

大跨度钢结构支座选型设计对整体受力的影响探究

王 磊

呼和浩特市建设工程施工图审查中心有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要：支座选型设计是大跨度钢结构体系形成完整传力路径的关键环节，其力学行为直接影响结构整体的刚度分布、内力重分配机制及抗震性能。本文从支座约束刚度、边界条件模拟、水平力传递路径及温度效应适配性等维度，系统探究支座选型对大跨度钢结构整体受力的作用规律。研究表明，支座约束刚度的合理取值能够显著改善结构竖向挠度与水平侧移的协调性，弹性支座与固定支座的组合布置方式直接决定温度应力与地震响应的消能效率。此外，支座选型需兼顾施工阶段临时约束与使用阶段永久约束的转换逻辑，避免因边界突变引发次生内力集中。本文旨在为大跨度钢结构设计实践中支座选型的力学合理性提供理论参考，推动“强节点、弱构件”理念在支座层面的深化应用。

关键词：大跨度钢结构；支座选型；约束刚度；边界条件；整体受力

引言

大跨度钢结构凭借其自重轻、强度高、跨越能力强及空间适应性好等优势，广泛运用于体育场馆、航站楼、会展中心及大型工业厂房等建筑形式中。随着跨度不断增大（百米级乃至数百米级），结构体系对支座边界条件的敏感性显著增强，支座不再是简单的“支承构件”，而是参与整体受力重构的关键节点。然而，当前工程设计中对支座选型的关注往往集中于承载力验算与构造可行性，对其与整体受力性能之间的耦合关系缺乏系统性的力学阐释。支座约束刚度的差异会改变结构自振频率、模态形态及荷载传递路径，进而影响设计内力的精确分布；同时，温度作用、风荷载及地震动输入均通过支座边界向主体结构传递，选型不当将加剧结构局部损伤风险。本文跳出单一支座构件的设计视角，从整体受力行为出发，探究支座选型对结构刚度匹配、内力重分布、抗震响应及温度适应性等方面的深层影响，以期为大跨度钢结构设计提供边界条件优化的理论依据。

1 支座选型的基本类型与力学表征

1.1 常见支座形式及其约束特征

大跨度钢结构常用支座包括平板橡胶支座、盆式橡胶支座、球型钢支座、铰支座及弹性滑动支座等。从力学约束维度划分，可分为三类：固定支座（约束三个平动自由度及部分转动自由度）、单向活动支座（释放某一水平方向的平动约束）、双向活动支座（释放两个水平方向的平动约束）。此外，弹性支座通过设置弹簧元

件引入可控刚度，实现了约束刚度连续可调^[1]。各类型支座的本质差异在于对结构边界自由度的约束数量及约束刚度的量值大小，这一差异直接决定了结构在外荷载作用下的变形协调机制。

1.2 支座刚度的参数化表达

支座刚度可分解为竖向刚度、水平刚度及转动刚度。对于大跨度结构，水平刚度对整体受力影响最为显著，因其主导了水平荷载（风、地震）的传递效率。支座刚度参数通常以弹簧系数（kN/mm）表示，其取值需与主体结构刚度处于同一量级，方能实现协同工作。若支座刚度过大，则近似固定边界，导致温度应力及地震惯性力高度集中；若刚度过小，则结构侧向刚度不足，变形失控。因此，支座选型的实质是刚度匹配设计，而非孤立地选取某一产品规格。

2 支座选型对结构静力受力行为的影响

2.1 竖向荷载作用下挠度形态的控制机制

在大跨度结构中，竖向荷载（恒载与活载）产生的挠度是设计控制要素之一。支座选型对挠度的影响主要通过边界转动约束及竖向支承刚度实现。固定支座能够限制端部转角，从而在支座附近产生负弯矩，减小跨中正弯矩峰值，进而降低跨中挠度；而铰支座或滑动支座因不传递弯矩，跨中挠度相对增大。然而，过度追求降低挠度而采用强转动约束支座，可能导致支座区域弯矩过大，造成节点构造复杂化。合理策略是依据结构跨度与荷载比值，选择适中的转动约束刚度，使挠度满足规

范限值的同时,避免支座区域应力集中。

2.2 水平荷载传递路径与内力分配规律

水平荷载(风荷载、地震作用)作用下,大跨度结构常采用空间桁架或网架体系,其水平力最终通过支座传递至下部支承结构。支座选型决定了水平力的分配比例:固定支座承担大部分水平剪力,滑动支座几乎不传递水平力。若同一结构体系中固定支座布置过于集中,则该支座承受极大水平反力,需特别设计锚固构造;若布置分散,则水平力均匀传递,但结构的抗侧刚度降低。从整体受力优化角度,应将固定支座布置于结构刚度中心附近,并配合弹性支座以调节各支座水平反力的均衡性,避免因个别支座过载而引发连锁破坏。

2.3 支座约束刚度差异引起的次生内力效应

实际工程中,由于制造误差、安装偏差或长期使用中的松弛,各支座实际刚度可能与设计值存在差异。这种差异将导致结构内力重分配,产生次生内力。例如,在网架结构中,若某一支座竖向刚度偏大,则该支座附近杆件轴力显著增加,而邻近支座卸荷,从而改变原设计的内力分布模式^[2]。因此,支座选型必须规定刚度容许偏差范围,并在整体计算中考虑刚度偏差的敏感性分析,确保结构在合理误差内仍保持安全的受力状态。

3 支座选型对结构动力特性与抗震性能的影响

3.1 自振频率与模态形态的改变

结构的自振频率取决于质量矩阵与刚度矩阵的比值,而支座约束刚度作为边界刚度的重要组成部分,显著影响整体刚度矩阵的稀疏性及主对角元素。以固定支座替代铰支座,结构整体刚度提升,自振频率增大,周期缩短,这可能使结构更接近地震动的卓越周期,从而增大地震响应。反之,采用弹性滑动支座可有效延长结构自振周期,实现“隔震”效果。大跨度结构设计中,应通过调整支座刚度使自振频率避开场地特征频率,这是选型设计中不可忽视的动力学条件。

3.2 地震响应下的内力集中与耗能机制

地震作用下,支座作为结构能量输入的首要界面,其选型直接影响输入能量的传递与耗散方式。固定支座将地震加速度直接传递至主体结构,结构通过自身塑性变形耗能;而采用铅芯橡胶支座或摩擦摆支座等耗能型支座,可利用支座的滞回特性吸收大量地震能量,减轻主体结构损伤。对于大跨度空间结构,均匀布置耗能支座可形成多道耗能防线,避免地震能量集中于少数关键杆件。然而,耗能支座的引入会改变结构阻尼比,需在

整体时程分析中准确模拟其非线性本构,否则可能低估结构位移响应。

3.3 多向地震耦合作用的边界适配问题

大跨度结构通常具有空间受力特征,地震动具有多向性。支座选型需同时考虑水平双向及竖向地震分量的耦合效应。传统设计中,竖向地震往往被低估,但大跨度结构竖向刚度相对较弱,竖向支座刚度不足可能导致竖向振动放大。因此,支座应具备足够的竖向刚度以抵抗竖向地震,同时水平方向设置适当的弹性或耗能机制。现代球型支座可实现三向独立刚度设计,为多向地震耦合下的边界适配提供了有效手段。

4 温度效应与支座选型的协同设计

4.1 温度变形对结构受力的驱动作用

大跨度钢结构对温度变化高度敏感,因钢材线膨胀系数较大(约 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$),温度升降引起结构的自由伸缩变形,当变形受到支座约束时,即产生温度应力。温度应力的大小与支座约束刚度及结构温度区段长度呈正相关。若采用全固定支座,温度应力可达到甚至超过荷载应力,导致结构屈服或稳定失效。因此,释放温度变形是支座选型首要考虑的功能需求。

4.2 滑动支座与弹性支座的温度适应机理

滑动支座通过释放水平位移自由度消除温度应力,是最直接的解决途径。但完全自由的滑动支座无法传递水平荷载,故工程中常采用“固定支座与滑动支座组合”方案,即在结构纵向设置若干固定点,其余位置设置滑动或弹性支座,使温度变形以固定点为中心对称展开,同时确保水平力有效传递。弹性支座则通过有限刚度允许一定位移,既部分释放温度应力,又维持必要的水平抗力^[3]。优化设计时,应基于温度变化幅度计算期望位移量,据此选定滑动支座的位移容量或弹性支座的刚度系数,使支座工作于弹性范围内,避免因位移超限造成支座破坏。

4.3 温度与荷载组合工况下的支座受力包络设计

实际工况中,温度作用与风荷载、雪荷载等同时发生,支座受力呈现多工况组合特征。支座选型需进行包络设计,即对比各组合工况下的支座反力最大值与位移最大值,确保支座的承载力与变形能力均满足要求。尤其要注意,温度应力与荷载应力的叠加方式因支座约束类型而异——固定支座以应力叠加为主,滑动支座以位移叠加为主。选型时必须明确结构在极端温度条件下的受力状态,避免低估支座设计内力。

5 支座选型与施工阶段受力的动态匹配

5.1 施工临时约束与永久约束的转换逻辑

大跨度钢结构常采用分块吊装、滑移或整体提升等施工工艺,施工阶段的支座约束状态与使用阶段截然不同。例如,滑移施工需设置临时滑道支座,其摩擦系数和导向刚度影响滑移过程中的结构内力分布;整体提升施工时,提升吊点相当于临时支座,其布置形式决定了提升阶段结构的变形形态。若施工阶段支座约束设计不当,可能导致结构在成型前即产生不可恢复的塑性变形。因此,支座选型应统筹施工临时约束与永久约束的衔接,明确约束转换的时序与刚度突变控制措施。

5.2 支座刚度突变对成型后受力状态的遗留影响

结构施工完成后,临时支座撤除或永久支座锁定时,约束刚度的突然改变会在结构中激发附加内力。这种“支座刚度突变效应”尤其在大跨度柔性结构中显著。设计时可通过分阶段张拉或逐步释放约束的方式平缓过渡,但本质上需要支座具备可调刚度功能。现代智能支座(如液压调节支座)可在施工过程中动态调整约束刚度,是实现平滑转换的有效技术路径。选型时需评估突变效应产生的附加应力是否超出结构承载力裕度,必要时调整永久支座的初始安装状态(如预偏位或预加载)以抵消后续变形。

6 支座选型优化设计策略与力学原则

6.1 基于受力敏感性的分类选型原则

大跨度钢结构支座选型应遵循“分类对待、分级匹配”的原则。对于支承于刚性下部结构(如混凝土柱)的支座,重点关注水平刚度与转动刚度的协调;对于支承于柔性下部结构(如钢柱或组合柱)的支座,则需考虑上下部结构的共同变形,支座刚度应取相对较小值以避免集中受力^[4]。此外,根据结构对约束变化的敏感程度,可将支座区域划分为高敏感区与低敏感区,高敏感区采用可调或耗能支座,低敏感区采用常规支座,实现差异化设计。

6.2 多目标约束下的刚度参数优化取向

支座选型本质上是多目标优化问题,涉及承载力、变形控制、抗震性能、温度适应及经济性等目标。优化的核心在于确定支座水平刚度与竖向刚度的最优组合。可采用加权综合法,以结构总应变能最小化为目标,以

支座位移限值及应力比限值为约束,优选刚度参数。需要注意的是,优化结果应具备鲁棒性,即对刚度参数的微小变化不敏感,以保证实际产品的适用性。

6.3 “强节点”理念在支座设计中的延伸

“强节点、弱构件”是钢结构抗震设计的基本准则。支座作为节点的重要组成部分,其强度与变形能力应高于相邻构件,确保塑性铰或耗能机制首先在构件中形成,而非在支座处发生脆性破坏。因此,支座选型时其承载力设计值应取相邻杆件极限承载力的1.2~1.5倍,同时支座位移能力应大于罕遇地震下结构最大位移的1.5倍。这一原则要求支座选型不仅满足弹性设计荷载,还需具备足够的延性储备^[5]。

7 结语

大跨度钢结构支座选型绝非孤立的产品选择,而是与结构整体受力行为深度耦合的系统性设计决策。本文从静力变形、水平力传递、动力特性、温度适应及施工动态匹配等方面系统论证了支座约束刚度与布置方式对整体受力的全面影响。研究揭示,合理的支座选型应在“约束”与“释放”之间寻求力学平衡——既不过度约束导致温度及地震应力集中,也不过度释放致使结构失稳或变形超标。弹性支座与固定支座组合布置、耗能支座与滑动支座协同工作,构成了当前大跨度结构支座设计的优化方向。未来研究应进一步关注支座非线性本构与结构非线性响应的耦合分析方法,以及智能支座主动刚度控制技术在超大跨度结构中的应用前景,推动支座选型从经验设计向性能化设计的跨越。

参考文献

- [1] 陈以一,王伟,李元齐.大跨度空间钢结构支座边界条件对受力性能的影响[J].建筑结构学报,2022,43(5):1-12.
- [2] 张其林,刘明,周晓峰.球型钢支座刚度参数对大跨度桁架地震响应的影响研究[J].工程力学,2023,40(2):156-165.
- [3] 赵金城,杨帆,许卫红.考虑温度效应的大跨度钢结构支座选型优化设计[J].空间结构,2024,30(1):45-53.
- [4] 王秀丽,李鹏飞,高文辉.弹性支座对网架结构整体稳定性的影响分析[J].建筑结构,2022,52(18):88-95.
- [5] 刘海卿,张辉,陈志华.大跨度钢结构支座约束刚度与抗震性能关联性研究综述[J].地震工程与工程振动,2023,43(4):210-219.