

建筑结构 优秀设计图集

9

《建筑结构优秀设计图集》编委会

中国建筑工业出版社

建筑结构优秀设计图集

9

《建筑结构优秀设计图集》编委会

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构优秀设计图集9/《建筑结构优秀设计图集》编委会.
北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-112-12553-1

I. ①建... II. ①建... III. ①建筑结构-结构设计-中国-图集
IV. ①TU318-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 197446 号

本书系全国第六届优秀建筑结构设计评选出的高层及多层建筑结构部分 37 个获奖项目汇编而成, 是我国 2004~2008 年期间高层及多层建筑结构的代表作。每个项目均介绍工程概况、计算方法、地基基础、结构布置和构造大样等, 以图为主, 辅以少量文字说明, 具有较强的技术性、实用性和资料性, 对建筑结构设计及施工人员、土建类大专院校师生有较大参考价值。

责任编辑: 蒋协炳

责任设计: 张 虹

责任校对: 王金珠 王雪竹

建筑结构优秀设计图集

9

《建筑结构优秀设计图集》编委会

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 38¼ 插页: 20 字数: 1030 千字

2011 年 1 月第一版 2011 年 1 月第一次印刷

定价: 98.00 元

ISBN 978-7-112-12553-1

(19811)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

《建筑结构优秀设计图集》编委会

主 任：徐培福

副主任：柯长华 徐 建

委 员：（以姓氏笔画为序）

陈远椿 肖从真 柯长华 赵基达

徐 建 徐培福 黄宝清 蒋协炳

序 言

随着国家经济持续快速发展,我国已成为世界建筑业最活跃、繁荣的地区之一,建筑的建造速度和规模属世界之前列,涌现了一批优秀建筑,丰富了建筑形式和结构体系。这些优秀建筑是建筑师、结构工程师及机电设备等工程师通力合作的结晶。结构工程师为新颖的建筑形式和现代化的建筑功能的实现提供了重要的技术支撑,对保证建筑工程的质量、安全和经济起着重要的作用。

为促进我国建筑工程健康、快速发展,提高结构设计技术水平,鼓励结构工程师的积极性和创造性,中国建筑学会十分赞成建筑结构分会开展全国优秀建筑结构的评选。2009年我会又继续承办了全国第六届优秀建筑结构设计评选,建设部质量安全司也积极支持此项评选,为支持单位。全国优秀建筑结构设计奖为国内建筑结构设计最高荣誉奖。当前,这一奖项的评选已受到全国各设计单位和结构设计人员的欢迎和积极支持,在行业中享有很好的声誉。

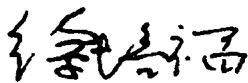
第六届优秀建筑结构设计评选范围是2004~2008年期间建成的建筑工程的建筑结构设计。此次活动得到了各省、市、自治区建筑学会、各设计单位的热烈响应,申报项目共139项。为做好评审工作,组织了由30名全国著名的结构专家组成评审委员会;公开发布评奖的条件:1.在建筑结构设计中有创新,对提高建筑结构设计水平有指导意义;2.在建筑结构设计中解决了难度较大的结构问题,对提高建筑结构设计水平有指导作用;3.在建筑结构设计中适应建筑功能要求,对提高工程质量和施工速度有显著作用,取得显著的经济效益。评审委员认真负责地审阅申报材料,评审会上进行讨论评议,最后采用无记名投票方式产生了一等奖13个、二等奖25个、三等奖45个;评选结果于2009年11月15日~12月15日在中国建筑学会网站上公示,听取意见;最后于2010年10月由中国建筑学会在中国建设报、建筑学报、建筑结构学报、建筑结构刊物上正式发布获奖项目名单。并在中国建筑学会建筑结构分会年会上向获奖省颁发奖状和证书。

为进一步表彰获奖的优秀建筑结构工程,并满足广大读者的需要,每届优秀建筑结构设计评选后,我们都精选部分获奖项目汇编成图集。在第一届和第二届评选后,汇编成第1册和第2册图集;第三届评选后汇编成第3和第4两册图集;第四届评选后汇编成第5和第6两册图集;第五届评选后汇编成第7和第8两册图集。本届评选后,在83项获奖项目中我们精选了74项汇编成两册。其中第9册收集了优秀多、高层建筑结构设计,第10册收集了优秀大跨度空间结构及特种结构设计。由于各获奖设计单位的大力支持、编委会成员的努力,本书能在较短的时间内正式出版。

本图册的内容包括各工程的工程概况、计算方法、结构布置、构造大样、配筋做法、抗震构造措施,部分工程还介绍了试验研究主要结果。对于结构设计人员,有较好的参考

价值。

在参考这些工程的经验时，请注意 2010 年我国一批主要的结构设计标准规范已完成了修订并将正式发布实施，本书中有一部分工程是按修订前的标准规范设计的，修订后的新规范适当提高了安全度，对结构规则性、地震作用、荷载组合、抗震措施以及对复杂结构的特殊要求等都增加了新的内容。本书收集的部分工程设计难免有个别内容与新标准规范不符合之处，望请读者注意和谅解。此外，也请读者在参考这些工程经验时，注意实际工程所处的地震地面运动强弱和地基情况不同，设计中选定的抗震性能目标不同，风作用、气候温度变化、建筑使用功能不同等情况，针对具体情况作具体分析是必要的，尤其是超限高层建筑结构的设计，更要注意分析具体情况。



2010 年 9 月

目 录

序言

高层及多层建筑结构

北京当代 MOMA 工程结构设计	3
上海环球金融中心结构设计	28
多哈高层办公楼项目结构设计	47
法门寺合十舍利塔结构设计	62
南京电子世界大厦	77
凯晨广场结构设计	94
浙江电力生产调度大楼结构设计与研究	118
深圳金域蓝湾三期	135
广州琶洲跨国采购中心结构设计	151
大庆奥林国际公寓 A、D 区工程	165
北京华贸中心办公楼	178
大连中心·裕景（公寓）结构设计	189
凉山民族文化艺术中心结构设计	201
成都市农村中小学标准化建设工程	218
深圳腾讯大厦结构设计	238
同济大学教学科研综合楼设计	252
上海市南汇区行政办公楼结构设计	267
西安市浐灞生态区行政中心结构设计	292
上海港国际客运中心综合客运楼结构设计	307
广州大学城广州大学校区校、院级行政办公楼 A 栋结构设计	322
重庆英利大厦结构设计	336
新建中共云南省委机关办公大楼结构设计	351
上海古北财富中心结构设计	364
深圳京基大梅沙酒店结构设计	379
大连金广枫景高级住宅	397
上海银行大厦结构设计	411
深圳中兴通讯研发大楼结构设计	427
金融街 F3 大厦结构设计	437
嘉润园国际社区 C1 区	451

北京市十一学校艺体培训办公综合楼结构设计·····	466
南京珠江壹号大厦·····	472
保利国际广场的结构设计·····	485
成都市南部副中心科技创业中心结构设计·····	510
河源广播电视中心结构设计·····	526
广州市交通信息指挥中心结构设计·····	540
西部通道深港旅检大楼巨型钢——混凝土结构设计·····	564
东北电网电力调度交易中心结构设计·····	581

高层及多层建筑结构

北京当代 MOMA 工程结构设计

建设地点 北京市

设计时间 2005/2007

工程竣工日期 2008

设计单位 北京首都工程建筑设计有限公司
[100035] 北京市平安里西大街 43 号
建研科技股份有限公司

[100013] 北京市北三环东路 30 号

主要设计人 李 勇 肖从真 刘品高 张莉若 王 琤 徐自国 王 辉
李跃林 刘志东 吉 磊 陈宗明

本文执笔 李 勇 张莉若 徐自国

获奖等级 全国第六届优秀建筑结构设计一等奖

一、工程概况

北京当代 MOMA 工程由 9 栋塔楼连体组成,总建筑面积 22 万余 m^2 ,地上 21 层,高度约 66m,地下 2 层,高度 9.45m;各塔楼之间以八座空中连廊相接,连廊长度分为 23.86~56.14m (图 1)。北京当代 MOMA 的方案设计由美国 SHA 建筑事务所和 GNA 结构事务所完成,北京首都工程建筑设计有限公司和建研科技股份有限公司配合,扩初设计、施工图设计则由北京首都工程建筑设计有限公司和建研科技股份有限公司共同完成,SHA 及 GNA 设计事务所配合。本工程为居住建筑,层高 3.05m,底层为商业及配套用房,层高 4.55m,塔楼在 12~18 层间设空中连廊兼顾连通式会所的服务功能,其中 T2、T3 塔楼间的连廊中还设有 7.5m $\times$ 25m 的空中游泳池及与之配套的设备用房;地下 1 层层高 5.30m,含车库、自行车库、库房及设备用房等;地下 2 层层高 4.15m,部分区域按 5 级和 6 级人防设计,含车库、室内网球场、库房及设备用房等。该工程采用配置型钢混凝土组合结构的钢筋混凝土框架—剪力墙结构体系,部分塔楼在 16~21 层设置外挑长度达 10m 的悬挑楼层,各塔楼之间采用两端均为滑动隔震支座的钢结构连廊相互连接而使整个建筑成为一体。工程还采用了地源热泵及现浇楼板顶棚辐射采暖加新风的恒温恒湿设备系统,整个建筑具有优良的节能性。

本工程地下室总长约 256m,总宽约 152m,地下室周边以塔楼围合,中间部分为二层纯地下室,整个地下室通过设置沉降后浇带(用于纯地下室与塔楼间)与施工后浇带、并

在各塔楼下设置 CFG 桩人工复合加强地基的方式来调节塔楼与地下室结构间的不均匀沉降和协调解决地下结构超长的问題。各塔楼中间为带楼梯、电梯间的核心筒，中筒外分别布置一道纵、横墙组成的十字剪力墙，周边柱网为 3.30m。主体结构为框架—剪力墙结构，由中筒、十字剪力墙及周边柱网共形成四块双向跨度约为 10~15m 的 L 型异形大跨楼板。为改善不规则楼板的结构受力性能，结合建筑布局要求另在每块楼板中部位置设置立柱。由于建筑造型复杂多变，在连廊出入口及其他有较大洞口的部位、悬挑部位、底层大空间与上部结构密排柱的衔接部位等都存在转换结构的设计。为了解决因建筑立面造型的要求而在上述转换部位不能设置高度较大的实体转换大梁的问题，设计中大量运用了空间桁架式的整体转换结构。同时为了改善这些转换结构的传力途径及承载性能，结合建筑立面造型及结构整体计算的需要，在转换桁架的适当部位设置了斜向支撑杆件。转换结构多应用型钢混凝土梁、柱体系，既通过结构体系及形式的调整合理地解决了结构构件复杂受力的需求，又相应缩小了杆件尺寸，从而与建筑外立面实现协调统一，较好地实现了建筑师的设计意图。

二、结构抗震超限设计

1. 北京当代 MOMA 具有如下结构特点：

1) 结构体系复杂，主要的超限情况体现在高位较大的悬挑、大底盘多塔楼、连体和局部转换结构等方面。部分塔楼裙房顶部收进尺寸过大（如 T1 塔楼自地上第 9 层开始收进达 36m，T9 塔楼自地上第 9 层开始收进达 42m），超过了规程建议的最大收进尺寸；部分塔楼自第 16 层开始向外悬挑 10m，超过了规程建议的最大悬挑尺寸，第 16~21 层为悬挑楼层。

2) 本工程地下室连为一体，上部九座塔楼，通过加强地下室侧向刚度和顶板，保证地下室能够成为上部结构的嵌固端；通过合理设置结构缝，将整个工程分成不超过两个塔楼的结构单元，避免形成复杂大底盘多塔结构。

3) 结合建筑立面要求，通过在塔楼适当部位设置斜撑构件（采用型钢混凝土结构或钢结构）和除设置核心筒外，另设置十字型剪力墙的方式来有效提高整体结构的刚度和抗倾覆能力。

4) 各塔楼之间通过连廊连接，形成一个复杂的连体结构。

5) 因建筑功能需要，多处抽去了部分框架柱，形成了梁托柱的局部转换结构。转换结构采用了带斜撑的型钢混凝土组合结构的空问整体转换桁架。

2. 结构设计采用了基于性能的抗震设计思想

为了保证不规则超限结构具有良好的抗震性能，在设计中采用了基于性能的抗震设计思想，综合考虑结构受到的荷载作用、构件反应及结构屈服机制等因素，将抗震设计由单一承载能力的目标设计转变为多重性能（承载能力、屈服机制及变形能力等）的目标设计，其中各楼座各阶段具体性能目标设定如下：

1) 小震下结构构件处于弹性；

2) 中震下结构竖向构件不屈服，连廊和悬挑部位钢结构处于弹性；

3) 大震下结构不倒塌，最大层间位移角小于 1/100，支撑连廊的构件和户型中的独

立柱不屈服。

三、地基基础及地下室设计

本工程含二层地下室,包括各塔楼对应的部分和中间纯地下室部分,采用钢筋混凝土梁式筏板基础,地下室结构连成一个整体,不设永久变形缝分隔,地下2层局部为5级和6级人防。作为示例,T2、T3塔楼地下1层结构平面图见图2。

1. 超长地下室整体结构设计

由于建筑形体的复杂和使用功能的严格限制,不允许设置永久变形缝将地下室划分为若干个单元。设计时在高塔与纯地下室结构之间设置沉降后浇带,并要求在主体结构封顶后将其封闭。高塔和纯地下室内部结构每隔40~50m设置施工后浇带,并要求在两侧混凝土施工完成二个月后将其封闭。后浇带的设置将超长地下室划分为若干独立的结构施工单元,同时加强建筑围护墙体的保温,通过计算对地下室楼板进行加强板厚及温度配筋等多项措施来满足地下整体结构的设计要求。地下结构框架柱主要尺寸为600mm×600mm,框架梁主要尺寸为500mm×600mm(高)、500mm×700mm(高)、人防部分700mm×750mm(高);楼板厚250~300mm(人防部分);基础底板厚600~900mm,基础梁主要尺寸为700(800)mm×1400mm(高)。本工程地上结构为九塔连体,地震作用计算十分复杂,为简化设计计算,需将地下室顶板作为上部结构的嵌固端考虑,按此要求设计的地下室,其刚度、柱配筋及顶板厚度等应满足现行规范要求。

2. 纯地下室抗浮设计

纯地下室部分工程地质及水文资料提供的抗浮设防水位为地表下2~3m,而地下室基坑深达10m以上,由此引起的地下水附加浮力对纯地下室结构的影响是不容忽略的。此外,由于采用地源热泵设备系统,地下室底板下分布有600多根管井,这些管井的先期施工对地下室底部的天然地基土扰动很大,从而也会影响纯地下室底部的天然地基承载特性。基于以上诸方面不利因素的考虑,最终从加强配重抗浮和设置抗浮桩二方案中选择了抗浮桩的设计方案,通过桩的合理布置,使抗浮桩既能抗浮又能抗压,也较好地弥补了地基土因扰动而导致承载力削弱的问题。

3. 地基基础差异沉降协调设计

为了有效协调高塔、裙房及地下室结构之间的差异沉降,本工程承载地基分别采用了如下三种不同的方案:(1)纯地下室部分采用天然地基加抗浮桩;(2)裙房部分采用天然地基;(3)高塔部分采用CFG桩复合地基,CFG桩的设计要求为结构最终沉降量不大于40mm,后期沉降量(结构封顶后)不大于15mm,倾斜不大于0.0015。通过对以上三种地基承载方案的承载力、基础沉降等进行完整的计算分析,同时结合合理地设置结构沉降、后浇带,以及待高塔结构主体自由沉降基本完成后再封闭后浇带以减少高塔结构的后期沉降,和加强整个建筑的沉降观测等措施,较好地解决了本工程各单体间差异沉降的协调设计问题。

四、主体塔楼结构设计

1. 楼面结构布置

塔楼各标准层的结构平面布置（以 T2、T3 塔楼为例）见图 3~8。塔楼核心部分为钢筋混凝土内筒剪力墙，筒内为电梯、楼梯间及各设备用房、设备管井等。由于本工程顶部存在较大的悬挑，故在核心筒外增设了十字形剪力墙（以 T1 塔楼 8 层墙、柱布置图示例）见图 9，二个体系共同承担风和地震引起的结构倾覆力矩与剪力。内筒剪力墙周边厚度从上到下为 300~400mm，内墙厚度为 250~300mm，筒外十字形剪力墙厚 300mm。塔楼周边为标准柱距 3.30m 的密排柱外框架，柱截面尺寸为 800mm（宽）×400mm（高），周边框架梁截面尺寸为 400mm（宽）×730mm（高）。本工程采用的型钢混凝土组合柱配筋详图见图 10。为改善大跨异形板楼盖的受力性能，在每块楼层厚板中部位置共增设 4 根截面尺寸为 500mm（宽）×1250mm（高）的扁柱；无柱帽现浇混凝土无梁楼板的厚度为 250~300mm（屋面板），柱顶处楼板内设置了暗梁和型钢剪力架以提高楼板抗冲切能力（图 11）。根据 MOMA 系统的设备设计要求，在现浇楼板内预埋了规格为 DN75 的新风管和 $\phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ （外径×壁厚）的热辐射天棚盘管以达到通过钢筋混凝土楼板辐射的恒温恒湿要求（图 12）。

2. 主体结构计算

主体结构（含大悬挑结构）除进行多遇小震下结构的常规计算外，还根据本工程基于性能的抗震设防目标要求，分别补充了考虑悬挑结构竖向地震作用和连廊地震作用后主体结构的中震弹性、部分结构构件的中震不屈服设计计算及塔楼结构的静力推覆（Push-over）分析，结构静力推覆计算采用的计算软件为美国 CSI 公司的 ETABS 程序，构件塑性铰参数均根据中国规范和实际配筋进行计算。侧向加载的模式采用弹性多遇地震的振型叠加反应谱法（振型有效参与质量大于 90%）计算地震作用。本结构的弹塑性分析是一个多次反复的过程，需要根据计算结果检查结构的抗震性能和破坏过程，多次调整结构布置与构件配筋，以保证结构具有合理的破坏模式及过程，并达到预先确立的抗震性能目标。

塔楼结构局部体型有高位置、大比例的偏心收进，结构设计过程中在收进位置设置了带型钢的钢筋混凝土斜撑以尽量避免收进处结构刚度的突变，同时将收进的楼层指定为薄弱层以放大地震剪力来提高构件的承载力。此斜撑及部分为增大结构抗扭刚度而设置的斜撑与外伸悬挑结构及转换桁架布置的斜撑相互协调一致，取得了较好的建筑立面效果。以 T1 塔楼为例，斜撑的布置图见图 13，其节点详图见图 14。

因建筑功能需要，各塔楼在与连廊结合处均存在局部抽掉了部分框架柱，形成了梁托柱局部转换的情况，根据结构受力特点，兼顾建筑立面的表达要求，在较大洞口上方设置了带斜撑的空间整体转换桁架，此转换桁架设计时应考虑施工阶段及地震时防连续倒塌的结构设计要求。

塔楼大量运用了型钢混凝土结构，通过合理采用配置型钢混凝土的梁、柱及斜撑来将悬挑钢结构、带斜撑的整体转换桁架结构、塔楼局部设置的型钢混凝土斜撑有效衔接，获得了较为满意的结构设计效果。型钢混凝土结构构件设计时应根据相关规范要求满足带型钢构件延伸一层（柱）或一跨（梁）的构造要求。

五、大悬挑结构设计

本工程结构悬挑部分长度达 10m, 高度为 3~5 个楼层, 针对结构上部悬挑的情况, 采取了以下措施:

1. 悬挑部分采用钢结构

为降低悬挑部分结构自重, 减小悬挑部分对整体结构的影响, 悬挑部分采用钢结构。钢柱大部分采用焊接工形钢构件, 个别采用箱型钢构件; 钢梁、钢支撑均采用焊接工形钢构件。钢柱截面为工 350mm×350mm 或箱型 350mm×350mm; 钢梁为工 600mm×350mm 和工 350mm×350mm 两种截面; 钢支撑为工 450mm×350mm 和工 350mm×350mm 两种截面。钢板厚度均不超过 35mm。

2. 悬挑部分增设斜撑, 塔楼增设斜撑和十字型剪力墙

为承受悬挑部分重力荷载产生的倾覆力矩, 在悬挑部分增设钢斜撑, 将倾覆力矩传递到塔楼上; 在塔楼相应的部位也增设型钢混凝土斜撑, 使塔楼整体承受倾覆力矩, 图 15 所示为 T2 塔楼悬挑钢结构斜撑布置及节点详图。在塔楼内除设置核心筒外, 还设置了十字型剪力墙, 提高塔楼整体的刚度和抗倾覆能力。

3. 进行竖向地震验算

根据规范规定, 对 8 度区的长悬臂结构要进行竖向地震的验算。本工程进行了竖向反应谱和竖向地震时程分析, 竖向地震峰值取水平地震的 0.65 倍, 并考虑了竖向地震与水平地震的组合 (包括水平地震为主的组合和竖向地震为主的组合)。

4. 提高悬挑部分和支撑悬挑结构构件的抗震设防标准

考虑到悬挑结构的冗余度低, 在设计过程中提高了悬挑结构的抗震设防标准。悬挑部分的结构按中震弹性计算, 即悬挑部分的构件验算时, 按中震弹性地震力 (水平地震和竖向地震) 与竖向荷载进行组合, 考虑荷载分项系数, 材料强度取设计值。

直接支撑悬挑结构的构件按中震弹性设计。

5. 体型收进处结构加强

根据以往的研究成果和本工程的弹塑性分析结果, 高位、大比例的体型收进对结构的抗震性能是不利的, 设计时要保证结构在收进处刚度的延续, 并保证收进处构件的延性和承载力。T1 塔楼体型收进的位置高, 而且是偏心收进, 结构设计过程中, 在收进位置的上下均设置了附加斜撑, 尽量避免收进处结构刚度的突变。结构计算时也将收进的楼层指定为薄弱层, 进行地震剪力的放大来提高构件的承载力。

经弹塑性分析, T2、T3 塔楼的收进高度较低, 对结构性能的影响较小, 故没有附加布置斜撑, 只是在结构计算时将收进楼层指定为薄弱层来进行地震剪力放大。

六、大跨度连廊结构设计

北京当代 MOMA 工程以 9 座主塔楼通过八个连廊连接为整体, 成为一个非常复杂的连体结构。连廊跨度分为 23.86~56.14m, 结构设计中采取了以下措施:

1. 设置隔震支座及防跌落的二次设防装置

在连廊的两端均设置隔震支座将连廊与塔楼隔开,塔楼只承受连廊竖向荷载和经隔震衰减后很小的地震作用。通过设置隔震支座,有效地减小了各塔楼的相互影响,并且有效减小了由于连廊而造成整体结构的质量偏心和扭转作用;另在连廊两端支座处设置了防跌落拉杆,通过此装置设置了连廊结构抗震设防的第二道防线。连廊采用的支座及吊杆节点详图件图 16。

为确定连廊隔震后的性能,设计中对每座连廊进行了时程分析。在针对单个连廊计算分析时,其分析模型包括连廊和支撑连廊的两座塔楼,将时程分析中连廊和塔楼的相互作用分别施加到连廊和塔楼上作为地震作用再进行结构构件设计。

采用摩擦摆式支座(Friction Pendulum Bearing,简称 FPB)作为隔震支座有效地提高了连廊的隔震及变形性能,此种类型隔震支座的力学及滞回性能与其受到的竖向荷载大小有关,压力越大,滞回圈也越大;相反,支座如果受拉,则会丧失滞回耗能能力。

2. 进行竖向地震验算

隔震支座只能减小水平地震的作用,对竖向地震的影响没有效果,所以进行连廊设计时,进行了竖向地震的时程分析和反应谱计算,竖向地震的峰值取水平地震峰值的 0.65 倍。

3. 连廊结构体系和构件尺寸

每座廊桥由于功能和跨度的不同必须单独进行计算和设计,同时又要达到与外观的协调一致,截面外轮廓尺寸应尽量统一,通过调整钢板厚度来满足受力要求。连廊均采用空间钢桁架体系,钢弦杆、钢柱基本采用焊接工形构件,个别廊桥的弦杆和端部钢柱由于受力较大而采用箱形钢构件,立面斜腹杆采用高强圆钢拉杆。

廊桥 B23 中建有一个空中泳池,所以弦杆构件截面为箱形 $500\text{mm} \times 400\text{mm}$,钢柱为工形 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。B90 廊桥跨度接近 60m,局部双层,其弦杆构件截面为工 $600\text{mm} \times 300\text{mm}$,钢柱尺寸为箱形 $350\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。其他各廊桥的钢弦杆尺寸基本为工 $500\text{mm} \times 300\text{mm}$,钢柱为工 $350\text{mm} \times 300\text{mm}$ 或箱型 $350\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。B12 和 B23 连廊结构体系示意图见图 17~20。

七、连接节点设计

本工程悬挑和连廊部分采用了钢结构,塔楼部分构件采用了型钢混凝土结构,钢构件、型钢混凝土构件和钢筋混凝土构件之间的连接节点成为设计的重点之一。

1. 型钢混凝土斜撑与外框架刚接节点

为保证结构刚度和主要构件中震不屈服,设置了部分型钢混凝土斜撑,对于梁—柱相交或梁—斜撑和柱—斜撑相交且只有两个方向杆件相交的节点,钢筋采用型钢上打孔直接穿过的方式;对于梁—柱—斜撑相交的节点,钢筋通过附加连接板与梁柱节点焊接,尽量避免钢筋穿型钢构件。

2. 型钢混凝土斜撑与外框架铰接节点

在受力比较小的部位,为简化结构受力,方便节点加工和安装,斜撑采用型钢,并且与框架铰接连接。

3. 悬挑部位刚结构节点

悬挑部位受到很大的重力和竖向地震作用,斜撑是主要的受力构件,因此斜撑与梁柱

刚接,并且采用斜撑贯通的形式。

4. 隔震支座节点

隔震支座考虑地震下最大相对位移量为每方向 500mm,选用摩擦摆支座。

5. 连廊节点

连廊是空间桁架结构,其斜腹杆采用钢拉杆。

八、结语

北京当代 MOMA 工程结构属超限高层建筑结构,具有体型收进、高位悬挑、转换结构以及多塔楼连体等诸多抗震不利特征,通过对上述超限项目所进行的结构设计方法研究和细致计算分析,其设计经验总结如下:

1. 本结构为高层大底盘多塔楼建筑结构,在基础设计中采用在主塔楼、裙房及二者之间设置施工后浇带或沉降后浇带,通过增加地下室楼板厚度并增加温度配筋等设计措施,解决了超长地下室不设永久缝的问题。

2. 除设置后浇带措施外,设计中对主塔楼、裙房及纯地下室分别采用 CFG 桩复合地基、天然地基及天然地基加抗浮桩的地基承载方式,有效地解决了主塔楼与地下室之间的差异沉降问题以及纯地下室抗浮问题。

3. 设计中采用在各塔楼结构之间设置防震缝、连体采用隔震支座、同时加大地下室结构构件尺寸等技术措施,将上部结构划分为多个以地下室顶板为嵌固端的独立设计单元,避免了多塔楼之间相互作用,降低了设计难度。

4. 对悬挑结构的竖向地震专项研究表明,悬挑结构的竖向地震效应约在 10% 以内,结构设计中采用 15% 计入其竖向地震效应,并采用中震弹性的设计方法,保证了悬挑结构的抗震性能。

5. 对体型收进位置进行的刚度及承载力研究表明,该位置是本工程主塔楼结构的抗震薄弱部位,应按薄弱层要求加大地震剪力的作用,提高构件的承载力;设计中采用了在体型收进位置增设斜撑,并在柱及斜撑内部配置型钢、加强核心筒剪力墙配筋等措施来保障其抗震安全性。

6. 设计中采用隔震技术将连廊结构与主体塔楼结构进行分隔,并采用整体模型,对连体结构+主体塔楼结构进行了多遇及罕遇地震作用下的非线性时程分析研究,保证隔震支座在罕遇地震作用下的位移量要求。同时本工程系在国内首次采用摩擦摆式隔震支座(Friction Pendulum Bearings)。

7. 对带斜撑的整体桁架转换方式的研究表明,在建筑许可的前提下,带斜撑的整体桁架转换避免了设置高度较大的转换梁,可以有效减小转换部位挠度,且更为有效地调整地震水平作用,使转换部位具有更好的结构抗震性能。本工程的实际应用效果表明,该种形式的转换结构不仅可以解决局部转换问题,而且对于悬挑结构的转换也有显著效果。

8. 在上述本工程各设计难点的专项研究基础上,在主塔楼的设计中,考虑悬挑结构及连体结构对塔楼主体结构的不利影响,并采用基于性能的抗震设计方法,通过静力弹塑性(推覆)方法反复验算调整,实现了主塔楼竖向构件中震不屈服的性能目标,提高了结构的抗震性能。