

# 结构工程在地震作用下高层建筑响应与控制

杨海生

重庆海笛森建筑设计咨询有限公司, 中国·重庆 400000

**摘要:** 地震中高层建筑的反应和控制问题是目前结构工程中一个重要的研究课题。该文对高层建筑地震损伤机理进行了系统的分析, 着重研究了材料非线性行为, 结构构件破坏模式和整体结构失效机理。同时, 讨论地震波传播对高层建筑动力特性的影响和地震响应特点。基于此, 论文对多种控制技术进行了介绍, 主要包括隔震技术及能量耗散装置等被动控制技术、主动控制技术、半主动及混合控制技术等, 对地震环境下高层建筑安全设计提供了理论依据。

**关键词:** 地震作用; 高层建筑; 损伤机制; 结构响应

## Response and Control of High-rise Buildings under Earthquake Action in Structural Engineering

Haisheng Yang

Chongqing Haidisen Architectural Design Consulting Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

**Abstract:** The response and control of high-rise buildings during earthquakes is currently an important research topic in structural engineering. This paper systematically analyzes the seismic damage mechanism of high-rise buildings, focusing on the nonlinear behavior of materials, failure modes of structural components, and overall structural failure mechanisms. At the same time, discuss the influence of seismic wave propagation on the dynamic characteristics of high-rise buildings and the characteristics of seismic response. Based on this, the paper introduces various control technologies, mainly including passive control technologies such as seismic isolation technology and energy dissipation devices, active control technology, semi-active and hybrid control technology, etc., providing theoretical basis for the safety design of high-rise buildings in earthquake environments.

**Keywords:** earthquake action; high rise building; damage mechanism; structural response

## 0 前言

随着城市化进程不断加快, 现代城市高层建筑数量日益增加, 地震时结构安全引起了人们的重视。建筑结构在地震中通常承受很大的动荷载而发生明显的反应与破坏, 甚至造成整体结构的破坏。因此, 深入研究高层建筑震后损伤机制及响应特征、探讨有效控制技术对于改善建筑抗震性能有实际意义。

## 1 结构工程在地震作用下高层建筑的损伤机制

### 1.1 材料的非线性行为

地震中高层建筑结构材料将呈现出复杂的非线性, 这也是导致结构破坏的根源之一。高层建筑中一般采用钢材, 混凝土等原材料, 这类原材料在地震力的作用下, 要经过弹性阶段, 屈服阶段以及塑性变形阶段。地震力超过材料弹性极限后, 内部微观结构就开始变化, 产生裂缝, 滑移及微观断裂等现象, 使力学性能劣化。例如, 混凝土受拉伸应力作用易出现裂缝并逐步扩展, 最后使材料破坏。钢材在重复地震载荷作用下将发生低周疲劳破坏, 具体表现为屈服强度的降低及塑性变形能力的削弱。另外, 材料的非线性行为包括应力和应变的关系已不再是线性的, 而表现出明显的滞回特征, 该滞回效应既影响了结构能量耗散能力又造成了反复加

载过程中构件的累积破坏。非线性行为使材料在地震过程中刚度与强度不断发生变化, 这一变化将进一步引起建筑结构非线性响应并进而影响整体结构抗震性能。所以, 准确了解材料非线性行为对评价结构损伤机制至关重要。

### 1.2 结构构件的破坏模式

在地震的影响之下, 高层建筑中的各种结构元素, 如梁、柱和剪力墙, 都可能遭遇各种不同的损坏方式。这些破坏模式既依赖于构件材料特性又与构件受力状态, 几何形状和连接方式等因素紧密相关。梁构件受地震的影响往往会发生弯曲或剪切破坏。弯曲破坏模式下, 梁体上、下边缘出现塑性铰并引起局部屈曲及裂缝扩展。剪切破坏模式一般出现在剪力较高部位, 剪应力大于材料剪切强度后构件将出现剪切断裂。地震作用下柱构件主要有弯曲破坏, 剪切破坏, 弯剪混合破坏。柱在承受大弯矩时最先产生塑性铰并伴有局部钢筋屈服及混凝土被压碎现象; 剪应力较高时会出现脆性剪切破坏。剪力墙作为一种抗侧力构件的破坏方式主要有弯曲、剪切及复合破坏等。弯曲破坏模式中剪力墙底部往往会产生塑性铰而使墙体产生裂缝并发生破坏; 在剪切破坏模式下, 斜裂缝会沿着墙体的高度逐渐扩展, 最终导致墙体出现剪切断裂。复合破坏模式由弯曲与剪切破坏综合而成, 常以墙体部分开裂、混凝土剥落为特征。弄清这类结构构件破坏模式对

合理设计与完善高层建筑抗震措施具有重要意义。

### 1.3 整体结构的失效机理

整体失效机理一般表现为各种局部损伤模式累积效应。高层建筑整体地震破坏以侧向失稳, 倒塌, 分层破坏为主。侧向失稳的原因在于建筑物受到水平地震力的作用后, 其刚度与强度会逐渐劣化, 最终使结构不能保持平衡而发生较大的侧向位移, 甚至发生倾覆。倒塌失效一般由若干部件的损伤积累触发, 在柱或者剪力墙等关键构件发生破坏时, 结构系统承载路径受到破坏并发生荷载再分配, 这进一步引发了其他部件的连续损坏, 触发了一系列的连锁反应, 最后导致了整体的坍塌。分层失效就是建筑物的某层或某些楼层因过度破坏而发生破坏, 使上部结构丧失支撑, 从而引起局部或整体坍塌。结构体系连接方式, 质量分布, 刚度不均匀性, 材料劣化均对整体失效机理产生与发展产生影响。所以在高层建筑抗震设计时, 有必要对上述因素进行全面考虑, 并从合理构件设计与连接方式, 优化选材, 增强结构整体刚度与韧性等方面入手, 降低整体结构失效风险。

## 2 结构工程在地震作用下高层建筑的基本响应

### 2.1 地震波的传播与影响

地震波在地壳内传播时会发生复杂的反射, 折射及散射过程, 以不同波速及频率传至地表, 显著影响高层建筑结构响应。地震波主要可以被分类为纵波(P波)、横波(S波)以及表面波(L波)三大类, 其中纵波是其中速度最快的压缩波, 它首先抵达建筑物并产生相对较小的震动; 横波在剪切效应作用下会引起较大的水平运动使高层建筑受到更强烈的影响。表面波传播到地表时, 由于其衰减慢、振幅大等特点, 对于建筑造成的危害最明显。地震波传播时, 各频率分量地震波和建筑物自振频率之间可能存在共振效应, 使结构振动幅度明显放大, 加大了建筑物破坏风险。特别是高层建筑因其周期长、质量大, 易受低频、长周期地震波影响而产生大幅摇晃

### 2.2 高层建筑的动力特性

高层建筑一般自振周期较长, 使之在长周期地震波中更易产生共振, 从而使结构反应增强。建筑物的阻尼特性是指其在振动过程中将机械能转化为热能或其他形式能量的能力, 阻尼比越高, 结构的能量耗散能力越强, 从而减少了地震作用下的振幅和持续时间。不同结构类型、材料特性、连接方式等因素均对建筑阻尼特性产生影响。质量分布对高层建筑地震响应亦有显著影响, 建筑物重心位置及质量分布的不均匀性可使地震时发生扭转效应而加剧结构不规则振动。另外, 高层建筑一般柔性较大, 即地震波作用下易产生较大位移与变形, 尤其顶部位移幅度较为明显, 这种剧烈的摇晃不仅可能对建筑内部的部件造成损害, 还有可能导致非结构性部件, 例如玻璃幕墙、隔墙和吊顶等, 遭受破坏。

### 2.3 地震作用下的结构响应分析

高层建筑在地震过程中, 其结构响应以水平位移, 层

间位移角以及加速度反应为主, 它们反映出建筑物受地震力影响时其变形及内力分布情况。水平位移指高层建筑受地震波影响而发生的总体侧向移动现象, 一般以建筑物顶部最明显。层间位移角是反映建筑物各层之间相对位移差别的一个重要标志, 层间位移角过大会使结构构件发生剪切失效或者弯曲破坏, 严重者可能引起层间倒塌等。地震作用会导致高层建筑加速度响应, 不仅会影响动荷载在结构中的分布, 而且还会显著影响内部设备, 人员安全和非结构构件。结构的非线性响应又是很重要的一方面, 大震过程中材料及构件的屈服, 裂缝扩展及塑性铰的形成等非线性行为对结构整体稳定性有显著影响。

## 3 结构工程在地震作用下高层建筑的控制技术

### 3.1 被动控制技术

#### 3.1.1 隔震技术

隔震技术就是在建筑底部或者结构层内设置隔震层来减少地震能量向上部结构转移的技术。这一技术核心是把建筑物从地基部分分离出来, 让建筑物在地震中自由摇摆, 以降低地震波产生的加速度及变形。常见隔震装置有橡胶支座, 摩擦摆隔震支座及弹簧阻尼器, 它们能吸收耗散地震能量并延长振动周期及降低地震力影响。橡胶支座是一种具有良好弹性的隔震装置, 通常是由天然橡胶和钢板组合而成, 它具有很好的变形能力和恢复性, 可以有效地减少地震对结构的影响。摩擦摆隔震支座是以摩擦力来消散能量, 而使建筑物在水平面内能自由运动, 符合要求位移能力较大的高层建筑使用。应用隔震技术可显著减小建筑物层间位移角及地震加速度反应、降低结构构件与非结构构件破坏风险、提高地震作用下建筑物整体安全性及寿命。本技术特别适合地震频发地区高层建筑、桥梁、医院等需要连续使用功能的建筑类型。实际工程应用中隔震技术需考虑建筑物动力特性, 隔震装置选型及布置方式, 安装施工技术要求等因素才能保证隔震系统有效可靠。

#### 3.1.2 能量耗散装置

能量耗散装置是一种被动控制技术, 旨在通过吸收和耗散地震输入的能量来降低结构的响应。其设计目标是将结构在地震作用下的部分振动能量转化为热能或其他形式的能量, 从而降低结构的地震响应水平。这类设备经常被放置在建筑的核心位置, 如楼板间、梁柱连接点或剪力墙内, 目的是尽可能地增强其能量的消散能力。常用的能量耗散设备主要有粘滞阻尼器、粘弹性阻尼器、屈曲约束支撑和摩擦阻尼器等几种。粘滞阻尼器是一种利用液体黏滞阻力耗散能量的阻尼器, 它适合各种建筑结构。粘弹性阻尼器是采用粘弹性材料制成, 利用材料内摩擦来耗散地震能量的阻尼器, 其变形能力强, 耐久性高。屈曲约束支撑是一种装置, 它将支撑构件包裹在外壳内, 通过控制支撑构件的屈曲形态来实现能量的耗散, 从而有效地提升了结构的刚度和延性。摩擦阻尼器利用相对滑动产生的摩擦力进行能量消耗, 耗能能力

强, 适应性强。高层建筑采用能量耗散装置可显著减小结构层间位移及内力需求并降低结构及非结构构件破坏概率。合理地配置这些设备不仅可以改善建筑物抗震性能, 而且可以从经济上、建设上产生积极效益。

### 3.1.3 基础隔震与结构隔震

基础隔震技术是通过建筑物基础和地基间设置隔震层来减少地震力上传进而降低上部结构地震反应。该隔震层一般包括橡胶支座, 滑动摩擦装置或者滚动球, 可有效地隔绝地震波传播路径。基础隔震减震效果显著, 适合新建、改建高层建筑使用。一方面, 地震时隔震基础柔性特征使得建筑物振动周期明显变长, 且与地震波共振频率较远, 使得地震产生加速度与位移反应大大降低。另一方面, 结构隔震技术是在建筑的中部或顶部楼层设置隔震装置, 以保护特定楼层或设备免受地震影响。结构隔震多应用于重要设备及设施防护, 如计算机房, 医疗设备区等关键部位, 并通过对这些部位下部布置隔震支撑来减少地震能量传递。两种隔震技术在实践中可分别或组合运用, 才能达到最优抗震效果。基础隔震适用于整体性较好的建筑物, 结构隔震适用于需防护的具体地区或者设备, 二者相结合能够全面提升建筑物抗震性能。基础隔震及结构隔震技术在地震多发区高层建筑设计中的合理选型及布置至关重要。

### 3.2 主动控制技术

主动控制技术就是利用外部动力系统控制建筑结构的力来抵消或者削弱地震作用所产生的震动。该技术取决于传感器, 计算机与执行机构之间的协同工作。传感器对地震波和建筑物响应进行实时监测, 并把数据传送给中央控制系统; 中央控制系统按照预定的算法快速地计算出期望控制力; 执行机构例如液压作动器, 电动马达或者磁流变减振器根据命令迅速调节输出力来抵消或者降低建筑结构振动幅度。这一实时动态控制特点使主动控制技术能有效地处理各种频率、振幅的地震波且适应性强、灵活性高。例如, 当调谐质量阻尼器与电磁作动器联合应用时, 可以显著地降低建筑物的摆动幅度; 并且主动推力装置能够施加反向力以减小结构整体晃动及局部变形。由于自动控制系统可以根据建筑物瞬时状态及外部地震激励加以调节, 因此其在增加结构安全性的同时也可以将结构损伤及非结构构件损伤降到最低。

### 3.3 半主动与混合控制技术

半主动及混合控制技术集被动控制及主动控制之优点于一身, 可以通过调整装置特性对结构地震响应进行控制, 而无需依赖外界输入能量或只消耗很少的能量。半主动控制技术是利用智能材料或者控制装置性质的改变来达到有效控制结构振动目的。例如, 磁流变液阻尼器、变刚度装置等都属于典型的半主动控制装置。磁流变液阻尼器通过磁场来改变磁流变液黏度进而调节阻尼力大小以实现地震波变化特性的动态响应, 不仅在能量耗散上表现突出, 而且还具有低功耗、高可靠性等优点。变刚度装置的工作原理是通过调整结构部件的刚度来控制其动态行为和振动模式, 从而更好地适应各种地震波的特性。该类技术造价低、系统比较简单、易于集成安装、适合各种建筑类型的需要。混合控制技术将主动控制与被动或者半主动控制手段同时运用到建筑物上, 充分发挥了它们的优点。混合控制系统一般由电动马达或者液压作动器等一种或者多种主动控制设备和调谐质量阻尼器或者磁流变液阻尼器等被动或者半主动控制设备组合构成整体控制方案。这类系统由主动控制设备来提供迅速响应能力以有效地降低地震初期建筑的震动, 半主动或者被动装置负责能量的进一步耗散并降低随后的震动幅度。

## 4 结语

高层建筑对地震的反应及损伤机制是复杂多变的, 必须运用各种控制技术对其实施有效地控制。通过进一步研究被动控制, 主动控制以及半主动和混合控制技术, 可为地震环境中高层建筑安全设计提供更多可靠保证。今后研究要进一步与实际工程应用相结合, 继续优化控制策略以增强高层建筑抗震能力与寿命。

### 参考文献:

- [1] 别红亮.住宅建筑工程大跨度地下框架结构地震响应与减震控制措施[J].居舍,2024(8):133-136.
- [2] 李晔.超高层结构抗震设计中若干问题的探讨[J].建设科技,2022(13):109-111.
- [3] 高经纬,涂建维,刘康生,等.基于GA-LSTM的高层建筑结构地震响应的分散控制研究[J].振动与冲击,2021,40(10):114-122.
- [4] 黄世敏.建筑结构抗震设计[M].重庆:重庆大学出版社,2020.
- [5] 汪权,韩强强,王肖东,等.地震作用下高层建筑结构的分散神经网络振动控制研究[J].计算力学学报,2019,36(1):77-82.