

大跨度结构设计中的应力分布问题与对策

文 / 赵 焰 安徽省安庆市岳西县现代建筑设计院有限公司

摘要：为解决大跨度结构设计中应力分布的关键问题，提升结构性能，借助理论分析、数值计算与实验研究等多种手段，深入剖析荷载分布不均、材料非均匀性、结构变形、环境因素对大跨度结构应力分布的影响机制。研究发现，荷载分布不均易造成局部应力集中，材料特性差异也会干扰应力状态，结构变形与应力分布相互作用，环境因素不可忽视。结果表明，通过优化结构形态布局、精准选择与分布材料、强化支撑连接设计、充分考量动态荷载与环境因素等举措，能够显著改善应力分布，增强大跨度结构的安全性与稳定性，为实际工程设计提供有力参考。

关键词：大跨度结构；应力分布；荷载分布；结构设计；优化对策

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.14.107

引言

随着建筑业的迅速发展，大跨结构已越来越多地应用于各种类型的建筑当中，如体育馆、机场航站楼等。它以其开放的室内空间满足了现代大型公共建筑功能的需要。然而，在大跨结构设计中，应力分布是影响大跨结构安全性和稳定性的一个重要因素。荷载分布不均匀，可能是由于设备布置和人群聚集等原因造成的；材料的不均匀性来源于制造过程的环节；在日常的使用和灾害中，结构变形是无法避免的；温湿度等环境因素对应力状态也有一定的影响。如果处理不好，可能导致结构局部破坏，甚至导致整体破坏，因此，迫切需要对其应力分布进行深入研究，并提出有效的应对措施。

一、应力分布问题的分析方法

（一）理论分析方法

理论分析方法依托经典力学理论与数学推导，构建大跨度结构的力学模型。通过材料力学、结构力学等知识，对结构的受力状态进行解析。例如，在分析梁式大跨度结构时，运用梁的弯曲理论，依据结构的几何尺寸、边界条件以及所受荷载，推导应力计算公式，确定结构不同部位的应力大小与分布规律。在桁架结构中，利用节点法、截面法等，结合静力平衡方程，求解杆件内力，进而换算出应力。该方法的优势在于能够揭示应力分布的本质规律，具有较高的普适性。但其局限性也较为明显，实际大跨度结构往往较为复杂，理论分析难以精确考虑所有因素，像材料的非线性特性、结构的复杂边界条件等，会导致计算结果与实际情况存在偏差。

（二）数值计算方法

采用数值方法，将大跨结构离散成有限元，并借助计算机软件对其进行离散。以有限元为代表的有限元分析方法，将结构离散为由节点相连的多个小单元。在此基础上，根据结构整体平衡条件及边界条件，将各单元方程进行整合，得到整体刚度矩阵。通过输入结构的材料参数、几何模型和载荷信息，软件就可以解出节点处的位移，然后根据位移和应力之间的关系进行应力分布计算。利用有限元软件对悬索桥这一大跨径结构进行仿真，可以清楚地显示主缆、吊杆、桥塔等在车辆荷载、

风荷载下的受力状态。该方法具有结构复杂、工作条件复杂、计算精度高等特点。然而，计算结果对模型精度有很大的依赖性，如果模型划分不当或参数设置不当，将严重影响计算结果的可靠性。

（三）实验研究方法

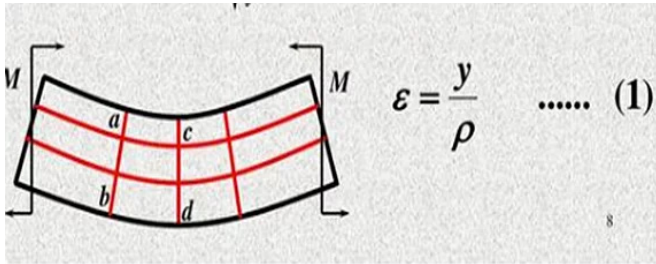
实验研究方法通过制作大跨度结构的缩尺模型或直接对实际结构进行加载测试，来获取应力分布数据。在实验室中，采用相似材料制作模型，按照相似理论，保证模型与实际结构在几何形状、力学性能等方面相似。利用电阻应变片、位移计等传感器，测量模型在不同荷载工况下关键部位的应变与位移，经换算得到应力值^[1]。例如，对一个大跨度拱结构模型进行竖向均布荷载和水平风荷载加载实验，实时监测应变片数据，绘制出结构表面的应力分布云图。对于一些已建成的大跨度结构，可在现场进行原位加载测试，更真实地反映结构在实际工作状态下的应力分布。实验研究能直观展现结构的力学行为，为理论和数值计算提供验证依据。但实验成本高、周期长，且模型与实际结构存在一定差异，实验结果推广存在局限性。

二、大跨度结构中的应力分布问题

（一）荷载分布不均对应力的影响

大跨度结构在现实使用中，荷载分布不均的状况屡见不鲜。在大型火车站的候车大厅屋面，由于候车区域人员密集，而一些设备间、通道等区域人员稀少，导致屋面不同部位承受的活荷载差异显著。又如在大型仓储式超市的大跨度屋盖下，货物往往集中堆放在特定区域，这使得屋盖局部承受远超平均水平的荷载。当荷载分布不均时，依据力学中的圣维南原理，在荷载集中区域，应力会迅速扩散并在局部形成峰值。以典型的简支梁式大跨度结构来说，假设在梁的跨中位置施加一个集中荷载，梁的跨中区域不仅要承担自身重力产生的应力，还要承受集中荷载带来的额外应力。在这种情况下，跨中截面的弯曲应力会急剧上升（见图一），远远超过按均布荷载设计时的应力值。这种应力的不均匀分布，会使结构局部区域的材料过早承受过高应力，进入塑性变形阶段。对于混凝土结构，过高的应力会引发内部微裂缝

的产生与扩展，随着时间推移，这些微裂缝逐渐连通，最终形成宏观裂缝，降低结构的承载能力。对于钢结构，局部过高应力可能导致钢材屈服，产生局部变形，严重时甚至引发整体失稳。长此以往，结构的安全性能大打折扣，使用寿命也会大幅缩短，一旦遭遇极端荷载，如地震、强风等，结构极有可能发生局部破坏甚至整体垮塌，造成严重的生命财产损失。



图一：弯曲应力

(二) 材料非均匀性导致的应力集中

大跨度结构使用的材料在生产、加工、运输等过程中，难以避免地会出现非均匀特性。钢材在冶炼和轧制过程中，由于工艺条件限制，内部可能产生微小气孔、夹杂等缺陷，同时合金元素也可能存在分布不均匀的情况。混凝土材料在搅拌、浇筑过程中，骨料的级配、水泥与外加剂的混合均匀程度，以及现场施工时的振捣情况等，都会导致混凝土内部的非均匀性。当结构受力时，材料的非均匀区域会成为应力传递的阻碍点^[2]。以存在内部缺陷的钢材杆件承受轴向拉力为例，在缺陷处，由于实际有效承载面积减小，根据应力计算公式 $\sigma = F/A$ (其中 σ 为应力, F 为外力, A 为受力面积), 在相同外力作用下, 此处应力会显著增大, 形成应力集中现象。应力集中区域的应力值往往是平均应力的数倍甚至数十倍, 使得材料在远低于设计强度的情况下就可能发生破坏。尤其是在承受动荷载或循环荷载时, 应力集中处的材料不断经历高应力与低应力的交替作用, 极易引发疲劳裂纹。随着裂纹的逐渐扩展, 杆件的承载能力不断下降, 最终可能导致结构突然失效。在大跨度桥梁的钢结构构件中, 因材料非均匀性引发的应力集中问题, 可能在长期车辆荷载作用下, 加速结构的损伤, 严重威胁桥梁的安全运营。

(三) 结构变形与应力分布的关系

大跨结构在承受荷载时, 不可避免地会产生不同程度的变形, 其变形和应力分布之间存在着复杂而又互相影响的关系。对于大跨径斜拉桥, 在车辆作用下, 桥面将产生竖向变形, 从而导致拉索索力的变化。由于斜拉索的长度、倾角及与桥面的连接位置等因素, 各拉索的受力情况也不尽相同, 从而引起斜拉索应力重分布。在混凝土框架结构中, 梁受垂直荷载而产生弯曲变形时, 其截面应力分布将发生显著变化。在弹性阶段, 受压区与受拉区的应力基本呈线性分布, 随着变形的增加, 进入非线性阶段, 受拉区混凝土逐渐开裂退出工作状态, 拉筋承担了较大的拉力, 应力增加。混凝土受压区内的

应力分布也不再呈线性分布, 峰值压应力向压边处偏移; 当结构变形过大, 超出设计允许值时, 结构局部应力可能超过材料屈服极限。例如, 在大跨高层建筑中, 当遇到强风时, 结构侧移过大, 底层柱受力过大, 造成混凝土压碎或钢材屈服, 导致结构局部破坏^[3]。长期反复的结构变形, 也会触发结构的累积损伤, 如混凝土微裂纹的扩展、钢材晶体结构的逐步破坏, 进一步加剧应力分布, 降低结构整体稳定性, 进而影响结构的服役寿命与安全。

(四) 环境因素对应力的影响

大跨度结构长期暴露于自然环境中, 多种环境因素交织作用, 对其应力分布产生不可忽视的影响。温度变化是常见且影响显著的环境因素之一。大型混凝土桥梁在夏季高温时段, 桥体温度升高, 混凝土受热膨胀; 而在冬季低温时, 又会收缩。若桥梁的支座等约束条件限制其自由伸缩, 结构内部就会产生温度应力。对于钢结构桥梁, 在昼夜温差作用下, 钢梁的不同部位温度变化不同步, 会产生温度梯度, 进而引发温度应力。湿度对大跨度结构也有重要影响, 特别是混凝土结构。当环境湿度降低时, 混凝土中的水分逐渐散失, 发生干缩变形; 湿度升高时, 又会吸湿膨胀。这种干缩湿胀变形会在混凝土内部产生应力, 尤其是在混凝土构件的表面与内部之间, 由于湿度变化速率不同, 会形成湿度梯度, 导致应力不均匀分布。风雨等自然荷载同样是环境因素的重要组成部分。强风作用下, 大跨度结构表面会承受复杂的风压力和吸力, 对于体型复杂的结构, 如大型体育馆, 风荷载会在结构表面形成局部高压区和低压区, 改变结构的受力状态, 使应力分布发生变化。暴雨天气时, 结构若排水不畅, 可能导致局部积水, 积水荷载会增加结构的额外应力, 进一步影响结构的应力分布。这些环境因素长期综合作用, 使大跨度结构的应力分布情况极为复杂, 严重威胁结构的耐久性和安全性, 可能导致结构过早。

三、大跨度结构设计中的应力分布对策

(一) 优化结构形态与布置

在大跨度结构设计中, 优化结构形态与布置是改善应力分布的关键举措。合理的结构形态能更高效地传递荷载, 降低应力集中现象。例如, 采用拱形结构, 其力学性能优良, 在竖向荷载作用下, 拱主要承受压力, 通过拱脚将荷载传递至基础, 相比梁式结构, 能有效减小弯矩, 降低结构内部的拉应力^[4]。在体育馆等大空间建筑中, 可采用空间网架结构, 将杆件合理布置成网格状, 利用空间协同受力特性, 均匀分散荷载, 使结构各部位应力分布更趋均匀。进一步来看, 在一些大型会展中心的设计中, 常采用张弦梁结构。该结构通过在梁下设置拉索并施加预应力, 使梁与索协同工作。梁受弯时, 拉索的拉力能有效抵消部分弯矩, 改变梁的受力模式, 从而优化结构的应力分布。在平面布置上, 对于大型商业综合体这类大跨度建筑, 根据不同区域的功能需求, 合

理划分柱网。如在中庭等大空间区域,适当增大柱间距,采用大跨框架结构;而在周边商铺等较小空间区域,减小柱间距,采用常规框架结构,实现荷载的合理分配。在竖向布置方面,像超高层大跨度建筑,通过设置多个加强层,调整结构的刚度分布,有效改善结构在水平荷载作用下的应力分布,避免因刚度突变导致的应力集中。通过精准的结构形态与布置优化,能显著提升结构的整体性能,充分发挥材料的力学性能,降低结构的建造与维护成本。

(二) 材料选择与分布优化

材料的选择与分布对大跨度结构的应力分布有着直接影响。在材料选择方面,应依据结构的受力特点与使用环境,挑选性能适配的材料。对于承受较大拉力的部位,可选用高强度钢材,因其具有较高的抗拉强度,能有效抵抗拉力,降低应力水平。在大跨度混凝土结构中,采用高性能混凝土,其具备良好的抗压、抗裂性能,可提升结构的耐久性与承载能力。以跨海大桥为例,在主缆等承受巨大拉力的关键部位,选用高强度、耐腐蚀的平行钢丝束。这些钢丝经过特殊处理,不仅抗拉强度高,还能适应海洋环境的侵蚀。在混凝土箱梁部分,采用海工高性能混凝土,添加矿物掺合料,提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力,增强结构耐久性。在材料分布优化上,在大跨度工业厂房的钢结构屋架设计中,在弦杆等主要受力杆件处,选用较大规格的型钢;而在腹杆等次要受力杆件处,采用较小规格型钢,在保证结构安全的前提下,实现材料的合理配置。在混凝土结构的连续梁中,在跨中受拉区增加配筋率,在支座受压区适当调整混凝土强度等级,使结构在不同部位充分发挥材料优势,优化应力分布,提高结构的可靠性与经济性。

(三) 加强支撑与连接设计

在大跨结构体系中,支撑和连接是关键节点,加强这一部位的设计,对于改善结构应力分布具有重要意义。在支护设计中,合理地设置支护形式和支护位置,对支护结构的变形起到了很好的约束作用。如高层大跨建筑多采用核心筒-框架结构,以核心筒为主要竖向支撑,提供较强的抗侧刚度,降低水平荷载下的受力^[5]。通过对桥墩和桥台的合理布置,加强了结构的竖向支承能力,并保证了荷载向地基的均匀分布。在大跨门式刚架结构中,设置柱间支撑可以改善结构纵向稳定,改变横向荷载作用下的传力路径,使得结构受力更加均匀。在节点设计中,保证节点的强度和刚度是非常重要的。在钢结构连接处,为保证节点内力的有效传递和避免应力集中,应采取焊接或螺栓连接的可靠方法。加强节点配筋设计,提高节点承载力和延性;为确保装配式混凝土大跨结构构件的连接可靠度,采用套筒注浆连接等先进连接方式,保证结构在受力过程中能够协同工作,且应力分布均匀。通过对支撑和节点的合理设计,提高结构的整体性和稳

定性,实现复杂荷载下的受力均匀,提高结构的抗震和抗风能力。

(四) 考虑动态荷载与环境因素

大跨度结构在实际使用中,不可避免地会受到动态荷载与环境因素的影响,因此在设计中充分考虑这些因素是优化应力分布的必要环节。对于动态荷载,如地震、风振等,采用合适的结构动力学分析方法,准确计算结构在动态荷载作用下的响应。通过设置阻尼器、隔震支座等装置,消耗地震或风振能量,减小结构的振动幅度,降低结构内部的动应力。在一些位于强风地区的大跨度输电塔设计中,安装黏滞阻尼器,有效减小风振响应,降低杆件的应力水平。在地震多发地区的大跨度桥梁设计中,采用隔震支座,延长结构的自振周期,减小地震力的输入。在环境因素方面,针对温度变化,设计合理的伸缩缝、后浇带等构造措施,允许结构在温度作用下自由伸缩,减少温度应力。考虑湿度对混凝土结构的影响,采用防水、防潮措施,控制混凝土的干缩湿胀。在沿海地区的大跨度混凝土建筑中,对混凝土表面进行防水涂层处理,阻止水分侵入,减少因湿度变化引起的结构应力。通过全面考量动态荷载与环境因素,提前采取应对措施,能使大跨度结构在复杂工况下保持良好的应力分布状态,延长结构的使用寿命,保障结构的安全运行。

结语

综上所述,大跨度结构设计中应力分布受多种因素影响。荷载分布不均、材料非均匀性、结构变形以及环境因素,均会致使应力集中或分布异常,威胁结构安全与耐久性。通过优化结构形态与布置、合理选择及分布材料、加强支撑与连接设计,并充分考量动态荷载与环境因素,能有效改善应力分布状况。未来,随着建筑技术的不断进步,应进一步深入研究复杂环境下大跨度结构的应力演变规律,研发新型材料与结构体系,借助先进技术手段实现结构全寿命周期的应力监测与调控,为大跨度结构的安全、高效发展提供更坚实的保障。

参考文献

- [1] 方秋红. 市政工程项目管理存在的问题及对策[J]. 居业, 2024, (11): 166-168.
- [2] 姚有钱. 市政工程中关于给排水项目的管理措施分析[J]. 居舍, 2020, (28): 143-144.
- [3] 窠旭亮. 市政工程给排水项目管理措施探讨[J]. 住宅与房地产, 2020, (18): 154.
- [4] 冯玉权. 市政给排水工程项目的精细化管理研究[J]. 居舍, 2019, (26): 117.
- [5] 赖汉初. 市政给排水工程管理中存在的问题与对策研究[J]. 住宅与房地产, 2019, (15): 131.

作者简介: 赵焰(1982-12)男汉族,安徽安庆岳西人,工程师,研究方向,建筑工程,(结构工程)。