

日本超高层建筑结构抗震新技术发展现状及思考

崔鸿超

(上海中巍结构设计事务所有限公司, 上海 200135)

[摘要] 近半个多世纪以来, 世界各地地震频发, 相应的抗震技术也得到了长足发展。近几十年来, 我国的结构抗震理论及相关国家标准的制订也逐步完善, 保证了建筑物的抗震安全, 但在抗震理论及技术方面仍有有待提高的地方。由于日本是个多地震的国家, 频发的大地震在给日本带来灾难的同时, 也促使日本的抗震技术得到迅速提高。介绍了日本抗震技术的发展及其最新抗震技术在高层建筑中的运用, 希望能对我国高层建筑抗震技术的发展有所借鉴。

[关键词] 地震; 抗震技术; 减震; 隔震; 阻尼器

Reflections on newest seismic technologies applied in current super-tall buildings in Japan

Cui Hongchao

(China Majesty Structure Design Office Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Since half a century before, seismic technologies have developed rapidly accompanied by the frequent earthquakes in the world. In recent decades, seismic theories and national standards in China have improved gradually. And it ensures the seismic safety of the buildings, yet to be improved. Due to it is more earthquakes country, frequent earthquakes brought disasters to Japan, which also contributed to the Japan's rapid progress in seismic technologies. Development of seismic technologies in Japan and the latest application of technologies in super-tall buildings are introduced, which provide reference for development of seismic technologies in China.

Keywords: earthquake; seismic technology; energy dissipated technology; seismic isolated technology; damper

1 日本抗震设计发展的过程及现状

在 1923 年关东 7.9 级大地震发生的第二年, 城市建造法增加了水平震度为 0.1 的规定, 同时对木结构、混凝土结构和钢结构增加了相应的构造要求, 强化了在水平地震作用下结构刚度及强度的保证。1950 年, 日本提出与短期容许应力强度相适应的水平震度 (当时日本抗震设计采用水平震度法, 其中“水平震度”相当于后来标准的地震力系数) 在 16m 以下为 0.2, 16m 以上建筑高度每增加 4m 震度增加 0.01, 建筑限高为 31m。1964 年突破了 31m 之后又集中建造了 50 层左右的新宿高层建筑群, 这是在经济大发展而抗震设计理论不完备情况下的实践。1978 年宫城县冲大地震之后, 于 1981 年公布了新抗震设计法^[1], 提出抗震设计二阶段目标, 新抗震设计法主要有: 1) 加强了结构构造规定; 2) 承载力计算时, 在水准一地震作用下, 构件强度不得超过短期容许应力强度; 3) 强化了层间位移角的限值规定; 4) 提出结构平面偏心率及楼层的抗侧刚度比限值规定; 5) 在世界上首次提出了水准二罕遇地震下的弹塑性设计要求。提出在水准二, 大震作用下结构极限状态的承载力计算,

即保有水平耐力计算, 以保证大震作用下结构的安全。采用分阶段进行设计: 第一次设计是承载力计算; 第二次设计是层间位移、刚度、偏心率及保有耐力的计算, 并在确定地震作用中考虑了结构的延性。

1981 年的新抗震设计法是 20 世纪日本结构抗震技术发展的重新起草, 此后建造的建筑, 在 1995 年兵库县南部 7.3 级地震中损害较少。兵库县南部地震之后, 正逢日本经济危机, 大规模建设停滞, 震后的需要使抗震诊断补强技术有了很大提高。同时日本对抗震结构的理论及技术进行了大量的研究, 理论上提出了基于能量平衡原理的损伤控制设计法, 研制并完善了隔震及减震技术。2000 年日本政府公布了隔震设计的告示, 在仍然执行以抗震设计为主导的建筑基准法的同时, 实际上已经开始按新的抗震结构理论及技术大量建造高层建筑 (需由包含私人公司在内的审查机构审查, 并取得国土交通省大臣认证)。

近十年来, 组合构件及高强度钢材、混凝土在工程中的运用进一步提高了高层建筑的建造水平。有日本资深专家认为, 由 20 世纪初到现今, 日本

关于结构抗震技术的发展经历四次“刚”、“柔”之争，“刚”和“柔”并非通常理解的周期长短和侧向刚度大小的狭义概念，“刚”是指在近半个多世纪中，一直占主导的抗震设计的基本思路，即满足重力荷载的结构再附加上对地震作用的抵抗能力，需要加大结构的刚度及强度来实现，也就是在确定了水平震度为 0.1 之后（关东大地震后），强化以“刚性结构”作为设计目标；“柔”主要是指将提高建筑物吸收能量的能力，作为建筑结构必备条件，使其基本强度和为吸收能量所需的变形能力均得到保证，但利用承受重力荷载的结构骨架来确保结构所需的强度和能量吸收能力显然是不合理，而隔震减震技术是解脱承重结构的负担，实现抗震结构的合理化目标的体现^[2]。如今，“柔”的设计理念逐步成为日本高层建筑抗震设计的主流。

2011 年 3 月 11 日发生的 9.0 级东日本大地震中，不仅在震中附近的仙台而且在较远的东京、名古屋和大阪等大城市的超高层建筑也发生了大振幅和长时间的摇动，地震动持续时间 300s 左右，超高层长周期结构则可能出现了以前没有预想到的共振问题。地震学家预测不久日本的东海及东南海会发生大地震，担心长周期、长时间的地震动将会将巨大的地震能量从震中传播到很远的地方，而大城市的超高层建筑设计时并没考虑长周期地震动，超高层建筑受到长时间、大幅度的摇摆可能导致其结构体或非结构体与设备受损。目前日本已对长周期地震动的应对方法进行了大量的研究，尤其是对现有超高层建筑受长周期地震动时的加固对策，例如设置新的减震器可使建筑物减小变形，但新设的减震器对现有结构（柱、梁、基础）产生反力，为此，正在研究采用新型的对既有结构不产生影响的减震器。

20 世纪以来，以每次大地震为契机，日本的结构抗震理论及技术在每个阶段均得到不断的发展，并在实践中得到应用且取得较好的效果。以下将介绍近年来日本最新抗震与减震技术的应用实例。

2 超高层建筑建造中新技术的运用实例^[3]

2.1 实例一

2.1.1 工程概况

工程为地上 23 层（高 138m），地下 3 层，高 138m，长×宽为 131m×31.5m，东侧为 131×24.3m 的办公空间，西侧 131×7.2m 主要为电梯、设备间等。平面、剖面见图 1，大空间办公区内部见图 2。屋顶雨水流入东侧的百叶板内，通过雨水和风对周围进行冷却（“生物皮”），使雨水流动的能量来

自太阳能，东外侧有不锈钢拉杆组成的张力结构支撑“生物皮”，见图 3。

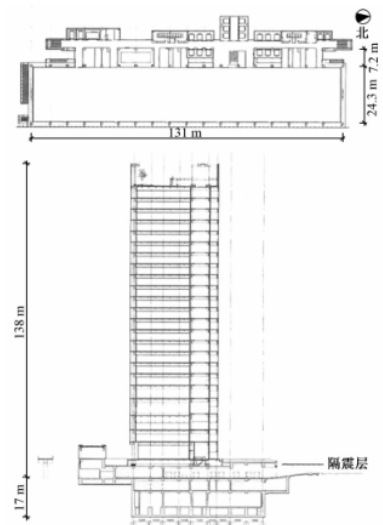


图 1 结构剖面图



图 2 办公区大空间内部



图 3 建筑外观

2.1.2 抗震体系

结构为隔震结构，隔震层由积层橡胶隔震支座（ $\phi 1100 \sim \phi 1500$ ）、油压阻尼器以及钢阻尼器构成。由于建筑平面为超长的板状结构，台风的风荷载要比隔震、减震后的地震作用大，对受风荷载影响较大的短边方向（南、北方向）的油压阻尼器设

有用电磁阀控制液压流动的锁定机构（图 4），通过风速计、加速度计和变位计对相应参数进行控制，当发生强风时油压阻尼器锁定，从而降低各抗震层的振动和钢阻尼器的累积塑性变形。当检测到一定强度的地震时，锁定将解除，而成为地震优先控制模式，通过与钢阻尼器的有效组合，可使锁定时的结构刚度能很好地适应风或地震的响应，使效果与费用达到最佳。



图 4 可控油压阻尼器

对于外侧核芯筒的悬臂结构，为降低中柱的轴向力，在超过 7m 的悬臂前端，采用粘弹性支撑构件与柱顶连接，以降低垂直振动和相对变形。对短边（南、北方向）外墙设置 V 形粘弹性阻尼支撑（图 5）构件，提高结构的耗能性能。该项目采用设有可控机构的油压阻尼器减震系统，并采用冷却周边环境的新环保技术，使超高层建筑的设计向前又迈进一步。



图 5 V 形粘弹性阻尼支撑

2.2 实例二

2.2.1 工程概况

工程为地上 60 层，地下 5 层，总高度为 300m，建筑平面尺寸：低层（商业）为 71m×80m，中间层（办公、博物馆）为 71m×59m，高层（酒店）为 71m×29m，图 6 为建筑剖面示意图。

结构设计考虑满足以下要求：1) 很大的轴向力；2) 控制变形；3) 预测可能发生特大地震时的应对措施；4) 强风作用下居住的舒适度；5) 施工合理性。

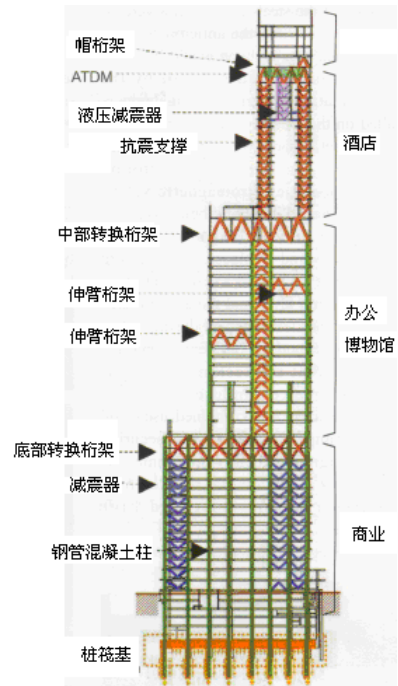


图 6 结构剖面图

2.2.2 结构方案

底层、中层、高层之间的分界处设有连通的转换桁架，并在办公楼的中间层设伸臂桁架（图 6）。低层部分四角均衡的设置油压阻尼器及摩擦阻尼器（图 7）；中层部分的中央结构周边沿 X 方向（平面的长边向）设波纹钢板阻尼墙（图 8），沿 Y 方向（平面的短边向）设钢骨抗震支撑；在高层部分，在各房间墙内 Y 方向设钢骨抗震支撑。



图 7 回转摩擦阻尼器



图 8 波纹钢板阻尼墙

2.2.3 抗震设计

(1) 地震作用的考虑：地震作用分三个水准，第一水准用日本规范要求的告示波或普遍使用的记录波，如 El Centro 及 TAFT 波；第二水准取日本规范要求的二阶段设计的告示波的 1.5 倍；第三水准考虑地区特性的东南海、南海波（指日本周边的东南海及南海）和本地活断层产生的地震波。

(2) 结构构件设计性能要求：相对通常高层结构设定的设计标准提高一级；在水准二地震作用时，构件不发生屈服；在特大地震作用时，梁和支撑允许屈服。

(3) 对于耗能减震构件的性能要求：在第一水准地震作用时，摩擦阻尼器允许开始工作；在第二水准地震作用时，允许波纹钢板阻尼墙的钢板剪切屈服，即根据地震水准分别能发挥耗能抗震作用。

(4) 除规范规定的地震力外，还要进行以下特殊情况的分析，主要有：1) 对于本地活断层产生的地震动计算，地震起始点不仅考虑距建筑物较近的位置，也考虑了其他位置对模拟地震动的影响；2) 当作为本地区地震波的主要地震动周期成分与建筑物的第 1~3 阶固有周期基本一致时，分析其影响；3) 在各种减震构件无法按照设计发挥耗能性能时，要进行地震作用的分析。

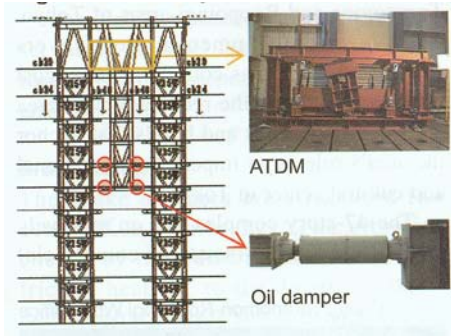
2.2.4 新技术的采用

(1) 减震器。低层部分布置的油压阻尼器及摩擦阻尼器在地震的任何阶段都可以发挥作用。摩擦阻尼器的原理构造及控制都比较简单。中层部分波纹钢板阻尼墙也是一种很有效的减震构件，在波纹方向可以自由伸缩，波纹垂直方向可抵抗水平力，而板间连接构件可以起减震耗能作用。减震器在水准二地震作用时发生剪切屈服，在水准三地震作用时发生受压屈服，可以充分发挥其吸收地震能量的作用。高层部分的结构周边设油压阻尼器可使高层部分层间变形减小 10%，其顶部布置调谐质量阻尼器（图 9），右侧为常规的吊摆与倒立摆组合的被动质量减震器（AMD），左侧为主动控制的调谐质量阻尼器（ATDM），可将强风时的加速度控制在 3gal 以内，保证了人员居住的舒适性。

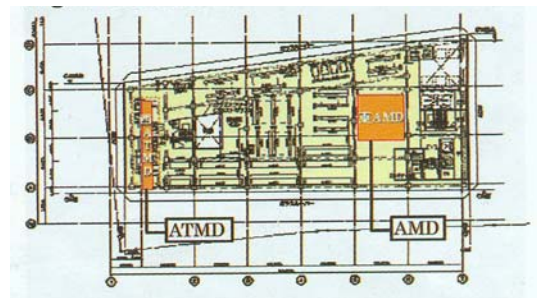
(2) 高强度钢管混凝土柱（CFT）采用 C150 级的高强混凝土和 590 级（屈服点 440N/min）的高强钢材，进行了防火及混凝土填充性的确认试验。

(3) 新的连接系统：CFT 柱与大梁的连接节点采用分割型外加劲肋；高强螺栓连接板表面用热喷涂铝，以提高其摩擦系数，该连接面对于浸水损伤及油污的影响具有较好的稳定性。

本工程是日本迄今为止新设计的最高建筑，汇集了日本高层结构的最新技术，目前在施工中。



(a) 高层部分阻尼器布置



(b) 调谐质量阻尼器的布置

图 9 阻尼器布置

2.3 实例三

2.3.1 工程概况

工程的总建筑面积 24.4 万 m^2 ，地上 52 层，地下 5 层，总高 247m，标准层平面为 85m \times 61m，标准层平面见图 10。

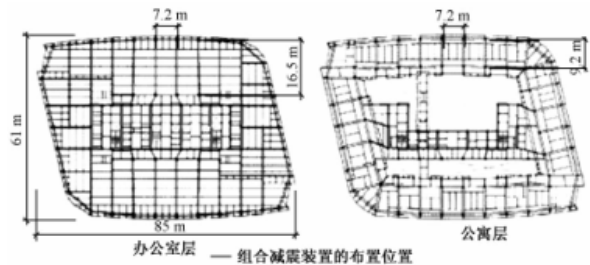


图 10 标准层平面图

6~35 层为办公区，36~46 层为住宅区，47 层以上酒店，本工程目前在施工，预计 2014 年完工。地上高层部分是以钢结构为主并设置抗震装置的框架结构，大型雨篷为钢结构，地下为钢骨、钢骨混凝土及钢筋混凝土结构，地铁涵洞上部顶板是 1m 厚的预应力板。

2.3.2 减震体系

在核心筒内设置耗能构件，采用了 516 个油压阻尼器、448 个屈服约束支撑、620 个摩擦阻尼器共三种阻尼器组合（图 11），采用耗能减震装置与不采用耗能减震装置的抗震设计相比，前者层间位移减小了 50%，保证了高抗震性能。

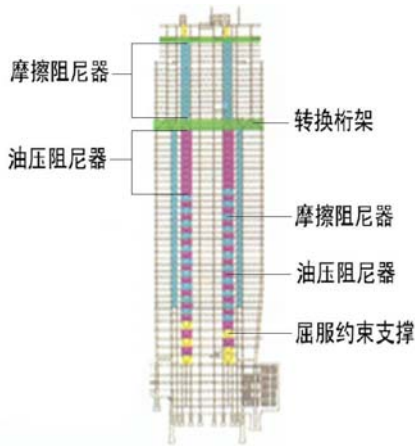


图 11 抗震装置的布置及转换桁架

2.3.3 防振措施

地铁从建筑的地下 2 层所设的独立的涵洞中穿过，在涵洞底板以下设置聚氨酯减震器与建筑物主体隔绝（图 12），以控制地铁振动对建筑物的影响。

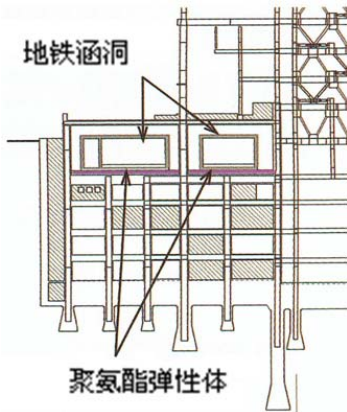


图 12 地铁涵洞及地下结构

2.4 实例四

2.4.1 工程概况

工程为地上 38 层，地下 6 层并有 3 层塔楼，总高 199.75m，总建筑面积 19.8 万 m^2 。项目地下为混凝土结构，地上为钢结构，采用 CFT 柱，核心部分设置减震构件，形成具有抗震支撑的框架结构，阻尼器采用了油压阻尼器及低屈服点钢材(LY225)的屈服约束支撑，可有效地吸收地震能量。转换柱采用巨型转换桁架的形式。在楼顶设置了抗风的主动调谐质量阻尼器(ATDM)，结构剖面图见图 13。

2.4.2 高强材料的使用

建筑设计要求在 1 层建造 3600 m^2 的绿化区，地铁中央大厅还需要大型空间，因此建筑底部的大跨需要超高强 CFT 柱来支承（图 14），本工程局部采用的 780N/mm²级的钢材与 C150 级混凝土的临界应变相近，混凝土及钢材的应力-应变关系见图 15，可最大限度地发挥高强度材料优化组合。

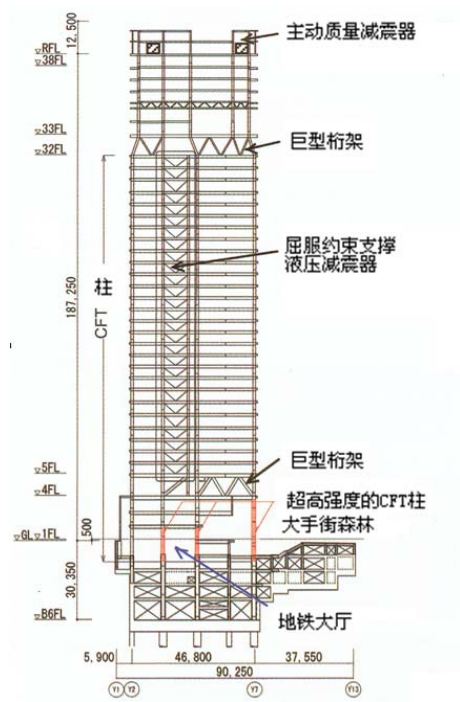


图 13 结构剖面图

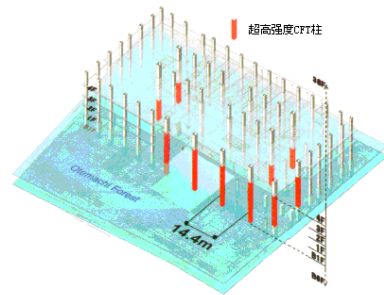


图 14 超高强 CFT 柱的应用范围

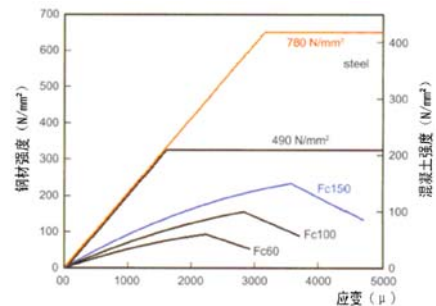


图 15 混凝土及钢材的应力-应变关系比较

2.5 实例五

工程地上 54 层为钢结构，地下 4 层为钢骨混凝土结构，建筑面积为 18 万 m^2 ，基本周期长边为 5.2s，短边为 6.2s（图 16），于 20 世纪 70 年代按抗震设计（即按中国目前的设计方法）进行的设计，因考虑长周期地震动的影响需要进行抗震加固改造，在 16~39 层每层长边设置 4 个、短边设置 8 个，共 288 个高性能位移型油阻尼器（图 17）。2011 年 3·11 大地震前刚好完成了对该结构的加固改造。

在 3·11 大地震中的记录表明,增设阻尼器后结构的阻尼比由原来的 1.3% 增到 2.7%, 顶部位移从 69.8cm 降到 54.2cm, 降低了 22%。该结构在 142gal 输入地震动的作用下,即使安装了 288 个油阻尼器,其阻尼比也只有 2.7%,设计人认为值得深入研究的是,如何判断结构实际具有的阻尼比。



图 16 建筑物照片

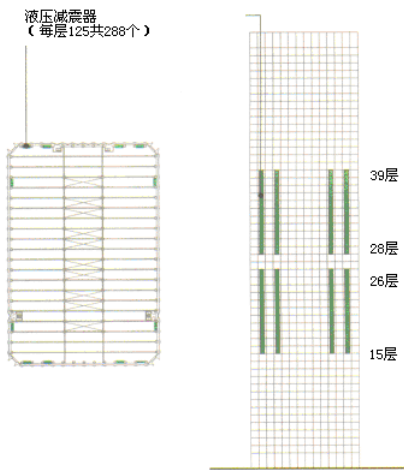


图 17 标准层平面及剖面图

2.6 实例六

工程地上 47 层,地下 4 层,总高度为 206.69m, 平面为 50.4m×50.4m, 办公层的构架组合平面见图 18。项目为由预制钢筋混凝土柱、梁以及钢梁构成的混合结构,仅内筒外框间跨度较大的梁采用钢梁,钢梁与混凝土柱的连接见图 19。预制混凝土构件采用了 C15 级混凝土及屈服强度 685N 级的纵筋和 785N 级的高强约束钢筋。

核心筒中采用了粘滞阻尼墙和滞回型阻尼墙(摩擦阻尼器),现场布置情况见图 20。摩擦阻尼器是应用汽车底盘的制动装置在一定荷载下滑动,将建筑物的振动能量转换成摩擦热,以降低建筑物

的地震响应及损伤。它可以反复使用,并无需维护,其构造情况见图 21。

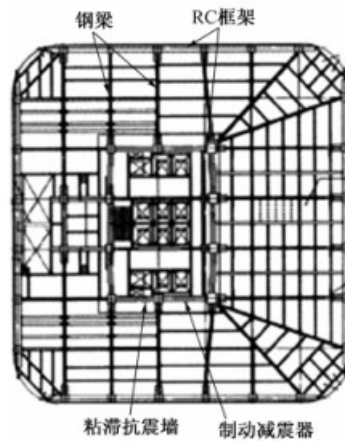


图 18 办公层的构架组合平面图

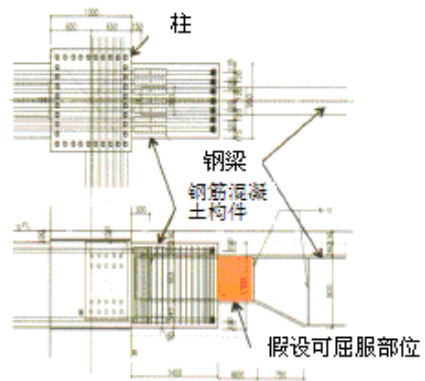


图 19 混凝土柱及钢梁的连接构造

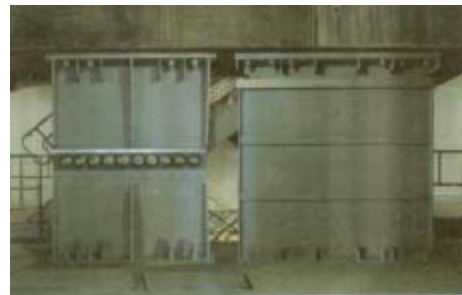


图 20 摩擦阻尼器(耗能阻尼墙)

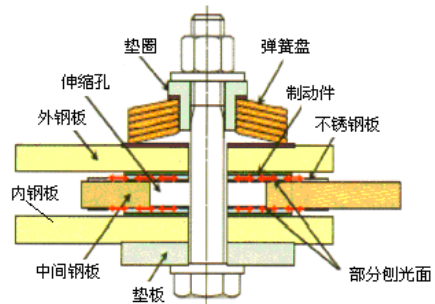


图 21 摩擦阻尼器的结构

近十年来,日本高层建筑很多采用预制混凝土结构,主要得益于高强混凝土和钢筋等新材料的研制及梁柱节点连接及焊接技术的提高。

2.7 实例七

工程为一栋 5 层平面为 133m×23m 的办公楼（图 22），采用了 1000N 级高强度钢材作一部分底层柱子，日本多年来，企业、大学、设计单位开展了对高强钢材、焊接材料以及焊接方法条件的研究，1000N 级钢材作为目前世界强度最高的钢材，其抗拉强度是 $950\text{N}/\text{mm}^2$ ，本工程是首次在实际中应用 1000N 级钢材的项目。

1 层采用 1000N 级钢柱，并设置由减震支撑组成的减震支撑结构（图 23），地震能量基本可以全部由减震支撑结构吸收，即使大震时，2 层以上的结构也可以保持弹性状态。为使 1000N 级钢柱在超过预估的地震作用下也保持弹性，在柱脚设置了球面支座和托架，并设有起动装置，防止钢柱发生屈服。高强度钢材的延性不如低屈服点的钢材，须对结构采取减震措施使钢柱保证仅承受垂直荷载，并始终处于弹性。

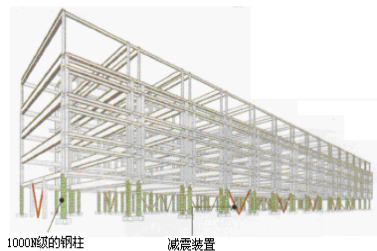


图 22 框架结构立体图

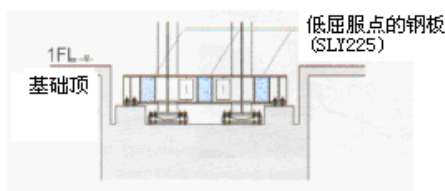


图 23 柱基座详图

2.8 实例八

2.8.1 工程概况

项目为地上 54 层，地下 1 层，塔楼 2 层，高 190m、长 42.7m、宽 39m，高宽比 4.51，为钢筋混凝土结构，为目前世界最高的隔震建筑^[4]。

2.8.2 抗震体系

结构为基础隔震结构，隔震层由外周铅芯橡胶支座、内部弹性滑板支座及油压阻尼器构成（图 24）。外周配置的铅芯橡胶支座可以增加隔震层的扭转刚度，弹性滑板支座可以有效地延长隔震周期，在水准二罕遇地震作用下剪应变为 250%时，短边和长边方向隔震周期分别达 8.33s 和 8.02s。铅芯橡胶支座和油阻尼器可以减少风荷载的影响。地上部分结构采用高强混凝土（ $\text{Fc}36\sim100\text{N}/\text{mm}^2$ ）纯框架结构，最大限度地配合了建筑设计的要求。楼

板采用半预制半现浇的合成楼板，满足抗噪声要求。

在水准二罕遇地震作用下，隔震层吸收约 70% 的地震输入能量。其中铅芯橡胶支座和油阻尼器吸收约 40%~60%，弹性滑板支座吸收约 20%~30%。结构为超高层结构，受风荷载影响比较大。在水准二风荷载作用下，隔震层顺风方向变形约 139.8mm，垂直风方向变形约为 39.7mm，矢量方向变形则为 145.3mm，均在隔震装置的规定变形以内。

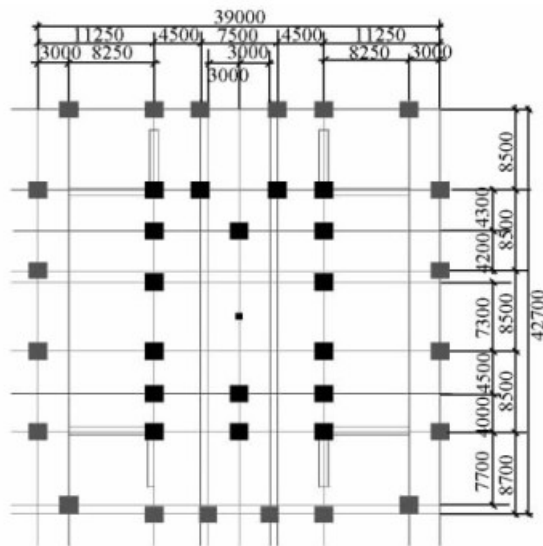


图 24 隔震支座的布置图

（每个柱子一个隔震支座）

3 借鉴国外先进技术推动我国抗震技术水平的提高

日本自 20 世纪 90 年代经济萧条开始，新的建筑减少，又逢 1995 年兵库县南部大地震，于是利用较高的科学技术积累和震害经历进行了大量细致的学术研究和技术开发。在超高层建筑抗震领域，主要表现为在理论上引入了损伤控制的概念；在实用技术上普遍采用了减震及隔震技术，并不断创新；在材料研发上不断将高强度钢材和混凝土运用于实际工程中。同时长周期地震动的研究，也不断地对抗震目标提出更严格的要求。不仅要求“安全”，进而提出“安心”的概念，也就是考虑地震时居住者的舒适度，加强了抗震诊断及补强的要求。这些变化使日本的超高层建造技术在 90 年代之后上了一个新的台阶。

我国近年来随着经济崛起，高层建筑飞速发展，开发商、设计师、施工方都取得了长足的进步。同时由于诸多因素，保持了几十年的高层建筑设计的大格局没有明显变化。对于超高层的建筑，几乎都是用大量的材料构筑成足够刚的结构，硬碰硬地

抵抗地震作用。为此，付出了浪费大量的资源的代价。现在新的技术如减震隔震等在新建的高层建筑中应用发展缓慢，固有的设计方法仍是主流，可以说我国与国外先进的抗震理论及技术相比，有着较大的提高空间。

4 结语

(1) 逐步完善和发展结构抗震的思路。日本的4次“刚”与“柔”之争，实际上是日本结构抗震思路的逐步演变过程，尤其在是高层建筑结构的设计中，新的抗震理论和技术逐步发展、使用和被认可。我国可考虑在目前统一法规的构架内，允许经过科学论证和审查的新的抗震理念和技术在实际工作中采用，以推动结构抗震技术的不断进步。

(2) 积极推广普及地震及抗震的基本理论和新知识，使设计人员不仅是靠计算机软件完成设计，还要使其知其然和所以然，发挥技术人员的智慧创造出更合理的抗震结构；要积极推广减震、隔震技术，使设计人员能熟知、会用，例如以上诸实例中设计师把性能不同的阻尼器恰当地用到同一高层而达到最优的减震效果，值得借鉴和思索。最近经过芦山地震考验的“坚强楼”，由于采用隔震技术，结构完好，成为一个亮点，对改进传统的抗震设计将会有所推动。

(3) 充分利用超限高层抗震审查制度，推动、引导耗能减震、隔震结构等新技术的发展。

经过十几年检验，超限审查制度是行之有效的，对保证结构安全起到了重要作用，不仅提高了结构工程师的抗震技术水平，而且增强了建设部门及建筑师的安全理念。但是目前超限审查实际上主要是对结构工程师的设计成品依据审查技术要点及规范进行补强加固，在掌控和引导做出合理的设计方案以及新技术采用方面发挥的作用有限。超限审查集结了国内结构专业的精英，形成了一支理论造诣较高和经验丰富的专家队伍，有关部门应进一步采取措施，使超限审查工作及审查专家们在发展抗震理论、使用先进技术方面成为有力的推动力量。

参 考 文 献

- [1] 日本建筑学会. 建築の構造設計そのあるべき姿[M]. 2010.
- [2] 秋山宏. 基于能量平衡的建筑结构抗震设计[M]. 叶列平, 裴星洙, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [3] 中日长周期地震动长周期结构地震作用高层隔减震技术专题研讨会汇总报告[J]. 建筑结构·技术通讯, 2013, (7).
- [4] 中澤昭伸, 等. 旭通四丁目地区第一種市街地再開発事業施設建築物[J]. 日本免震構造協会, 2013.

作者简介: 崔鸿超, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, Email: chnmaje@163.com。