

大跨度管桁架结构节点受力和施工探讨

邓婷婷¹ 宋楠¹ 任靖¹ 陈阁琳²

1. 中冶赛迪工程技术股份有限公司 重庆 400013

2. 重庆两江新区建设有限公司 重庆 400010

摘要: 随着我国经济的不断发展, 2008年奥运会, 2012年世博会和2022年的冬奥会在我国召开, 极大推动了大跨度钢桁架结构的运用范围。比如体育场馆、大型商场、会展中心、影剧院、工厂车间等建筑都广泛应用了这种结构形式。本文结合某展示中心为例, 对管桁架结构的连接形式和节点设计进行了分析和对比, 并采用“地面拼装、整体吊装”的技术方案完成该项目大跨度管桁架结构的施工, 取得了较好的施工效果, 为工程设计提供参考。

关键词: 大跨度钢结构; 连接形式; 节点分析; 地面拼装, 整体吊装

Force analysis and construction discussion of long-span tube truss structure joints

Tingting Deng¹ Nan Song¹ Jing Ren¹ Gelin Chen²

1. China Metallurgical CCID Engineering Technology Co., LTD., Chongqing 400013

2. Chongqing Liangjiang New Area Construction Co., LTD., Chongqing 400010

Abstract: With continuous development of our country economy, 2008 Olympic Games, 2012 world expo and 2022 Winter Olympic Games are held in our country, which greatly promoted the application scope of large-span steel truss. Such as sports venues, large shopping malls, exhibition centers, theaters, factories and other buildings are widely used in this form of structure. Based on the example of an exhibition center, this paper analyzes and compares the connection forms and joint design of the pipe truss structure, and uses the technical scheme of “ground assembly and overall lifting” to complete the construction of the project’s long-span pipe truss structure, and obtains good construction results, which provides a reference for engineering design.

Keywords: Long-span steel structure; Connection form; Node analysis; Ground assembly, overall lifting

一、工程概况

本项目位于重庆市两江新区寸滩邮轮母港片区, 长江与嘉陵江交汇下游6公里的长江北岸, 向南可远眺两江交汇核心区城市天际线, 北临寸滩保税区, 与南山隔江对望。

场地地形高差大致为北高南低, 最低点绝对标高195.85m, 最高点236.03m, 高差约40m, 建筑用地范围位于整个地块中部三角形台地上, ± 0.00 的绝对标高为226.0m。建筑地上三层, 无地下室, 局部吊脚11m, 结构嵌固端拟定为基顶。除搭管桁架结构和旋转楼梯的框架柱采用钢管混凝土柱之外, 其他柱均采用矩形钢管。除大跨度梁和桁架的上下弦杆的材质采用Q390外, 其他构件的材质均采用Q355B。管桁架的跨度为44.549米。

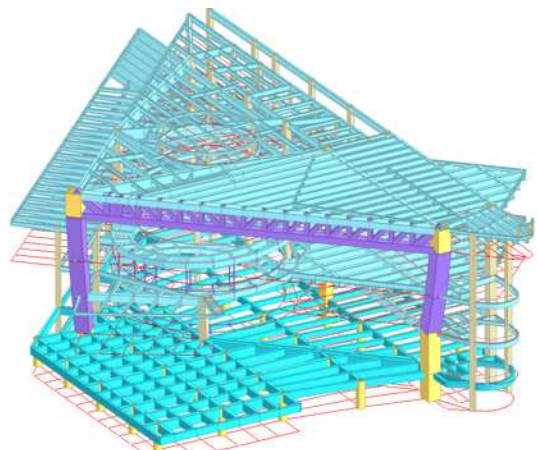


图1 钢结构三维轴测图

Fig.1 Three dimensional axonometric drawing of steel structure

二、桁架与钢管混凝土柱各种连接形式的对比

第一种形式: 当管桁架与钢管混凝土柱左侧连接节点为刚性连接, 右侧连接节点为铰接连接时, 上下

弦杆截面均采用 1000x800x40x40 (Q390B), 腹杆均采用 500x500x25x25 (Q355B), 采用 PKPM 中桁架模块进行建模得出的结果: 上弦杆最大的应力比是 0.79, 下弦杆最大的应力比是 0.81, 总用钢量约为 175t; 第二种形式: 当管桁架与钢管混凝土柱两端均采用刚性连接时, 上弦杆截面是 1000X800X40X40 (Q390B), 下弦杆截面按变截面来设计, 右侧端部第一跨按 1100X1100X50X50 (Q390B), 第二跨按 1000X1000X45X45 (Q390), 第三跨至左端均采用 1000X800X40X40 (Q390B), 右侧端部的腹杆按 700x700x30x30(Q355B) 设计, 其他区域均采用 500x500x25x25 (Q355B)。采用 PKPM 中桁架模块进行建模得出的结果: 上弦杆最大的应力比是 0.55, 下弦杆最大的应力比是 0.95, 总用钢量约为 178t; 第三种形式: 当管桁架与钢管混凝土柱两侧均采用铰接连接时, 上下弦杆截面均采用 1000x800x40x40 (Q390B), 腹杆均采用 500x500x25x25 (Q355B), 采用 PKPM 中桁架模块进行建模得出的结论: 上弦杆最大的应力比是 0.89, 下弦杆最大的应力比是 0.95, 总用钢量约为 172t。从总用钢量、施工难易程度、建筑造型的实现、安全储备度等这几个方面进行分析对比, 最终本项目选择第一种连接形式: 左侧为刚性连接, 右侧为铰接连接。再用 3D3S 软件进行补充验算大跨度管桁架结构的应力, 得出下弦杆最大的应力比是 0.769,

与 PKPM 结果的误差在 5% 以内, 上弦杆的最大应力比是相同的。综上所述, PKPM 建模计算分析大跨度管桁架结构, 结果是可行的。

三、管桁架支座节点分析

在结构设计中, 节点设计一直是关注的重点与焦点, 并要求其在各工况下, 强度、延性均能达到预期的性能状态, 实现“强节点, 弱构件”的设计理念, 满足相关规范及设计要求。本工程基于大型通用有限元软件 ABAQUS, 按实际结构布置建立关键节点的三维模型, 从 PKPM 软件中查找并提取节点 (最不利的三个节点如图 2 所示) 在多遇地震作用最不利工况下的杆端各项内力, 复核节点的应力结果。由于 ABAQUS 中的 C3D8R 八节点空间三位缩减积分实体单元计算精度较高, 用于本模型计算耗费的时间较少, 故采用 C3D8R 实体单元模拟支座节点对应的构件。

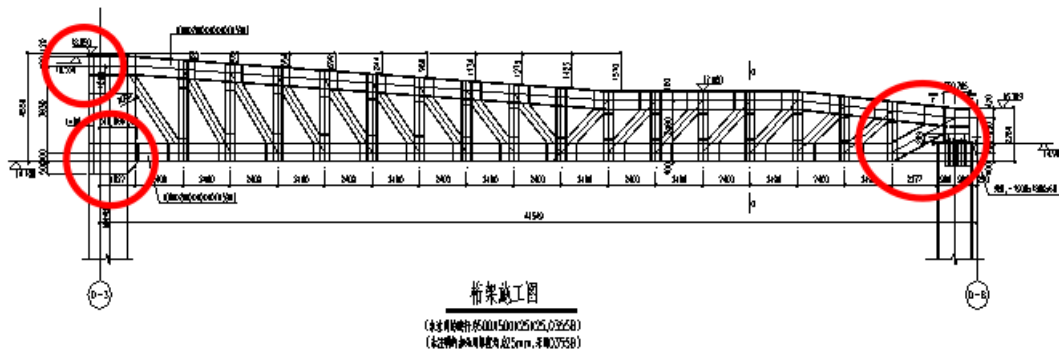
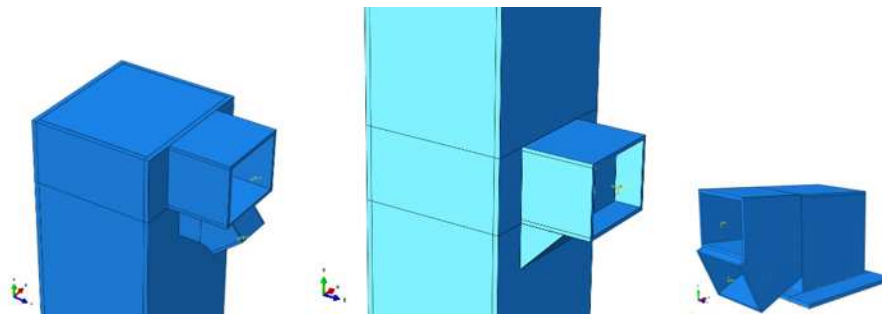


图 2: 屋面桁架节点位置选取



1) 节点一模型 2) 节点二模型 3) 节点三模型

图 3: 屋面桁架节点位置选取及模型编号

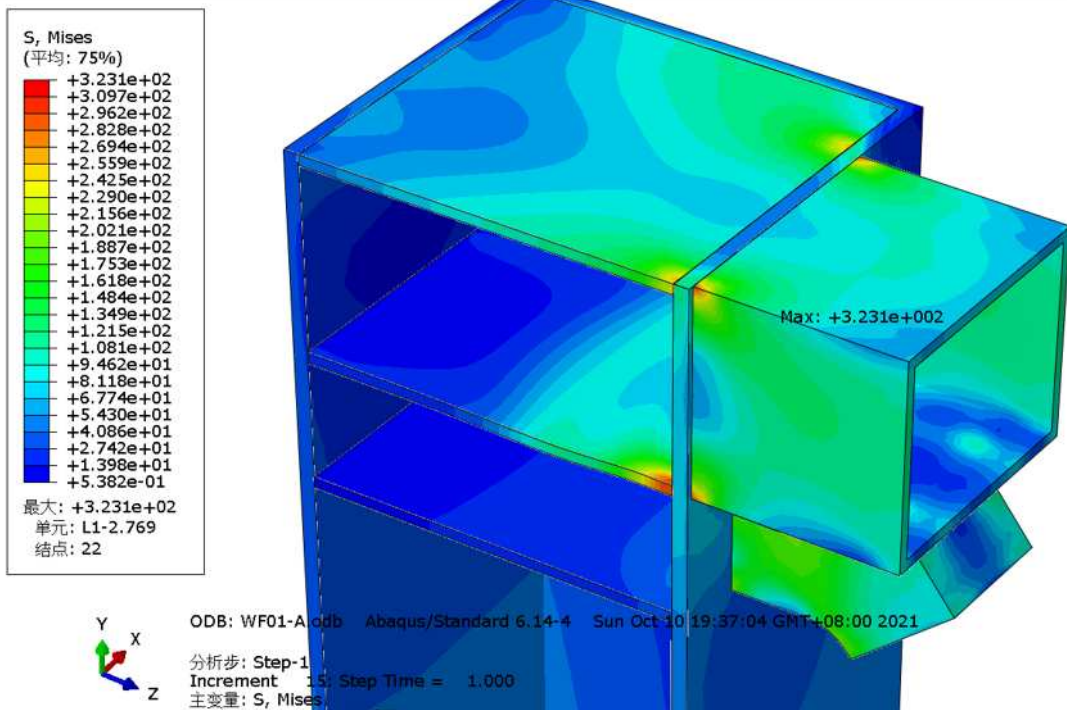
先读取各节点的 PKPM 模型最不利内力组合, 然后分别用 ABAQUS 软件进行节点有限元分析, 计算模型选取如图 3 所示。从节点一的应力结果 (图 a) 可以看出, 上弦杆

的四个角部和钢柱内部加劲板角部的局部极小区域出现较大应力, 其余梁柱连接区域应力小于 200MPa, 远小于钢材应力屈服强度 325Mpa, 无须进行节点加强处理。

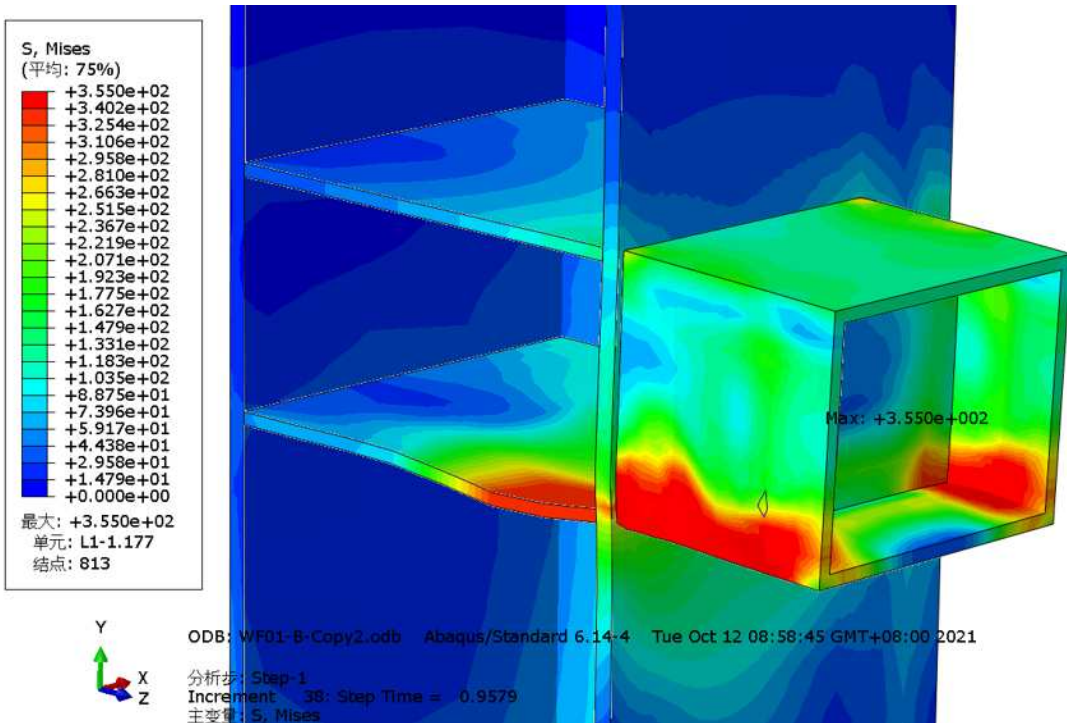
由于屋面桁架下弦杆内力较大，计算结果显示下翼缘和加劲板出现大面积屈曲（图 b），建议在应力较大区域进行梁加腋和增加相应位置的柱加劲板。经过改进之后的节点如应力云图（图 c），可以看出大部分的梁柱连接区域的应力远低于钢材应力屈服强度，各个构件的安全富裕度

均高于 20%；

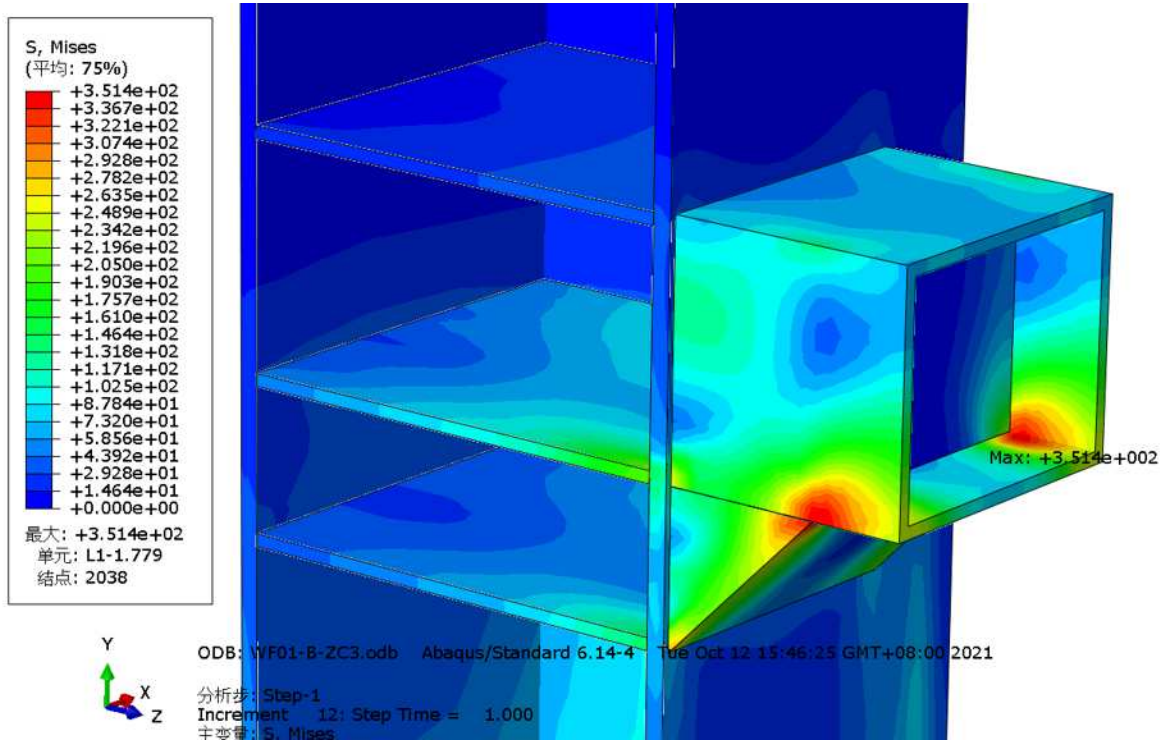
图 d：桁架右侧铰接节点，主要抵抗剪力和轴力作用，弦杆与顶端连接区域应力较小，但柱端与底板连接区域应力较大，此处的安全储备比较少，建议通过增加底板区域的横向和竖向加劲板，来增强底板的刚度，提高安全储备。



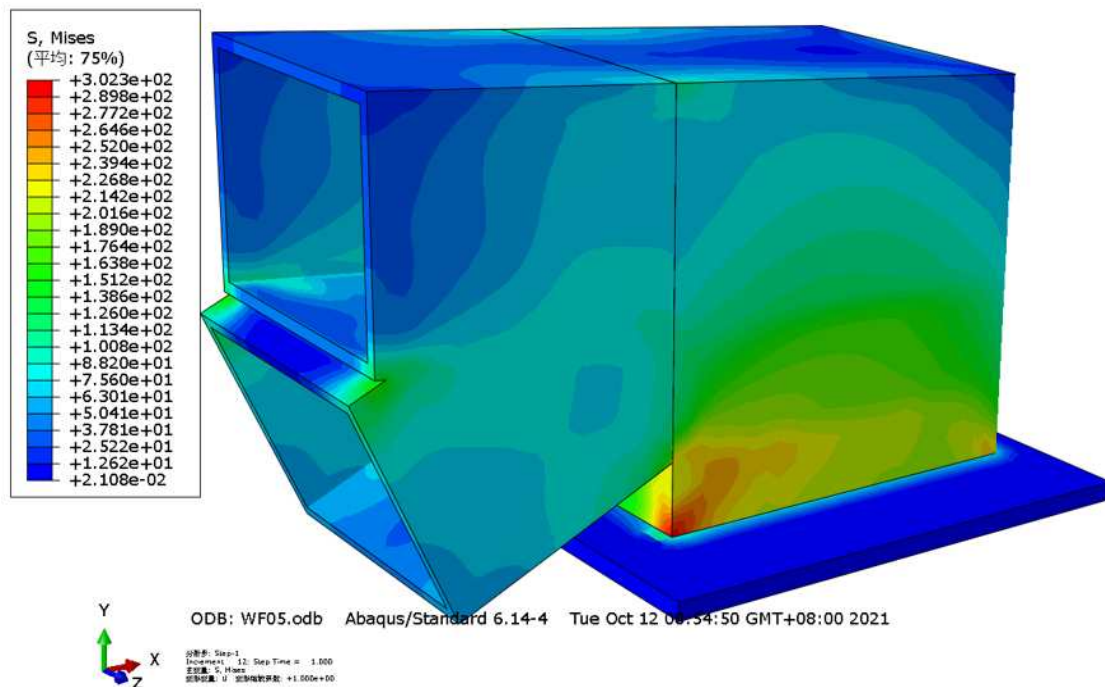
a) 节点一应力云图



b) 节点二应力云图（原方案不满足要求）



c) 节点二应力云图 (改进方案满足要求)



d) 节点三应力云图

图 11.3.4 屋面桁架节点有限元应力分析结果

综上所述,屋面桁架的关键性节点在多遇地震作用的最不利工况下通过局部区域加强的措施仍处于弹性阶段,并具有一定的安全储备。

四、管桁架施工和吊装的技术探讨

本项目的管桁架总重约为 175t, 为了满足建筑造型,桁架高度是渐变的,最高处是 3.360m,最低处是 1.45m,

宽度均为 1.00m,桁架底部的标高为 14.100m。施工时,要考虑风荷载对桁架结构侧向稳定的影响,对施工吊装要求比较高。目前主要的大跨度桁架的施工方法有整体吊装、整体提升、分段吊装、高空散装、高空滑移等^[1]。

由于重庆市寸滩国际新城展示中心为坡地建筑,现场场地比较狭小,周边遍布还有施工作业在赶本项目的进

度, 考虑到大吨位的汽车吊无法进入施工场地, 同时还要受道路宽度和转弯半径的限制, 只能分三段运输大跨度桁架结构, 然后直接到现场进行地面拼装。为了保证施工质量, 管桁架在现场拼装时, 须搭设 H 型钢制作的桁架拼装胎具, 并且要求拼装胎具下的地面要平整、压实, 以保证拼接后桁架的平整度在可控范围内^[2]。同时, 设计要求, 管桁架在制作、拼装、焊接后均应进行起拱度的检查, 起拱度为跨度的 1/750, 起拱值允许误差不超过跨度的 1/5000。管桁架的拼装应根据《钢结构工程施工质量验收标准》(GB50205-2020) 的要求严格执行。经设计复核, 施工方组织专家方案论证, 最终采用“地面拼装, 整体吊装”的技术方案, 完成了本项目大跨度管桁架结构的安装。根据桁架的位置结合场地的实际情况, 采用 2 台 400 吨吊车共同吊运大跨度桁架结构, 直至吊装顺利完成。

五、结论与建议

支座节点是大跨空间结构屋盖与支撑结构连接的关键构件, 对保证整体屋盖结构安全至关重要。结合重庆市寸滩国际新城展示中心这个项目, 对支座节点采用三种连接方式进行方案对比, 找出最优解。若不是受设计周期短、施工进度快和建筑造型适应性的限制, 设计还可以从其他方面来选择支座节点形式, 比如平板支座节点、弧形支座节点、球铰支座节点、板式橡胶支座、铸钢节点、和直埋式支座^[3]。

通过 ABAQUS 有限元分析关键节点的内力, 找到节点区域的不利部位, 从而进行局部加强, 提高整个桁架结构的安全储备, 是必不可少的环节。当然, 这只是从设计角度采取的加强措施。如果节点区域施工质量不好, 直接会影响整个桁架结构体系的失稳。因此, 建议在实际展开空

间管桁架施工时, 应遵循“先点焊, 后全焊”的主要施工顺序^[4]。并要求施工人员必须对焊接搭接的部分进行明确的处理, 焊缝质量等级严格按照设计要求进行检测。厚钢板的焊接工艺应采取可靠的施工措施, 如预热和后热, 防止焊接应力和变形过大。

在重庆市寸滩国际新城展示中心项目中, 施工技术人员通过专业软件核算大跨度管桁架结构在吊装工况下的强度、稳定、变形, 并经专家组讨论, 最终确定采用“地面拼装, 整体吊装”的方案来吊装管桁架。此项目实施此方案后, 发现既保证了施工进度要求, 又确保了施工过程中的安全, 达到了很好的经济效益。后期的大跨度空间结构可持续改进此种施工吊装方案, 进行施工技术的延伸。

由于时间和篇幅有限, 本文未对焊接过程中的焊接传热进行有限元分析^[5], 对于大跨度管桁架 Q390 和 Q355 钢结构在焊接过程中应力与变形的控制是一个很关键的问题。如何提高焊接后结构的质量, 是后期需要研究分析的问题。

参考文献:

- [1] 司保元. 谈大跨度桁架钢结构施工中的关键技术问题 [J]. 山西建筑, 2013, 39 (24): 106-107.
- [2] 柳国光, 龚宗宜. 大跨度桁架屋面的吊装 [J]. 科学技术创新, 2021, 07-0132-02.
- [3] 赵思玉. 管桁架结构支座节点力学性能分析及试验研究 [D]. 天津大学, 2019.
- [4] 邵志民, 刘伟, 姜滨. 某体育中心空间管桁架结构设计 [J]. 低温建筑技术, 2018, 31 (5): 46-48.
- [5] 王士博, 王宇晴, 张春瑞等. X70 钢不同焊接方法下焊接接头低温 CTOD 试验 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (23): 58-61.