

# 高层建筑和高耸结构抗震概念设计\*

曹 宏      李秋胜      李桂青

(武汉工业大学工程结构抗震研究所)

**摘 要:** 本文简要介绍高层建筑和高耸结构抗震设计的复杂性、抗震设计的几个重要概念、强震中不倒塌结构的概念分析以及控制结构的概念。

**关键词:** 概念设计, 抗震, 高层建筑, 高耸结构

**中国图书分类号:** TU972·4

抗震概念设计是根据有关抗震的一些重要概念进行设计, 包括结构方案的选择、构件选型、构件断面及配筋设计等。

七十年代以来, 人们在总结大地震灾害的基础上提出这样的看法: 对建筑和结构的抗震设计而言, “概念设计”比“计算设计”更为重要。原因是由于地震作用、结构体系、地基土影响等的复杂性, 以及结构计算模型与实际情况的差异, 使得“计算设计”很难有效地控制结构在地震作用下的薄弱环节。因此, 不能完全依赖“计算”, 而应主要依靠正确的概念。

我国抗震新规范 (GBJ11-89) 第二章的主要内容, 就是关于抗震概念、概念设计的重要性、措施、规定等。

## 1 抗震设计的复杂性

### 1.1 地面运动的复杂性

地面运动的复杂性表现为多向性与随机性。所谓多向性是指地面运动是复杂的空间运动, 可以分解为六个分量, 即 3 个平动分量与 3 个转动分量。但目前还没有转动分量的实测资料, 故在抗震计算设计中无法计及这个因素, 而只能依靠概念设计予以适当考虑。

至于地面运动的随机性, 是指它的发生在时间、空间及其随时间的变化规律等都不能预先确知, 而且是一个多维非平稳随机函数。

### 1.2 地震烈度的复杂性

地震烈度的复杂性表现为随机性与模糊性。它的随机性是指地震的强烈程度、它对地表及建筑物的破坏程度是不能预先知道的; 它的模糊性是指评价地震烈度的各种指标是模糊量。如所知, 我国抗震规范中的烈度是离散量, 相差一度将导致地震作用相差一倍。可

\* 收稿日期: 1991.03.18

见正确评定地震烈度以及建立关于地震烈度复杂性的概念是十分重要的。

### 1.3 震中距影响的复杂性

如所知,一次地震只有一个震级,而烈度则随地区而异,可以有若干个,这主要取决于震中距。一般说来,震中距越大,烈度则越低,即烈度随震中距的增大而衰减。

抗震新规范(GBJ11-89)规定烈度衰减了二度及二度以上的地震称为“远震”,其余则为“近震”。同一烈度的近震与远震的地面运动及其对建筑物的破坏作用可能有很大差异。一般说来,远震的地面运动的卓越周期要长一些,对柔性建筑物的破坏作用要大一些,甚至有可能大一倍或更多。

### 1.4 地基土影响的复杂性

地基土对结构地震反应的影响是复杂的,包括:

#### 1.4.1 地基失效

1.4.2 由基岩输入的地震波通过土层传播,可以使输入波的振幅及频率特性有很大改变,从而导致结构基底剪力的差异可达数倍之多。

例如,1957年美国旧金山地震时,在城内4英里长的若干地点进行过地面运动的记录。根据所记录的地面运动,对一栋典型的10层建筑计算过它们于记录地点的最大基底剪力。其结果表明:对于同一建筑物,基底剪力从最小的200千磅(建筑物位于基岩上)变化到900千磅(建筑物位于300英尺厚的粘土和砂土上),其差异达4.5倍。

高层建筑和高耸结构的基本自振周期较长,因而选择坚硬地基可大大减轻其地震作用。

1.4.3 地基变形使得地基各点的运动产生差异,这对于平面尺寸较大的高层建筑来说,是一个不容忽视的因素。

1.4.4 地基变形产生土和结构体系的相互作用,甚至导致邻近结构的相互作用。当场地土很软时,这些作用有显著的影响。

1.4.5 考虑短期突然加载对地基承载能力的影响,往往对地耐力的提高作出人为的估计(一般是30~50%),也给抗震设计带来差异。

### 1.5 结构体系的复杂性

主要包括:

1.5.1 结构是一个复杂的空间体系,特别是高层建筑,一般是多道设防。例如,框架-剪力墙体系,在地震作用下剪力墙一般将最先遭受破坏,是第一道设防;在剪力墙破坏前,框架所受地震作用不会很大,而当剪力墙破坏后,它就成了主要抗震体系了,因而框架是第二道设防。但高耸结构,如烟囱、水塔等只有一道防线,而且赘余约束不多,局部破坏也可能导致这类结构整体的倒毁。这种结构体系与构造形式的区别,属于抗震设计中的重要概念。

还应指出,对高层建筑而言,特别是10层左右或以下的建筑,非承重结构构件的影响是很大的,但在计算简图中却很难如实考虑。

1.5.2 结构的非线性。由于设计中所考虑的强烈地震是多年一遇,甚至是百年一遇的随机荷载,它的强度很大,而持续的时间又很短,只不过是几秒、几十秒或几分钟,因而允许结构在遭受基本烈度的地震(第二水准烈度)时发生塑性变形,而要求在遭受罕遇

地震(第三水准烈度)时不倒塌。

考虑结构塑性变形的设计比按强度设计的方法复杂得多。

1.5.3 结构各部件间的节点或连接质量的好坏,往往对结构是否破坏起决定性作用,但在计算中却得不到反映,或难以确切地反映。

1.5.4 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。

钢筋混凝土截面惯性矩,一般按毛面积计算,这是不符合实际情况的。其次,竖向及侧向荷载的变化,均将影响中和轴的位置。柱配筋的不同,也可使结构周期有一定差异。

1.5.5 阻尼变化的影响。钢筋混凝土结构的阻尼比一般为1%~3%,与结构类型有关。一般说来,高层建筑和高耸结构的阻尼比一般建筑的阻尼要小。大量实测表明,钢筋混凝土烟囱类的高耸结构的阻尼比一般为1%左右;钢筋混凝土空框架结构的阻尼比为2%左右;框架建筑物的阻尼比为3%左右;高层钢筋混凝土建筑的阻尼比为2%~3%;而一般砖混建筑的阻尼比为4%~5%。但当受震松动或开裂后,其阻尼比可增加数倍。而阻尼变化对不同结构地震反应的影响又是不同的,这主要取决于结构自振周期与地基土卓越周期之差。如所知,阻尼在共振区的影响是很大的。

1.5.6 基础差异沉降的影响。按一般荷载设计的框架结构,若地震力为0.1W(即建筑物重量的10%),基础差异沉降为1厘米时,可能造成框架在竖向荷载及地震荷载作用下的弯矩达70%的误差,而此误差在设计中一般未予考虑。

从上述可以看出,由于某些因素的随机性和可能的误差幅度,可以导致计算上的差异达数倍之多。因而若只依靠计算设计,有可能导致严重的后果。

## 2 抗震设计中的几个重要概念

### 2.1 地震作用的基本概念

地震对建筑物的作用,表现为建筑产生动力反应,如内力、变形、能量反应等。由于地面运动的复杂性,因而地震作用也是复杂的。特别是地震作用不仅与地面运动有关,而且还与结构的动力特性有关。由于结构体系的复杂性,因而地震作用就更加复杂了。

地震作用不同于一般的荷载。一般动荷载对结构产生的效应,虽然也与结构动力特性有关,但荷载本身,即其大小和随时间变化的规律,是与结构的动力特性无关的。而地震作用则不然,它本身也与结构的特性有密切关系。事实上,地震作用是一种惯性荷载,它首先与结构的重量有关。一般说来,结构重量越大,地震作用越大。但这也并非是一种简单的线性关系,有时适当增加结构重量,反而会减轻地震效应。

### 2.2 在地震作用下结构破坏的宏观概念

从多次地震灾害的情况来看,各类结构遭受的破坏千差万别,原因复杂,因素很多。概括地说,主要原因是由于强度不足、延性不够、联接不牢、整体性不强、地基失效所引起的。

对广大的设计工作者来说,“强度”的概念是很强的,是很受重视的。但变形的概念、延性的概念却还没有受到普遍的重视。事实上,保证主要结构的延性,是防止整个建筑物

在意外大震或罕遇大震下倒塌的关键。因为延性好,可以抑制地震作用。如果联接牢固,整体性强,还可以使地震作用重分配,不致被各个击破,不致因局部破坏而导致整体倒塌。

应当指出,结构延性是用延伸率表度量的。但结构的延伸率,至今尚无统一的定义。文献[1]建议按三个层次来考虑,即节点延伸率,用节点变形来确定;层间延伸率,以层间变形来确定;结构整体延伸率,以顶点变形来确定。

至于地基失效使建筑物造成破坏的问题,近三十年来已被日益重视。所谓地基失效,主要有两种情况:一是饱和砂土受到强烈振动时,砂处于离散状态,如同液体,丧失承载能力;二是软弱地基、严重不均匀地基在地震时产生过大变形,严重沉降,特别是不均匀沉降,以及地基滑移和地裂、地陷等情况。毫无疑问,处于这二种情况下的建筑物必然发生沉陷、倾斜直至倒塌。显然,这种震害是不可能靠加强上部结构的办法来解决的,而应该选择对建筑物有利的地段为建筑场地。如确难避开可液化的或软弱地基,则应着重在地基与基础方面采取抗震措施。同时也要适当增强上部结构的整体性。

应该指出,由于地震的复杂性及不确定性,单靠提高结构强度来抗御意外地震是不经济、也是不现实的,甚至是不可能的。

## 2.3 高层建筑和高耸结构震害的特点

2.3.1 软弱地基上的高层建筑和高耸结构的震害较重,设有桩基时其震害有明显减轻。

2.3.2 高层剪力墙房屋的震害,一般为上轻下重,剪力墙的裂缝多发生在下层,表现为斜裂缝;剪力墙洞口及连梁易受破坏;连梁的破坏可起到保护墙肢的作用;剪力墙布置不对称时将加重震害。

2.3.3 高耸结构的破坏特征和破坏形式是多种多样的。砖烟囱大致分为水平裂缝、水平断裂、斜裂缝、交叉裂缝、斜断裂、竖缝、扭转错位、酥松以及塌落等形式。钢筋混凝土烟囱主要震害为裂缝、倾斜、弯曲以致折断、坠落等形式。钢塔结构的震害较轻。

高烟囱的破坏形式与地震烈度有关,斜裂缝、交叉裂缝一般常见于低烈度区,而水平裂缝、错位、扭转、掉头则常见于高烈度区,且烈度越高,烟囱破坏的高度就越低。7度区大都在顶部1~4米范围内;8度区约在顶部 $1/3 \sim 1/2$ 高度范围内;9度(及以上)区一般在中部。

## 2.4 两种屈服机制

框架结构有两种基本屈服机制。一种是楼层机制(S-机制),其特点是强梁弱柱,塑性铰只发生柱端;另一种是总体机制(O-机制),其特点是强柱弱梁,塑性铰只发生梁端及底层柱根。其余屈服机制均可由这两种机制组合而成。

试验研究及理论分析表明,总体机制可以耗散较多能量,可以避免或延缓倒塌。因此,对于高层框架结构来说,宜将结构设计成强柱弱梁体系,主要耗能构件应为水平构件。

选择主要耗能构件时还应注意以下条件:它们屈服后的变形应受到其他处于弹性阶段的构件所约束;有较好的延性和饱满稳定的滞回环;耗能构件的刚度应占总刚度的相当明显的一部分,但又有相对柔性;能使整体结构保持一定的约束屈服阶段。这样,可以使延

性构件充分发挥耗能作用,而脆性构件则仍处于弹性阶段。延性与脆性构件的共同工作,可实现一定的总体延性。这对于七、八度地震区是一种较为适宜的方案。

### 2.5 抗震设计的基本原则

综上所述,高层建筑和高耸结构抗震设计的基本原则可以概括为:选择坚硬地基;基础适当加强;平面立面规则、对称;质量、刚度均匀分布,质心、刚心重合;结构布局合理,设置多道抗震防线,避免薄弱环节,抗侧力构件基本正交;强度、刚度与延性比例适当;合理选择屈服机制和耗能构件,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;合理控制非弹性区域的部位;建筑物重量要轻,楼层要矮;楼板的平面刚度大,结构整体性强。

在高层建筑设计中强调平、立面应力求规则、对称的主要原因是:可以避免地震作用与地震应力的集中;避免或减小扭转作用;计算简图和传力路线比较明确。当受场地影响或由于建筑功能等原因不能采用简单、对称的外形时,则宜利用抗震缝、沉降缝等将其分割为若干规则体。

在高层建筑设计中,还有一个原则问题:是刚一点好,还是柔一点好?这是争论了几十年的问题。单从地震作用来看,当然是结构越柔,所受地震作用越小。但为了避免或减轻非结构构件,特别是各种建筑装饰遭受破坏,以及为了满足建筑功能的某些要求,结构不能太柔,其变形不可太大。

## 3 唐山地震中不倒塌结构的概念分析

1976年唐山大地震时,唐山市的烈度高达10度、11度,绝大部分建筑物均遭严重破坏或倒塌。但仍有部分框架结构没有倒塌,甚至有少量的脆弱结构没有倒塌。这些未倒塌的脆弱结构大致有以下几种:

### 3.1 建于基岩上的建筑

在历次地震中,基岩上的柔性建筑一般都幸免破坏,或破坏较轻,这主要是由于基岩上的卓越周期远小于柔性建筑的基本周期的原因;但基岩上的刚性建筑的破坏也常常(并非每次地震)比较弱地基或较深复盖层上的刚性建筑的破坏要轻一些,其原因就比较复杂了。除了基岩上的土层对地面运动可能有较大作用外,还与非坚硬地基的非均匀的变形有密切关系。

### 3.2 地基液化区的砖房

一般说来,地基液化区对抗震建筑是不利的,为什么反而在唐山地震中表现出某种有利作用呢?其原因是液化区不利之处是易于引起建筑物整体倒塌;而有利之处是对地震作用可以起隔离作用,因为地基液化后难以传播剪切地震波。

### 3.3 基底有破坏性滑动的砖房

若建筑物的基底形成了可滑动的通缝,则相当于形成了一个摩擦控制隔离层,亦可降低地震作用。

### 3.4 设有构造柱的砖房

如所知,构造柱的主要作用是可以限制墙体裂缝的发展,提高建筑物的变形能力和加

强整体性, 是避免或延缓建筑物倒塌的重要措施之一。

#### 4 结构控制与控制结构

高层建筑和高耸结构随着其高度的增加, 刚度递减很快, 为满足正常使用要求, 减轻震害, 特别是减轻非结构构件和装饰物的损坏, 按传统设计方法, 必须大大增加主体结构的刚度和抗侧力构件的断面, 这样, 又使建筑物重量相应增加并导致地震作用加大, 且基础设计将会遇到很大困难, 在经济上也是不合算的。为解决这些矛盾, 近年来发展了一门新兴学科——结构控制理论。

结构控制分为主动控制与被动控制两大类。主动控制需一套现代控制设施, 包括传感器、计算机、驱动设备和外部能源。被动控制则不需外部能源的控制措施, 详见[4]。

值得指出, 合理设计结构刚度、质量分布和配筋, 设置某些构造缝、人工塑性铰、薄弱层, 也可以达到某种控制目的; 适当调整顶部突出物的质量、刚度, 增强其延性, 或利用顶部水箱作为调谐质量器 (称为 TMD), 也可以降低主体结构的地震反应。这属于“控制结构”研究的对象。

“控制结构”的概念是[5]首次提出的, 是一种有控制措施的结构工程学。它根据给定的控制条件, 将控制措施和结构作为一个整体进行优化设计。按照控制结构理论设计的结构, 不仅可以控制其变形在给定的范围内, 而且可以控制结构的破坏模式、塑性铰出现的部位和顺序等。“结构控制”则是从结构的观点来研究控制措施的。

“结构控制”与“控制结构”是工程结构的一种新的设计理论<sup>〔5〕</sup>。

#### 参 考 文 献

- (1) 李桂青著. 抗震结构计算理论和方法. 地震出版社, 1985
- (2) 陈骥. 唐山地震中的倒塌现象和结构的抗震概念分析. 工程抗震, No.2, 1986
- (3) 胡庆昌. 建筑结构的抗震概念设计. 工程抗震, No.1, 1986
- (4) 李桂青, 邹祖军. 结构振动控制述评. 地震工程与工程振动, No.1, 1987
- (5) 李桂青. 结构控制与控制结构. 结构工程科学的未来. 清华大学出版社, 1988

### Ascismic Conceptual Design of Tall Buildings and High-Rise Structures

Cao Hong Li Qiusheng Li Guiqing

(Institute of Ascismic Engineering Structures, Wuhan University of Technology)

**Abstract:** The complexity of ascismic conceptual design of tall buildings and high-rise structures, several important concepts of ascismic design, conceptual analysis of non-collapse structures under an strong earthquake and the concepts of a controlling structure are briefly introduced in this paper.

**Keywords:** conceptual design, earthquake resisting, high-rise building, highrise structure