

预应力施工技术在大跨度建筑中的应用研究

李华兴

上海建工二建集团有限公司南昌分公司 江西 南昌 330000

摘要: 本文旨在系统探讨预应力施工技术在大跨度建筑中的应用。首先,阐述了预应力技术的基本原理、分类及其核心优势;其次,深入分析了其在典型大跨度结构体系(如预应力混凝土梁/桁架、预应力空间网格结构、预应力索-膜结构、预应力拱结构等)中的具体应用形式与受力机理;再次,详细论述了预应力施工的关键技术环节,包括材料选择、张拉工艺、锚固体系及施工控制要点;最后,结合国内外经典工程案例,总结了该技术的应用成效,并对其未来发展趋势进行了展望。研究表明,预应力施工技术是实现大跨度建筑高效、安全、经济建造的核心支撑,其与新材料、新工艺、智能化技术的融合将为未来大跨度建筑的发展开辟更广阔的空间。

关键词: 预应力技术;大跨度建筑;结构体系;施工工艺;工程应用

引言

21世纪,人类对建筑空间需求愈发多样,巨型体育场、大型综合体、现代化交通枢纽等,都要求建筑内部空间无阻碍且开放,这直接推动了大跨度建筑蓬勃发展。所谓大跨度建筑,通常指单跨长度超过60米或总覆盖面积巨大的建筑结构。这类建筑不仅是城市现代化的标志性符号,更是衡量一个国家土木工程技术水平的重要标尺。但大跨度使结构构件承受巨大弯矩和剪力,传统钢筋混凝土结构在大跨度下自重过大,纯钢结构用钢量大、成本高且易变形,影响使用与美观。在此形势下,预应力施工技术应运而生,成为解决大跨度结构难题的关键。它通过提前引入与外荷载效应相反的内力状态,优化结构受力,提高材料利用率,减轻自重,控制裂缝。因此,深入研究其在大跨度建筑中的应用,对推动技术进步、实现绿色低碳建造意义重大。

1 预应力技术的基本原理与分类

1.1 基本原理

预应力技术的核心思想是“化被动为主动”。对于以受弯为主的构件(如梁、板),在外荷载作用下,其截面底部会产生拉应力。混凝土作为一种抗压性能优异但抗拉性能极差的脆性材料,一旦拉应力超过其抗拉强度,便会开裂,导致刚度下降、钢筋锈蚀,最终影响结构的安全性和耐久性^[1]。预应力技术通过在混凝土浇筑前(先张法)或浇筑后达到一定强度时(后张法),利用千斤顶等张拉设备对高强预应力筋(钢绞线、钢丝束等)进行张拉,使其产生巨大的拉力。这个拉力通过锚具传递给混凝土构件,使混凝土在使用前就处于全截面受压或大部分截面受压的状态。当外部荷载施加于结构上时,所产生的拉应力首先需要抵消掉这部分预压应力,只有当荷载足够大时,

混凝土才会出现拉应力甚至开裂。这样,就极大地推迟了裂缝的出现,并有效控制了裂缝宽度,同时显著提高了构件的抗弯刚度和承载能力。

1.2 主要分类

根据施工工艺的不同,预应力技术主要分为两大类:

1.2.1 先张法

先张法是在浇筑混凝土之前,先将预应力筋张拉并临时锚固在台座或钢模上,然后浇筑混凝土。待混凝土达到设计规定的强度(通常不低于75%)后,放松预应力筋,依靠预应力筋与混凝土之间的粘结力,将预加的应力传递给混凝土。先张法工艺简单,质量易于控制,适用于工厂化、标准化生产的中小型预制构件,如空心板、轨枕等。但在现场施工的大跨度结构中应用较少。

1.2.2 后张法

后张法是先浇筑混凝土构件,并在其中预留孔道。待混凝土达到规定强度后,再将预应力筋穿入孔道,利用千斤顶在构件两端进行张拉,最后用锚具将预应力筋锚固在构件端部,并向孔道内灌浆以保护预应力筋并建立与混凝土的粘结。后张法无需庞大的台座,适用于现场浇筑或大型预制的大跨度构件,是当前大跨度建筑中最主流的预应力施工方法。后张法又可根据预应力筋是否与周围混凝土粘结,分为有粘结预应力和无粘结预应力。

2 预应力技术在大跨度建筑结构体系中的应用

2.1 预应力混凝土梁/桁架体系

这是最基础也是应用最广泛的形式。通过在普通钢筋混凝土梁的受拉区配置预应力筋,可以大幅减小梁的截面高度和自重。例如,对于30米跨的普通梁,截面高度可能需要1.8-2.0米,而采用预应力后,截面高度可降至1.0-1.2米,经济效益显著。在更大跨度下,常采用预应

力混凝土桁架。桁架的上弦杆受压，下弦杆受拉，通过在下弦杆施加预应力，可以有效平衡桁架在竖向荷载下的弯曲效应，使其内力分布更趋均匀，充分发挥材料性能^[2]。北京西客站主站房的巨型预应力混凝土桁架就是这一技术的成功典范。

2.2 预应力空间网格结构体系

空间网格结构（如网架、网壳）本身具有三维受力、整体性强的优点。引入预应力后，形成了更为高效的“杂交”结构体系。常见的有：（1）预应力拉索加强型网架/网壳：在网架或网壳的下部或内部增设预应力拉索，通过张拉拉索对上部网架产生向上的反拱作用，从而减小网架杆件的内力和节点位移，实现更大跨度的覆盖。（2）弦支穹顶（Suspension-Dome）：这是一种典型的预应力空间结构。它由上部刚性单层网壳和下部预应力拉索系统组成，两者通过竖向撑杆连接。通过对环向拉索施加预应力，可以给上部网壳提供连续的弹性支撑，极大地提高了整个穹顶的稳定性和刚度。国家体育馆（“鸟巢”旁的“折扇”）的屋盖就采用了弦支穹顶结构。

2.3 预应力索-膜结构体系

索-膜结构是轻质、高强、柔美的大跨度结构代表。其稳定性和承载能力完全依赖于预应力。通过在柔性膜材（如PTFE、PVC）边缘或内部布置高强钢索，并施加足够的预张力，使膜面形成稳定的、具有抵抗外部荷载（风、雪）能力的曲面。预应力在这里不仅是承载的手段，更是赋予结构形态的根本。水立方（国家游泳中心）的ETFE气枕外墙虽然主体是气承式，但其内部的支撑结构也大量运用了预应力索网技术，确保了气枕单元的稳定和整体建筑的形态。

2.4 预应力拱结构体系

拱结构以受压为主，天然适合混凝土材料。但在大跨度拱桥或建筑中，拱脚会产生巨大的水平推力，对基础要求极高。通过在拱肋内部或外部设置预应力拉杆（系杆），形成“系杆拱”，可以有效地平衡拱脚的水平推力。预应力系杆不仅承担了全部或部分水平推力，其自身的预拉力还能调节拱肋的内力分布，优化结构性能。许多大型火车站的站台雨棚就采用了预应力混凝土系杆拱结构。

3 预应力施工关键技术

3.1 材料选择

预应力工程的质量与寿命，从根本上取决于所用材料的性能。预应力筋是整个体系的核心，目前工程中普遍采用符合国家标准的高强低松弛预应力钢绞线，例如1×7-15.2-1860规格的产品，其抗拉强度标准值高达

1860MPa，且松弛损失小，能长期稳定地维持预应力。与之配套的锚具、夹具和连接器则是保证预应力有效传递和永久锚固的关键部件，它们必须具备可靠的锚固性能、足够的静载与疲劳强度以及优良的耐久性，常用的有夹片式锚具和镦头锚具等。在后张法施工中，孔道的成型材料也至关重要，金属波纹管或高密度聚乙烯（HDPE）塑料波纹管被广泛使用，它们不仅需要足够的刚度以抵抗混凝土浇筑时的压力，还需具备良好的密封性以防止漏浆，并能与后续灌入的水泥浆形成有效粘结^[3]。最后，用于保护预应力筋并建立有粘结体系的灌浆材料，通常采用高性能的水泥基灌浆料，其必须具备优异的流动性以确保能充满整个孔道，同时还要具有微膨胀或无收缩特性，以避免在硬化过程中产生空隙，从而为预应力筋提供长期、可靠的防腐屏障。

3.2 张拉工艺与控制

张拉是预应力施工的灵魂所在，其成败直接决定了结构的最终性能。整个张拉过程必须遵循科学严谨的程序，通常采用“0 → 初应力（10%-20%σ_{con}）→ σ_{con}（持荷2-5分钟）→ 锚固”的步骤。施加初应力的目的在于消除预应力筋的松弛和孔道内的微小间隙，以便准确测量后续的有效伸长量，并初步检验孔道摩阻损失是否在预期范围内。张拉的核心在于精确控制，工程实践中严格奉行“双控”原则，即以张拉力（通过校准的油压表读数换算得出）为主要控制指标，同时以预应力筋的实际伸长量作为校核手段。理论伸长量可通过规范公式计算得出，而实际伸长量则通过精密量具在现场测量。两者之间的误差必须控制在±6%的允许范围内，一旦超出，必须立即停止张拉，查明原因（如孔道堵塞、预应力筋滑丝等）并妥善处理后方可继续。对于包含多束预应力筋的大型或复杂结构，张拉顺序的安排尤为关键，必须遵循对称、分批、分级的原则，避免因不对称加载而导致结构产生过大的偏心弯矩、局部应力集中或不可控的变形，确保整个结构体系在张拉过程中始终处于安全、可控的状态。

3.3 孔道灌浆

对于有粘结预应力体系而言，孔道灌浆是保障结构百年大计的最后一道、也是至关重要的一道工序。其目的不仅是将预应力筋与周围混凝土牢固地粘结成一个整体，共同工作，更重要的是为高强钢绞线提供一个密闭、碱性的环境，隔绝水分和氧气，防止其发生锈蚀。传统的常压灌浆方法难以保证孔道，特别是复杂曲线孔道或高点部位的灌浆密实度，容易留下空洞或水囊，成为日后结构耐久性的隐患。因此，现代高质量的预应力

工程普遍采用真空辅助灌浆技术。该技术首先利用真空泵对预应力孔道进行抽真空，将其中的空气和水分抽出，形成负压环境，然后再从孔道一端压入高性能灌浆料。在负压的“吸力”和正压的“推力”双重作用下，灌浆料能够迅速、均匀地填充整个孔道，有效排除残留气体，极大程度地保证了灌浆体的密实性和均匀性^[4]。为了验证灌浆质量，除了严格按照配合比和工艺参数操作外，还可以在关键部位采用凿开检查、超声波无损检测或内窥镜探查等方法进行抽检，确保万无一失。

3.4 施工监测与信息化管理

在当今信息化时代，预应力施工已不再是单纯依靠经验和手工操作的传统作业。以BIM（建筑信息模型）技术为代表的信息化管理手段，正在深刻改变着预应力工程的面貌。在施工前，通过建立高精度的BIM模型，可以对预应力筋的空间走向、锚具位置、张拉端空间等进行三维可视化模拟，提前发现并解决与建筑、机电、幕墙等其他专业管线的碰撞问题，优化施工方案。在施工过程中，通过在结构的关键部位布设光纤光栅、振弦式等传感器，可以实时、连续地监测混凝土的应力、应变以及结构的整体位移。这些数据通过无线传输汇集到项目管理平台，工程师可以动态掌握结构在张拉过程中的真实响应，并与理论分析结果进行比对。一旦发现异常，可以立即调整后续的张拉力或顺序，实现施工过程的动态反馈与闭环控制，从而确保结构最终成形的精度和安全性，将风险消灭在萌芽状态。

4 工程应用案例分析

4.1 案例一：深圳宝安国际机场T3航站楼

T3航站楼屋盖采用了巨型Y型柱支撑的预应力张弦桁架结构。每榀张弦桁架跨度达85米，由上弦刚性H型钢桁架、下弦预应力拉索和中间V形撑杆组成。施工中，通过精确计算和分阶段张拉，成功实现了屋盖的整体提升和预应力施加。该结构不仅创造了开阔的无柱空间，而且用钢量比传统方案节省了约20%，充分体现了预应力技术

的经济性和高效性。

4.2 案例二：杭州奥体中心主体育场（“大莲花”）

“大莲花”的花瓣状屋盖结构极为复杂，由28片大花瓣和27片小花瓣交织而成。其核心支撑结构大量采用了预应力技术。特别是花瓣之间的悬挑部分，通过内置的预应力拉索系统来平衡巨大的倾覆力矩，确保了悬挑端的稳定性和安全性。施工过程中，运用了先进的BIM协同平台和智能张拉设备，克服了空间定位难、张拉顺序复杂的挑战，完美实现了建筑师的设计意图。

5 结语

本文系统研究预应力施工技术在大跨度建筑中的应用，结论表明，该技术凭借独特优势成为大跨度建筑发展的核心驱动力之一，它改善了结构受力性能，解决了传统结构诸多瓶颈问题，且已与多种大跨度结构体系深度融合，衍生出高效创新的结构形式，极大丰富了大跨度建筑的设计语言。不过，预应力施工是复杂系统工程，对多方面要求严苛，实际操作中要严格执行“双控”原则、推广先进工艺、加强监测与信息化管理，以确保结构质量与安全。展望未来，其在大跨度建筑领域前景广阔，材料高性能化、施工智能化、设计与施工一体化、可持续性成为核心导向等趋势明显。总之，预应力施工技术与时代科技不断融合创新，将在塑造未来城市空间中发挥不可替代的作用。

参考文献

- [1]陈佑燃.预应力施工技术在大型建筑中的应用研究[J].价值工程,2026,45(08):150-153.
- [2]陈国东.建筑大跨度空间结构施工中的预应力技术[J].低碳世界,2026,16(01):82-84.
- [3]赵子岗.高层建筑大跨度预应力混凝土楼板施工技术[J].建材发展导向,2026,24(02):103-105.
- [4]刘欢.住宅工程预应力施工技术在大型建筑中应用[J].中国房地产业,2025,(31):186-189.