

Structure

Architecture

『2013建筑、结构巅峰对话：结构成就建筑之美』
2ND DIALOGUE OF ARCHITECTURE AND STRUCTURE

Current Analysis and Research of Super High-rise Buildings in China

我国超高层建筑的现状分析和探讨



丁洁民

Ding Jiemin / President / TJAD

同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司总裁、总工程师

代表作品：上海中心大厦、上海世博会主题馆、温州市大剧院、东方体育中心、北京大学体育馆、同济大学教学科研综合楼等。

吴宏磊

Wu Honglei / Structural Engineer / TJAD

同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司结构工程师



扫描二维码
可进入报告视频

我国超高层建筑的发展概况

随着我国经济和科学技术的发展，超高层建筑逐渐盛行。作为现代城市中的地标，超高层建筑已表现出非凡作用，成为国家、民族以及城市经济崛起的象征。我国的超高层建筑发展始于 1990 年，1990~2007 年是超高层建筑的起步期，2008~2012 年为超高层建筑的快速发展期，2013~2018 年可谓是超高层建筑的繁荣期。以高度为依据，本文将超高层建筑分为以下 4 个区段：250~300m，300~400m，400~500m 以及 500m 以上。

截至 2012 年，我国共建成超高层建筑 94 幢，其高度分布比例如图 1 所示。250~300m 的超高层建筑数量最多，约占建筑总数的 59%；500m 以上超高层建筑仅一幢；港澳台超高层建筑共计 18 幢，约占总数的 20%。这一阶段国内典型超高层建筑有上海环球金融中心（492m）和台北 101 大厦（509m）等。

2013~2018 年，我国计划建成 250m 以上的超高层建筑共计 164 幢，如图 2 所示。与图 1 相比，300~400m 的超高层建筑数量显著增多，约占总数的 43%。港澳台超高层建筑共 2 幢，约占总数的 1.2%。

除超高层建筑数量不断增多外，其高度近年来也在不断刷新。500m 以上的超高层建筑增多，部分塔楼高度已突破 600m，如上海中心大厦，其主体建筑结构高度为 587m，总高度为 632m。建成之后将成为世界第一绿色摩天高楼，并与 420.5m 的金茂大厦、492m 的环球金融中心共同构成浦东陆家嘴金融城的新三角。正在设计中的深圳平安金融中心塔楼桅杆顶高度将超过 600m。

截至 2012 年，我国已建成超高层建筑的地域分布状况如图 3 所示，各城市超高层数量统计见表 1。我国超高层建筑集中在经济较发达的珠三角和长三角地区，主要城市包括上海、香港、广州和深圳。

2013~2018 年我国计划建成的超高层建筑的地域分布如图 4 所示，表 2 为各城市计划建成的超高层数量统计。可见，超高层建筑的分布区域明显增加，其中环渤海地区成为新崛起的超高层建筑集中地；二线城市的超高层数量也有显著增加。

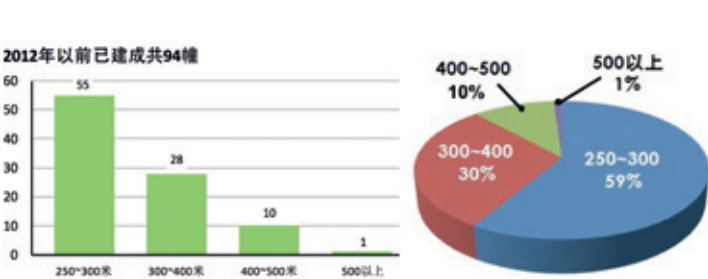


图1 我国已建成的超高层建筑高度统计（截至2012年）

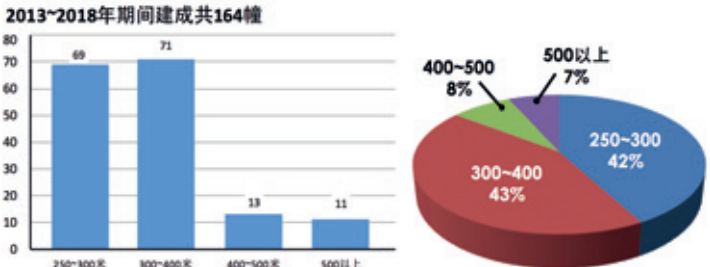


图2 我国计划建成的超高层建筑高度统计（2013~2018年）

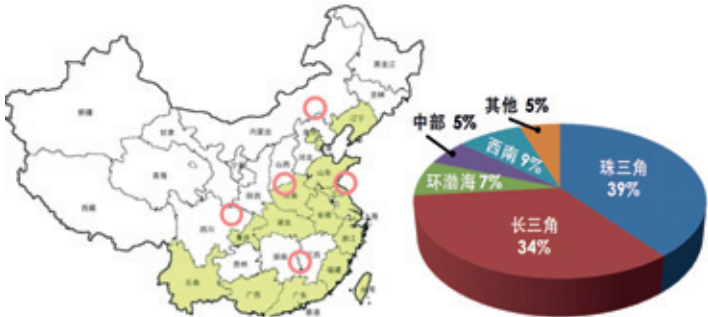


图3 我国已建成超高层建筑分布（截至2012年）

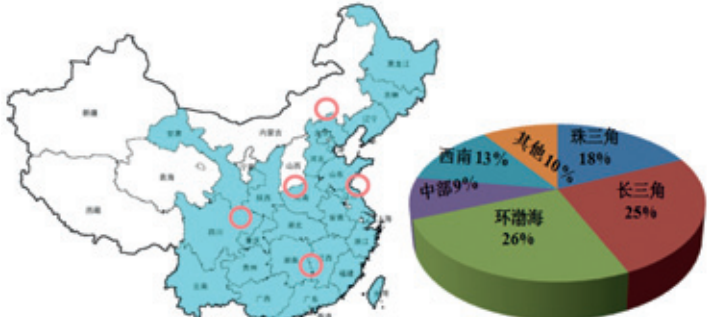


图4 我国计划建成的超高层建筑分布（2013~2018年）

表 1 各城市超高层建筑数量统计（截至 2012 年）

名次	1	2	3	4	5	6	6	8	9	9	9	9
城市	上海	香港	广州	深圳	重庆	武汉	南京	温州	北京	天津	苏州	沈阳
数量	16	15	10	9	7	4	4	3	2	2	2	2

表 2 各城市超高层建筑数量统计（截至 2012 年）

名次	1	2	3	4	4	6	6	6	6	10	10
城市	天津	深圳	无锡	广州	大连	上海	武汉	沈阳	贵阳	重庆	昆明
数量	20	15	9	8	8	7	7	7	7	6	6

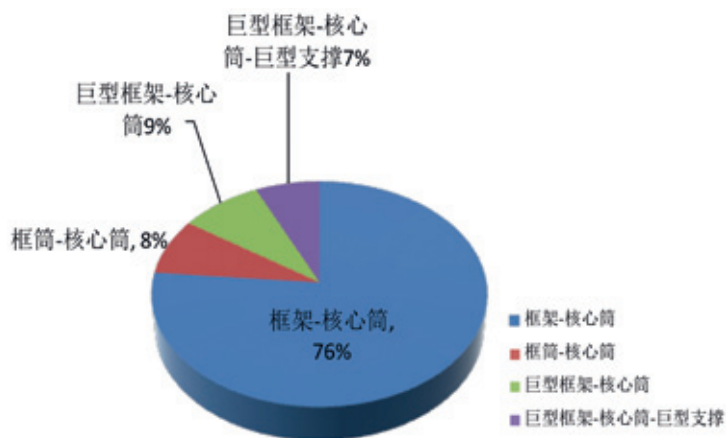


图5 250m以上超高层建筑结构体系类型分布

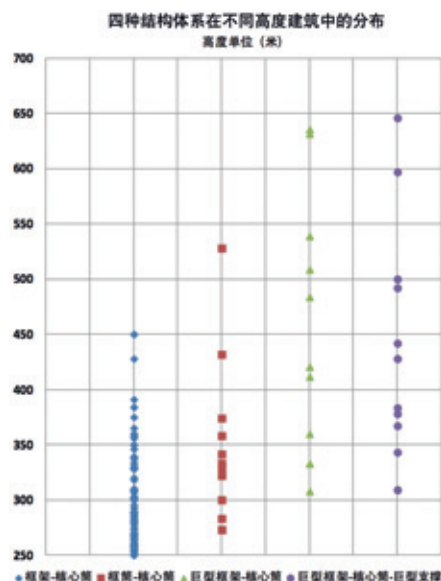


图6 各结构体系在不同高度超高层建筑中的分布（截至2018年）

我国超高层建筑结构类型的发展

随着技术进步、经济发展和人口密度的增加，超高层建筑不断突破新的高度。除了满足建筑使用功能要求，建筑师越来越重视建筑个性化的体现。尤其近几年，各种新型复杂体型及复杂结构体系大量出现，表3为目前国内部分超高层建筑结构体系（含已建成和在建工程）。

根据表3的归纳可见，高度超过250m的超高层建筑结构一般采用筒体结构，包括框架-核心筒、框筒-核心筒、巨型框架-核心筒和巨型框架-核心筒-巨型支撑4种结构体系，分别适用于不同高度的超高层建筑（图5）。如图6所示，框架-核心筒、框筒-核心筒适用于250~400m的超高层建筑；巨型框架-核心筒适用于300m以上的超高层建筑；巨型框架-核心筒-巨型支撑适用于300m以上的超高层建筑。

框架-核心筒结构是目前高层及超高层结构中应用最广泛的结构形式之一。由于有实腹筒存在，我国《高层建筑混凝土结构技术规程》将其归入筒体结构。核心筒除了四周的剪力墙外，内部还有楼、电梯间的分隔墙，核心筒的刚度和承载力都较大，成为抗侧力的主体，框架承受的水平剪力较小。为了使周边框架柱参与抗倾覆、增大结构抗倾覆的能力，在核心筒和框架柱之间可设置水平伸臂构件。伸臂构件使一侧框架柱受压、另一侧框架柱受拉，对核心筒形成反弯，减小结构的侧移和伸臂构件所在楼层以下核心筒各截面的弯矩。设置水平伸臂构件的楼层成为加强层。为了进一步增大结构的刚度，使周边的框架柱都参与抗倾覆，可在设置伸臂构件的楼层设置周边环带构件。设置加强层后，框架-核心筒结构的建造高度与筒中筒结构的建造高度接近。

用框筒作为外筒，将楼（电）梯间、管道竖井等服务设施集中在建筑平面的中心做成内筒，就成为筒中筒结构。采用钢筋混凝土结构体系时，一般外筒采用框筒，内筒采用剪力墙围成的井筒；采用钢结构体系时，外筒用框筒，内筒一般也采用钢框筒或钢支撑框架。框筒-核心筒结构是双重抗侧力体系，在水平力作用下，内外筒协同工作，其侧移曲线类似于框架-剪力墙结构，呈弯剪型。外框筒的平面尺寸大，有利于抵抗水平力产生的倾覆力矩和扭矩；内筒采用钢筋混凝土墙或支撑框架，具有比较大的抵抗水平剪力的能力。

巨型结构的概念产生于上世纪60年代末，由梁式转化层结构发展而成。巨型结构体系是由巨型构件组成的简单而巨型的桁架或框架等结构，作为超高层建筑的主体结构，是与其他次结构共同工作的，从而获得更大的灵活性和更高的效能。

巨型框架-核心筒-巨型支撑结构由巨型钢框架、巨型支撑、钢筋混凝土核心筒和伸臂桁架组成，具有多道抗震防线。设置巨型支撑可提高结构抗侧刚度且缓解刚度突变；水平地震作用下，巨型支撑直接提高外框架刚度，使框架底部剪力和弯矩都明显增大，满足“第二道防线”的要求。

表3 国内部分超高层建筑结构体系

工程案例	建筑高度	结构体系
上海中心	632m	巨型框架-核心筒
深圳平安金融中心	648m	巨型支撑框架-核心筒
天津117	597m	巨型支撑框架-核心筒
台北101	508m	巨型框架-核心筒
上海环球金融中心	492m	巨型支撑框架-核心筒
长沙国金中心	452m	框架-核心筒
广州西塔	432m	支撑筒-核心筒
西安新长安二期	303m	框架-核心筒
兰州鸿运金茂综合体	285m	框架-核心筒
郑州绿地中央广场	283m	框架-核心筒

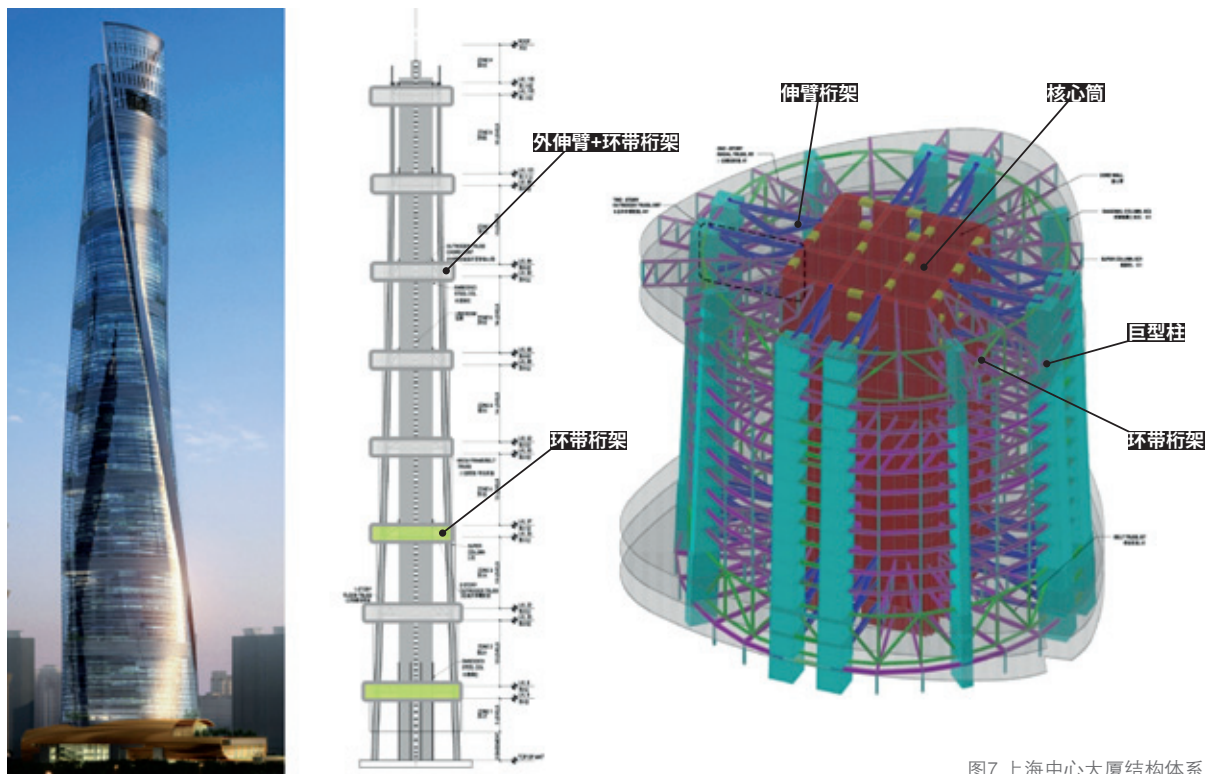


图7 上海中心大厦结构体系

在建的上海中心大厦（图7）塔楼建筑高度632m（结构高度为580m），共124层。塔楼抗侧力体系为巨型框架－核心筒－外伸臂结构体系。在8个机电层区布置多达6道两层高外伸臂桁架和8道箱形空间环形桁架，由箱形空间环形桁架和巨柱形成外围巨型框架。此抗侧力系统已超出一般意义上的由少量外伸臂桁架及巨柱构成的核心筒－巨型柱－外伸臂结构体系，形成了巨型框架－核心筒－外伸臂抗侧力体系。无论是从抗侧效率还是结构的安全度方面，均有一定的提高及创新。

在建的深圳平安中心大厦（图8，9）塔楼高度648m，共104层，采用巨型斜撑框架－核心筒－钢外伸臂体系，主要由型钢混凝土巨柱、钢筋混凝土核心筒、钢外伸臂、空间周边双榀桁架、巨型斜撑以及角部巨型V形支撑等部分组成。

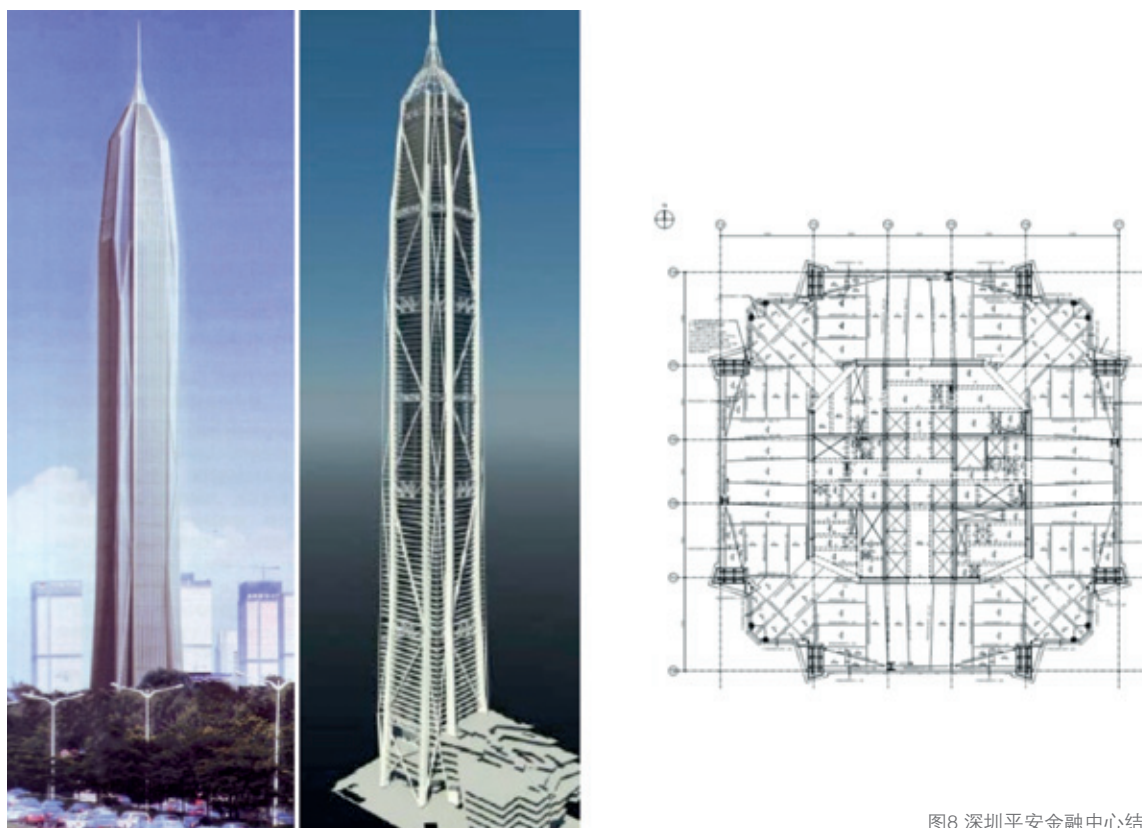


图8 深圳平安金融中心结构体系

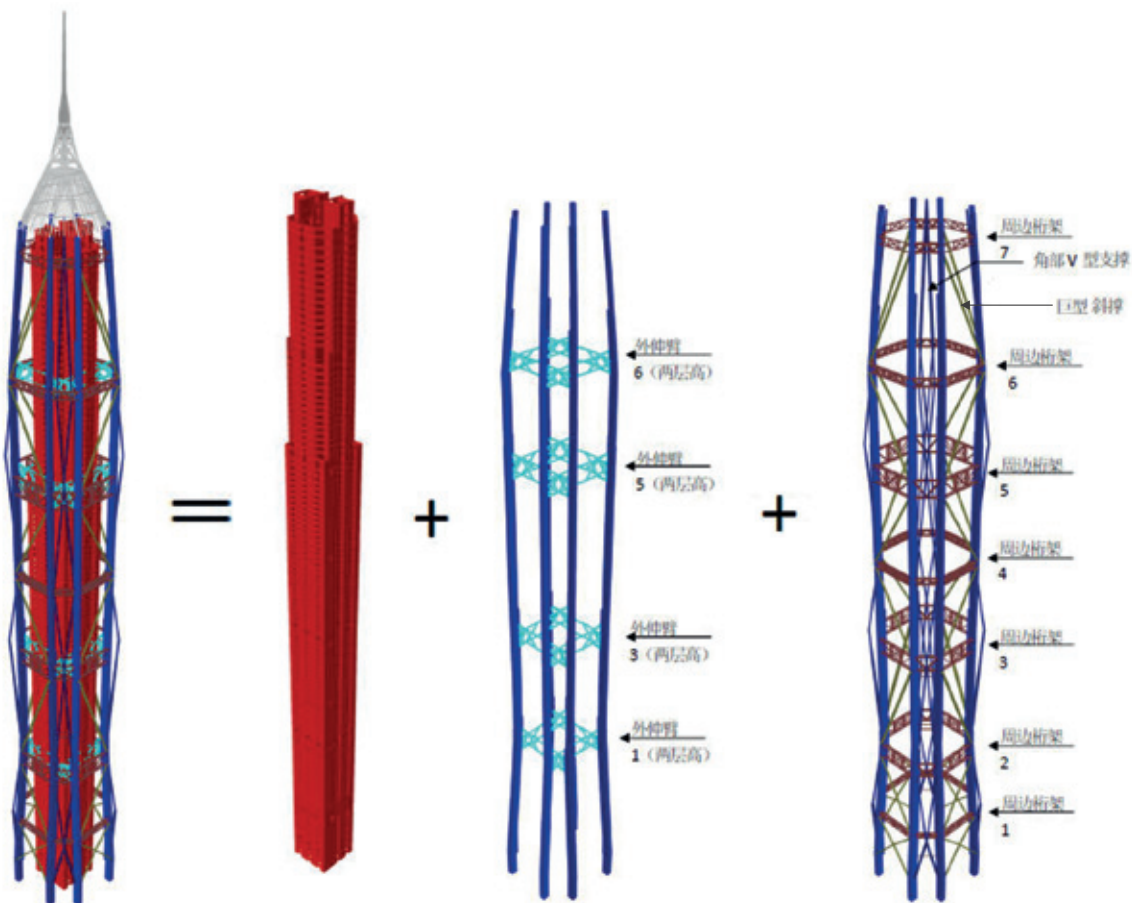


图9 深圳平安金融中心结构体系分解

沿塔楼全高设置 4 道钢外伸臂，将核心筒与巨柱有效地连接在一起，从而控制层间位移，改善结构的性能和冗余度，增加结构抗侧刚度。7 道空间双桁架及单角桁架均匀布置于每区避难 / 机电层，连接巨柱，将塔楼的外围形成巨型框架，承担大部分由侧向力引起的倾覆力矩。

天津高银 117 大厦（图 10）建筑高度 597m，共 117 层，采用巨型框架 - 核心筒 - 巨型支撑结构体系。巨型框架构成的周边结构构成了多道设防的结构体系，提供了强大的侧向刚度。底部节间考虑建筑主入口要求为人字支撑，其余节间采用交叉支撑，以求最大程度地发挥构件效率。由于建筑方面要求弱化交叉支撑的视觉效果，避免斜支撑及边梁柱相互交叉导致传力路径不清晰，设计中采取了将斜撑与周边框架在平面上错开的方案，两者相互独立。

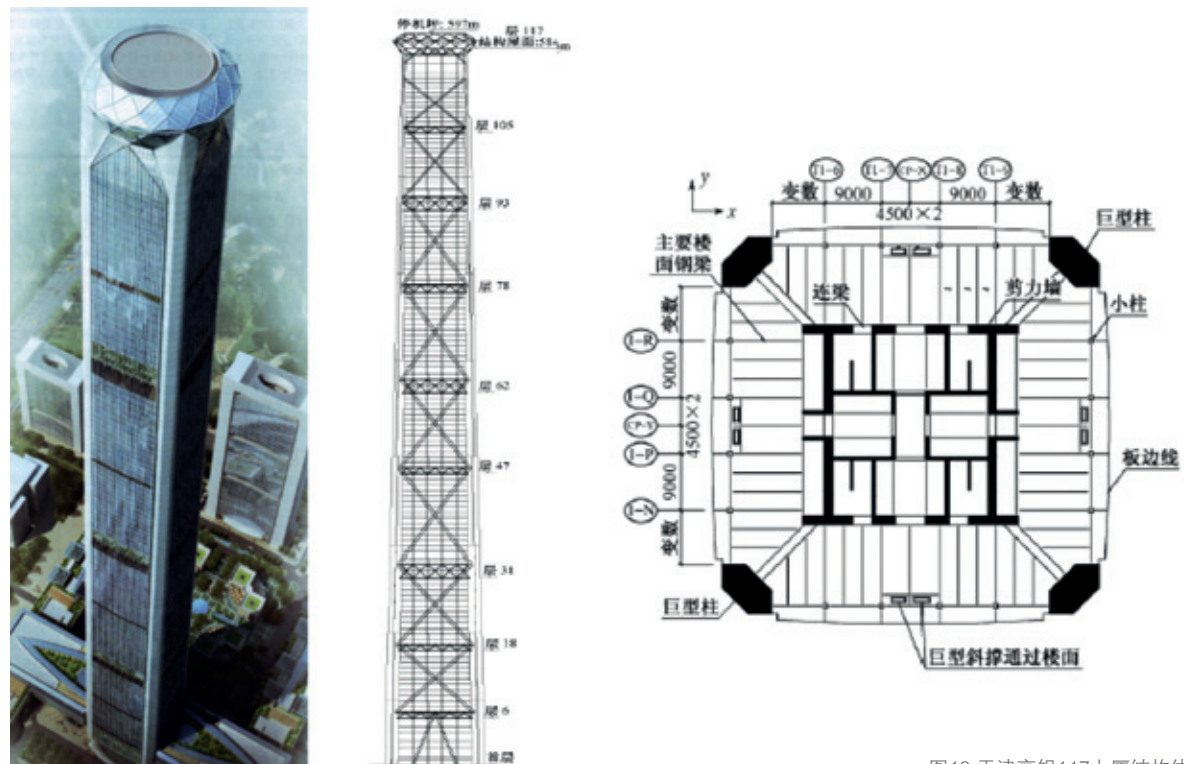


图10 天津高银117大厦结构体系

进一步从材料角度分析超高层建筑结构体系的发展。国外高层、超高层建筑以纯钢结构为主，而我国以钢-混凝土混合结构居多。图 11 以材料为分类标准，统计了我国 250m 以上各超高层建筑结构体系的使用率。钢-混凝土混合结构之所以得到较大发展，是因为其可有效地将钢、混凝土构件进行组合，既具有钢结构的技术优势，又具有混凝土造价相对低廉的特点。如上海环球金融中心及金茂大厦内部均为钢筋混凝土核心筒，外框为型钢混凝土柱及钢柱；正在建设中的上海中心采用了巨型框架-核心筒-外伸臂结构体系（混合结构）。

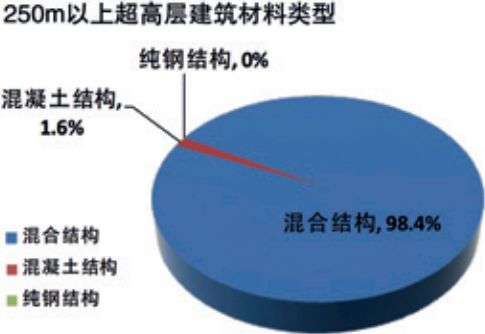


图11 250m以上超高层建筑材料类型（截至2018年，共258幢）

我国超高层建筑经济性的分析

超高层建筑作为体现一个地区的标志性的载体，不仅承担着重要的使用功能作用，而且组成了一个城市的天际线。因此，超高层建筑设计不能仅从建筑方面考虑，也不能仅从结构效率方面出发，它是一个综合的产物，需要各方面的协调。超高层建筑结构工程造价的影响因素主要包括：建筑造型与平面布置、建筑物所在地区的地震烈度、结构体系选型以及各个国家结构设计规范等。

本节统计了上海（地震设防烈度7度）、郑州（地震设防烈度7度半）及兰州（地震设防烈度8度）地区共7座超高层建筑的建安造价和土建造价，以分析建筑高度、结构体系、地震烈度对工程造价的影响。图 12 为 7 座超高层建筑建造安装与土建工程的单位面积造价。图 13 以上海中心为例，给出其土建工程各部分造价及其占土建工程总造价的百分比。



图12 超高层建筑实际工程造价统计

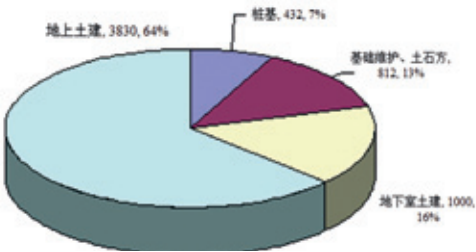


图13 上海中心大厦土建工程各部分造价对比（相对于塔楼总建筑面积）

总结

- 由本文的数据分析结构可得到如下结论：
- (1) 我国超高层建筑的数量和高度都在迅速发展。
 - (2) 我国超高层建筑的分布地域明显由长三角、珠三角地区向全国其他区域扩展，环渤海地区以及部分二线城市超高层建筑发展快速。
 - (3) 我国超高层建筑结构体系与塔楼高度有一定关系，随着塔楼高度的增加，巨型框架和巨型支撑应用较多。
 - (4) 我国混合结构是超高层建筑结构材料应用的主流。
 - (5) 我国超高层建筑的结构造价占总造价的 30%~40%，随着塔楼高度的增加，结构造价将有所提高。