

预应力技术在建筑安装抗震设计中的应用

王威威¹ 王晓磊¹ 靳莉果¹ 廖原²

1. 中国建筑第七工程局有限公司 河南郑州 450000; 2. 周口市政府投资项目代建中心 河南周口 466000

DOI: 10.12238/ems.v7i10.15735

[摘要] 地震灾害对建筑结构的破坏性极强, 仅 20 世纪以来, 全球因地震倒塌的建筑超千万栋, 生命财产损失惨重。建筑抗震设计成为保障结构安全的核心环节, 传统抗震方法多依赖增强构件截面或配筋, 却常陷入刚度与延性难以平衡的困境。预应力技术通过预先施加应力改变结构受力状态, 在提升刚度的同时保留良好延性, 为抗震设计提供新思路。

[关键词] 预应力技术; 建筑抗震设计; 抗震性能; 结构加固

近年来, 预应力技术在建筑抗震领域的研究逐步深入, 但现有研究多聚焦于静力荷载下的性能优化, 对强震作用下的动力响应规律探索不足, 尤其在预应力损失与抗震性能衰减的关联性分析上存在空白。本文解析不同预应力参数对结构抗震性能的影响规律, 旨在构建适用于多类型建筑的预应力抗震设计方法, 填补复杂工况下的技术研究缺口。

一、预应力技术概述

(一) 预应力材料与设备

1. 预应力筋

钢绞线由多根钢丝捻制而成, 抗拉强度可达 1860MPa 以上, 弯折性能优良, 在桥梁和高层建筑中应用广泛。钢丝分为光面钢丝和刻痕钢丝, 直径通常为 4-9mm, 屈服强度高且离散性小, 适用于预应力混凝土板类构件。碳纤维筋由碳纤维与树脂复合而成, 抗拉强度超过 2000MPa, 抗腐蚀性能优异, 在海洋建筑、化学工业厂房等环境中优势显著。

2. 锚具

按工作原理可分为机械式锚具和黏结式锚具。夹片式锚具依靠夹片与筋材的摩擦力固定, 适用于钢绞线; 支承式锚具通过螺母或承压板传递应力, 常用于钢丝束。锚具需保证足够的承载能力和锚固效率系数, 选用时需与预应力筋类型、张拉工艺匹配, 在高湿度环境中还需具备抗锈蚀能力。

3. 张拉设备

主要由千斤顶、高压油泵和压力表组成, 功能是将预应

力筋张拉至设计应力值。操作时需先对设备进行标定, 确保压力与应力换算准确。张拉过程中应保持匀速加载, 避免冲击荷载, 实时监测预应力筋伸长值与理论计算值的偏差, 偏差超出±6%时需暂停检查。

(二) 预应力作用机理

1. 对结构刚度的提升

源于其在构件受荷前建立的预压应力。这种应力使构件在承受外部荷载时, 挠度增长速率降低。受拉区混凝土在预压作用下更早进入弹性工作阶段, 材料刚度得以充分发挥, 整体结构在相同荷载作用下的变形量显著减小, 尤其在大跨度结构中, 刚度提升效果更明显^[1]。

2. 对结构抗裂性的改善

通过在受拉区预先施加压力实现。外部荷载产生的拉应力需先抵消预压应力, 才能使混凝土受拉。这一过程延迟了裂缝出现的时间, 同时减小了裂缝开展宽度。即使在荷载较大时产生裂缝, 预压应力也能限制裂缝延伸, 维持结构的整体性。

3. 荷载作用下的内力重分布

与材料塑性发展相关。当部分截面因荷载增大进入塑性阶段时, 预应力筋的约束作用使应力向未屈服区域转移。受拉区预应力筋的拉力增长放缓, 受压区混凝土承担更多压力, 形成新的内力平衡状态, 避免局部破坏引发整体结构失效, 延长结构承载历程。

二、建筑抗震设计的基本要求

(一) 地震作用与结构响应

地震荷载具有随机性,其发生时间、强度和波形难以精确预测,受地质构造、震源深度等多种因素影响。突发性表现为作用时间短暂且无明显前兆,短时间内释放巨大能量。破坏性体现在水平和竖向振动的复合作用,可使结构产生剧烈变形甚至坍塌。

结构在地震作用下的平动包括水平方向的纵、横向振动和竖向振动,水平振动对多数建筑破坏更显著。当结构刚度中心与质量中心不重合时,会出现扭转振动,加剧角部构件的受力与变形。

结构的动力响应规律与自振特性相关,自振周期与地震波周期接近时,易发生共振,导致响应放大。振动过程中,结构各部位位移、速度和加速度存在相位差,柔性结构振动周期长,在长周期地震波作用下响应明显;刚性结构则对短周期地震波更敏感,动力响应随结构阻尼增大而衰减^[2]。

(一) 抗震设计的目标与原则

1. 核心目标

“小震不坏、中震可修、大震不倒”。小震对应50年超越概率63%的地震,结构应处于弹性状态,不产生破坏,保障正常使用功能。中震为50年超越概率10%的地震,结构可出现局部损坏,但经修复后能继续使用,不影响整体安全。大震指50年超越概率2%的地震,允许结构产生严重塑性变形,但需保持整体稳定性,避免倒塌造成人员伤亡。

2. 基本原则

强柱弱梁要求框架结构在地震作用下,梁端先于柱端屈服,通过梁的塑性变形消耗能量,防止柱破坏引发整体垮塌。强剪弱弯确保构件在受弯破坏前不发生剪切破坏,因剪切破坏属脆性破坏,无明显预兆。强节点弱构件强节点承载力高于连接构件,避免节点先于构件失效。同时需保证结构延性,通过合理配筋和构造措施,让构件在屈服后仍有足够变形能力,延长破坏过程。

三、预应力技术在建筑抗震设计中的具体应用

(一) 框架结构中的预应力应用

框架梁设计中,预应力筋多采用曲线布置,在梁端弯矩较大区域加密,跨中区域适当放宽间距。通过调整张拉控制应力,使梁受拉区混凝土始终处于预压状态,截面受弯时中性轴上移,受压区高度增加,抗弯承载力提升30%~50%。抗剪方面,在梁端剪力集中部位设置U形或折线形预应力筋,与普通箍筋形成协同受力体系,剪应力分布更均匀,某办公大楼框架梁采用此设计后,抗剪能力较传统梁提高25%。

框架柱布置预应力筋时,纵向采用直线形或螺旋形配置,横向搭配普通箍筋形成约束体系。张拉后柱截面产生均匀预压应力,延迟混凝土开裂时间,塑性铰出现位置向柱中部转移,避免柱端过早破坏。某12层住宅框架柱中,每根柱配置4根直径15.2mm钢绞线,张拉控制应力取 $0.75f_{ptk}$,柱的位移延性系数达到3.5,较非预应力柱提高40%。

框架节点处理需保证预应力有效传递,节点区预应力筋尽量直线穿过,避免弯折角度过大导致应力集中。对梁柱节点,在核心区设置环形预应力筋,张拉后形成径向预压应力,增强节点抗剪刚度。某商场框架节点采用体内预应力筋贯通布置,配合节点区附加箍筋,地震模拟试验中节点屈服位移较传统节点增大20%,且破坏形式由脆性剪切转为延性弯曲。

(二) 剪力墙结构中的预应力应用

对于15层以下建筑,常采用全预应力方案,通过体内直线筋与曲线筋组合,使剪力墙全截面处于预压状态;超高层剪力墙则采用部分预应力方案,在底部加强区布置高强度钢绞线,顶部区域减少预应力筋用量^[3]。某28层住宅楼剪力墙设计中,通过调整预应力筋张拉控制应力,使底部3层剪力墙抗侧移刚度较传统设计提高35%,满足大震下位移限值要求。

预应力筋在剪力墙中的配置需适应受力特点。水平方向采用折线形布置,在墙肢两端加密,跨中稀疏,抵抗水平地震作用产生的弯矩;竖向预应力筋沿墙高均匀分布,增强墙

体竖向承载力:部分工程在洞口周边设置环形预应力筋,改善应力集中现象。某商业综合体剪力墙中,水平预应力筋采用1860MPa钢绞线,间距200mm,竖向筋选用直径12mm螺纹钢,形成双向预应力体系,提升整体协同工作能力。

预应力对剪力墙开裂性能的提升体现在多方面。预压应力使混凝土受拉区在地震作用下,需先克服预压应力才会产生拉应力,延迟裂缝出现时间。某酒店剪力墙结构试验显示,施加预应力后,开裂荷载较普通剪力墙提高40%,且裂缝开展宽度控制在0.2mm以内。同时,预应力筋的约束作用限制裂缝延伸,即使在强震下产生裂缝,也能保持裂缝分布均匀,避免出现贯通性主裂缝,为后续修复保留条件。

(三) 空间结构中的预应力应用

大跨度屋盖结构中,预应力技术通过索杆体系优化受力分布增强抗震稳定性。某机场航站楼屋盖采用双向交叉预应力索网,沿主次桁架方向布置直径5mm高强度钢丝索,张拉控制应力达1200MPa。索网与钢桁架形成空间张拉整体,地震作用下屋盖振动周期缩短至1.8s,较传统结构减少25%,最大位移控制在 $L/500$ (L 为跨度)以内。屋盖边缘设置环向预应力梁,约束径向振动,使整体结构抗震冗余度提升40%。

网架结构施加预应力多采用整体张拉与局部补强结合的方式。螺栓球节点网架中,在对角线方向穿入体外预应力筋,通过两端锚具张拉,使网架杆件预先受压。某展览馆网架结构采用此方法,每榀主网架配置4束1860级钢绞线,张拉后网架整体刚度提高35%,中震作用下杆件应力比控制在0.7以内。网壳结构则通过径向或环向预应力筋施加预应力,双层球面网壳在赤道圈设置环形预应力索,张拉后壳面形成环向预压应力,某剧院网壳采用该技术,大震时顶点位移较非预应力网壳减少30%,避免节点塑性破坏。

(四) 既有建筑抗震加固中的预应力技术

体外预应力加固梁时,先在梁体两侧或底部布设钢绞线,采用折线形或抛物线形走向,两端通过锚具固定在梁端新增的钢牛腿上。张拉时按分级加载方式进行,每级加载值不超

过控制应力的20%,直至达到设计值^[4]。加固板时,在板底沿短跨方向布置体外预应力筋,采用单向或双向配置,通过板端预埋钢板锚固。张拉后,板跨中预压应力使受拉区混凝土开裂延迟。

柱的体外预应力加固多采用环形或U形布筋,在柱周设置环形钢绞线,上下端锚固于柱身钢箍上。张拉后形成径向预压应力,约束柱身混凝土,某办公楼框架柱加固后,轴压比降低20%,抗剪能力提高25%。

古建筑抗震加固中,预应力技术优势显著。对木构梁架,采用碳纤维筋在梁底施加体外预应力,无需拆除原有构件,不破坏古建筑风貌。某清代祠堂加固时,在木梁两端设置隐形锚具,张拉碳纤维筋后,梁的抗震承载力提高30%,且未改变梁体外观。对砖石墙体,在墙体内植入预应力筋,张拉产生的预压应力增强墙体整体性。

四、结束语

综上所述,预应力技术通过预压应力调控结构受力状态,既提升了抗裂性与刚度,又保留了必要延性。未来应重点推进新型复合材料与预应力技术的融合,开发自适应预应力抗震系统,利用智能监测技术实现应力状态实时调控。同时加快完善跨结构类型的设计规范,推动预应力技术从单体构件应用向整体结构体系抗震升级,为建筑抗震提供更高效、可靠的技术支撑。

[参考文献]

- [1]秦永康.基于减隔震技术的预应力混凝土连续梁高墩桥抗震设计[J].运输经理世界,2025,(11):97-99.
- [2]崔晓鹏.某建筑区预应力施工管理分析[J].工程建设与设计,2021,(18):208-210.
- [3]周圣勇,周剑,田春雨.全装配预应力混凝土模块结构体系研究[J].住宅产业,2021,(08):24-29.
- [4]章妮.钢筋混凝土预应力公路桥梁工程的设计探讨[J].城市建筑,2021,18(03):184-186.