

地震高发区超高层钢结构施工技术研究

倪礼

上海建工五建集团有限公司, 上海 200333

[摘要]随着“一带一路”倡议的深入推进,中国的建筑企业在海外承建的高层建筑项目日益增多,特别是在地震高发区,钢结构因其优异的延性、轻质高强和抗震性能成为首选结构形式。本文以乌兹别克斯坦塔什干新城金融中心项目为依托,系统阐述了地震高发区超高层钢结构施工的关键技术体系,包括钢结构分段吊装优化、厚板焊接应力控制、粘滞阻尼器精密安装、高强螺栓连接质量控制、高精度测量控制网络构建以及高空作业安全保障措施。通过工程实践验证,形成了一套适用于高烈度地震区复杂钢结构施工的综合技术方案,为同类海外工程提供技术参考。

[关键词]地震高发区;超高层建筑;钢结构;厚板焊接;粘滞阻尼器;施工技术

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19181

中图分类号: TU393.3

文献标识码: A

Research on Construction Technology of Super High-rise Steel Structures in Earthquake Prone Areas

NI Li

Shanghai Construction No. 5 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200333, China

Abstract: With the deepening of the "the Belt and Road" initiative, the number of high-rise building projects undertaken overseas by Chinese construction enterprises is increasing, especially in earthquake prone areas. Steel structures have become the preferred structural form due to their excellent ductility, light weight, high strength and seismic performance. This article is based on the Tashkent New City Financial Center project in Uzbekistan, and systematically elaborates on the key technical system for the construction of super high-rise steel structures in earthquake prone areas, including segmented lifting optimization of steel structures, stress control of thick plate welding, precision installation of viscous dampers, quality control of high-strength bolt connections, construction of high-precision measurement control networks, and safety measures for high-altitude operations. Through engineering practice verification, a comprehensive technical solution suitable for the construction of complex steel structures in high-intensity earthquake areas has been developed, providing technical reference for similar overseas projects.

Keywords: earthquake prone areas; super high-rise buildings; steel structure; thick plate welding; viscous damper; construction technology

引言

随着全球城市化进程加速,超高层建筑在地震活跃带的建设需求持续增长。乌兹别克斯坦作为中亚地区重要经济体,其首都塔什干位于地震活动频繁区域,抗震设防烈度高,对建筑结构的抗震性能提出了严苛要求。钢结构凭借其良好的塑性变形能力和能量耗散特性,成为地震高发区超高层建筑的的首选结构体系。

乌兹别克斯坦塔什干新城金融中心项目由三栋超高层办公楼组成,最高达 159m,结构形式为钢筋混凝土框架-核心筒混合结构,内含大量劲性钢柱、钢梁及粘滞阻尼器。由于项目处于地震高发区,根据地勘报告和国内设计规范,等同于国内 9 度抗震设防地区,抗震设计要求极为严格,钢结构施工面临厚板焊接变形控制、阻尼器安装精度、多专业交叉作业协调等多项技术难题。

本文结合乌兹别克斯坦塔什干新城金融中心项目,对地震高发区的钢结构施工关键技术进行系统研究与实践总结。

1 工程概况

1.1 工程概况

本项目位于乌兹别克斯坦塔什干新城 6 号地块,包含 26#阿洛卡(ALOQA)、25#阿萨卡(ASAKA)银行和 28#工业建设(PSB)银行总部办公楼,总建筑面积 22.54 万平方米。其中 28#楼地上 33 层,建筑高度 159m; 25#楼地上 26 层,高度 135.1m; 26#楼地上 26 层,高度 137.6m。三栋楼均设地下 2 层,塔楼下方为地下车库。

钢结构主要分布:核心筒劲性钢柱、外框架十字柱、钢梁、粘滞阻尼器桁架、避难层悬臂桁架等。钢材等级主要为 Q390B、Q355D,部分阻尼器构件采用 LY225/LY160 低屈服点钢材,最大板厚达 80mm,最大单节钢柱重量 16.3t。

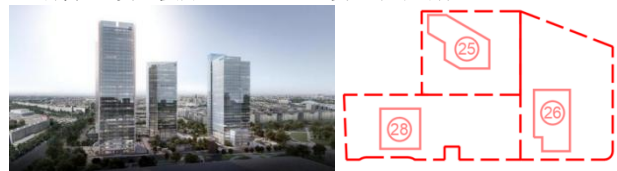


图 1 项目效果图

1.2 地震高发区结构设计特点

(1) 结构体系创新

采用“钢筋混凝土核心筒+钢框架”混合结构体系，核心筒承担主要水平剪力，钢框架提供延性和耗能能力，二者协同工作，形成多道抗震防线。这种混合结构体系在地震高发区具有显著的抗震优势：核心筒提供刚度控制侧移，钢框架通过塑性变形消耗地震能量。

(2) 阻尼器设置

在核心筒与外框架之间设置粘滞阻尼器桁架，形成耗能减震层，有效消耗地震能量，降低主体结构的地震响应。阻尼器作为结构的“保险丝”，在地震发生时率先进入耗能状态，保护主体结构不受破坏，安装精度要求极高，节点板孔位偏差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内。

(3) 材料性能要求

厚板钢材 ($t \geq 40\text{mm}$) 需满足 Z 向性能要求： $40 \leq t < 60$ 时满足 Z15， $t \geq 60$ 时满足 Z25，防止层状撕裂。板厚 $> 50\text{mm}$ 的钢材采用正火 (N) 状态交货，改善焊接性能和韧性。低屈服点钢材 (LY225/LY160) 用于阻尼器芯材，确保在地震作用下率先屈服耗能。Q390B 等高强度钢材需保证低温冲击韧性，适应乌兹别克斯坦冬季寒冷气候。

(4) 节点抗震设计

梁柱节点采用“栓焊连接”方式——腹板用高强螺栓连接，翼缘熔透焊接，既保证节点刚度，又兼顾延性。柱-柱接头采用全熔透焊接，焊接工艺要求严格。节点设计充分考虑地震作用下的往复荷载，避免应力集中和脆性破坏。

2 地震高发区钢结构施工关键技术

2.1 基于抗震要求的钢结构分段吊装优化技术

(1) 分段原则

综合考虑塔吊起重能力 (最大 16.5t)、运输集装箱长度限制 ($\leq 12\text{m}$) 和安装便利性，钢柱按“两层一节”分段，分段点设于楼层以上 1.2m 处，便于操作平台搭设和焊接作业。粘滞阻尼器桁架按节点区外分段，减少现场拼装难度，保证阻尼器安装精度。

28#楼钢柱总共 33 根，其中外框架十字柱共 8 根，核心筒 H 型钢柱 25 根，如图 2 所示。

25#楼钢柱总共 41 根，其中外框架十字柱共 6 根，H 型钢柱 10 根，核心筒 H 型钢柱 25 根，如图 3 所示。

26#楼钢柱总共 48 根，其中外框架十字柱共 4 根，H 型钢柱 8 根，核心筒 H 型钢柱 36 根，如图 4 所示。

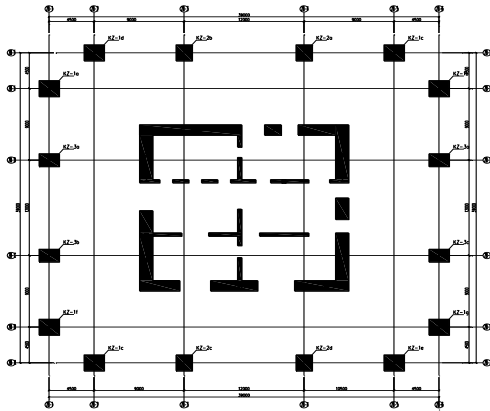


图 2 28#楼钢柱钢柱定位图

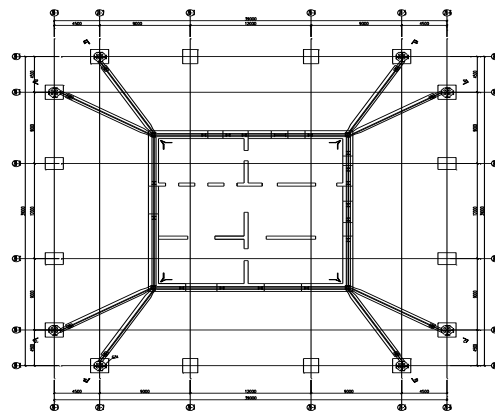
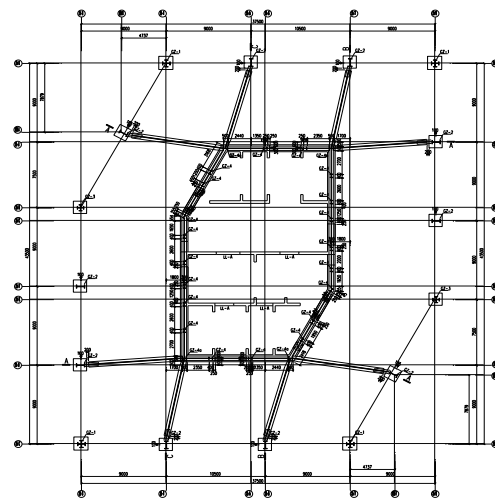
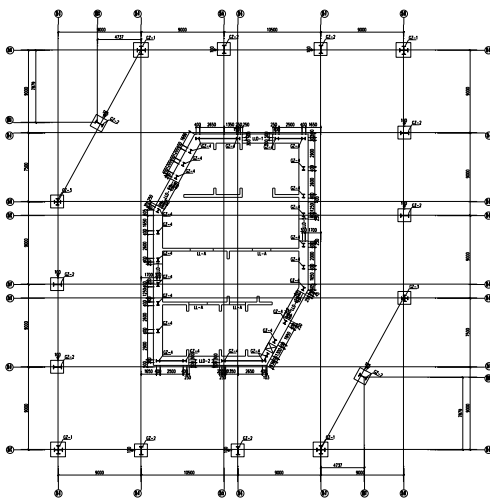


图 3 25#楼钢柱钢柱定位图



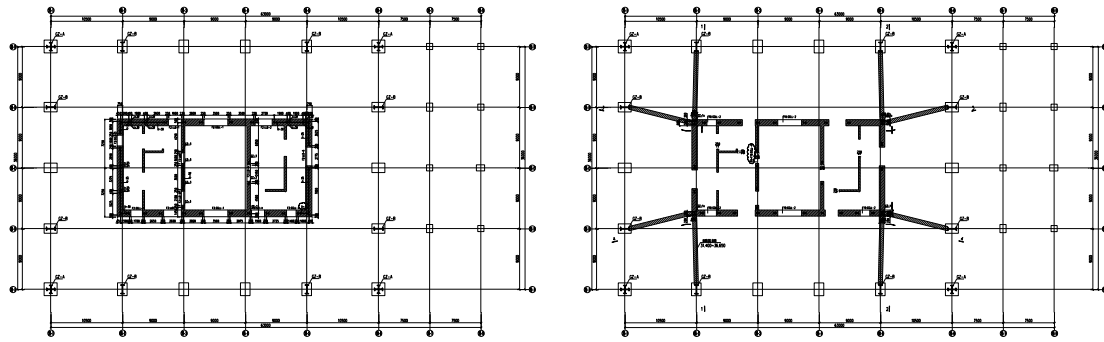


图4 26#楼钢柱钢柱定位图

(2) 吊装设备配置

塔吊选型充分考虑地震高发区构件重量大的特点,共设置6组STT373A型塔式起重机,每栋楼两组,臂长分别是45、50m和55m,覆盖全部吊装区域。

塔吊布置兼顾构件堆场、运输道路和土建施工空间,形成“双机协同、分区负责”的吊装模式。确保吊装安全裕度。

表1 塔机配置表

序号	大楼名称	单体编号	塔吊数量(台)	塔吊编号	塔吊臂长(m)
1	PSB	28#楼	2台	5#、6#	55m和45m
2	Asaka	25#楼	2台	3#、4#	均为50m
3	Aloqa	26#楼	2台	1#、2#	45m和55m

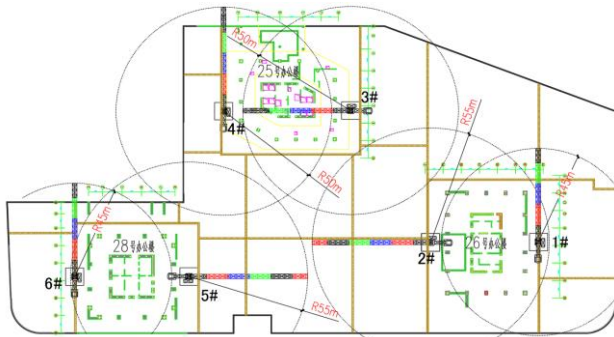


图5 塔吊平面布置图



图6 现场塔吊设置及吊装

(3) 吊点设计与验算

钢柱采用四点吊装,吊点设于耳板处,按最不利工况(16.3t)计算钢丝绳受力。

钢丝绳选用 $\phi 34.5\text{mm}$ 6 \times 37型,安全系数取6,卸扣选用12t美标弓形卸扣。

吊耳焊缝进行抗拉、抗剪、局部挤压三项验算,确保

吊装安全。

(4) 吊装顺序优化

采用“核心筒领先、外框架跟随”的流水作业模式:核心筒钢柱领先外框架3层安装,形成稳定单元后再扩展外框架。

每个柱网单元形成后立即进行测量校正和高强螺栓初拧,确保结构刚度及时建立。这种吊装顺序有利于控制结构在地震作用下的整体稳定性。

2.2 高精度测量控制技术

本工程三栋主楼高度均超130m,为实现整体的效果,各构件的安装定位、标高测量控制及安装校正是现场安装能满足设计要求的前提。高层钢结构安装精度直接影响结构抗震性能和整体稳定性,地震高发区对结构垂直度、轴线偏差等指标控制更为严格。

(1) 测量控制网布设

采用“外控+内控”相结合的方法,首层布设20个主控点(外控),按四等导线精度施测。塔楼内布设加密控制点(内控),用于竖向传递。控制点埋设混凝土标石,周围设防护栏杆。定期对控制网进行复核,消除沉降和位移影响。

(2) 竖向传递

选用激光铅直仪进行传递,每5层设一个传递层(首层、5层、13层、20层、25层、30层、35层、38层)。每层预留200mm \times 200mm方孔,接收靶采用有机玻璃光靶。每个基点从0°、90°、180°、270°四个方向投点,取四点几何中心作为投测点,误差 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

(3) 柱垂直度控制

每节柱安装后用两台经纬仪相互垂直方向观测,垂直度偏差单节柱 $h/1000$ 且 $\leq 10\text{mm}$,柱全高 $\leq 35\text{mm}$ 。测量时机选择在温差小、日照弱的早晚或阴天,减少温度影响。考虑焊接收缩对垂直度的影响,预留收缩余量。

(4) 标高控制

采用相对标高控制法,柱加工长度偏差 $\leq \pm 3\text{mm}$ 。标高传递用塔尺沿钢柱竖向引测,配合水准仪复核,每层柱顶标高偏差控制 $\leq 5\text{mm}$ 。考虑压缩变形和沉降影响,定期复核基准标高。



图7 垂直度及标高控制

2.3 厚板焊接应力与变形控制技术

本工程大量采用板厚 40~80mm 的 Q390B 钢材，焊接难度大，易产生焊接应力和变形，影响结构抗震性能，地震高发区对焊接质量要求更为严格，必须确保焊缝在地震往复荷载下不产生脆性破坏，保证钢构件的安装成形精度和焊接质量。

(1) 焊接方法选择

以 CO₂ 气体保护焊为主，局部采用手工电弧焊。CO₂ 气体保护焊熔敷效率高、热输入集中、变形小，适合厚板多层多道焊。

针对 Q390B 钢材，选用 ER50-6 焊丝，匹配母材强度。乌兹别克斯坦的冬季大风较多，当 CO₂ 气体保护焊环境风力大于 2m/s、手工电弧焊环境风力大于 8m/s 时，在未设防风棚或没有防风措施的施焊部位严禁进行 CO₂ 气体保护焊和手工电弧焊。



图8 现场钢柱焊接

(2) 预热与层间温度控制

预热温度按板厚确定：25≤t≤40mm 预热 60℃，40<t≤60mm 预热 80℃，60≤t≤80mm 预热 100℃。预热范围≥板厚 1.5 倍（至少 100mm），采用氧-乙炔中性焰加热。层间温度严格控制在 85~110℃之间，每个接头一次性连续焊完。

(3) 焊接顺序优化

十字柱-柱节点：对称焊接 A、B 节点至 1/3 板厚→割除耳板→连续焊完 A、B 节点→对称焊接 C、D 节点。

H 型柱-柱节点：对称焊接两翼缘 1/3 板厚→割除耳板→焊满翼缘→单面焊接腹板。梁-柱节点：先焊下翼缘，后焊上翼缘，一根梁的两端不得同时焊接。

(4) 后热与保温

焊后立即进行后热处理（200~250℃），保温时间至接头区域冷却至环境温度。地震高发区对焊缝韧性要求高，寒冷地区（乌兹别克斯坦冬季气温低）增加石棉布覆盖层数（4~8 层），延缓冷却速度，防止冷裂纹，保证焊缝低温冲击韧性。



图9 石棉布

(5) 焊接质量检验

一级焊缝 100% 超声波探伤，二级焊缝抽检 20%。

外观检查：无裂纹、咬边、气孔、夹渣等缺陷。

不合格焊缝按工艺评定要求返修，同一位置返修不超过两次。

关键节点焊缝进行磁粉探伤，检测表面微裂纹。

2.4 粘滞阻尼器精密安装技术

为满足 9 度抗震要求，通过方案对比和多次优化，采用了“带有钢骨和阻尼器的钢筋混凝土-核心筒”结构，具有消能减震、防火、防腐效果。粘滞阻尼器是结构抗震的核心耗能元件，安装精度直接影响其工作性能。在地震高发区，阻尼器的可靠性直接关系到结构安全。

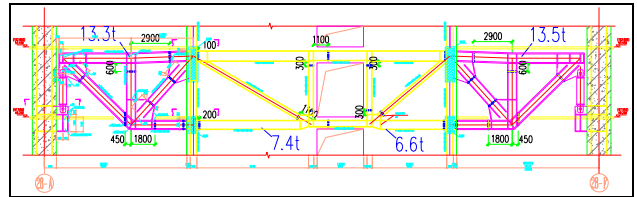


图10 粘滞阻尼器桁架分段示意图（蓝色虚线为分段位置）

(1) 安装准备

阻尼器桁架在工厂预拼装，检查节点板孔位偏差，确保阻尼器两端连接板同心。在核心筒预埋件上划出钢梁定位线，焊接防滑挡板。阻尼器两端设置吊篮和溜绳，便于高空对位。阻尼器进场后进行性能抽检，确保阻尼力、行程等参数符合设计要求。



图11 桁架层粘滞阻尼器拼装施工



图12 桁架安装

(2) 吊装与调整

阻尼器桁架分段吊装，分段位置设于节点区外，减少现场焊接应力影响。就位后先用临时螺栓固定，进行精调：轴线偏差≤3mm，标高偏差±2mm。采用千斤顶和手拉葫芦进行微调，确保阻尼器两端同心。阻尼器安装方向必须与设计一致，防止反向受力。

(3) 焊接与检测

焊接顺序：先焊中间节点，再向两端扩展，避免焊缝

收缩向一端累积。焊缝尺寸符合设计要求,避免堆焊产生过大残余应力。焊后对阻尼器连接节点进行100%超声波探伤。安装完成后进行阻尼器行程测试,确认无卡阻现象。

2.5 高强螺栓连接质量控制技术

本工程高强螺栓均为10.9级扭剪型螺栓,摩擦面抗滑移系数 ≥ 0.40 。地震高发区对螺栓连接的可靠性要求更高,必须保证在地震往复荷载下不产生滑移。

(1) 摩擦面处理

连接面平整,无毛刺、飞边、焊疤、油污、浮锈。摩擦面不允许有钢材卷曲变形或凹陷。间隙处理:间隙 $\leq 1\text{mm}$ 时可不处理;1~3mm时磨平较厚板; $> 3\text{mm}$ 时加垫板。摩擦面处理后在24h内完成安装,防止二次污染。

(2) 施工流程

定位临时螺栓固定→初拧(60%~80%终拧扭矩)→终拧(100%终拧扭矩)。

初拧和终拧间隔不超过一天,防止扭矩衰减。每个节点临时螺栓不少于螺栓总数的1/3,且不少于2个。

(3) 紧固顺序

从螺栓群中央向四周对称紧固,防止偏心受力,扭剪型螺栓终拧以梅花头拧断为合格,保留2~3扣螺纹外露。螺栓穿入方向一致,便于检查。

(4) 检验

扭剪型螺栓:目测梅花头拧断即为合格。雨天禁止施工,摩擦面保持干燥,每批高强螺栓进行轴力复验,确保扭矩系数稳定。

3 结语

目前,本项目已竣工交付,得到各方一致认可。本文

通过对地震高发区钢结构施工技术从施工工艺、材料性能、结构特点和安装精度等多个方面进行综合研究,通过对钢结构吊装、焊接、连接、测量等关键工序的严格把关和控制,有效地提高了钢构件的安装精度和施工质量,进而保证了建筑的整体抗震性能和结构安全,同时也减少了运营期的安全隐患和维护成本,提高了建筑的使用寿命和可持续性。

经过本工程实践证明,地震高发区钢结构施工技术的系统研究对复杂条件下的构件分段吊装、厚板焊接质量控制、黏滞阻尼器精密安装、高强螺栓连接工艺等方面取得了良好成果,为今后同类地震高发区超高层钢结构工程施工提供了重要的参考依据。

[参考文献]

- [1]李国强,张其林,钱锋.多高层钢结构抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
 - [2]陈绍蕃.钢结构抗震设计原理[M].北京:科学出版社,2019.
 - [3]刘大海,杨翠如.高层建筑抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.
 - [4]王元清,石永久,李少甫.高层钢结构焊接技术[M].北京:机械工业出版社,2016.
 - [5]张耀春,周绪红.钢结构稳定理论及抗震设计[M].北京:高等教育出版社,2018.
 - [6]李国强,胡大柱,孙飞飞.耗能减震钢结构设计方法与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- 作者简介:倪礼(1991.2—),毕业院校:上海师范大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:上海建工五建集团有限公司,职务:项目执行经理,职称级别:工程师。