

# 屈曲约束支撑在建筑减震设计中的应用探究

朱 婧

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：**屈曲约束支撑作为一种先进的金属屈服型耗能构件，因其在拉压双向受力下均能实现全截面屈服而不发生整体失稳，已成为建筑结构减震控制领域最具工程应用前景的技术手段之一。本文从屈曲约束支撑的构造原理与减震机理出发，系统阐释其“屈服耗能、刚度贡献、承载力储备”三位一体的功能特征，深入分析其在建筑减震设计中的关键应用要点，包括支撑布置策略、屈服承载力确定、刚度匹配及连接节点设计等核心问题。本文还就屈曲约束支撑应用中面临的连接构造复杂、经济性评估及检测维护等现实问题进行分析。研究表明，屈曲约束支撑的有效应用依赖于合理的刚度分配与屈服机制设计，其减震效益的充分发挥需要结构整体协同工作。

**关键词：**屈曲约束支撑；减震设计；耗能能力；屈服机制；连接节点

## 引言

传统抗震设计依赖主体结构塑性变形耗能，虽能实现“大震不倒”，但主体易受损且修复成本高。相比之下，减震设计通过设置专门耗能装置，使其率先进入非弹性状态以大量耗散地震能量，从而保护主体结构保持弹性或轻微损伤，实现“功能可恢复”的更高性能目标。在此框架下，高效、可靠、经济的耗能构件开发成为核心课题，屈曲约束支撑（BRB）应运而生。BRB突破了普通钢支撑受压易屈曲而丧失承载力的缺陷，通过外部约束机制使核心钢材在拉压状态下均能全截面屈服，兼具稳定的滞回性能和优越的低周疲劳特性。自 20 世纪 90 年代日本阪神地震后规模化应用以来，BRB 已在全球多地高层建筑及重要公共建筑中成功实践。近年来，随着中国抗震设防标准提高及减震政策推广，BRB 在新建建筑和既有建筑加固中的应用日益广泛。然而，BRB 的应用并非简单替换普通支撑，其效果取决于对支撑与主体结构刚度匹配、屈服顺序控制及节点构造处理等关键问题的正确把握。

## 1 屈曲约束支撑的基本原理与力学特性

### 1.1 构造组成与工作机理

屈曲约束支撑由三个核心部分组成：核心单元、约束单元和滑动机制。核心单元通常采用低屈服点钢材或普通结构钢材制成的十字形或一字形截面构件，是支撑中实现屈服耗能的关键部件。约束单元一般由钢管填充混凝土或由双槽钢组合而成的外包构件，其作用是为核心单元提供侧向约束，防止其在受压时发生整体或局部屈曲。滑动机制通过在核心单元与约束单元之间设置无

粘结隔离层或预留间隙来实现，确保核心单元在轴向受力时可自由伸缩，而约束单元仅提供侧向刚度而不传递轴向力<sup>[1]</sup>。当屈曲约束支撑承受轴向压力时，核心单元产生的侧向膨胀趋势被约束单元有效抑制，使核心钢材能够在全截面范围内达到屈服强度，而不会像普通支撑那样在应力远低于屈服强度时即因弯曲失稳而失效。在承受轴向拉力时，约束单元不参与受力，核心单元同样直接进入屈服状态。由此，屈曲约束支撑在拉压两方向均呈现近似对称的饱满滞回曲线，这是其区别于普通支撑的根本特征。

### 1.2 滞回性能与耗能能力

屈曲约束支撑的滞回曲线呈稳定的平行四边形或纺锤形，其滞回环饱满度远高于普通钢支撑。这种理想的滞回特性意味着在地震往复作用下，屈曲约束支撑可以在多次循环中持续稳定地耗散地震能量，而不出现承载力退化或刚度衰减。其累积塑性变形能力通常可达普通支撑的数倍乃至一个数量级以上，低周疲劳寿命满足设防地震和罕遇地震下的反复加载需求。从耗能机理来看，屈曲约束支撑的耗能能力主要来源于核心钢材的塑性变形能。每循环耗散的能量等于滞回环所包围的面积，其大小取决于屈服承载力和极限变形能力。因此，合理选择核心钢材的屈服强度和极限应变是设计中的重要环节。低屈服点钢材（如 LY100、LY160）具有更低的屈服应力和更高的延性，在小幅地震作用下即可进入屈服，适用于位移幅值较小的减震需求；而普通 Q235 或 Q345 钢材则具有较高的承载力，适用于需要较大屈服力的大震耗能场景。

### 1.3 等效刚度与承载力特征

屈曲约束支撑在弹性阶段的轴向刚度与普通支撑基本相同,由核心单元的截面面积和弹性模量决定。进入屈服后,其切线刚度显著降低,通常为初始弹性刚度的1%至5%,呈现明显的双线性刚度特征。这一特性决定了屈曲约束支撑在设计中的作用具有双重性:在设防地震或风振作用下,结构反应较小时支撑保持弹性,为结构提供附加刚度,控制层间位移角;在罕遇地震下,支撑进入屈服,刚度退化但耗能增强,将地震输入能量转化为热能耗散<sup>[2]</sup>。屈曲约束支撑的屈服承载力由核心单元的净截面面积和钢材实际屈服强度决定。设计时需要明确区分“名义屈服承载力”和“实际屈服承载力”——前者用于结构分析模型中的性能指标,后者用于支撑构件的加工验收标准。考虑到钢材实际屈服强度通常高于名义值,设计中需兼顾超强系数的影响,确保在支撑达到最大承载力时其连接节点和相邻构件仍具有足够的安全裕度。

## 2 屈曲约束支撑在减震设计中的应用要点

### 2.1 支撑布置策略与结构体系选择

屈曲约束支撑的布置位置和方式直接关系到减震效果。从平面布置看,宜将支撑沿结构两个主轴方向均匀对称布置,避免因刚度偏心引起结构的扭转效应。对于框架结构,支撑通常布置在框架柱之间,形成支撑框架体系;对于框剪或框筒结构,支撑可布置在结构的周边框架或核心筒周边,以增强结构的抗侧刚度和耗能能力。在竖向布置方面,应避免在某一楼层集中布置支撑而其他楼层少布或不布的情况,否则将导致楼层刚度突变,形成薄弱层。理想的布置方案是在各楼层保持支撑屈服承载力的合理比例,使结构在高度方向上形成均匀的耗能分布。对于底部加强区或转换层等关键部位,可适当增加支撑数量或提高其承载力,以应对该区域较大的剪力需求<sup>[3]</sup>。支撑的布置形式也值得关注。人字形布置和V字形布置在工程中较为常见,其优点是可在较小的建筑平面内布置较大数量的支撑,但需注意这两种布置形式在支撑屈服后对框架梁产生的附加竖向力——当一侧支撑受压屈服而另一侧受拉屈服时,两者竖向分量不平衡可能对横梁产生较大的不平衡力,设计时应验算梁的抗弯承载力并考虑相应的构造加强。单斜撑布置形式避免了竖向不平衡力,但需要成对设置以保证双向抗侧能力。

### 2.2 屈服承载力的合理确定

确定屈曲约束支撑的屈服承载力是减震设计的核心

参数之一,其取值直接影响结构的刚度分配、耗能能力和主体结构的内力水平。屈服承载力过低,支撑在设防地震下过早屈服,虽能较早参与耗能,但可能因累计塑性变形过大而提前破坏;屈服承载力过高,支撑在罕遇地震下仍未充分屈服,耗能作用难以发挥,主体结构仍面临较大地震力。合理的屈服承载力应在结构分析中通过参数研究确定。设计原则通常为:在小震或风荷载作用下支撑保持弹性,为结构提供弹性刚度并控制层间位移在规范限值之内;在设防地震作用下,支撑开始逐步进入屈服,参与耗能并降低主体结构的地震反应;在罕遇地震作用下,支撑充分发展塑性变形,在保护主体结构的同时自身不发生低周疲劳破坏。这一分阶段性能目标的实现,要求设计人员通过非线性时程分析或弹塑性静力分析反复调整各支撑的屈服力参数,直至达到最优的性能匹配。

### 2.3 刚度匹配与结构协同工作

屈曲约束支撑与主体结构的刚度匹配是设计中必须慎重对待的问题。支撑的加入增大了结构的整体刚度,从而改变了结构的自振周期和地震作用分布。若支撑刚度过大,将吸引较多的地震剪力进入支撑框架,可能导致支撑过早屈服的同时给连接节点和周边构件带来过大的内力需求;若刚度过小,则支撑对结构的贡献有限,减震效果不明显。刚度匹配的实质是在附加刚度和耗能贡献之间寻求平衡。一般建议屈曲约束支撑提供的屈服承载力之和约占结构底部总剪力的15%至30%作为起始设计参考,但最终取值应根据具体结构体系和性能目标通过分析确定。需要指出的是,刚性楼板假定下的支撑刚度贡献与实际楼板变形条件下的表现可能存在差异,对于楼板平面内刚度较弱的建筑,应考虑楼板变形对支撑力分布的影响。

### 2.4 连接节点设计的关键要求

连接节点是屈曲约束支撑设计中最为关键的环节,也是实际工程中出现问题较为集中的部位。支撑与框架的连接通常采用销轴连接或高强螺栓连接,前者允许一定转动自由度,后者则提供更强的约束。节点的设计承载力应基于支撑的最大预期承载力确定——考虑到钢材的超强效应和应变硬化效应,节点承载力验算应采用“调整后的最大承载力”,即名义屈服承载力乘以超强系数(通常取1.3至1.5)和应变硬化系数(约1.1至1.2)后的数值。连接节点的延性和转动能力同样不可忽视。在地震作用下,支撑端部与框架梁柱节点区存在一定的转动变形需求,若连接节点缺乏足够的转动能力,可能发生脆性断裂<sup>[4]</sup>。设计中宜采用弧形端头或设置适

当间隙的构造方式,释放转动约束,减小端部应力集中。此外,节点区的加劲肋布置和焊缝尺寸应经过仔细设计,避免因局部应力过大引发节点区先于支撑破坏。对于采用销轴的节点形式,应验算销轴的抗剪强度和孔壁承压强度,并考虑销轴在反复荷载下的磨损影响。

### 3 应用中需关注的若干问题

#### 3.1 支撑与主体结构相互作用的影响

屈曲约束支撑的屈服行为会改变结构的抗力分布,可能引起内力重分配。特别需要注意的是,支撑进入屈服后其轴向刚度显著降低,原本由支撑承担的剪力将向未屈服或未设置支撑的构件转移。设计时应通过弹塑性分析(如 Pushover 或时程分析)确认这种内力重分配不会导致相邻柱或剪力墙超载,尤其应关注底部加强区竖向构件的轴压比和剪力水平是否超出限制。此外,支撑屈服后的残余变形可能影响结构的可修复性,对于震后功能恢复要求较高的建筑(如医院、应急指挥中心),应在设计中预留支撑更换的操作空间和节点可拆装构造,并在节点设计中引入可更换的耗能连接件,以便在罕遇地震后以最小代价实现功能复原。同时,支撑与框架的连接刚度也会影响整体侧向位移模式,设计时应避免因连接刚度过大或过小导致预期屈服机制失序,宜通过参数化分析确定最优连接刚度范围。

#### 3.2 支撑的检测与维护

屈曲约束支撑的外包约束单元(通常为钢管混凝土或钢筋混凝土外套)在服役期内无法直接观察核心单元的状态,这使得其健康监测具有特殊性。建议在重要建筑的屈曲约束支撑上布置应变传感器或位移传感器,实时监测其在地震或强风下的响应,为震后损伤评估提供数据支撑。对于超高层建筑,还可考虑布设声发射传感器以捕捉核心单元局部断裂的早期信号。定期检查的重点应放在连接节点的锈蚀情况、销轴的磨损和润滑状态、防锈涂层的完整性等方面,检查周期宜根据环境腐蚀性等级适当调整,沿海或工业区建筑应缩短至每两年一次。对于使用低屈服点钢材(如 LY225)的支撑,应注意钢材在长期荷载下的屈服强度稳定性问题,特别是蠕变和低周疲劳性能的退化,必要时应进行现场抽样检

测,并对照出厂力学性能报告进行对比评估,以便及早发现材料劣化隐患。

#### 3.3 经济性与设计参数的综合平衡

屈曲约束支撑的单位成本高于普通钢支撑,其经济可行性需要通过结构整体优化来验证。一个合理的判断标准是:因采用屈曲约束支撑而带来的主体结构构件截面减小和配筋降低所节省的费用,能否超过支撑本身的增量成本。对于多数高层建筑,这一权衡结果是积极的,但对于小型低层建筑,普通支撑或剪力墙方案可能更为经济。设计人员应在方案阶段进行多方案比选,给出量化的技术经济分析,为业主决策提供依据。

### 4 结语

屈曲约束支撑以其稳定的滞回性能和高效的能量耗散能力,为建筑减震设计提供了一种可靠的技术手段。本文从力学机理出发,系统分析了其在减震设计中的核心应用要点——支撑布置策略需保证均匀对称,避免刚度偏心;屈服承载力的确定应遵循分阶段性能目标,使支撑在小震弹性、中震屈服、大震充分耗能;刚度匹配需平衡附加刚度和耗能贡献,避免局部薄弱层形成;连接节点设计应按最大预期承载力验算并保证足够的转动延性。研究还表明,屈曲约束支撑在高层建筑、既有建筑加固及高烈度区结构中均具有良好的适用性,但其效益的充分发挥依赖于连接构造的可靠性、结构整体协同工作能力以及合理的经济性评估。随着我国抗震设防要求的提高和减震政策的深入推进,屈曲约束支撑的应用将迎来更大的发展空间,而其设计方法的精细化和标准化也将成为持续研究的重点方向。

### 参考文献

- [1] 周云,汪大洋,邓雪松. 屈曲约束支撑研究进展及其工程应用 [J]. 建筑结构学报,2022,43(4):1-16.
- [2] 李国强,刘玉姝,孙飞飞. 屈曲约束支撑滞回性能及设计方法研究 [J]. 土木工程学报,2023,56(2):34-43.
- [3] 陈以一,赵宪忠,王帆. 屈曲约束支撑连接节点的设计与构造要求 [J]. 建筑结构,2024,54(1):78-85.
- [4] 田炜,吕西林,蒋欢军. 高层建筑中屈曲约束支撑的优化布置策略 [J]. 振动与冲击,2023,42(9):145-153.