

天津高银 117 大厦项目之方案和初步设计阶段

受访嘉宾：刘鹏，奥雅纳公司联席董事，奥雅纳北京公司结构负责人，天津高银 117 大厦项目方案和初步设计阶段结构设计负责人。

《建筑结构》：ARUP 公司近年来在国内参与了多项重大的高层项目，在结构设计方面积累了丰富的经验，请问对于一个超高层的项目，在权衡建筑功能和结构方案可行性的关系方面，需要结构工程师具备怎样的技术管理能力方能取得一个让各方都满意的结果？

刘鹏：结构是建筑空间的骨架，支撑其内部功能。高层和超高层建筑一般是把各种功能空间在垂直方向叠合，并通过共同的交通核连通。因此超高层的结构设计需要把握内与外、一般(楼层)与加强(楼层)、整体与局部之间的矛盾和协调关系，在空间和功能的限制下寻找最合理的传力途径，保证结构的安全。

本项目奥雅纳是由香港、北京和天津的团队共同参与，方案和初步设计前后历时三年，期间历尽了多次方案调整，深刻感受到超高层设计各专业之间的相互平衡和制约的关系。另外超高层设计周期长、任务多、团队规模大，



图 1 整体建筑效果图

而且本项目相关技术问题突破规范，不确定因素较多，可能产生诸多的不确定性和变化，结构工程师需要有丰富的经验、极高的责任心和良好的合作意识，结构工程师需要有丰富的经验、极高的责任心和良好的合作意识，且对技术难点有足够的敏感度和预见性。

《建筑结构》：在天津高银 117 项目方案阶段，结构工程师通过全力配合，最终实现结构平面和核心筒的双轴对称的格局，能与大家分享一下这个艰辛的历程吗？

刘鹏：由于天津高银 117 项目本身的高度和高宽比都已经超出常规，并且还处于中高烈度区，对于抗震设计来说，结构平面的规则对称是整个结构体系经

济性的基础，为最终通过巨型结构达到侧向刚度的最大化提供了条件。

专业配合过程中，特别对于核心筒，建筑本身形成“田”字形，即四个子筒通过“十”字形走道连接的布局为结构创造了良好的前提，但初始阶段受到建筑和机电专业的条件限制，楼电梯、设备、走道等形成的门洞宽度和开口方向并不相同，结构工程师强调结构需求的同时，积极协调各方，提供了不同的配合解决方案，我们的良苦用心，使建筑师逐渐接受我们的意见，进而微调了相关的建筑平面，相信最终规整对称的协调成果也会有利于后续的深化设计、构件加工、施工管理等方方面面，达到多赢的局面。

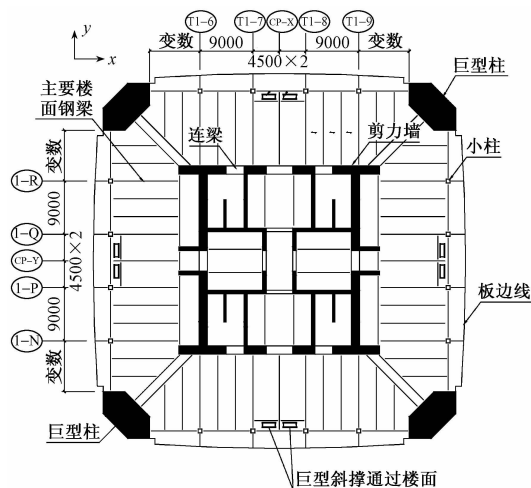


图 2 结构典型平面布置图

《建筑结构》：对于一个总高度将近 600m 的超高层设计任务，结构体系的选型方面面临哪些挑战和困难？请结合本项目介绍，谈谈结构方案最终确定的各阶段性成果？

刘鹏：为实现建筑布局并确保结构安全，结合工程经济性，充分发挥钢与混凝土两种材料的优势，对于外框筒在方案设计阶段依次考虑了几种不同的布置方案，通过不断的演进形成了最终的结果。

传统的密柱结构，即便增设含伸臂桁架和腰桁架加强层，这种体系对于抗震区 400m 以上高层建筑主要的问题是刚度难以满足要求，同时中国规范对于外框架作为第二道防线需满足一定的刚度和强度要求，使得框架柱截面尺寸较大，柱间净距狭小，难以

满足建筑对公共空间布局及视野的要求。柱总体含钢量偏高,多道伸臂桁架也增加了与核心筒连接的复杂程度和造价,并产生刚度突变问题。因此在较早阶段,结合本项目高宽比较大的特点,我们就已经意识到600m 级的超高层建筑,如果满足相应的技术指标要求,需要在结构体系方面向含有巨型支撑的巨型框架体系演进。

在方案和初步设计早期,天津高银 117 大厦考虑的是含有人字支撑或菱形撑的巨型框架体系,此方案充分利用了巨型框架刚度大的特点,但重力由密柱传递至地面层,其截面仍相当大,此外角部的巨型柱所受的重力不能够平衡水平力产生的拉力,仍未能达到建筑空间布置的要求。因此形成了巨型结构加次框架的结构方案,即巨型柱仅布置于四角。塔楼边柱在各区形成次框架柱,仅承受重力荷载,并将重力通过机电层的巨型转换桁架传递到两端的巨型角柱,边柱截面得以缩小,建筑空间较为开敞,结构也可以获得更大的抗侧刚度。在超限审查过程中,专家组提出了诸如要控制自振周期和最小初始剪重比的严格要求,要求结构整体刚度进一步提高。最终经过与业主及建筑师协调,除底部节间考虑建筑主入口的要求为人字支撑外,其余节间采用交叉撑的形式。此外,由于外框架刚度显著提高以至在大部分楼层超过了钢筋混凝土内筒的刚度,分析结果表明,伸臂桁架对于提高结构整体刚度的作用不明显,最终予以取消。结构最终采用的多重结构抗侧力体系如图 3 所示,分别由钢筋混凝土核心筒、带有巨型支撑筒、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,共同抵抗水平地震及风荷载。

由于建筑方面弱化交叉支撑的视觉效果要求,设计中采取了将斜撑与周边次框架在平面上错开的方案,两者相对独立,如图 4 所示。

《建筑结构》:请介绍一下本工程结构体系的各项控制性因素?

刘鹏:天津高银 117 大厦从结构高度、高宽比、所处的烈度等方面都给结构工程师提出了非常严峻的设计挑战,由此造成了对于结构整体刚度及其指标控制的难度,如剪重比、层位移、风载下舒适度、刚重比等指标同时成为该项目的控制性技术因素,之后的相应调整都可能对以上指标造成不同程度的影响。在结构设计调整过程中,需要不断平衡和关注以上因素。此外关键设计和分析参数的合理选取、主要抗侧构件选型和性能目标恰当确定,包括结构自重的控制等方面都是本项目重要的因素。

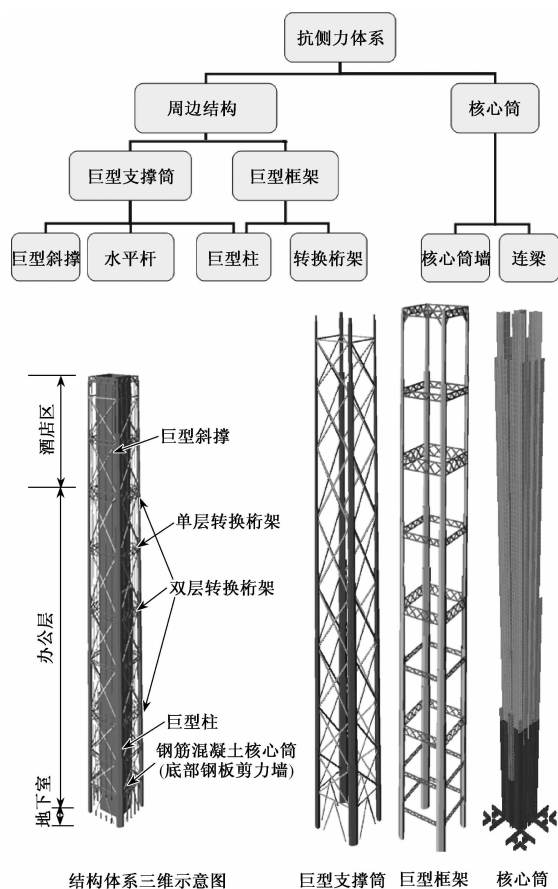


图 3 多重抗侧力体系示意图

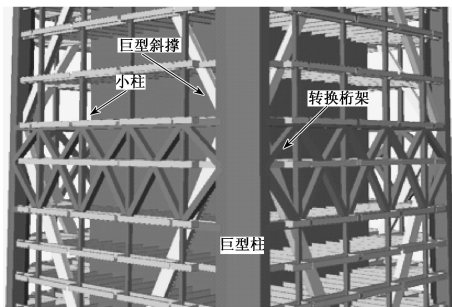


图 4 巨型框架与巨型支撑连接空间示意（双层桁架）

《建筑结构》:由于本项目结构体系的复杂性,结构计算模型既要考虑与实际相符,又要进行必要的简化,能和同行分享一下这方面的经验总结吗?

刘鹏:天津高银 117 大厦整体结构分析模型由于体量大、构件数量多,考虑运行时间对工作效率的影响以及软件技术条件限制等因素,需要作出相应简化和假定。

例如:对于多腔体复杂截面的钢管混凝土柱和组合钢板剪力墙这样的钢和混凝土形成的组合构件,由于构件内部通过构造(如栓钉)等措施,钢与混凝土之间实现协同变形,因此在模型中按照等刚度的原则

对不同组合构件按均质材料假定对弹性模量、容重及局部坐标等进行了对应调整。

再如,由于巨型柱截面巨大,在其连接节点部位,在杆单元上附加无质量的“刚臂”并与巨型斜撑和桁架连接,以模拟巨型柱的构件尺寸效应。需要注意的是,这样形式的巨型柱本身已经是一个小型的结构体,其节点域远小于整个截面,因此在详细设计中要考虑外力如何从节点向全截面扩散的问题。这样的简化也经过了试验的验证,以确保其满足平截面假定以及强度和刚度上的设计假定。

《建筑结构》: 本项目在专家论证和超限审查阶段,应当与各方均有充分的技术交流与协调,能介绍一下这方面的信息吗?

刘鹏: 本项目初步设计时正处新老规范交替阶段,本项目本身的挑战性也使得设计面临很多不确定性因素。我们和施工图设计方华东建筑设计院和结构顾问容柏生事务所方面有很多的沟通和交流,吸收了他们的很多宝贵的意见。本项目在正式通过审查前,在方案和初步设计阶段共组织了4次抗震专家研讨会和风工程专项审查会议,期间全国以及天津市组成的超限审查专家组对本工程先后提出了60多条主要意见和建议,绝大部分意见融入了最终的设计中。各方主要探讨的部分内容如下:

(1) 加速度反应谱6s后超长周期段的选取问题: 现行规范对此没有给出明确意见,需要单独研究。经专家审议,由于本工程自振周期达约9s,可将规范反应谱第二衰减段沿同样斜率延伸。

(2) 位移反应谱对于高柔建筑结构应用可行性问题: 理论上,高柔结构超长周期地震动采用位移反应谱更为合理。但经专家审议,由于位移反应谱理论和工程实践发展还不成熟且暂无成熟软件进行分析和支持,仍然采用现行加速度反应谱和两阶段动力时程的方法进行抗震分析。

(3) 高强混凝土在超高层建筑中应用问题: 提高混凝土强度等级可以起到增加结构刚度,减小结构构件截面和自重的作用,但混凝土强度等级超过C60后,材料脆性以及延性降低问题明显突出,应用在超高层建筑中应给予限制。经过专家审议,本工程所采用的混凝土强度等级,考虑延性要求,对于核心筒剪力墙不应超过C60,巨型混凝土柱不应高于C70。

(4) 最小初始剪重比的控制和地震作用的调整问题等: 高柔建筑按照现行抗震规范要求,初始剪重比一般难以满足要求。如何合理确定或限定最小地震作用,保证结构安全是一个重要课题。经专家审议,

初始剪重比不能小于规范限值的85%,结构的内力和变形均需要根据规范最小剪重比要求进行相应放大调整。

《建筑结构》: 抗震性能目标的选择和制定方面有何特色?

刘鹏: 抗震性能目标是结构初步设计和专家审查需要确定的一项重要内容,从子系统的性能目标(如框架体系分担剪力)到构件的性能目标,根据其受力特点、重要性等方面具体设定。就天津高银117大厦而言,由于巨型框架体系构件数目较少,而且重力在每个区均形成了转换,专家对构件均提出了中震或大震下的性能要求。由于基于弹塑性分析的性能化设计方法仍未完全成熟和被广泛接受,目前基本上是在近似弹性分析结果的基础上进行构件的性能化设计,而使用弹塑性分析进行大震下整体结构性能的复核。

《建筑结构》: 超长自振周期反应谱的问题是近年来超高层建筑结构计算分析中一个基础性的必须解答的问题,本工程作为典型的长周期结构,是如何考虑和确定的?

刘鹏: 限于客观条件等因素,在现行规范框架下,加速度反应谱和两阶段时程分析仍然是超长自振周期超高层建筑抗震分析的基本手段。本工程自振周期达9s,而加速度反应谱在6s后的超长周期段没有明确规定,根据超限专家意见,本工程将规范第二衰减段沿同一斜率从6s延伸至10s并进行相应计算分析研究。而实际上,超高层建筑反应谱分析所得的底部剪力往往不能满足规范最小剪重比的要求,因而对初始剪重比的控制便成为了该类工程最核心和处理难度最大的问题。为满足要求,除了努力降低结构自重、增加构件截面或配钢率等一般手段外,需要通过调整优化结构自身抗侧体系和构件布置的方式来实现。而天津高银117塔楼在初步设计阶段,从优化体系、降低自重等方面均采取了很多实质手段,满足了各项要求,得到了专家组的认可。

《建筑结构》: 由于本工程结构体系的复杂性,弹塑性分析的工作量相当巨大,起到对结构体系方案可行性的验证和揭示结构体系薄弱部位的重要作用,请谈谈该方面的设计成果?来自第三方的弹塑性分析验证工作起到了哪些补充作用?

刘鹏: 弹塑性分析是我司初步结构设计的重要内容。数值分析采用了LS-DYNA软件,主要关注了整体结构响应(如位移)、关键构件性能(如巨柱、巨

撑、剪力墙、楼板等及其材料的应力、应变)以及结构薄弱部位等。通过弹塑性分析,进一步验证了结构整体指标以及在相应地震水准条件下构件的性能目标,此外在设计分析过程中,也暴露了一些在弹性分析过程中无法发现的相对薄弱部位,并采取了针对性的加强措施。

例如,由于结构顶部巨型支撑收停,其上楼层由于内外筒刚度分配的显著变化,高阶振型的鞭梢效应对内筒钢筋混凝土剪力墙的不利作用更为明显。核心筒分配内力突然增大,构件剪切破坏严重,层位移显著增大,显示出了明显的薄弱部位,虽然在弹性分析过程中亦采取了诸如增加型钢暗柱和配筋率等的加强措施,但弹塑性补充分析的结果让我们下定决心采取了在墙体内部增设钢板,形成了组合钢板剪力墙结构,分析表明,结构性能得到了显著的改善。

由于结构超高,本工程进行了第三方弹塑性分析和相应的比对研究工作。该工作由容柏生事务所完成,期间和我司设计团队进行了密切的沟通。双方主要分析结果总体比较接近,找到了相似的薄弱部位,为我们弹性分析工作提供了更为全面的设计验证和技术反馈。两个弹塑性分析团队,彼此背靠背的独立分析和比较,有利于更早地发现和暴露设计隐患,相互印证,并及早对设计进行纠正和调整。对于一个大型复杂工程,此举有利于设计团队更为稳健地推进各项设计工作,增加结构分析和设计的可靠性和安全性。

《建筑结构》:本工程采用多重抗侧力体系,结合本工程的特点,请介绍一下这方面的信息?其中,巨型斜撑和转换桁架的受力有何特点?

刘鹏:多道设防是高层建筑抗震设计和抗震规范的一项重要原则。天津高银 117 大厦是由钢筋混凝土核心筒和带有巨型柱、支撑、转换桁架构成的外框筒形成的“筒中筒”结构体系,并实现抗震的多道防线。

值得指出的是,由于设置了巨型支撑,使外筒刚度得到了显著提高。从内外筒层剪力分配情况看,对于典型楼层,外框筒承担的地震剪力约占据相应层剪力 70% 以上,倾覆力矩约达到 80%,该指标表明,天津高银 117 塔楼从抗侧体系上显著缓解了传统钢-混凝土混合结构“混凝土内筒强,型钢外筒弱”对结构产生的不利影响,降低了混凝土核心筒在罕遇地震下刚度退化内力重分配对型钢外框架的不利作用,大大提高了结构的整体安全储备。

巨型斜撑作为本工程主要抗侧构件,在水平作用下主要承受轴向拉压作用,采用了型钢箱形截面,结

构构件校核考虑了构件加工以及安装等因素造成的初始偏心对结构的不利影响。由于其长度很长并跃层布置,设计中通过楼面构造对其面内外进行有限约束,在初步设计中,通过估算其约束刚度,利用欧拉公式进而反算其计算长度,确定其稳定应力。该构件在强度方面,除进行了地震和风作用下的校核外,还特别对其进行了施工模拟,特别是巨型支撑后连接工况条件下,在不同区段,重力效应重分布和整体弹性变形方面的校核分析。数据统计表明巨撑连接合拢后,整体结构在超静定条件下继续施加重力荷载,结构底部支撑所受应力中重力分量比重相应增大(至 40%~50%),这是巨型支撑结构的特点和需要关注的内容。

转换桁架承受各区结构自重和水平荷载的双重内力作用,由于其跨度较大,还要保证其竖向刚度并承受竖向地震的作用和响应。此外,在连续倒塌的极端工况条件下,一旦某区次框架出现破坏,结构自重传力路径切断,还需要通过其下弦悬挂节点,吊住其下若干层,起到“既托又挂”的角色,因此转换桁架的设计需要考虑的工况较多,设计比一般工程相对复杂。

《建筑结构》:本工程存在多项超限,采用了多项新技术,其中做了哪些方面的试验研究工作,对实际工作起到何种指导作用?

刘鹏:这个项目在设计方面开展了以下三个方面的试验和研究。

第一是在建研院完成的整体结构 1:40 振动台试验,主要测定不同地震水准下模型的动力响应以及构件在弹性和弹塑性阶段的位移、加速度及主要构件的应变,观察、分析结构抗侧力体系在地震作用下的受力特点、破坏形态及过程,找出可能存在的薄弱层及薄弱部位,验证结构的抗震性能是否如数值分析所预测,检验结构是否满足规范三水准的抗震设防要求,检验结构各部分是否达到设计设定的抗震性能目标等。

第二是在北京工业大学完成的六边形多腔体钢管混凝土巨型柱 1:12 轴压和偏压的验证性试验。主要是考察巨柱变形平截面假定和应力集中情况,验证结构抗震性能是否达到设计抗震性能目标以及构造改进意见。

第三是钢管混凝土构件轴向拉压试验,主要是了解在不同构造条件下(如内部栓钉、型钢率),该构件在反复拉压荷载条件下,由于内部混凝土受拉开裂造成的刚度退化情况,主要用以指导相应整体模型在

弹塑性分析构件本构的确定,特别是获得比较合理的巨柱的中大震作用下的拉力数据,为工程设计提供相应依据。

《建筑结构》:巨型柱截面选型是结构方案确定非常重要的一个环节,最终选择六边形多腔体的钢管混凝土组合柱的截面形式,其优点体现在何处?

刘鹏:本工程底部构件截面 45m^2 的六边形多腔体钢管混凝土巨型柱是综合平衡了建筑造型、建筑布局、结构整体刚度、构件受力性能、节点连接、工程造价、制作加工、施工可行性等各方面的要求,最终形成的设计。

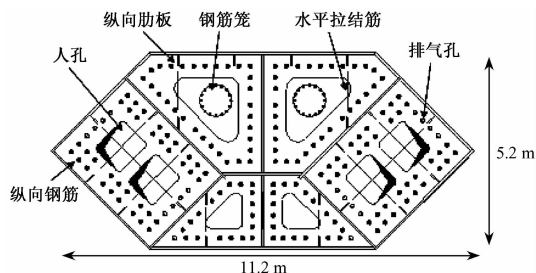


图5 底部典型楼层巨型角柱截面构造示意图

由于塔楼结构整体高度和高宽比的条件,与传统的密柱结构相比,框架柱布置周边化而形成的巨型结构为塔楼提供了最为高效的水平抗侧体系,巨型柱同时还要承受巨大的重力作用,为提供相应的承载力和延性、兼顾建筑对室内面积等要求,钢管混凝土和钢骨混凝土这两种截面类型成为了仅有的选项。两者在计算、构造、施工等方面都具有非常显著的差异,在本项目设计过程中对不同方案进行了深入的研究和比较。

由于截面尺寸巨大,对于钢骨混凝土柱,根据相关试验和超限专家要求,柱内各孤立的钢骨间必须采取全高的强连接的方式,避免出现类似格构柱的分离式的布置,确保柱的整体延性。这一要求客观上形成了在巨型柱内的封闭式钢管结构,如其外部再由混凝土包裹,此构造既不能避免大尺寸钢管混凝土构件加工的复杂性,又面临大量箍筋绑扎形成的复杂构造以及模板支护等工序和时间。而钢管混凝土柱内部混凝土受到钢管包裹和约束,延性钢管内部的混凝土又可以有效地防止钢管发生局部屈曲,特别是塔楼在中大震作用下还需承受相当的拉应力作用,因此该构造形式使构件和整体结构延性性能明显改善,耗能能力大大提高,具有优越的抗震性能。此外,钢管柱构件自成模板,便于施工,且可加快施工进度。

巨型柱位于结构四角,各区段均需要分别与两侧的转换桁架和巨型支撑相连接,考虑其节点连接的客

观要求,形成了六边形的轮廓及尺寸。此外由于钢管混凝土柱截面巨大,在内部分成若干个腔体,配合内部钢筋暗柱可以有效增强对内部混凝土的约束,同时提供对外包钢板的面外约束改变其屈曲模态,避免局部失稳。对于如此巨大的巨柱截面,型钢布置的均匀化有利于保证构件内力和变形分析平截面假定。

《建筑结构》:该项目在抗连续倒塌分析方面做了哪些工作,相应的构造措施体现在何处?

刘鹏:巨型结构的传力特点造成了和传统结构相比冗余度较弱的缺点。本塔楼各节间巨型支撑和次框架相互脱开,因此我们在设计中更关注抗连续倒塌的设计和分析。在本工程设计和分析过程中,国内当时还没有相应的设计规范,我们引用和参考了美国国防部 DOD 和总务管理局 GSA 的相关设计和评价方法,假定不同区域次框架柱在特殊条件下出现局部破坏后可能产生的影响。在设计构造措施上,特别将各区段小柱顶部采用了长圆孔的构造方式与上部转换桁架下弦进行连接,在柱局部破坏条件下可以将梁柱吊住,起到了“保险丝”的作用,以一个简单的构造提高了结构的稳健性和安全性。

(上接第 13 页)

在哪儿?

李盛勇:大型或重大工程,投资多,规模大,结构难度大,结构成本比例高。由于其标志性,复杂程度远远超过一般工程,同时也远超规范限值,需进行超限审查。此类项目设置结构设计顾问方是十分必要的,这有助于避免设计者出现由于经验、能力或疏忽而导致的设计缺陷、错误甚至较大的浪费。顾问方与设计方一开始就参与全过程的设计合作,用不同的视角积聚两个团队的资源,集思广益。通过不同环节的交流讨论甚至争论,使结构有关问题及早暴露和解决,结构方案逐渐趋向合理,同时与建筑及机电的配合也更加完善,实现建筑价值的提升。

利用各团队优势实现互补,顾问方更着重于难点论证,并与设计方互证,实现并达到如下目的:1)符合业主需求、建筑创意、机电要求之上的商业价值提升;2)符合规范及抗震性能设计的高效结构;3)对结构设计条件的充分理解,找出结构关键控制因素;4)结构方案有合理的构成,包括整体刚度和构件尺度。

结构合理就能实现结构的经济性,用最少的资源实现最优的设计,创造结构精品是每位结构工程师的目标。