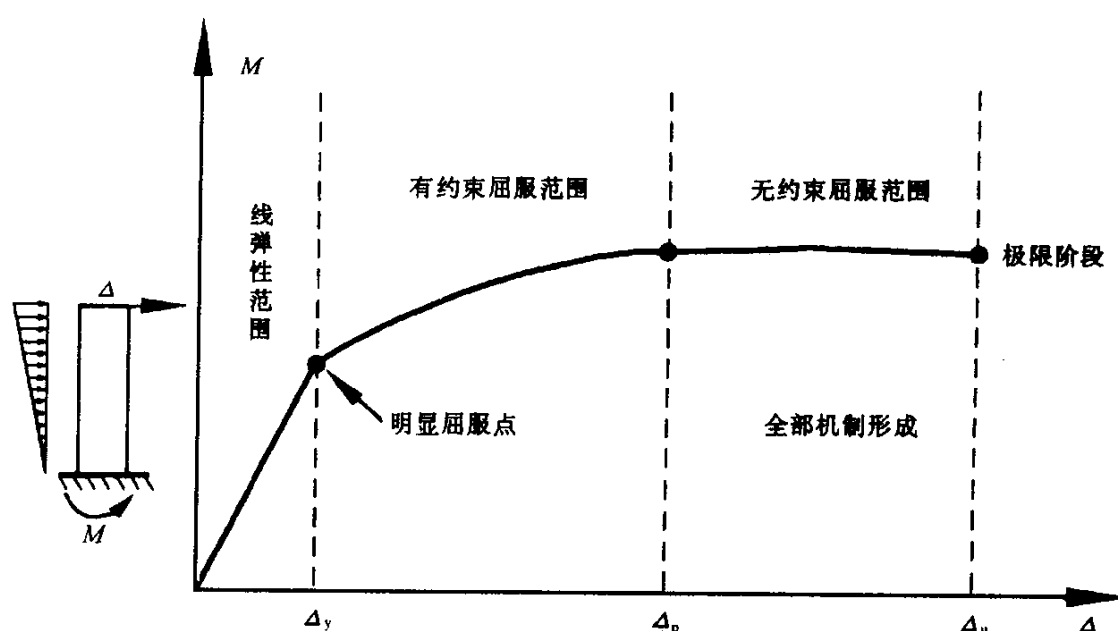


图 1 屈服历程，抗力与位移关系

1. 屈服机制有两种基本类别：S-机制（楼层机制）及 O-机制（总体机制），其他机制均可由这两种机制组合而成。

S-机制（图 2）仅竖向构件屈服，水平构件保持弹性，各层可以独立地沿地面运动方向移动，因此整个结构可有相当于总层数的自由度，但全部机制不一定在各层同时形成。只有这种机制可用剪切梁模型来表达。地面运动对其层间位移，梁和有柱铰框架的延性比是非常敏感的。装配大板结构的墙板沿水平缝滑动即属于此种性能。

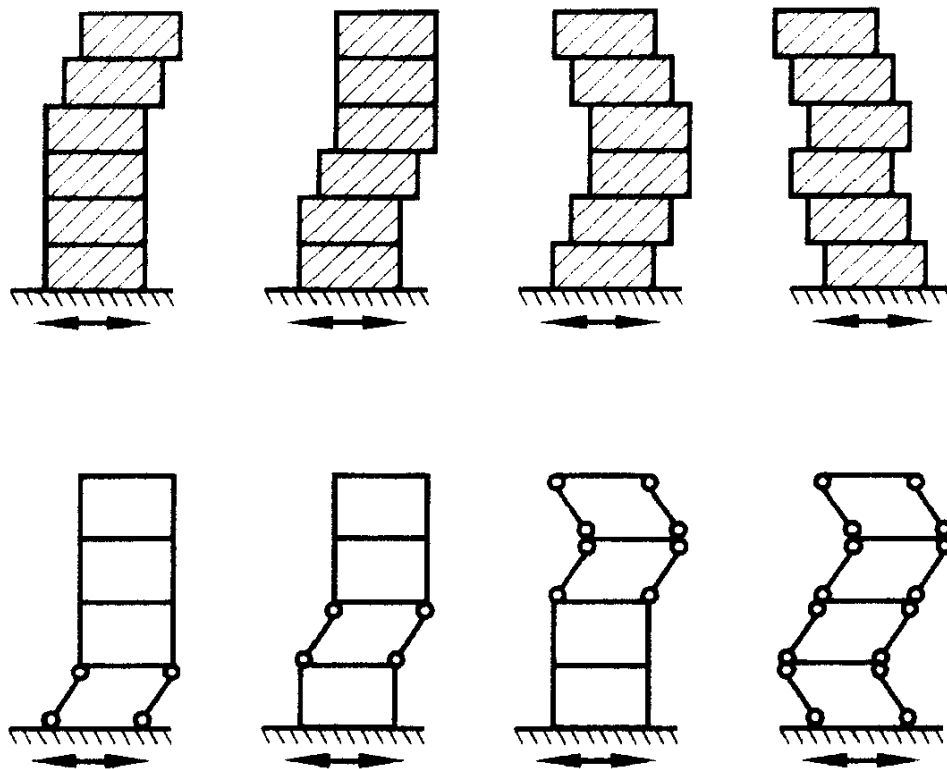


图 2 S-机制

O-机制（图 3）所有水平构件屈服，竖向构件除根部外均处于弹性，整个结构绕根部作刚体转动，在平面内仅有一个自由度。其层间位移分布均匀，沿高度的延性要求可足够精确地用等效静力分析（非弹性）得到，侧力按倒三角形分布，最大顶点位移采用动力分析的数值。这种层间位移及延性分布对于地面运动不敏感。

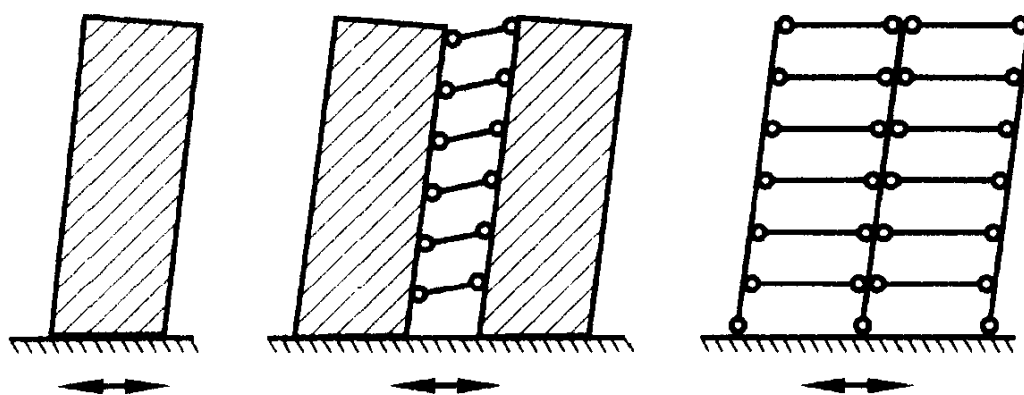


图 3 O-机制

2. 在迫使实现 O-机制的同时，应使顶部、底部及中间的竖向构件在弹性阶段保持得愈久愈好，即主要耗能构件具有明显的约束屈服阶段。

选择主要耗能构件应注意以下条件：它们屈服后的变形受到其他处于弹性阶段的构件所约束；它不是主要承受竖向荷载的构件（低层除外）；有较好的延性和饱满稳定的滞回环；它们应占总刚度有相当明显的一部分，但又有相对柔性。因此，主要耗能构件以水平构件为宜。

正如为实现所期望的构件破坏形态，对不同的破坏形态（如弯曲与剪切）采用不同的安全系数；对结构体系可采用不同的“力的折减系数”来实现所期望的塑化过程（图 4）。利用有约束屈服阶段，可以使延性构件充分发挥耗能而脆性构件仍处于弹性，延性与脆性构件的共同工作，可实现一定的总体延性，这对于中等地震区是可取的。

如图 5 所示, 若 R_y 是主要耗能构件的折减系数, R_p 是其余构件的折减系数, 则 $\Delta_p/\Delta_y = R_y/R_p$ 比值愈大, 有约束屈服过程愈长, 塑化过程表现愈好。从联肢墙及框剪结构的分析可知, Δ_p/Δ_y 一般为 2~4。

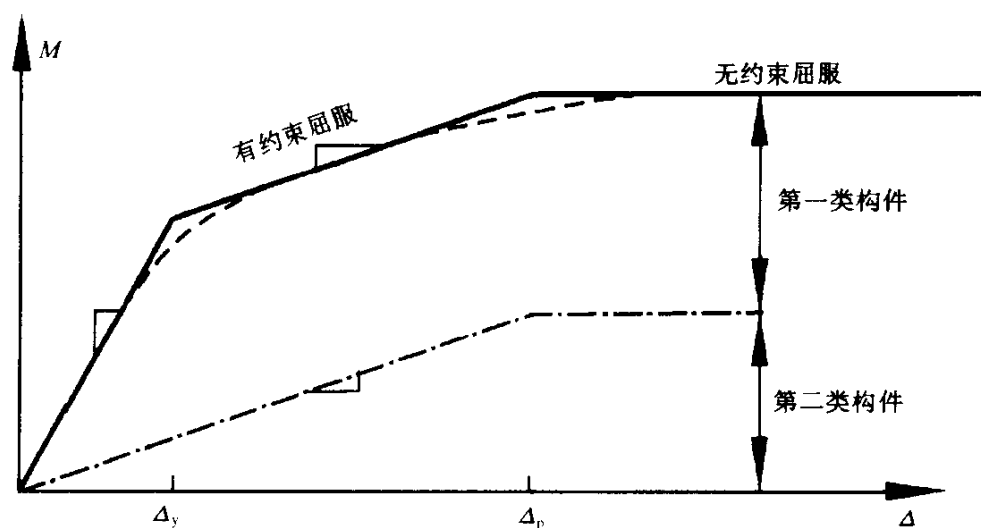


图 4 S-机制

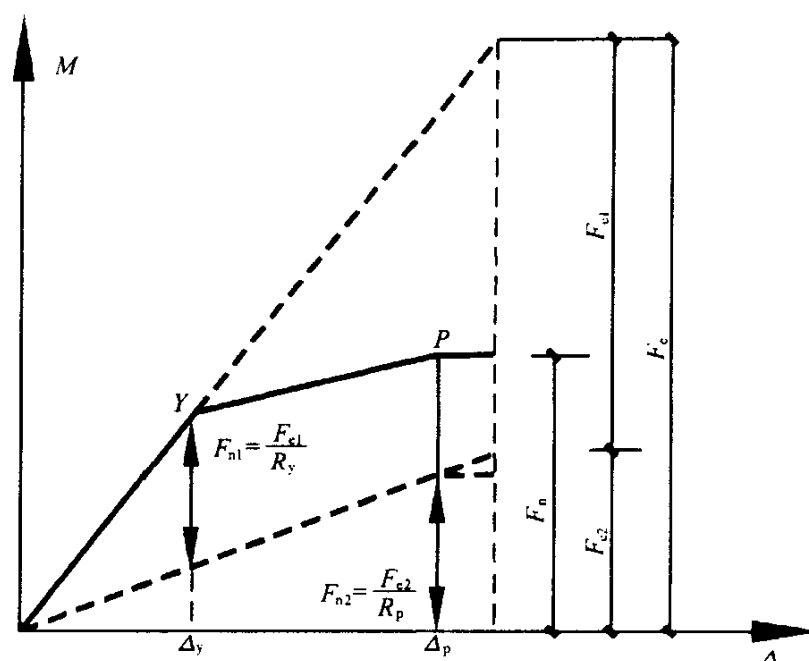


图 5

四、合理考虑承载力与延性的关系

美国 D.W.Symond 工程师介绍了完全按弹性设计的处于美国 III 区（地面加速度为 0.1g）的 48 层钢结构房屋，认为比按延性框架设计更经济合理。他说，高层建筑考虑抗风已具有较大的承载力储备，有时不必过多增加地震作用就能满足弹性设计的要求，这样就可不按延性要求进行截面设计；对联肢墙及偏交钢支撑等有耗能构件的结构，则可按“接近弹性”设计，既可适当降低地震作用，又只须对耗能部位考虑延性要求。

他建议对 UBC 规范的结构系数 K 和 ATC 试行规范的地震作用调整系数 R 做如下修正：
对剪力墙或带支撑框架，不对高度限制， K 值由 1.0 改为 5.0， R 值由 5~5.5 改为 1.0；
对框架承担 25% 以上地震力的框剪结构， K 值由 0.8 改为 3， R 值由 6~8 改为 5/3~11/6；
对具有耗能部位的体系， K 取 2.5， R 取 2~2.4。

（原文发表于 1986 年 3 月《工程抗震》）

钢筋混凝土房屋抗震设计

一、抗震设计概念

1. 20 余年来的震害经验

20 余年以来。世界上一些大城市先后发生了若干次大地震，有的震中就在城区中心。通过对震害分析对高层建筑的破坏规律逐步有了更多的认识，从而推动了科研工作，并取得了抗震设计经验。以下简要介绍在几次大地震中对高层钢筋混凝土房屋分析取得的一些主要经验。

1963 年南斯拉夫司考比地震证明框剪结构抗震性能有明显的优越性，即使是无配筋的剪力墙，墙开裂但框架完好。

1964 年日本新泻地震，对砂土地基液化问题引起重视。地基软，柔性结构破坏严重，刚性建筑整体倾斜。有的倾倒。

1964 年美国阿拉斯加地震，有些十几层高的剪力墙结构遭受破坏，带洞口剪力墙的洞口梁均有破坏，凡是洞口梁破坏的，则墙身完好。首层墙身有斜向裂缝，施工缝处多有水平错动。底层和施工缝处是剪力墙的薄弱部位，而洞口梁的破坏对墙肢起保护作用。

1967 年委内瑞拉加拉加斯地震，对倾覆力矩的作用表现出强烈反应。有些框架柱由于倾覆力矩产生的压力将柱压坏。有一栋十一层旅馆，下边三层为框架，上边为剪力墙，下边三层的柱顶均发生压剪破坏，主要由于轴力大、延性低。震害还说明建筑外型的高宽比较大时（ ≥ 5 ），对倾覆力矩的作用更要注意。

1968 年日本十胜冲地震，许多 2~4 层的钢筋混凝土结构破坏，对剪力墙的配置数量提出了必要壁率的规定。短柱的破坏引起重视，从而开展了对短柱的大量试验研究工作。

1971 年美国圣佛南多地震，首层空旷，刚度突变的结构破坏严重。六层楼的橄榄景医院。一至二层为框架结构，二层以上为剪力墙结构，上下刚度相差十倍，框架柱严重破坏，配有螺旋箍筋的柱表现良好。用坚实材料砌筑的填充墙对框架起不利作用，对柱产生附加轴力，对梁柱节点增加剪力。

1974 年马拿瓜地震，再一次证明双肢剪力墙的洞口梁屈服。对墙肢起保护作用。提出了洞口梁抗弯不要太强但要保证受剪承载力的设计方法。此外还说明剪力墙的设置对减轻非结构构件及设备系统的震害起重要作用。

1975 年日本大分地震，长短柱合用的框架破坏严重。此外抗震墙沿对角线开洞非常不利。

1976 年我国唐山地震又一次证明框剪结构在防止填充墙及建筑装饰破坏比框架结构有明显的优越性。由砖砌填充墙形成的短柱，也遭受严重破坏。柱端、节点核芯、角柱及加腋梁的变截面处是框架结构的主要破坏部位。

1979 年美国加州爱尔生居地震，柱在首层埋入地面处破坏，说明地面的约束作用不能忽视。

1985 年墨西哥城地震，梁、柱截面过小而且超量配筋造成框架倒塌，无梁平板及双向密肋板结构由于冲剪，破坏严重。

1995 年阪神地震再一次证明避免底部软弱层及防止中间层刚度，承载力突变的重要性。

2. 几个重要概念

为了达到抗震要求，钢筋混凝土房屋结构的承载力、刚度、稳定、能量吸收及能量耗散等性能，均应满足地震作用下的要求。

由于以上供给和需要的两方面存在很多不确定因素，而两方面的因素又是互相影响的（例如，地震作用程度会影响构件的设计，而结构构件设计构造的不同又将影响地震对结构

的效应),因此,孤立地考虑任何一方面会导致不合理或不经济的设计。截至目前,很大程度靠判断,而判断能力主要来自以往的震害分析经验和试验研究成果。这种工程判断称之为概念设计,它是抗震设计很重要的一部分。在钢筋混凝土房屋抗震设计中,除了经常提到的合理结构选型和布置以及采取正确的构造措施等原则以外,更要注意以下几个重要概念。

第一,承载力、刚度和延性要适应结构在地震作用下的动力要求,并应均匀连续分布。在一般静力设计中,任何结构部位的超强设计都不会影响结构的安全,但在抗震设计中,某一部分结构设计超强,就可能造成结构的相对薄弱部位。因此在设计中不合理的任意加强以及在施工中以大代小改变配筋,都需要慎重考虑。

第二,采取有效措施防止过早的剪切、锚固和受压等脆性破坏。在这方面,“约束混凝土”是非常重要的措施。

第三,尽可能设置多道抗震防线。强烈地震之后往往伴随多次余震,如只有一道防线,在首次破坏后再遭余震,将会因损伤积累而导致倒塌。适当处理构件的强弱关系,使其在强震作用下形成多道防线,是提高结构抗震性能、避免倒塌的有效措施。

第四,在地震作用下节点的承载力应大于相连构件的承载力。当构件屈服、刚度退化时,节点应能保持承载力和刚度不变。

第五,地基基础的承载力和刚度要与上部结构的承载力和刚度相适应。

第六,合理控制结构的非弹性部位(塑性铰区),实现合理的机制。

第七,结构单元之间应遵守牢固连接或彻底分离的原则。高层建筑宜采取加强连接的方法,而不宜采取分离的方法。

3. 合理的屈服机制及屈服过程

钢筋混凝土房屋的抗震设计要考虑某些结构构件进入非弹性。为了掌握结构的抗震性能,尽可能做到经济合理的设计,必须研究在地震作用下结构的屈服部位、屈服过程及最后形成的屈服机制。

多层或高层钢筋混凝土房屋可以归纳为两类屈服机制,一种为总体机制,另一种为楼层机制。其他机制均可由这两种机制组合而成。

典型的楼层机制表现为在地震作用下仅竖向构件屈服,而横向构件处于弹性。

结构的自由度与层数相同。总体机制则表现为所有横向构件屈服而竖向构件除根部外均处于弹性,总体结构围绕根部作刚体转动,因此从结构总体而言仅有一个自由度。

以框架结构为例,层间位移及延性系数的分布对于楼层机制(柱铰机制)是非常敏感的,塑性变形集中现象随着地面运动的不同可能在不同楼层发生,而总体机制(梁铰机制)则表现完全不同。由于只有一个自由度,层间位移的变化是很均匀的,而且对于地面运动很不敏感,这样就可以减少一部分不确定因素的影响,使设计者掌握较多的主动权。这也是为什么要在设计上采取措施控制结构的屈服部位,促使实现预期理想机制的主要原因。

理想的总体机制也就是最少自由度的机制,一方面防止塑性铰在某些构件上出现,另一方面迫使塑性铰发生在其他次要构件上,同时要尽量推迟塑性铰在某些关键部位的出现,例如框架柱的根部、双肢或多肢剪力墙的根部等。

在地震作用下首先进入屈服的构件称为主要耗能构件,这些构件在屈服进展过程中受约束于其他处于弹性的构件,这一阶段称为有约束屈服阶段。抗震设计就是要设法延长这一阶段以提高结构的抗震性能。这种由弹性阶段到有约束屈服阶段(弹塑性),再到无约束屈服阶段(全塑性)直到最后破坏,是在地震作用下结构表现的全过程。

基于上述要求,选定主要耗能构件要注意以下几点:

第一,主要耗能构件的屈服过程应尽量保持受约束屈服,且具有良好的延性和耗能性能。

第二,为了保证主要耗能构件的延性,应选用承受轴向应力较小的构件,不宜选用承受竖向静荷载的主要构件。为了提高耗能能力,构件应具有相当的刚度。

第三,主要耗能构件耗能部位的破坏形态应当是弯曲破坏而不是剪切破坏,为此在进行

构件承载力设计时，应按不同承载力的要求进行设计。

二、抗震结构体系及其分析

为了做到具有良好抗震性能及经济合理的设计，正确选用结构体系是非常重要的。选定结构体系要考虑多方面的因素，例如使用要求、地震烈度、房屋高度、建筑布置、场地和地基条件等。以下结合几种常用的结构体系进行分析。

1. 框架结构体系

框架结构为双向或多向平面框架组成的空间框架。采用框架结构可获得较大空间，有利于公用建筑设计。按照不同构造，框架结构可区分为刚接延性框架和半刚接框架。框架结构体系可全部采用刚接延性框架，此时梁柱和节点的设计构造有较高的要求。对于低烈度区及场地较好的中等烈度区可采用刚接延性框架与半刚接框架的混合体系。此时，抗侧力及保证侧向刚度主要由刚接延性框架承担，而半刚接框架主要承受竖向荷载，同时考虑结构进入非线性阶段，由于侧移对柱引起附加内力的影响。

半刚接框架，包括板柱体系，可减少梁截面高度，有利于争取楼层空间和简化构造。考虑抗扭作用，这种混合体系的周边应采用有梁刚接框架，同时要求有整体性较好的楼盖。这种体系也不宜用于体型和平面形状复杂、扭转影响较大的情况。

对抗震框架，首先推荐采用现浇混凝土结构。低烈度区以及场地较好的中等烈度区可以采用装配整体式框架结构。平面、体型复杂的框架结构的楼盖宜采用整体浇筑或后浇叠合作法，以保证楼盖刚性和结构的整体性。当采用装配式楼盖时，板与板、板与梁均应有良好的连接。采用条形预制楼板时，可有横向主框架或纵向主框架两种布置方案。由于前者楼盖的整体刚度较好，除特殊情况外一般不推荐后者。

在同一结构单元应尽量避免楼层标高有突变。楼梯间是抗震的不利部位。在强震作用下楼梯结构起支撑作用，从而引起应力集中造成连接部位的破坏。为此可以采用楼梯踏步板上端为铰接，下端为滑动支承的作法，以减小楼梯间的刚度（图1）。

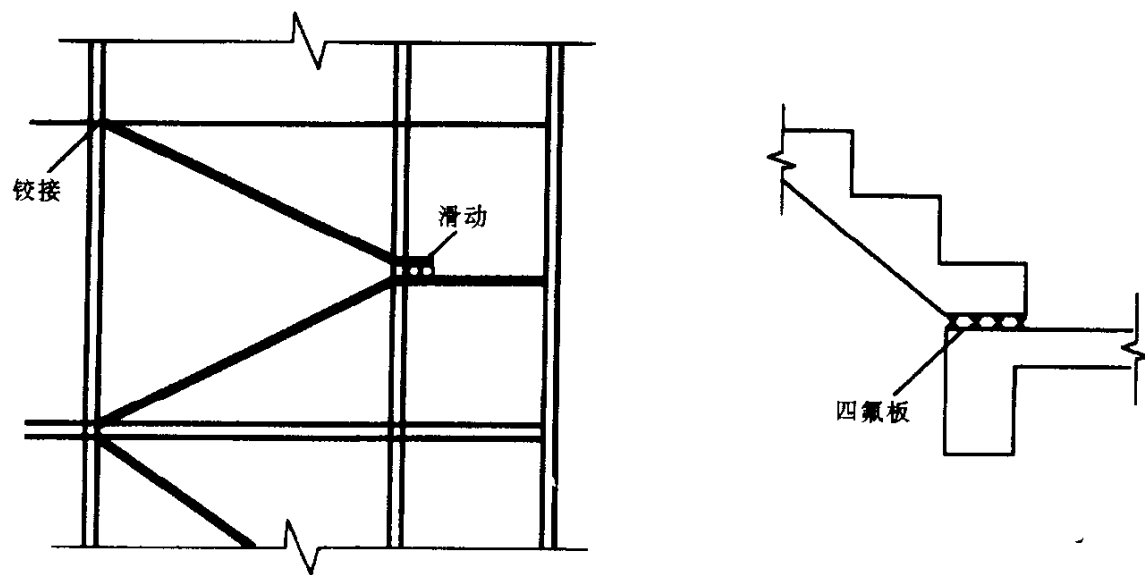


图1 减小楼梯间刚度的一个途径

楼梯休息板宜用柱支承，而不宜用折梁作法。主要承重柱不宜用梁支承。采用钢筋混凝土作为电梯间的围护墙时，电梯间宜对称布置，否则应采取构造措施以减小扭转的不利效应（图2）。局部突出屋面的结构不宜布置在房屋尽端。

用坚实材料砌筑的填充墙对框架结构有不利和有利两方面的影响。填充墙如布置及构造合理，可以减轻地震对框架的作用。中等烈度区及低烈度区层数不多（五至八层）的框架结构可以利用部分实心砖砌填充墙作为抗侧力构件。

填充墙的存在和设置不当，在地震作用下可能给框架结构带来以下不利的影响：

- (1) 不对称布置填充墙造成整体扭转。
- (2) 沿高度填充墙布置不连续形成薄弱层。

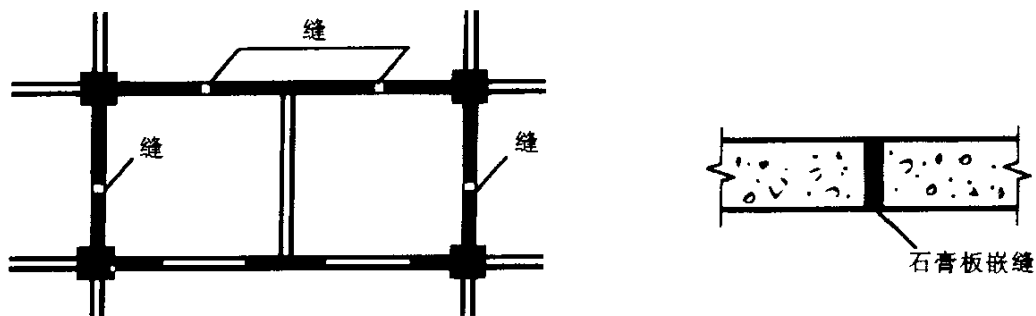


图2 楼梯间墙留竖缝

- (3) 填充墙的斜向支撑作用对梁端、柱端引起附加剪力（图3）。
- (4) 对填充墙的相连柱引起附加轴力。1967年委内瑞拉加拉加斯地震和1971年美国圣费尔南多地震都曾发生填充墙框架柱受压破坏的现象。
- (5) 柱受填充墙的约束而形成短柱破坏（图4）。

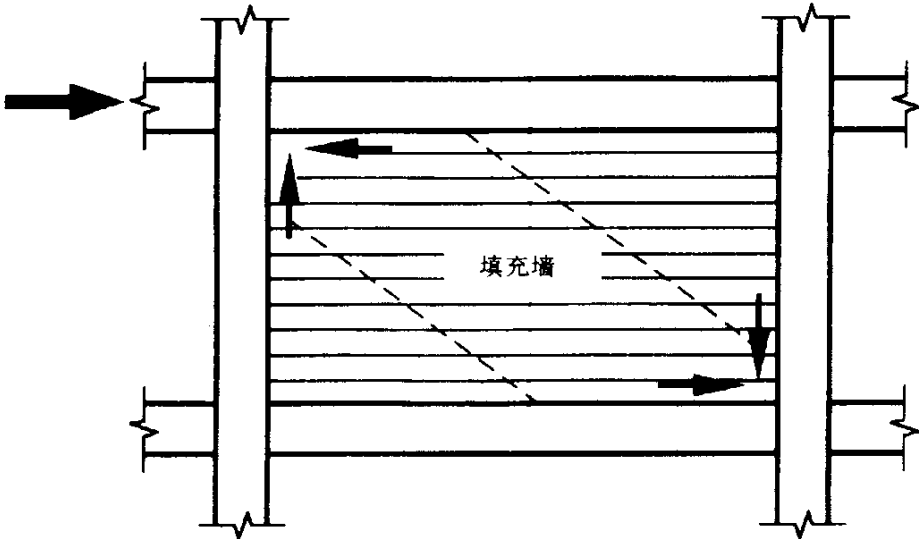


图3

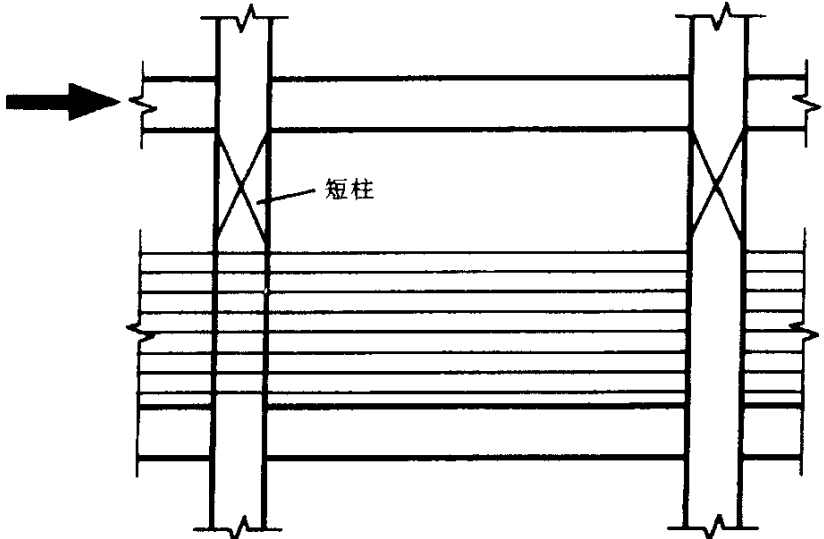


图4

(6) 地震力分配的改变。在地震作用下，由于填充墙参加整体工作，其刚度和强度对框架地震力的分配可能带来较大影响。例如一栋二十层的框架结构在4层以上有砖砌填充墙，4层以下空旷。砌墙前自振周期 $T_1 = 1.96\text{s}$ ，基底剪力 $V_0 = 21 \times 10^6 \text{N}$ 。砌墙后， $T_1 = 1.2\text{s}$ ， $V_0 = 31 \times 10^6 \text{N}$ 。图5表示各层框架承担的地震剪力，可以看出，4层以上填充墙承受大部分地震剪力。4层以下由于地震剪力增大且无填充墙，因此框架承担的地震剪力增大了50%左右。这只是按静力分析，还未考虑由于刚度突变带来的动力效应。

正确的处理填充墙的作用有两种途径；一是利用填充墙有利作用，此时要合理布置并在设计构造上充分考虑其对框架的影响。另一是尽量避免填充墙带来的不利影响，如采用柔性连接的轻质隔墙及柔性连接的外挂墙板等。此时要考虑连接件有足够的承载力和变形能力。当采用钢筋混凝土现浇裙墙时要考虑避免形成短柱的有效措施（图6）。

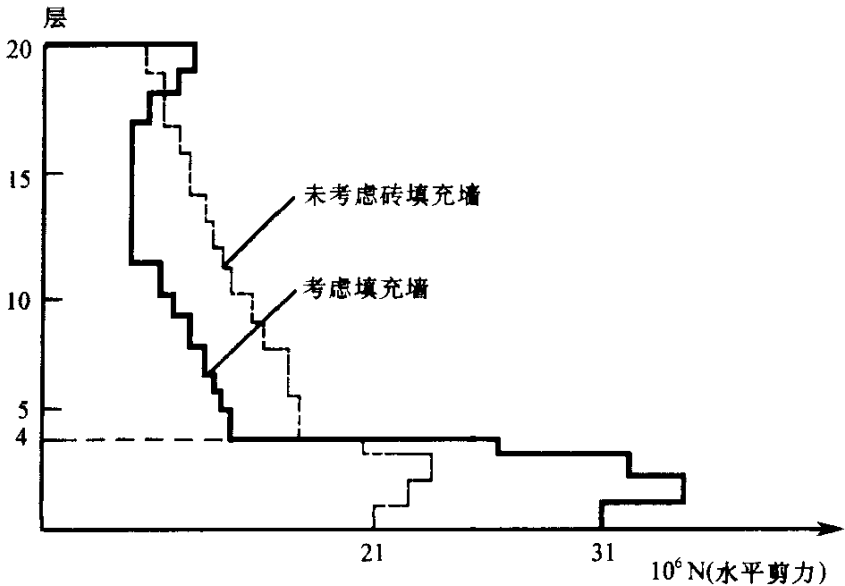


图5

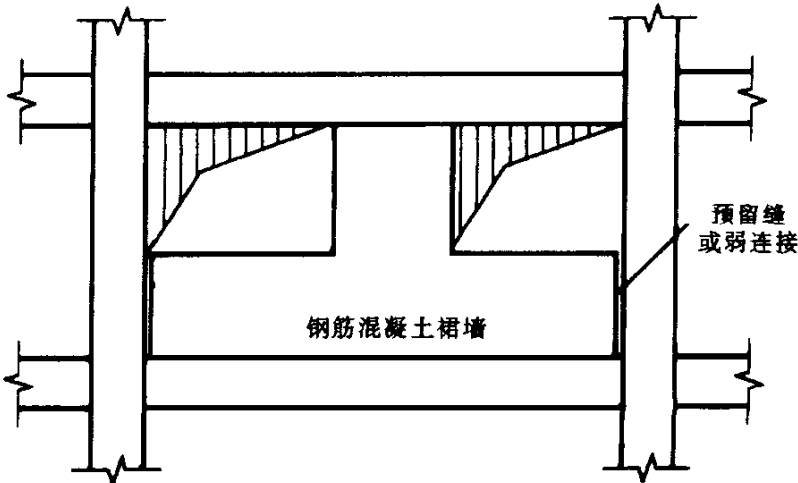


图6

2. 框架剪力墙结构体系

框架剪力墙结构（简称框剪结构）是框架、剪力墙和楼盖协同工作的空间结构体系（图7）。历次大地震的经验证明，框剪结构是一种比较有效的抗震结构体系。1963年南斯拉夫斯科普里地震证明，框剪结构在抗震性能方面有明显的优越性，即使是无配筋的剪力墙，虽有墙体开裂但框架仍保持完好。1974年尼加拉瓜马拿瓜地震中美洲银行大楼和1976年唐山地震中天津友谊宾馆的震害，都以鲜明对比的实例说明框剪结构对减轻非结构构件、建筑装饰及设备系统方面的震害有明显优越性。

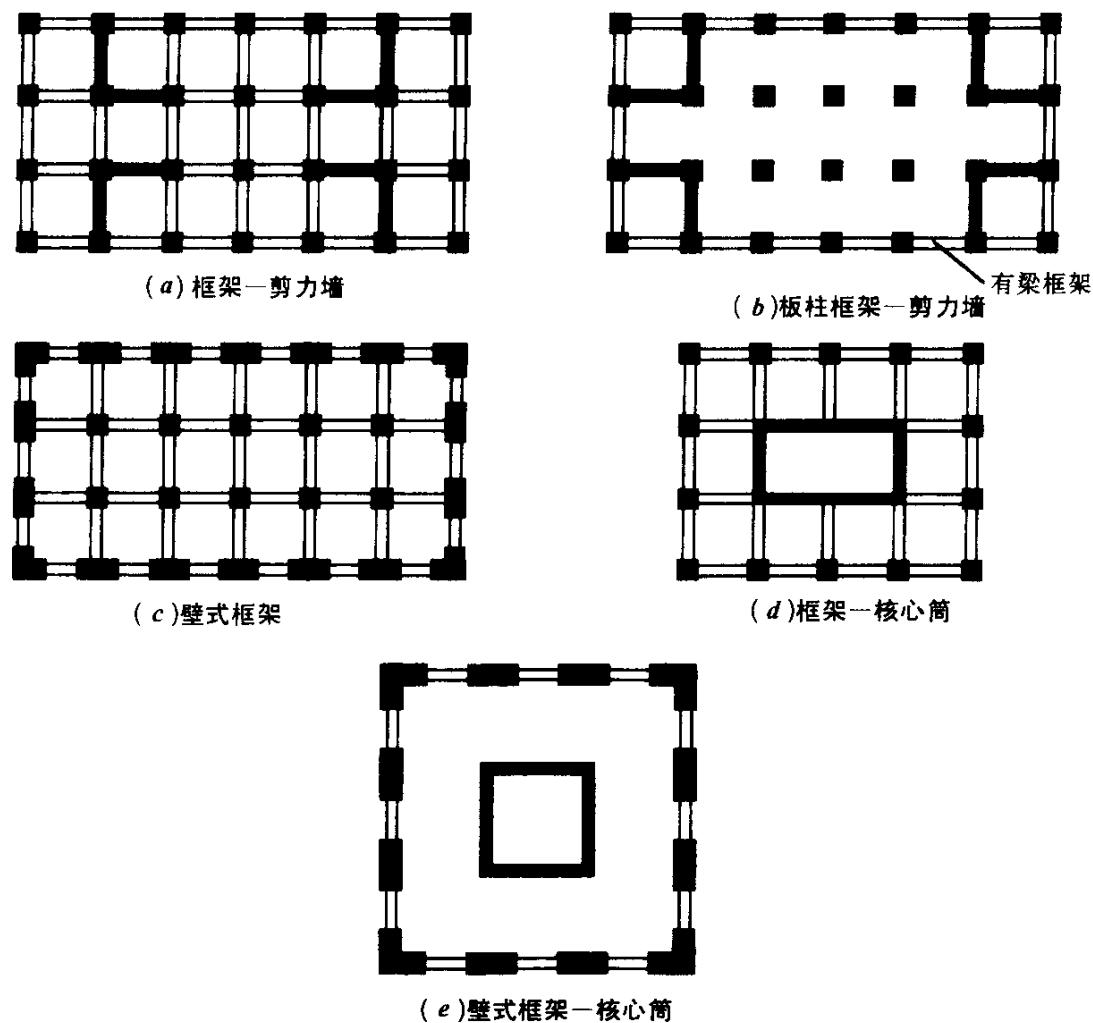


图7

框剪结构体系中的框架宜采用刚接延性框架。剪力墙可以分散布置也可以采用筒式。板柱剪力墙体系不宜用于高烈度区，且必须有足够的剪力墙以保证空间刚度。为了有利于抗扭，沿平面周边必须有梁。在条件允许时采用带扁梁的柱上板带也是一种争取空间，同时有利于抗震的做法。壁式框架的窗台墙与壁柱之间宜采用弱连接，在大震作用下能满足“强柱弱梁”的要求。多层建筑在烈度不高的情况下，可以用钢筋混凝土支撑代替剪力墙，但钢筋混凝土支撑延性较差，不宜用于高层建筑。1985年墨西哥地震有一些16层左右的高层建筑采用钢筋混凝土支撑遭受严重破坏，甚至全部倒塌。

在框剪结构中，楼盖是保证地震作用沿平面传递的重要横向构件，因此必须有足够的刚度和承载力。楼盖的平面内变形将影响楼层地震力在各抗侧力构件之间的分配，且主要决定于地震作用的程度和抗震墙之间楼盖的长宽比。框剪结构的平面立面比较规则时，楼盖按绝对刚性假定与按实际刚度进行地震作用的计算结果差别很小（图8）。

当沿房屋高度剪力墙刚度有突变时，按绝对刚性与按实际刚度的楼盖进行地震作用分析，将有较大的差异（图9）。

筒式框剪结构体系的楼盖可以是梁板，也可以是无梁平板。层数较多时，在低烈度区为了增强筒式框剪体系的空间抗弯刚度，可以采取设刚性层的做法，也就是利用刚性桁架或墙形大梁连接内筒与外围框架这种刚性层可位于顶层及若干其他楼层部位，一般可结合设备层或避难层位置设置。在侧力作用下，刚性楼层对内筒转动起约束作用，从而提高筒体的抗弯刚度并减小侧移，侧移的减小程度与筒体、刚性层和柱的刚度有关，也和刚性层沿高度分布

的位置有关。刚性层沿高度一般为两处，最多不超过 4 处（图 10）。

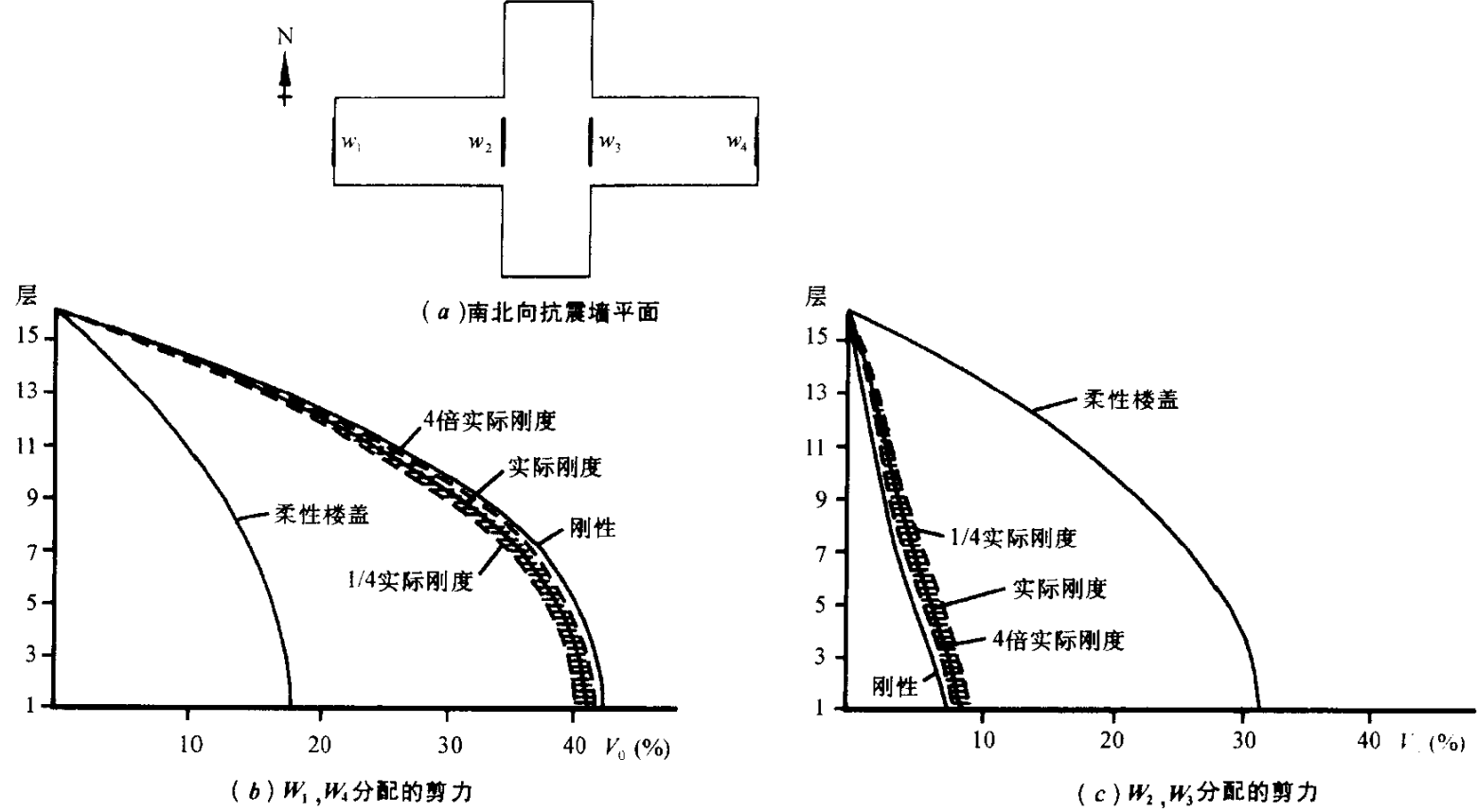


图 8 楼盖刚度对抗震墙地震作用分配的影响

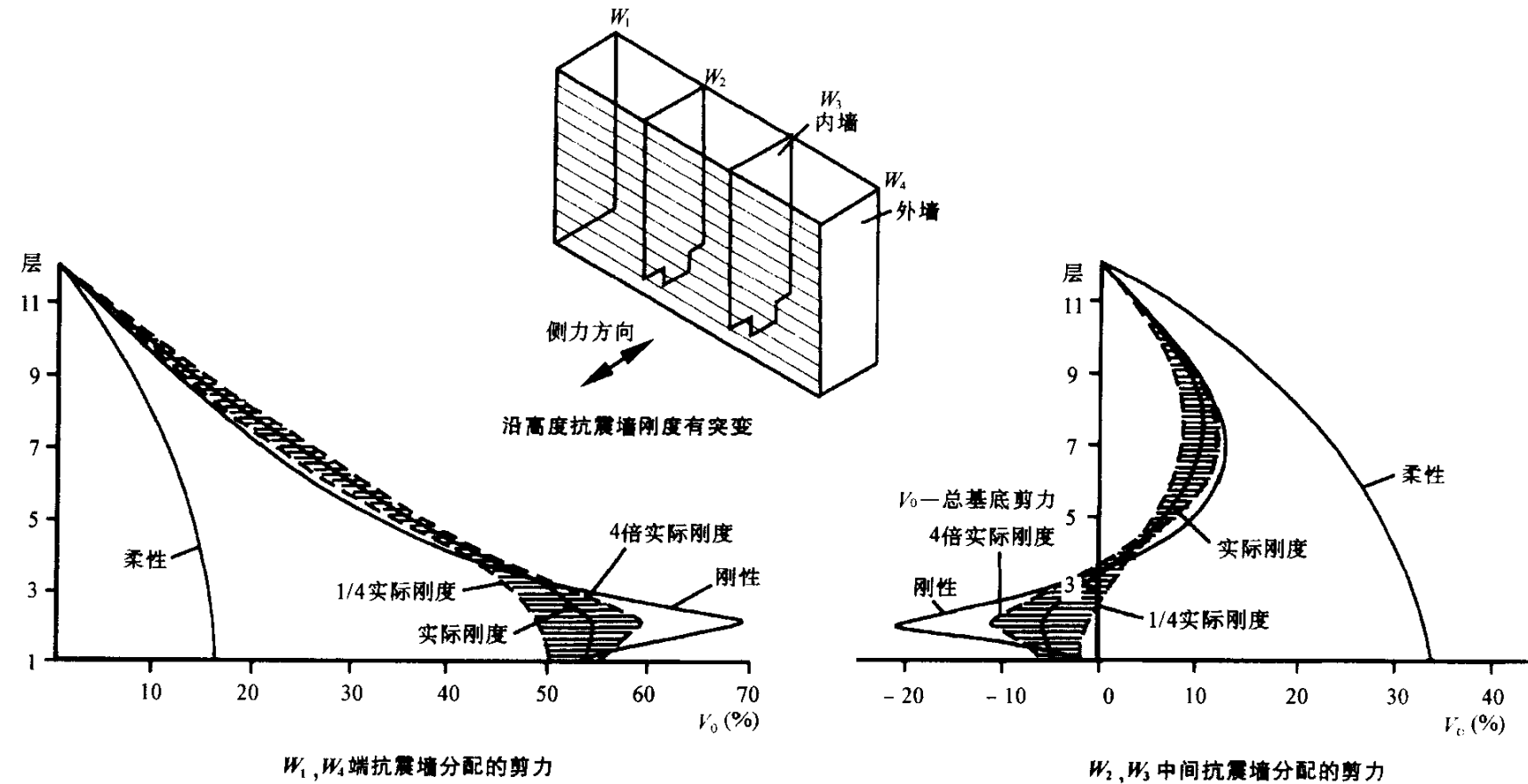


图 9

3. 剪力墙结构体系

剪力墙结构施工简单，无突出墙面的梁柱，因此可以降低建筑层高，充分利用空间，特别适合于多层及高层居住建筑。剪力墙可采用大模板或滑模施工方法，外墙亦可采用装配整体式混凝土墙板。当建筑平面较长，高度较高，采用现浇混凝土外墙时，为了减少温度变形的影响，宜采取墙外保温隔热措施。

以往认为，剪力墙是一种脆性结构，故在抗震设计方面对剪力墙结构采取种种保守的考虑，如高度的限制、反映结构延性的结构系数的取值以及截面平均剪应力的限制等。最近

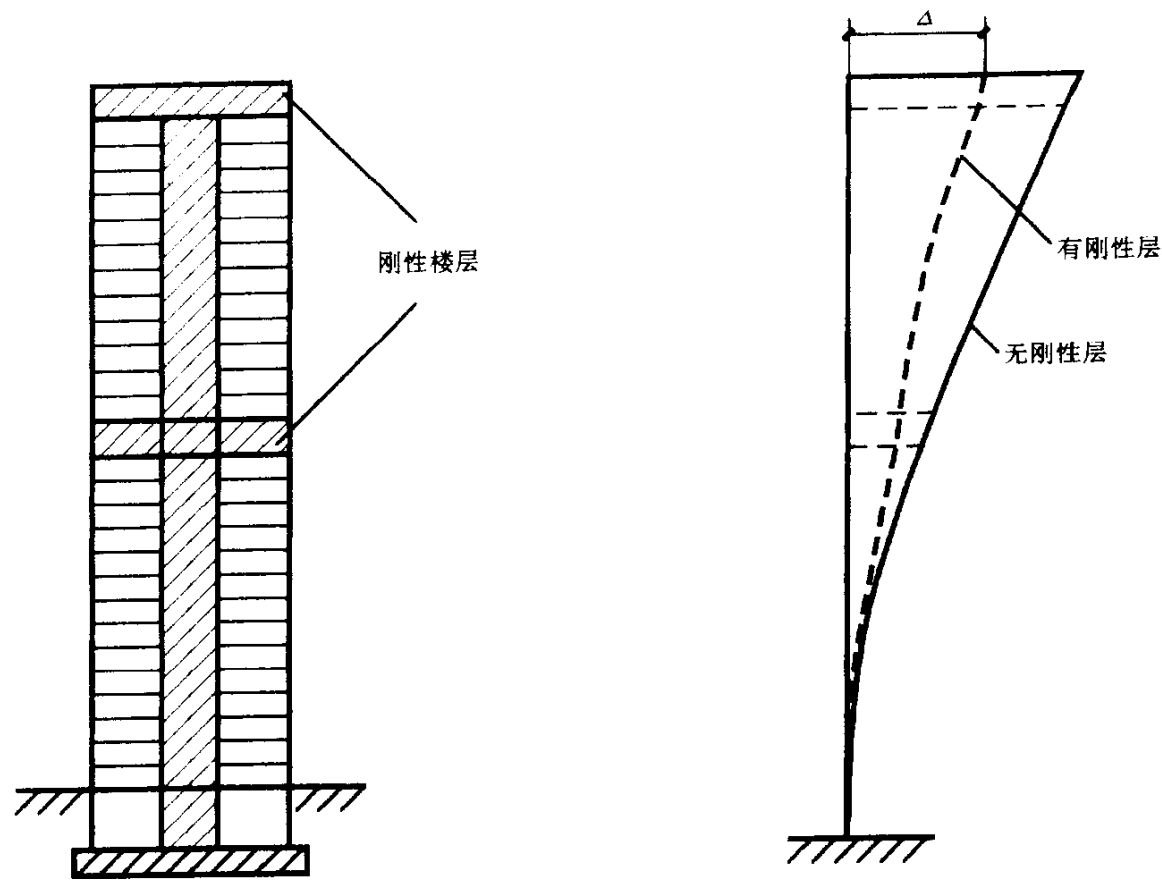


图 10

20 年来，由于震害经验的积累以及试验研究工作的进展，对剪力墙结构的抗震设计方法和提高抗震性能的有效措施方面有了很大进步，同其他结构体系相比，剪力墙结构具有较大的受弯和受剪承载力，延性剪力墙更具有耗能能力强和震后容易修复等优点。因此近年来已大量用于高层抗震结构。

根据剪力墙的外形，墙段高宽比 ≤ 1.5 属于低剪力墙，高宽比大于 4.5 属于高剪力墙，在两者之间属于中等高度剪力墙。高剪力墙的破坏形态为弯剪破坏，因此可按延性剪力墙进行设计。低剪力墙的破坏形态为剪切破坏，因此要求有足够的受剪承载力。当然低剪力墙和中等高度剪力墙亦可利用结构洞口变为高剪力墙的墙肢（图 11）。

在多层及高层建筑中，为了提高剪力墙结构的变形能力，应结合洞口设置弱连梁将一道较长的剪力墙分成较均匀的若干墙段，使每个墙段的高宽比不小于 2。在地震作用下当连梁的总约束弯矩不大于该墙段地震倾覆力矩的 20% 时，这些连梁称为弱连梁（图 12）。

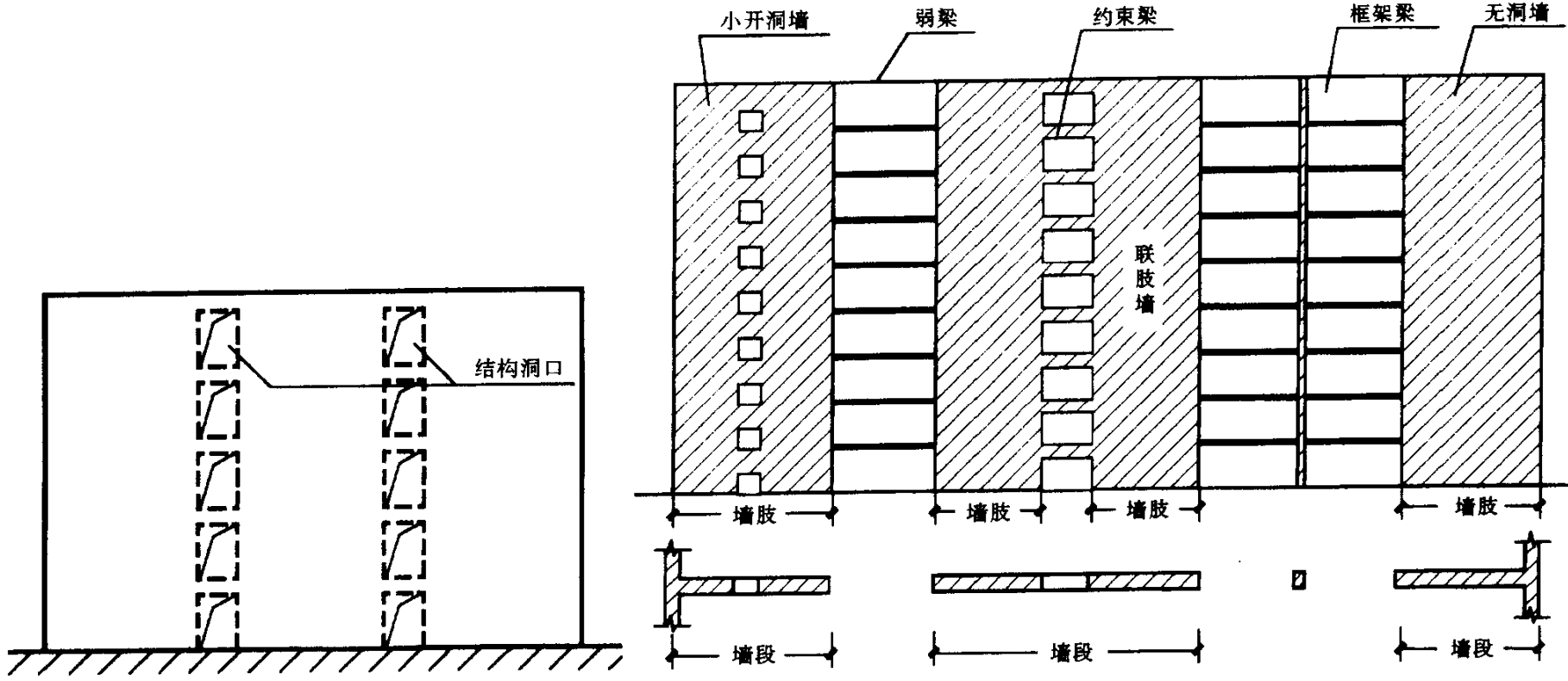


图 11 利用结构洞口改变剪力墙性能

图 12 剪力墙的墙段及墙肢示意图