

复杂功能超高层建筑的结构设计挑战

Challenges of Structural Design of Mixed-use Ultra High-rise Buildings

撰文 Dennis Poon, Paul Lew, Ling-En Hsiao, Yi Zhu, Paul Fu, Steve Zuo
Thornton Tomasetti Inc. (美国宋腾添玛沙帝工程顾问公司)

0 引言

总部位于美国纽约的宋腾添玛沙帝工程顾问有限公司 (Thornton Tomasetti Inc., 简称TT), 是一个专长大型复杂结构设计的公司, 其凭借专业实力, 参与了世界前20个超高层建筑中近一半项目的结构设计, 包括已建成的中国台湾台北市的世界金融中心 (即台北101)、马来西亚吉隆坡的双子石油大厦、上海的恒隆广场和正在建设中的上海中心、芝加哥螺旋塔、平安国际金融中心等。复杂超高层建筑的实现从来离不开结构设计的支撑, TT的结构工程师们在与Adriam Smith + Gordon Gill, Gensler, Pelli Clarke Pelli Architects, John Portman & Associates, RMJM, Santiago Calatrava, KPF, SOM, Pei Cobb Freed等国际知名建筑事务所的建筑师们长期合作的过程中积累了宝贵的经验, 以下将结合具体案例从结构师的角度阐述复杂超高层设计所面临的挑战, 希望对建筑师有所借鉴。

由于超高层建筑结构需要用到大量材料和承受巨大内力, 超高层结构施工的可行性成为一个首要的问题。尽管从“理论上”来讲通过无限的材料来构想出超高层塔楼的设计方案是可能的, 然而由于现有施工条件的制约, 最好的结果是这个方案没有实践性, 最差的结果则是这是个可能失败的方案。

超高层塔楼所需的材料用量直接导致了可使用面积和结构所需材料之间的矛盾。从经济角度来看, 超高层结构中混凝土用量越多越好。但是混凝土占用的单位面积是钢的6倍, 混凝土用量越多意味着建筑可使用或“可租赁”面积越少, 这是设计者需要考虑的重要经济因素。在超高层建筑中使用混凝土的主要优势是额外的混凝土质量具有更高的阻尼来消耗地震作用产生的能量 (混凝土与钢的阻尼比是2%比1%) 以及可以更好地减小结构风荷载作用下产生的加速度。但是值得注意的是超高层结构质量增加会增大相应的地震力。

在另一方面, 结构钢有其自身的优点。首先, 从建筑角度来讲, 它所占据的可使用面积较少, 约是混凝土的1/6, 在超高层建筑中, 底部混凝土巨柱的面积有可能接近30m², 损失的可使用面积是对经济有害的因素。其次, 尽管结构钢的成本较混凝土来说相对要高, 但是在做材料选择决定时另一个会倾向于使用

钢的重要因素是结构钢材受拉时的附加延性。再次, 从可靠度角度来讲, 钢节点更可靠、更有韧性和富余度。然而在使用结构型钢上是有许多限制的, 用于焊接节点的钢板厚度通常不超过100mm, 以避免材料缺陷。虽然受拉工字钢的翼缘板厚度可以超过100mm, 但它往往需要更复杂的施工步骤, 特别是焊接的时候, 以保证钢构的受拉性能和延性性能。

随着地震活动下“性能化”设计的出现, 超高层结构的延性性能是设计时需要考虑的关键。在地震情况下, 钢结构的优势从延性角度来讲是至关重要的, 因此, 混合结构成为当今超高层结构设计的流行趋势, 即在混凝土柱或墙体内预埋型钢构件。这样做的好处是保证主要构件的连续性以形成具有延性节点的构架。由主要结构柱的转换或巨柱/核心筒的不连续所引起结构的不连续是不允许的。虽然主要结构构件的转换在“计算上”是可行的, 但是其施工可行性是有问题的。在构想超高层结构系统的时候, 需要寻找连续的传力路径。

本文结合已经建好的都曾经是世界第一高楼的吉隆坡石油双塔和中国台湾的台北101以及在建的上海中心大厦、深圳平安塔楼、韩国151仁川塔楼和美国芝加哥螺旋塔楼项目, 讨论超高层建筑当前的设计思路, 并论证这些主要原则。

1 石油双塔

建筑设计: Pelli Clarke Pelli Architects

结构设计: TT

石油双塔是第一座超高层现代塔楼^[1]。塔楼主结构允许使用钢筋混凝土材料, 大大简化了施工过程。石油双塔 (图1) 利用中间核心筒和周边巨型框架 (图2) 达到452m的高度。

在塔楼中间机电层处的一个方向上采用大家所熟悉的“软外伸臂”。石油双塔核心筒外部墙体在底部达750mm厚, 周边巨型框架柱直径达2.4m, 图3为周边框架梁柱节点。

塔楼抗侧力体系中承担倾覆弯矩的比例为: 核心筒承担50%, 周边巨型框架承担50%。石油双塔只采用钢筋混凝土作为主要抗侧力体系, 而楼面体系则采用钢结构, 可以允许租户灵活布置。石油双塔是纯混凝土结构, 从地面延伸直到452m高。



图1 石油双塔

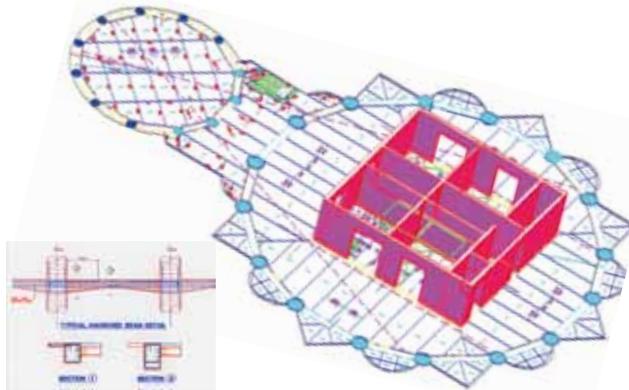


图2 典型楼面的等角视图



图4 两幢塔楼之间的天桥

经过分析发现，钢筋混凝土足以抵抗相应的侧向力，同时与其它设计方案相比性价比更高。由于混凝土结构的自重，结构加速度控制在ISO: 10137预期限值内，不需要调频质量阻尼器。天桥成为该独创性项目的标志图像之一（图4），支撑天桥的两根钢桅杆构件非常细长，在其内部加装阻尼器。

2 台北101

建筑设计：C.Y. Lee and Partners

结构设计：Evergreen Consulting Engineering, Inc., TT

台北101是在石油双塔建成后的第二幢超高层塔楼（图5）^[2]，高508m，地上101层，是目前世界第二高楼。塔楼的主要抗侧力体系主要是钢结构，最大限度地减小了结构面积，增加了可使用（租赁）面积。塔楼独特的外部层叠轮廓是通过周边框架形成的。台北101是超高层塔楼结构设计中第一个采用混合抗侧力体系的项目。台北位于地震活动带，按规范要求需建立双重结构抗侧体系。主要抗侧力体系由钢支撑核心筒、外伸臂和8根巨柱组成（图6，7）。外伸臂有11道，底部4道外伸臂两层楼高，其余外伸臂一层楼高。在塔楼周边设置抗弯延性框架，以满足在地震活动带需设置双重抗侧力体系的抗震设计要求。

延性框架单元倾斜布置以形成层叠轮廓，它们由机电层的转换环带桁架支撑，将各区的重力传到巨柱上。这使独特的建筑幕墙层叠效果得以实现，成为塔楼的标志。转换环带桁架和巨柱形成了周边巨型框架，增加了每区框架的延性。

组合巨型钢柱大大减小了巨柱的面积。巨柱为箱型截面，在设计、制造和现场装配时都非常仔细小心（图8）。

组合巨柱的最大尺寸是3m×2.4m。每一个箱型截面包含约2m高的箱型外包板、底板、加劲肋和可灌注高墙混凝土的中心圆孔，通过中央圆柱体混凝土柱将不同截面尺寸的柱相互连接起来。在底板上切割很多小圆孔，使混凝土竖向钢筋连续。组成箱型截面的型钢板厚度尺寸，要求它们在严格的标准下进行焊接。首先，钢板必须具有高延展性，通过材料缺口韧性实验测定。其次，焊接区域需要预热，然后整个焊接过程的温度要保持不变，且缓慢降温。第三，如有必要，所有的全融透焊接由超声波测试和X射线测试。水平底板与外伸臂以及环带桁架对齐，将桁架的力传至巨柱。

为了使台北101塔楼的加速度控制在ISO: 10137预期限值内，在结构内设置了一个独特的钟摆式调频质量被动阻尼器



图5 台北101

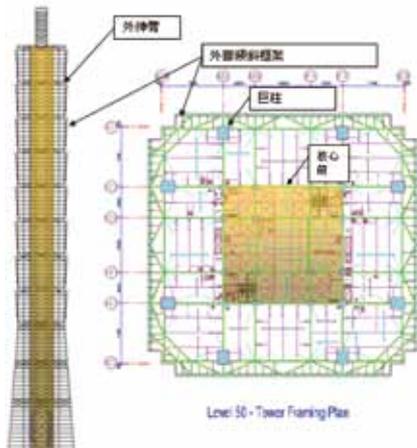


图6 抗侧力体系立面图

图7 典型平面图



图8 组合巨柱截面



图9 钟摆式调频质量阻尼器



图10 上海中心大厦

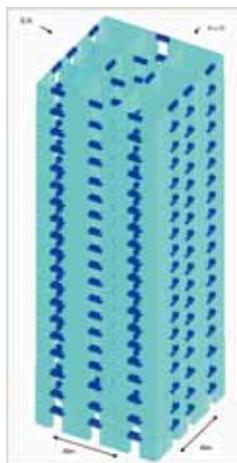


图11 上海中心核心筒墙体

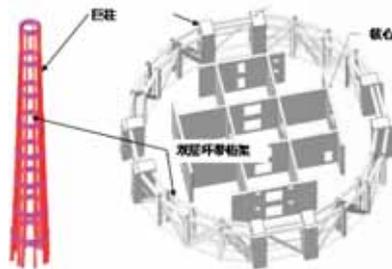


图12 上海中心巨型框架

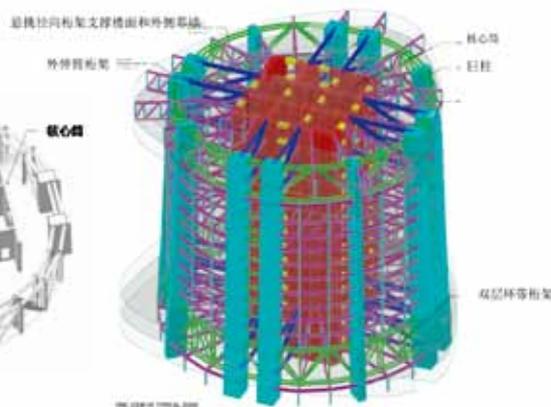


图13 上海中心塔楼抗侧力体系

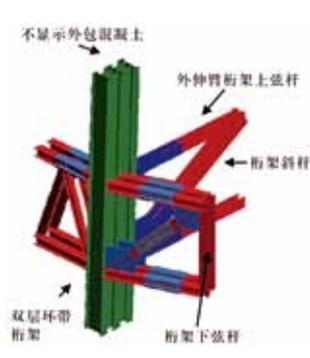


图14 外伸臂连接详图

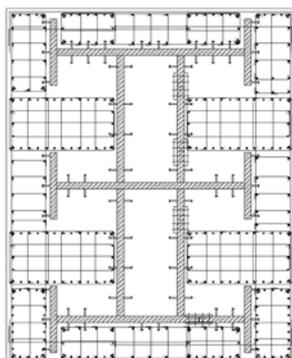


图15 巨柱构造剖面图

(TMD)，它成为了建筑的设计特色(图9)。钟摆形式的调频质量阻尼器由8根缆绳悬挂的660t重圆球组成。一系列侧向阻尼(冲击振动吸收器)被用来协调建筑结构的调频质量阻尼不超出设计允许的范围，然后“阻尼”建筑物的加速度。就在台北101完工前，台北发生了一次里氏7.0级地震，塔楼结构表现良好。

3 上海中心大厦

建筑设计：Gensler

结构设计：TT

国内合作设计：同济大学建筑设计研究院

632m高的上海中心大厦正在进行施工。它将是世界第一高楼和世界第二高楼(图10)^[3]，它代表了超高层建筑的最新理念。超高层结构设计的基本原则之一是结构传力路径的连续性，这对核心筒的构型尤为重要。核心筒必须被当作整体而非独立的结构构件。核心筒的某些墙体可以随着标高的上升而减少，但是不能偏移、转换或者是增加。如中国的抗震专家们不同意核心筒墙体的转换，我们也持同样观点。由于转换而产生的应力集中会造成核心筒严重的应力超限。如果核心筒墙体上下连续，而仅在底部增加新的墙体，应力集中就会大大减小。这个原则始终贯彻在上海中心大厦项目的设计中，建筑师在限制的几何尺寸内进行设计(图11)。这是电梯需求根据不同使用功能而改变的复杂功

能超高层建筑中的典型挑战。

超高层塔楼另一个重要方面是在满足强度和塔楼性能要求的同时能够最大限度地减小结构构件尺寸，因此存在矛盾要求。在世界上大多数地区，最经济的方案是采用混凝土巨柱，然而混凝土柱的面积约是钢柱的6倍，此外，钢结构节点更可靠，更有韧性和延性，在分析上比混凝土节点的分割更清晰。比如上海中心大厦，它和很多其他超高层塔楼一样使用性价比比较高的巨柱和外伸臂作为主要的抗侧力结构体系。为了能够最大限度地减小巨柱尺寸，塔楼采用了型钢-混凝土组合柱，组合型钢预埋混凝土里面，最大面积占柱总面积的5%。若不预埋型钢，所需要的巨柱尺寸将会增加25%~50%以上。上海中心塔楼主要的抗侧力结构体系是外伸臂体系+由巨柱和环带桁架组成的巨型框架(图12, 13)。

在超高层塔楼设计中的另一个关键问题是各不同主要构件之间的节点性能，因此第一步要做的是设计非常可靠并经过反复测试的节点。预埋型钢柱有利于满足这种标准。预埋型钢的节点设计基于设计者对当前组合型钢截面的全面了解，不需要将混凝土和型钢连接在一起。预埋的型钢有其自身的惯性矩并和外伸臂桁架和环带桁架直接连接。预埋型钢柱的构造是围绕连入钢柱各个钢构件的连接节点来设计的。

第一个连接到巨柱内型钢柱的关键构件是外伸臂，巨柱内的预埋型钢柱的主轴方向与外伸臂对齐。次轴方向根据与外伸臂几乎正交的环带桁架对齐。由于圆形的楼面几何形状，环带桁架在巨柱处有一个很小的角度变化，在角度变化的地方设置加劲肋。外伸臂连接到焊在预埋型钢柱上的钢板上，环带桁架则连接到焊在预埋型钢柱上的端(臂)上，在巨柱混凝土外侧拼接(图14)。

在组合结构施工的时候，一个额外的顾虑是外包混凝土的连续性和整体性。上海中心安放在巨柱内部的型钢柱是安排好的，为了使混凝土能划分成一系列小柱(图15)。这些混凝土小柱垂



图16 平安塔楼



图17 结构模型

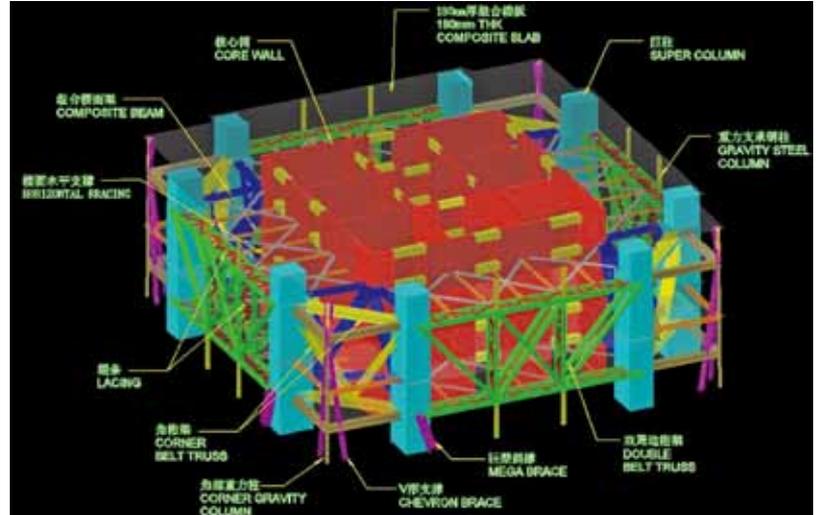


图18 机电层

直连续，且不被内置型钢阻挡。混凝土小柱之间的混凝土水平连续，通过水平布置的长方形箍筋以及向外伸臂、环带桁架和楼面梁相连的盒状放射形节点实现。

为了减小楼面梁对外包混凝土的阻碍，从内置型钢上预留端板直到混凝土表面，三维实体有限元模型的分析方法被应用到巨柱、外伸臂和环带桁架的节点分析上，以分析研究组合截面的性能，来确定节点之间的相互作用是否合理。

4 平安金融中心

建筑设计：KPF

结构设计：TT

国内合作设计：CCDI中建国际设计

平安大厦高623m（图16）^[4]，采用与上海中心相似的结构设计理念，同时引入角部V型大斜撑和巨柱之间的外侧中心大斜撑，以满足中国抗震规范规定的双重抗侧力体系的要求（图17）。

外围大斜撑提供抗侧力体系10%的刚度，主要抗侧力体系是核心筒+外伸臂+巨柱。为减小巨柱尺寸，在巨柱内预埋型钢，占巨柱面积的6%~8%，与纯混凝土巨柱相比减小面积达1/3。平安塔楼的外伸臂与核心筒外墙基本对齐，允许外伸臂在核心筒外墙

上的节点布置更大的空间。在塔楼顶部安放了一台调频质量阻尼器以减小塔楼的加速度运动，提高人的舒适度。

5 仁川151大厦

建筑设计：John Portman & Associates

结构设计：TT

位于韩国的仁川151大厦（图19）塔楼总高599m，结构在一个方向上有成对的两个核心筒，由3道4层高的桁架相连（图20）。

这些桁架连廊一直延伸到建筑外立面，从首层到45层两个核心筒连为一体以提高侧向刚度。仁川151大厦的抗侧力体系采用变化的“虚拟外伸臂体系”，因为环带桁架在塔楼两个平行面上与核心筒是分离的，但实际上仍然产生外伸臂的作用。为了使环带桁架具有外伸臂的效果，在结构设计上必须包括两个结构构件：1）垂直于核心筒到外侧平行面的外伸臂延伸到外侧环带桁架；2）在环带桁架的上下弦杆上使用楼面水平斜撑将环带桁架连到核心筒形成“虚拟的外伸臂体系”。

仁川151具有特有的空气动力问题，塔楼屋顶的形状大大增加了风力，为了减小这种影响，在屋顶处增加狭缝以减小风压。同时，调频质量阻尼器也可以提高塔楼中人们的舒适度。



图19 仁川大厦

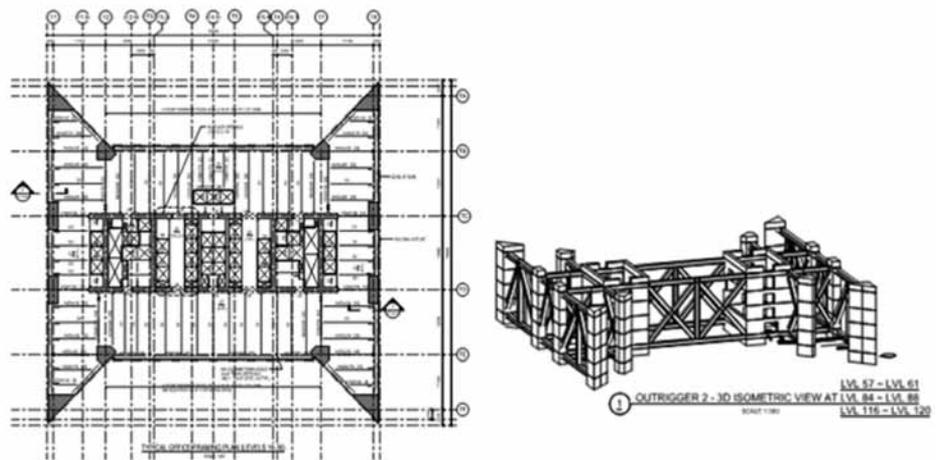


图20 外伸臂构造



图21 芝加哥螺旋塔



图22 底部出入口和旋转建筑表面放大

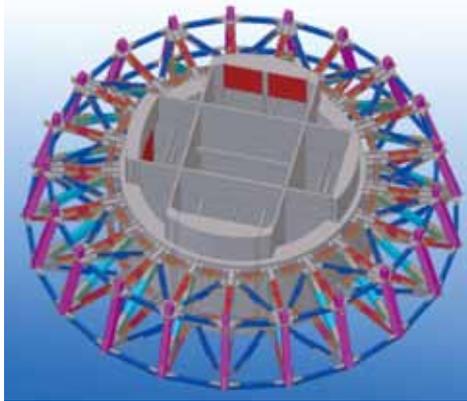


图23 外伸臂构造

6 芝加哥螺旋塔

建筑设计: Santiago Calatrava, Perkins & Will

结构设计: TT

芝加哥螺旋塔(图21, 22)塔楼高610m, 有160层, 外层幕墙从下到上随板边线螺旋上升旋转360°。主体结构轴向对称, 核心筒垂直上升, 芝加哥螺旋塔是圆柱体型结构, 其轴向对称的特点带来很多好处。

其抗侧力体系是四道指环圆形外伸臂桁架+圆柱形核心筒(图23)。指环圆形外伸臂与核心筒的连接节点被简化了。另一个影响设计的因素是如何处理加速度问题。在亚洲, 除了要解决加速度问题, 还要着重解决高刚度需求问题, 因为在亚洲要求结构的自振周期比较低。低自振周期意味着低自重, 自然而然地就会增加建筑的加速度。增加结构重量可以降低加速度, 比如使用混凝土材料而非钢, 因此为了控制加速度, 即便知道会引起更高

的自振周期和地震力, 仍然希望结构能够具有更高的质量。芝加哥螺旋塔就是这样达到人们的舒适度要求的。这种通过增加重量减小加速度的做法可以更好地适用于低地震区。

7 结论

复杂功能的超高层塔楼结构设计任务是相当复杂的, 本文讨论了完成这些重要任务的基本原则。超高层塔楼结构设计的关键是传力路径和材料的连续性, 应避免材料和应力的突变。此外, 所有竖向构件(柱和核心筒)必须作为整体共同作用, 这需要沿建筑高度设置间隔的转换环带桁架, 将二级柱里的力传到竖向连续的构件里。这种转换通常设在机电避难区, 这样传到巨柱、一级柱和墙里的力就会一起抵抗塔楼承担的侧向力。超高层塔楼会产生很大的变形, 其他非结构构件包括幕墙等必须与变形相协调。必须说明, 如此重要的超高层项目, 结构的任何一个部分都必须战胜文中所列举的各种挑战。

参考文献

- [1] CHARLES H THORNTON, UDOM HUNGSPRUE, LEONARD M JOSEPH. Design of the world's tallest buildings – Petronas Twin Towers at Kuala Lumpur City Centre[J]. The Structural Design of Tall Buildings, 1997 (6): 245–262.
- [2] DCK POON, S SHIEH, LM JOSEPH. Structural design of Taipei 101, the world's tallest building [C]//Proceedings of the CTBUH, 2004.
- [3] DENNIS C K POON, LING-EN HSIAO, YI ZHU, et al. Structural analysis and design challenges of the shanghai center [C]//美国土木工程师协会结构大会, 2010: 3088–3103.
- [4] DENNIS C K POON, LING-EN HSIAO, YI ZHU, et al. Structural analysis and design challenges of the Ping An Tower under consideration of the upcoming China code [C]//美国土木工程师协会结构大会, 2011: Buildings, 528–540.

TT核心成员暨本文作者简介



Dennis Poon (潘子强)
TT董事会副主席和执行总裁



Yi Zhu (朱毅)
TT资深副总裁



Irwin P. Lew
TT高级副总裁



Dr. Ling-En Hsiao
TT资深副总裁



Paul Fu (傅国勇)
TT副总裁



Steve Zuo (左晴)
TT副总裁