

京城第一高楼“中国尊”项目结构技术挑战

——访“中国尊”项目方案和初步设计负责人刘鹏

《建筑结构》：请介绍一下中国尊项目的主要设计节点和历程，目前项目处于什么阶段？

刘鹏：中国尊项目（图 1）的设计由五家公司组成的设计联合体完成，其中 ARUP 负责结构设计的方案和初步设计阶段，北京市建筑设计研究院负责施工图设计。项目的方案设计和初步设计历时两年多，目前项目已进入施工图设计阶段。



图 1 塔楼整体和 CBD 核心区鸟瞰图
(由建筑设计 KPF 公司提供)

《建筑结构》：结构专业在介入该工程时，在满足业主不同阶段对建筑功能不断调整的要求下，结构方案是如何紧密配合的？

刘鹏：在项目的方案设计阶段考虑过酒店、公寓等混合业态的方案。当时业主的期望是酒店和公寓的楼层不出现斜撑构件，因此结构在这些楼层采用了密柱抗弯框架的形式，而在办公楼层采用巨型斜撑的形式。如何将这两种抗侧力体系结合成一个连贯且一致的外框结构的确给结构设计带来了很大的困难。最后业态确定为全办公的形式，外框得以统一为全高巨型交叉斜撑结构，结构体系也更为合理。

《建筑结构》：本项目采用了参数化设计方法，相对于传统设计手段，其优势体现在哪些方面？采用该方法后对于结构工程师的工作带来哪些便利？

刘鹏：本项目的结构体系与天津高银 117 有很多类似之处，但本项目的难点在于其曲面的造型。由于立面呈尊形（图 2，3），每个楼层的外轮廓尺寸均不相同，角部的圆弧倒角半径也每层不同。

更重要的是，在方案设计阶段建筑师对大楼曲

线的不同几何定义进行了多次的研究，对于每个方案，作为结构工程师都需要给出量化的性能结果，以便于业主和设计团队做出决策。参数化的结构设计方法（图 4）使得我们可以和建筑师的几何模型无缝对接，实时生成相应的结构模型，大大节省了工作量，加快了响应速度。



图 2 整体立面效果图和“尊”的几何尺寸
(由建筑设计 KPF 公司提供)



图 3 塔冠建筑效果图及结构布置示意图
(建筑效果图由建筑设计 KPF 公司提供)

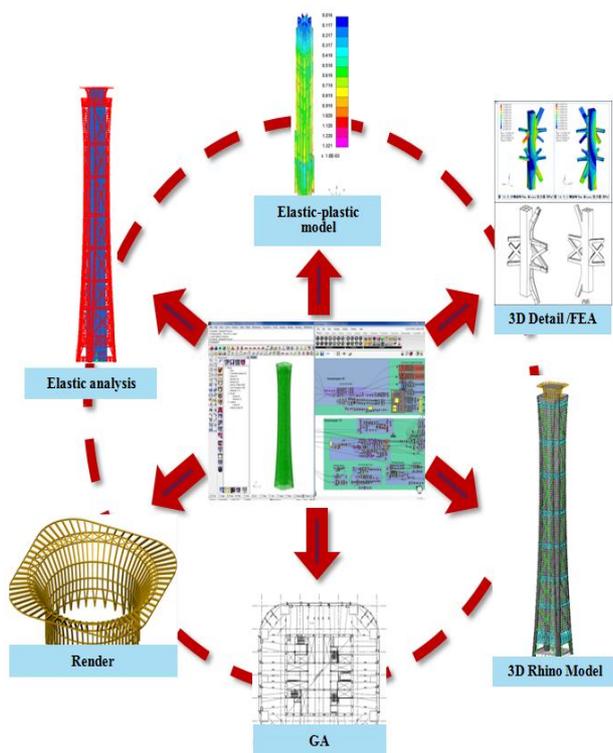


图4 参数化设计

《建筑结构》：项目都用到的哪些参数化软件？在项目设计过程中的作用体现在哪些方面？

刘鹏：项目的参数化设计软件包括犀牛 (Rhino) 造型软件以及其参数化建模插件 Grasshopper。这些软件可以模拟结构几何从最基本的参数到每个构件的几何定位的定义过程。由于这些软件都是纯几何建模软件，我们再自行开发了结构信息插件以及和结构分析软件等的接口，基本上可以自动产生结构模型。

《建筑结构》：为完美体现“尊”的整体建筑造型和美学要求，在确定巨柱的柱线找形与外幕墙的合理匹配方面，结构专业做了哪些方面的工作？

刘鹏：在参数化设计手段的辅助下，我们得以考察上百个巨柱的找形方案，评估的原则是：

- (1) 结构刚度最大。
- (2) 柱线位于一个垂直面内以减小附加力。

(3) 在满足最小距离的前提下尽可能减小结构柱外皮与楼板边的距离，以最大化利用内部空间。最后的方案满足了上述原则，尤其是对于多数楼层结构，柱外皮与板边最小距离保持在 500mm 左右。另外值得一提的是，在各区之间转折时我们对一个拐点和两个拐点的方案做了很多的研究，最后认为局部区域采用两个拐点的方案可以提供更大的侧向刚度，同时减小柱外皮与板边距离，整体

来说利大于弊。

《建筑结构》：本项目地处北京，抗震设防烈度为 8 度，与国内同类型超高层建筑相比，在受力特性方面有何特别之处？在超限审查环节，哪些方面的问题是参与该项目设计工作的各方共同关心的，各方是如何协调解决的？

刘鹏：本项目是国内目前 8 度区的最高楼，在全世界同等设计烈度下也是最高的建筑物。与其他 7 度区的超高层相比，抗震设计方面的要求更高，值得一提的是：

(1) 在方案初期经过协调选取了较大的建筑底盘尺寸，有效降低了高宽比，为结构的可行性创造了条件。同时在建筑上也凸显了收腰造型的效果，达到了双赢的结果。

(2) 功能业态的统一为形成单一形式的外框巨型结构创造了重要的条件。

(3) 顶部尺寸放大给收腰部的核心筒提出了更高的抗震性能要求，这一点由弹塑性分析结果发现，并对其进行相应加强。

(4) 本项目还存在的一个挑战是如何在 8 度区较好土质条件下满足剪重比的要求。这方面也是在与超限审查专家组的多次沟通，对结构体系进行了多次的优化和调整，最终达成了各方均满意的设计，项目的演变过程见图 5。

《建筑结构》：巨型柱作为关键受力构件之一，其截面选型受到诸多因素制约，在总结和吸收类似工程成功经验的同时，如何做到最优选择？

刘鹏：本项目的巨型柱均采用钢管混凝土柱（图 6~8），第 0 区为六边形的多腔钢管混凝土巨型柱，与天津高银 117 类似。以上各区基本上是矩形钢管混凝土柱，与台北 101 和深圳京基 100 大楼类似。钢管混凝土已经成为一种成熟的施工技术，与钢筋混凝土截面相比，具有不用模板、避免钢筋锚固的复杂性的优点，同时，钢管与巨型斜撑等钢构件的连接也较为方便，但需要注意的是需要保证内部混凝土的浇筑质量和组合结构受力的整体性。

《建筑结构》：弹塑性计算分析能直接验证结构体系的抗震性能是否合理，并且得到第三方设计单位的计算验证，请谈谈弹塑性的计算工作对本结构设计起到哪些有益的指导作用？

刘鹏：弹塑性时程分析对本项目的设计有重要的指导作用。我们和第三方弹塑性分析单位中国建筑科学研究院的结果相互印证，得出收腰处和顶部楼层的核心筒需要进行特别加强的结论，进而指导了结构设计的调整。在本项目的弹塑性时程分析

	第一次研讨会 2011年8月	第二次研讨会 2012年4月	第三次研讨会 2012年8月	专家审查预审会 2012年12月	正式专家审查会 2013年2月
塔楼结构体系					
建筑高度/结构高度	555m/546m	528m/524m	528m/524m	528m/521.6m	528m/521.6m
楼层数	119层(8区)	108层(8区)	108层(7区)	118层(7区)	118层(7区)
结构底部尺寸(m)/高宽比	67/8.1	72/7.2	73.6/7.1	73.7/7.1	73.7/7.1
功能	办公、酒店、公寓、观光	办公、公寓、观光	办公、观光 (公寓取消)	办公、观光	办公、观光
斜撑高度(m)与总结构高度比值	约280m(至第4区) 约50%	350m(至第5区) 约66%	全高布置	全高布置	全高布置

图5 项目的演变过程

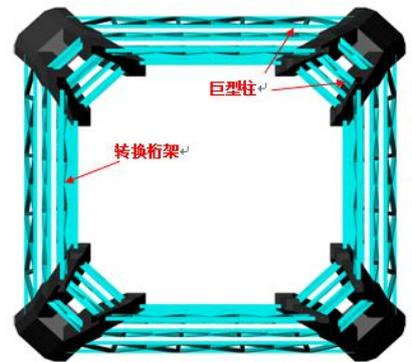
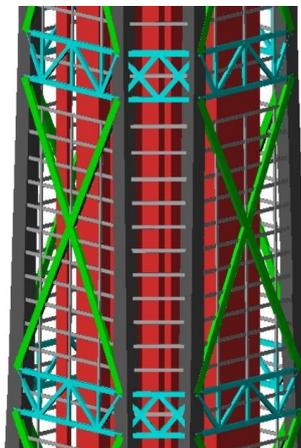
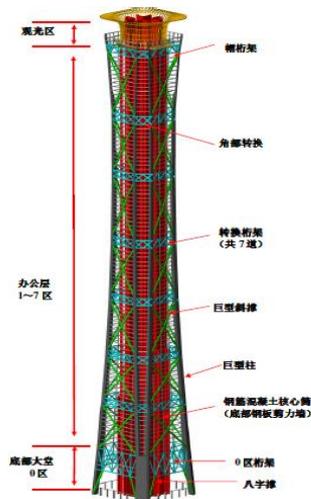


图6 最终采用的双重抗侧力结构体系 图7 巨型框架周边结构空间关系示意图

图8 巨型柱布置俯视图

中，我们也发现了地震波对分析结果的判断有影响，这也说明现在的非线性弹塑性时程分析仍然是一个较为复杂的计算手段，需要对相关理论有深入的理解，而不能仅仅依靠软件。

《建筑结构》：由于塔楼为超高层建筑，导致传递到柱底的轴力是非常巨大的，在基础设计方面，你们对桩型、桩径、单桩承载力的确定，以及优化桩基布置和筏板应力分布等做了大量的研究分析和对比优化工作，最终的基础形式是如何兼顾以上因素并加以合理确定的？

刘鹏：本工程为超高层建筑，上部结构传至基础的荷载巨大，在最终的桩筏基础形式的确定过程中，进行了以下几方面的综合考虑：

(1) 桩型确定方面：根据相关地勘资料并参考邻近项目经验，采用钻孔灌注桩，并进行桩端与桩侧复式后压浆施工，这样可以有效地提高单桩承载力并控制沉降。采用性质很好的第12层卵石、圆砾层为桩端持力层，有效桩长达40.1~44.6m，不同区域考虑桩径分别采用1000mm与1200mm。基于地勘资料提供的参数进行估算，并且经过试桩静

载荷试验确定，两种桩型的单桩承载力分别可达到 14500kN 与 16000kN。

(2) 桩基布置方面：充分考虑了 2011 版基础规范的变刚度调平设计精神，在荷载巨大的核心筒与巨柱范围，布置单桩承载力及刚度较大的桩（桩径 1200mm）；在塔楼其他荷载相比较小的区域，则布置单桩承载力及刚度较小的桩（桩径 1000mm）。这样有利于控制总沉降量及差异沉降变形，减小筏板挠度，控制筏板内力。

(3) 筏板布置方面。筏板采用变厚度布置，在荷载较大的塔楼区域筏板厚度 6500mm，荷载较小的纯地下室部分筏板厚度 2500mm，两部分过渡区域筏板厚度 4500mm。并考虑到荷载传递到筏板的上部结构荷载巨大，筏板范围向东西两侧扩大，来容纳更多基桩承担上部荷载。并且在地下室巨柱和核心筒外侧设置翼墙，来使荷载分布更平均，同时可以增强筏板抗冲切承载力。

目前桩基筏板方案，由设计团队经过充分的上部结构-地基-桩基协调变形分析后，不论在承载力方面还是总沉降、差异变形方面，均可满足现行规范的相关要求。

《建筑结构》：本项目先后做了哪些方面的试验研究工作，请总体介绍一下。

刘鹏：目前已经完成了 1:40 的振动台试验，在中国建筑科学研究院的实验室完成。模型经历了 8 度和 8.5 度大震地震波的考验，证明了结构的安全性。下一步会结合施工图设计进行一些构件和构造方面的试验。

《建筑结构》：由于在高烈度地区建造总高度超过 500m 的超高层建筑在我国尚处于起步阶段，本项目在设计中肯定会遇到前所未有的困难，请谈谈这方面的设计感受？

刘鹏：总的感觉是项目发展太快，对于设计理论与技术储备提出了很多挑战。我们在设计过程中在超限审查专家的指导下进行了很多的研究和探索工作。由于超高层建筑项目现在的发展主要在新兴国家，而且各国国情不同，需要国内结构设计界

同仁共同摸索适合中国市场的结构体系和设计方法。目前我们的超高层结构设计手法还有待丰富，希望在概念设计和性能化设计之间能找到新的平衡点。

对于中国尊（CBD Z15 项目），由于还在施工图设计阶段，后期还会有很多设计方面的困难和需要解决的问题，到时可由施工图设计单位——北京市建筑设计研究院进行相关经验介绍。

《建筑结构》：ARUP 公司近年来在国内先后参与了多项具有重大影响力的超高层建筑设计工作，高度超过 500m 的超高层建筑与常规的 200~300m 超高层建筑相比较，哪些是控制结构体系成立与经济性的关键性因素？作为一名优秀的结构工程师，哪些方面的能力最重要？

刘鹏：事实上 500m 以上的超高层建筑结构的安全和经济性对于建筑方案的制约效果更大。可以看到，已完成和正在进行的项目基本上是双轴对称或三轴对称的平面布局，立面造型上可以突破的手段较少，结构各种转换需要付出的代价也更大。因此，成就一个真正的超高层杰作对结构工程师的要求也更高，需要对结构体系本身以及与建筑美学的融合有深刻的理解。我们也在学习和摸索之中，希望下一个项目能有新的突破。



刘鹏，奥雅纳公司副董事，奥雅纳北京办公室结构负责人，在高层建筑、抗震设计及奥雅纳中国的项目上有着丰富的经验。参与/负责许多中国大陆及香港地区项目的结构设计工作，其中包括北京 CBD 核心区中国尊项目（528m），北京 CBD 核心区 Z6 地块项目（425m），中国国际贸易中心 3A 项目（330m），北京财富中心（260m），天津高银 117 大楼项目（597m），天津嘉里中心（333m），中央电视台总部大楼，大连裕景中心（380m），香港环球贸易广场（497m）等。作为奥雅纳东亚地区结构优化的专家，其负责许多奥雅纳项目的优化研究和工程服务。

（上接第 34 页）

考虑结构布置对节点的影响，造成节点构造、加工、安装复杂；也可能是由于我们建筑师节点控制能力不强、结构工程师的设计经验欠缺。这方面能力是我们大部分建筑师和结构工程师需要提高和完善的，还需要更多的沉淀。只有当我们既能提出新型、合理的结构体系，又能把结构细部设计得非常精致，我们才算从结构设计大国转变为结构设计强

国，实现中国的“结构梦”。关注细节也能改善结构方案，在深圳机场 T3 航站楼项目中，外方屋顶方案的主桁架之间为 2.25m 网格的匀质网壳结构，考虑施工方便，我们将网格去掉 1 半，网格由 2.25m 扩大为 4.5m，大大减小了网壳结构的安装工作量，虽然增加了次结构的安装量，但降低了安装难度、缩短了工期。因此，在细节上多花功夫，也很有价值，也能降低结构的综合造价。