

# 中国大陆屈曲约束支撑产品应用与展望

官海，王新娣，胡成功  
(上海蓝科建筑减震科技股份有限公司)

## 1 减隔震行业背景

建筑减隔震技术与传统抗震方法有所不同，目前发展和应用都较为成熟的主要有以下两种技术方法：一为建筑减震，是在结构体系上增设消能减震装置以吸收或消耗一部分输入能量，从而减小主体结构或构件的耗能要求，并使可能的结构损坏降到最低程度；二为建筑隔震，是通过在结构中设置隔震层以阻隔地震能量向上传递，同时通过延长结构周期来减小上部结构的地震反应，从而提高结构的抗震安全度。建筑减震与建筑隔震两大应用类别从专业技术上看在 40% 左右的应用比例情况下具备交叉替代性，但在另外 60% 的情况下，则互不冲突，各有各的技术应用领地。在日本等主要成熟市场，减震技术与隔震技术应用的市场份额比例大约为 65%：35%。就目前中国大陆市场来看，因为隔震技术在 20 世纪 90 年代中后期就已经起步，在产品与技术体系上比减震技术成熟很多，所以在 2008 年汶川地震后兴起的建筑减隔震技术应用热潮中，快速占领了主要的市场需求。目前，减震技术与隔震技术在国内的市场份额比例大约为 45%：55%。从发展态势来看，这两种技术产品及其应用都在快速发展着，但相对而言国内减震产品与技术后发优势更大，近两年应用比例迅速上升。按 2013 年预估房屋建筑减隔震行业产品总产值 6.5 亿来看，建筑减震产品约 3 亿，其中金属类减震领域产品约 2 亿，黏滞类减震领域产品约 1 亿；建筑隔震领域产品 3.5 亿，其中橡胶隔震支座类产品约 2.8 亿，金属隔震支座类产品约 0.7 亿。主要建筑减隔震产品产值分布如图 1 所示。

从国外建筑减隔震行业发展的规律来看，“发生大地震后的十年是行业的快速发展期”已经成为普遍发展规律。美国加州减隔震行业是在 1994 年美国加州北岭地震后快速成长；日本减隔震行业是在 1995 年阪神大地震后快速成长。而在中国情况类似，中国台湾减隔震行业是在 1999 年“9·21”大地震后快速成长；中国大陆 2008 年汶川大地震也带动了国内建筑减隔震行业进入高速成长阶段。通过对国内近 5 年建筑减隔震产品产值的估算(图 2)，

可以看到近 5 年呈现近倍数成长。

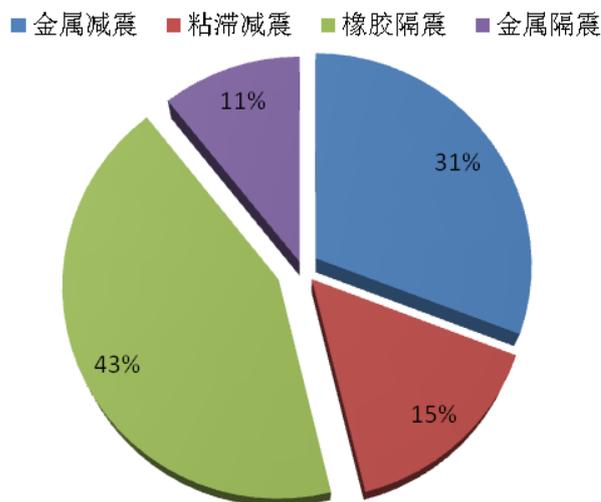


图 1 主要建筑减隔震产品产值比例示意图

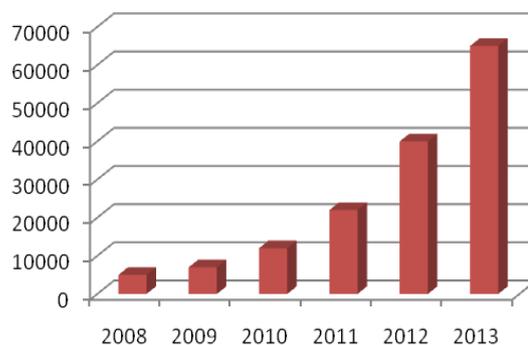


图 2 国内建筑减隔震产品近 5 年销售成长  
(纵坐标单位：万元；横坐标单位：年)

随着建筑工程减隔震技术研究的深入和工程应用的推进，一些应用了减隔震技术的工程经受了汶川、芦山等地震的实际考验，保障了人民生命财产安全，产生了良好的社会效益。实践证明，减隔震技术能有效减轻地震作用，提升房屋建筑工程抗震设防能力。为有序推进房屋建筑工程应用减隔震技术，2014 年 2 月，住房和城乡建设部在全国范围内发布《关于房屋建筑工程推广应用减隔震技术的若干意见（暂行）》，旨在进一步肯定和推进建筑减隔震技术的应用推广。经过近 5 年的环境转变，中国大陆地区可以说在规范、法规政策与技术体系方面都已经初步成型，基本可支持建筑减隔震行业的大发展。

## 2 屈曲约束支撑的应用概况

屈曲约束支撑是一种集承载和耗能为一体的特殊减震构件，在设计时既要保证构件的承载要求，还要保证构件的减震耗能要求。就日本等成熟的减隔震市场来看，由于屈曲约束支撑具备优良性价比，因此其应用在减隔震产品中所占比例最高，一般占到减隔震行业应用总量的40%左右。

中国大陆在实际建筑物中采用屈曲约束支撑始于2003年。截止至2013年底，从事屈曲约束支撑研究的单位有十余家，已完成200余项工程应用，涉及数千亿元工程项目，例如，北京人民日报社报刊综合楼、天津117、上海世博中心、上海虹桥枢纽磁浮车站、中国国家展览中心等，以及大量的历史建筑加固改造、学校与医院建筑的新建及抗震加固等与人民生命和财产息息相关的重要工程项目。

就屈曲约束支撑的应用数量而言，据蓝科减震的统计（图3，4）：2013年屈曲约束支撑根数增长24%，但总耗钢量约比2012年增长80%。所以，就屈曲约束支撑这个细分行业来说，市场容量是在稳步扩大；从应用的承载力指标来看，大吨位甚至超大吨位屈曲约束支撑开始大量增加。预计，2014年总体市场仍会有50%以上年增长。

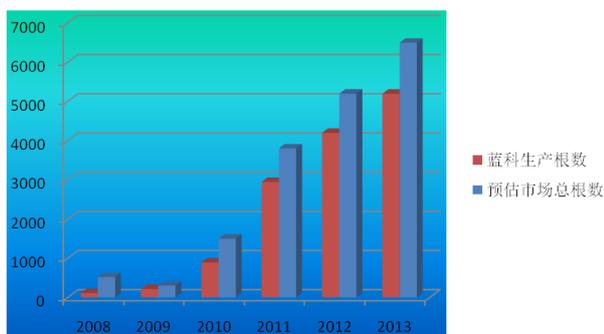


图3 中国大陆屈曲约束支撑产品生产根数预估（根）

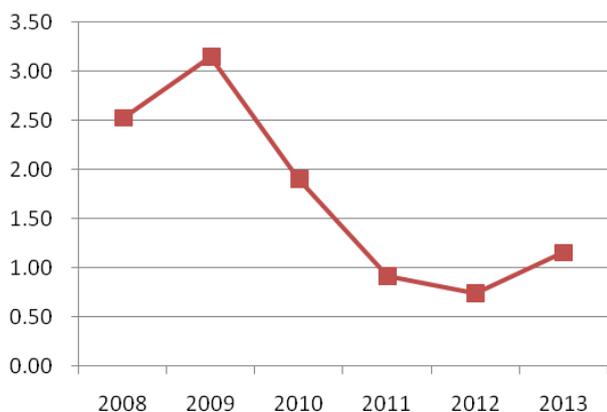


图4 蓝科减震屈曲约束支撑产品单根耗钢量（t）

从单根耗钢量来看，其主要决定于屈曲约束支撑的长度与屈服吨位；在2008~2010年，由于国家抗震规范还没有加入屈曲约束支撑设计方法，其应

用类型主要是大型公建工程，支撑长度与吨位平均较大。2011~2012年，由于全国校园加固工程的全面启动，体现出大量的小吨位支撑的应用。2013年，由于校园加固项目的减少，屈曲约束支撑的应用更加回归到公共建筑方面，并且总体更加均衡。

屈曲约束支撑根据设计要求不同可分为两类：耗能型和承载型。耗能型屈曲约束支撑的特点为：可以为结构中的水平抗侧力构件；能够提高结构的抗侧刚度和水平承载力；可作为结构主要耗能构件使用；但不作为承受竖向荷载的构件使用；可视为不承受竖向荷载的金属阻尼器。承载型屈曲约束支撑的特点为：为结构中的竖向抗侧力构件；除可提高结构抗侧刚度和水平承载力外，也可提高结构竖向承载力；不可作为结构的主要耗能构件使用；可视为承受竖向荷载的普通钢支撑的改良。两种类型的应用比例据蓝科减震统计如下：耗能型约占80%；承载型约占20%。以新建建筑和加固改造建筑的用量来区分，新建建筑仍然是应用主体，约有80%的屈曲约束支撑应用于新建建筑，而加固改造中所用屈曲约束支撑约占20%。由于加固改造项目数量不少，应用范围也较广，但由于一般单体应用规模较小，导致应用总量与产值也较小。

## 3 屈曲约束支撑的应用模式

建筑减震技术的应用实质上是完成对抗震构件的局部替代。就替代模式而言，可以分别从技术角度和需求角度来归纳。

### 3.1 技术角度

#### 3.1.1 不用不行的情况

必须用屈曲约束支撑来解决建筑与结构问题一般有两种情况：外观限制和扭转主控。

##### (1) 外观限制

建筑师规定了支撑构件的最大宽度或墙的最大厚度，对于中长支撑利用屈曲约束支撑受力与稳定问题解耦的优势，可以实现建筑要求。支撑受压钢构件通常由稳定控制，对于超出长细比限制的受压斜杆，普通钢支撑无法实现，此时必须借助于屈曲约束支撑来满足外观的限制；受建筑整体美观限制，通常支撑构件的外观尺寸会有适当限制；门、窗及通道的位置和高度会造成普通钢支撑无法布置，而采用屈曲约束支撑，构件外观得到有效控制，可以解决一部分此类问题；当支撑内包于墙内时，支撑的控制方向尺寸往往需要小于墙厚，屈曲约束支撑这方面会处理得比较理想。

##### (2) 扭转主控

对于平面复杂、扭转不利影响较为严重，且受

建筑功能影响导致剪力墙布置位置十分有限的项目，仅依靠调整剪力墙的厚度或者梁柱尺寸来解决扭转不利的效果微乎其微，且经济性差，对建筑使用也会造成不便影响。利用屈曲约束支撑刚度可以自由设定的灵活优势，可以很好的解决扭转位移比的问题。

以红星美凯龙浦东金桥店项目为例，本项目中初始方案为框剪结构体系（剪力墙最大厚度达到1000mm），但有扭转位移比等指标仍超（A区最大1.65，B区最大1.78），为解决上述问题并提高结构的抗震性能，将结构中原有剪力墙删除，在特定部位设置屈曲约束支撑，屈曲约束支撑平面布置位置见图5中蓝色粗线标示，可见为原框剪方案中剪力墙位置中的部分。

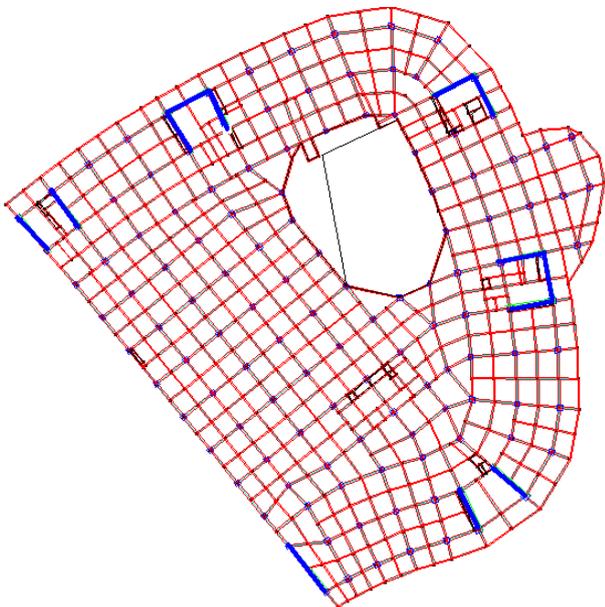


图5 A区结构布置图

以A区计算结果为例，两种体系的主要指标如表1所示，可见在小震时屈曲约束支撑-混凝土框架体系的各项指标满足规范及建筑功能要求；大震时，屈曲约束支撑承担“保险丝”功能，提高了结构的抗震性能，该部分具体分析略过。经济性方面，A区节约混凝土4399m<sup>3</sup>，钢筋1586.5t，屈曲约束支撑共采用98根，代表屈服承载力为4600kN，材料费用节约估算：4399×400+1586.5×4000-1880000（屈曲约束支撑A区总价）=622万元。

### 3.1.2 性价比更高

#### （1）普通钢支撑刚度过大

以世博中心项目为例，为了保证在设防烈度地震作用下支撑不失稳，普通支撑的截面面积为0.0384m<sup>2</sup>，而屈曲约束支撑方案中BRB的截面面积为0.0045m<sup>2</sup>，普通支撑的截面为BRB截面面积的8.5倍。结构刚度的增大使得地震作用下结构吸收

的地震力也显著增大，表2中数值多遇地震下结构基底剪力的对比，说明普通钢支撑结构的地震力比屈曲约束支撑结构增大24%~30%；总用量以东区为例，与屈曲约束支撑相比采用普通支撑后的总用量多1014t。

A区主要计算结果对比 表1

模型		BRB 计算模型	框剪计算模型
周期 (s)	T <sub>1</sub>	1.6882 1.00 (0.53+0.47), 0.00	1.1677 0.90 (0.28+0.61), 0.10
	T <sub>2</sub>	1.5723 0.99 (0.46+0.53), 0.01	1.1492 0.88 (0.49+0.39), 0.12
	T <sub>3</sub>	1.4741 0.04 (0.02+0.02), 0.96	0.9796 0.26 (0.23+0.02), 0.74
最大层间位移角	X向	1/618	1/840
	Y向	1/631	1/953
位移比	X向地震规定水平力: 1.04	X向偶然偏心下地震: 1.58	
	Y向地震规定水平力: 1.04	Y向偶然偏心下地震: 1.65	

屈曲约束支撑与钢支撑结构比较（东区） 表2

结构体系		屈曲约束支撑-钢框架	钢支撑-钢框架
结构自振周期 (s)	T <sub>1</sub>	2.23 (X)	1.42 (Y)
	T <sub>2</sub>	1.93 (Y/T)	1.32 (X)
	T <sub>3</sub>	1.75 (Y/T)	1.24 (T)
基底剪力 (kN)	X	39785	52421
	Y	40850	50755
主体结构总用钢量 (t)		7749	8808

#### （2）混凝土框架加固

在日本，一半的屈曲约束支撑应用在抗震加固工程中，主要应用方式在结构的边角部位布置屈曲约束支撑。采用屈曲约束支撑进行抗震加固可以缩短加固工期，降低加固造价。综合成本一般可以降低30%~60%。

单位: 万元 (人民币)				
项目总投资额		抗震加固总造价约 160 万元		回收期 (年)
栏目		新增利润	新增税收	1 年
年份			创收外汇 (美元)	节支总额
2011				245
各栏目的计算依据: (200 个汉字左右)				
寿春中学一期教学综合楼为多层钢筋混凝土框架结构, 总建筑面积为 16380m <sup>2</sup> , 采用 T 型屈曲约束支撑加固平均加固造价约为 100 元/ m <sup>2</sup> , 远低于同类框架结构采用常规加固方案约 250 元/ m <sup>2</sup> 的造价, 节约造价为 16380m <sup>2</sup> × 150 元/ m <sup>2</sup> = 约 245 万元。				
				单位财务专用章
				2012 年 3 月 20 日

图6 寿春一中经济性证明

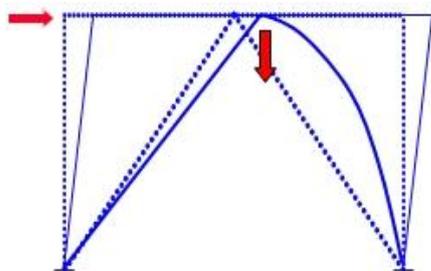
在国内，以校安工程为例（样本较为充足，数据较为可靠），如只进行设防类别的提高，混凝土框架加固传统做法结构加固成本约 250~400 元/m<sup>2</sup>，而屈曲约束支撑结构加固成本约 100~200 元/m<sup>2</sup>，部分项目应用的经济性证明可见图 6（以安徽寿春一中为例）。值得一提的是，学校建筑有相当一部分为单跨框架，采用屈曲约束支撑加固，改变了结构体系，实现了“多道防线”的设计思想，从而提高整个结构的抗震性能。

（3）大震时保证结构弹塑性层间位移角满足要求

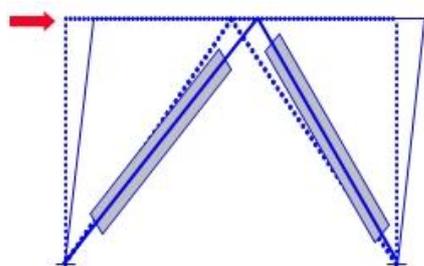
有部分项目，尤其是超高层建筑，在小震下结构计算的所有指标均满足规范要求，但在大震弹塑性计算时，层间位移角不满足要求，比较经济的做法是在结构外框设置一些屈曲约束支撑，既能增加结构刚度和承载力，保证外框分担的剪力，在大震下，这些屈曲约束支撑消耗地震能量，从而保证结果满足“大震不倒”的要求。

（4）不平衡力问题解决

在强震作用下，如果人字形或 V 形支撑受压斜杆受压屈曲，则受拉斜杆内力将大于受压屈曲斜杆内力，这两个力在横梁交会点的合力的竖向分量使横梁产生较大的竖向变形，人字形支撑使梁下陷，V 形支撑使梁上鼓，见图 7（a）。



（a）普通“人”字撑



（b）屈曲约束支撑

图 7 侧向力作用下的竖向不平衡力示意图

这可能引起横梁破坏，并在节点两侧的梁端产生塑性铰，同时体系的抗剪能力发生较大的退化，为了防止支撑斜杆受压屈曲，其组合的内力设计值应乘以增大系数 1.5。同时为了防止横梁破坏，应

按下述方法进行横梁的设计：人字形支撑和 V 形支撑的横梁在支撑连接处应保持连续，该横梁应承受支撑斜杆传来的内力，并按不计入支撑支点作用的简支梁验算重力荷载和受压支撑屈曲后产生的不平衡力作用下的承载力，其中不平衡力可取受拉支撑的竖向分量减去受压支撑屈曲压力竖向分量的 30%。

而屈曲约束支撑由于两侧支撑均进入屈服耗能状态，受力大小几乎相同，不会对框架梁产生不平衡力，见图 7（b）。当使用普通钢支撑时，横梁或者转换桁架横梁跨度比较大或者荷载比较大时，该横梁几乎很难计算通过，若放大横梁刚度，则地震力也同时增大，容易进入“死循环”，此时，采用屈曲约束支撑可取得“事半功倍”的效果。

### 3.1.3 锦上添花型应用

（1）性能更优

如果不需要用到屈曲约束支撑的耗能能力，仅作为改善型的钢支撑——不会发生失稳、承载力稳定，此时用来替换普通钢支撑即看中了屈曲约束支撑性能更优。对于重要的结构构件，采用屈曲约束支撑提高其性能是一种有效的手段。

（2）大震、超大震储备

地震的发生有其不确定性，选用屈曲约束支撑作为大震甚至超大震的储备，在有条件的情况下也是不错的选择，就像“保险”的功能一样。

## 3.2 需求角度

从业主需求角度主要有三类：第一类：开发商把减隔震概念作为销售卖点，目前已经初步开始兴起；第二类：8 度及以上地区，学校、医院根据建设部文件或地方文件要求优先选用减隔震；第三类：部分业主对自建工程提出更高的防震能力要求，明确要求使用减隔震技术。目前，第二类情况在需求角度占据主流。

## 4 屈曲约束支撑应用目前涉及的主要问题

目前屈曲约束支撑产品的应用包含如下过程：第一步，由结构工程师根据结构设计确定产品的性能参数，并在设计施工图中列明；第二步，由业主或总包根据设计施工图进行招标，确定产品厂家；第三步，由产品厂家对施工图纸进行产品与节点深化，并得到结构工程师认可及明确试验抽检规则，而后进入实施；第四步，厂家完成产品生产，采购方完成抽检试验验证；第五步，施工方进行产品安装；第六步，进行子项目工程验收，包括实物与资料验收。就目前看，由于设计规范体系的不断完善及行业的不断成熟，第一、二步的实施问题不大，

而在主要问题出在三、四、五步骤上，给应用的建筑工程带来极大隐患。

#### 4.1 厂家深化设计问题

结构工程师提出的只是性能参数，要实现这些性能参数需要专业产品选型与连接节点设计的配合，如果这个深化设计做不好，减震效果就与结构计算大相径庭。深化设计方面目前在两个方面存在较大理解偏差与隐患。

##### (1) 刚度匹配问题

与普通钢支撑不同，屈曲约束支撑的节点设计对屈曲约束支撑进入屈服的早晚有紧密联系，对屈曲约束支撑的耗能能力的发挥有着重大影响。要使深化设计中的整体轴线刚度与结构模型（如 PKPM 模型）中的轴线刚度一致，需要进行三部分的刚度计算并作“串联”运算（图 8）：屈曲约束支撑本身刚度+节点板刚度+梁柱节点域刚度（一般可处理为刚接）。

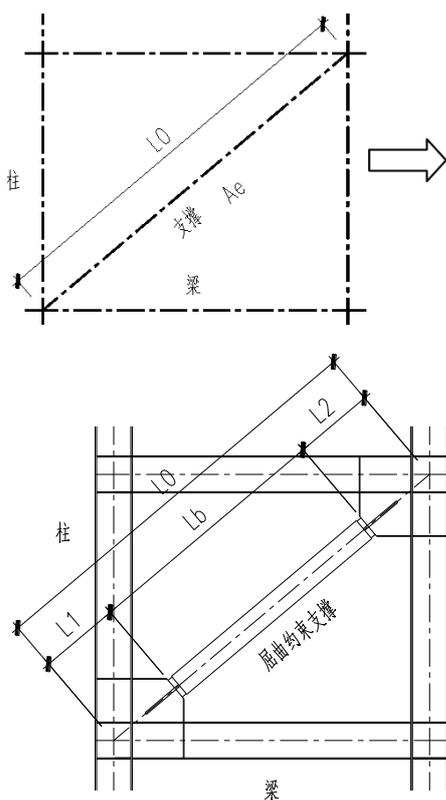


图 8 屈曲约束支撑刚度串联示意图

经验不足的厂家可能会直接将屈曲约束支撑的刚度等效为结构模型中的轴线刚度。优秀的厂家应该能做到深化后的轴线刚度与模型中的轴线刚度误差不超过 5%，合格的厂家刚度误差应该不超过 10%，这是因为大于 10% 的误差，就会对结构弹性计算结果产生较大的影响。因此对于一个专业的减震厂家而言，至少要符合以下两个条件：一是具备满足额定产能要求和标准化流水作业的生产基

地；二是具有满足正规试验要求的检验平台，可以进行出厂产品的自我检验。

就具体操作而言，结构工程师应该要求产品深化厂家提供“屈曲约束支撑本身刚度+节点板刚度”的串联刚度计算书，并明确屈曲约束支撑本身刚度参数要求。然而在目前的大量实践中，往往忽略了对屈曲约束支撑本身刚度参数的要求，而只考虑屈服承载力及长度，很多时候刚度偏差高达 50%，实际结构已经和计算模型偏差很大了。实际上由于屈曲约束支撑内部耗能段的长度不同，其刚度也是多解的。确定了屈曲约束支撑的刚度，就可以通过试验验证（屈服力除以屈服位移）来保证屈曲约束支撑刚度误差在合理范围内（规范规定单根误差 15% 以内，平均 10% 以内），从而保证了“屈曲约束支撑本身刚度+节点板刚度”与计算的轴线等效刚度在一定误差范围内保持一致。

##### (2) 屈曲约束支撑设计位移问题

屈曲约束支撑的设计位移一般用于耗能型产品的低周疲劳性能检验，并以此来进行 30 圈或 3 圈的循环加载试验。目前，设计师习惯按产品实际长度的比例设定这个指标不太合理，应该对相同轴线长度的情况，设定这个指标。对于同样位置的屈曲约束支撑产品，理论上其设计位移是一样的，但如果按支撑实际长度，如果支撑深化时越短，则设计位移越小，不具有合理性。

屈曲约束支撑的设计位移可通过结构在罕遇地震下的弹塑性分析确定，也可以用极限层间位移法反推。一般而言，采用极限层间位移法反推的可操作性更大。由于目前较多结构设计师多并未对这个指标给与高度重视，建议：按轴线长度基本一致设为一类，而不是支撑实际长度；12 圈可以作为支撑基本检测要求，30 圈检验时应按设计位移和 1/150 支撑长度的不利值进行。

##### (3) 屈曲约束支撑应用还需注意的问题

1) 承载型屈曲约束支撑可用来替代传统的钢支撑，在设计地震力下提供刚度，不能发生屈服；同时在立面上需要连续布置；当不连续布置时，应采取加强措施；2) 屈曲约束支撑屈服后即金属阻尼器，在罕遇地震下需满足金属阻尼的金属低周疲劳要求，同时应满足位移型阻尼器的相关要求与规定；3) 除了应用于伸臂桁架外，屈曲约束支撑应先于主体结构的竖向构件和重要构件进入屈服状态；4) 屈曲约束支撑应避免发生整体失稳、局部失稳、加强段屈曲以及节点板面外屈曲，其连接节点设计比普通支撑要复杂得多。

## 4.2 产品生产问题

由于减震产品是专业化产品，必须通过专业化的生产来保证，很多厂家拿着一个专利图，随便找个厂家去代工，过程中也不去认真控制与管理，很难保障产品的质量，这种厂家的做法是不负责的，将带来极大应用隐患。产品专业厂家必须建立全面的质量管理体系并保障真正实施，并通过“详图→材料组织→下料→加工→组装→检验探伤”全面的过程管理与资料体系来保证产品质量。采购方与设计方应该对产品生产厂家的产品生产能力与管理进行重点关注。

## 4.3 产品检验问题

屈曲约束支撑产品的质量应通过厂家型式试验检验与工程产品抽检试验来保证。在厂家型式检验时，试验检验应包括构件试验和子结构试验检验；在工程产品抽检时，应从主体结构中使用的屈曲约束支撑产品中随机抽取试验构件，抽检试验可选用构件试验或子结构试验两种方式之一。

现在很多厂家产品从来没做过产品检验试验，或者型号的应用范围完全对不上，却在市场上承揽能力范围之外的项目，这些未经过检验的产品将给应用结构带来极大的隐患；我国的规范对于屈曲约束支撑型式检验这块仍有待完善与从严。产品技术体系应该经过省部级专家评估或鉴定，评估或鉴定虽然不能完全保证产品质量，但对于很多非常不成熟的产品确能起到一定的把关作用；严格出厂产品抽样检查，根据国家规范，对于建筑减震产品必须进行抽样检查，规范给出了抽样建议方法，具体抽样规则与试验规则由结构设计师确定。现在很多项目，忽略产品抽样检测或采用伪造的检测报告，对产品质量从根本上失去了保证。

不能把好检验关，将造成弄虚作假、劣币驱逐良币的恶性循环，给建筑带来巨大抗震安全隐患，给行业健康发展带来巨大威胁。可喜的是在 2014 年 2 月建设部推广文件中明确了各个环节的规范管理要求，接下来关键在于各参与主体的落实。

## 4.4 产品安装问题

对于屈曲约束支撑产品的应用，施工是实施的最后一关，由于大部分施工单位对于减震产品不是经常碰到，所以需要专业化的施工或者施工指导，以保证产品的施工是正确的。对此，蓝科减震和中国新兴建设开发总公司于 2012~2013 年合作编写了“屈曲约束支撑安装施工工法”，该施工工法顺利通过了国家工法评定，并被认定为国家一级工法，这将全面指导与规范屈曲约束支撑的施工与验收。

## 5 国内屈曲约束支撑标准化进展

目前国内有关屈曲约束支撑相关的规范标准主要有以下几个：

(1) 国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 第 12 章的“隔震和消能减震结构设计”，对位移相关型消能器的设计参数及性能检验指标进行了规定，屈曲约束支撑作为一种位移相关型消能器，可以参照执行。

(2) 上海市建筑产品标准《TJ 屈曲约束支撑应用技术规程》(DBJ/CT 105—2011) 对耗能型屈曲约束支撑、屈曲约束支撑型阻尼器和承载型屈曲约束支撑三种类型的产品进行了介绍，并对产品的设计、施工和质量验收提出了相关的技术要求。

(3) 行业标准《建筑消能阻尼器》(JG/T 209) 专门给出了屈曲约束支撑的外观、材料、耐久性等技术要求以及试验方法和检验规则。

(4) 行业标准《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013) 给出了屈曲约束支撑的技术性能指标及支撑结构与构造要求。

(5) 行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》(征求意见稿 2012) 中附录 E 部分纳入了屈曲约束支撑的相关内容，该规程对屈曲约束支撑的结构特点、设计原则、构件设计、框架结构、试验和验收进行了阐明和规定。

(6) 中国工程建设标准化协会标准《屈曲约束支撑应用技术规程》拟针对屈曲约束支撑结构设计、屈曲约束支撑构件的设计与加工、屈曲约束支撑与结构的节点连接、屈曲约束支撑的性能检测及屈曲约束支撑的施工与验收等内容进行详细规定，目前该规程讨论稿已于 2013 年 12 月完成，编制组讨论修改之后的征求意见稿也已于 2014 年 2 月完成，现正在全国范围内征求修改及完善意见。

## 6 未来发展方向探讨

### 6.1 性价比更高的应用模式建立

目前我国大陆地区在工程应用方面已经有了不小的数量，也积累了几乎各种结构形式的经验，美中不足的是没有进行更细致、更专业化的梳理工作，比如针对医院建筑、学校建筑或者其他类型的建筑整理出应用模式，包括结构选型、各构件抗震性能目标确定、屈曲约束支撑构件平面、里面布置原则、节点选用及节点设计原则及经济性概括等方面。只有建立出各种性价比更好的应用模式，才能让屈曲约束支撑技术长远地健康发展。

### 6.2 可检测屈曲约束支撑

在设防地震或者罕遇地震发生后，屈曲约束支

撑构件是否需要更换，这也是需要解决的一种需求。如采用可检测屈曲约束支撑，则可满足这种需求，震后打开，看内部的芯材变形情况以衡量是否需要更换；若希望有更精确的定量估计，则可在代表性的屈曲约束支撑中设计微型健康监测系统，采集必要的数据来监测屈曲约束支撑的工作状态。

### 6.3 二阶屈服阻尼型支撑

对于阻尼器型屈曲约束支撑，小震时即可屈服为结构提供附加阻尼，从而减小地震力，但在中、大震下其变形能力是否能够满足变形需求，这仍需要更多的研究。由此，引入二阶屈服的概念，在小震下该支撑经设计的某一部分较容易屈服耗能，而其他部分仍处于弹性状态，但在大震下，小震下屈服的那一部分进入强化由于强化后屈服力增大40%~50%，带动二阶部分屈服，由于更长的耗能段可以具有更大的变形能力，保证其在大震下不失效。二阶屈服的阻尼器支撑可满足不同水平地震下的变形与耗能需求，应该会有更广阔的应用空间。

### 6.4 低成本屈曲约束支撑产品

对于承载型屈曲约束支撑，甚至是要求并不是特别高的耗能型屈曲约束支撑，可以考虑芯材选用强度稍高的钢材，只要延伸率能够满足一定要求，

对于构造设计合理的屈曲约束支撑，完全能够满足《建筑抗震设计规范》中12圈的要求，从而降低屈曲约束支撑成本，可以实现对中长普通支撑的成本替代。

### 6.5 屈曲约束支撑的特性与构造的关系

屈曲约束支撑的抗震性能及稳定性与其具体构造是密切相关的，目前针对此方面研究较少，今后仍需作进一步补充和完善。

致谢：本文在写作过程中广州大学周云教授提出了修改意见，在此深表感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 住房和城乡建设部关于房屋建筑工程推广应用减隔震技术的若干意见（暂行）[S].
- [2] 中国新兴建设开发总公司，上海蓝科建筑减震科技有限公司. 屈曲约束支撑安装施工工法[P].
- [3] JGJ 297—2013 建筑消能减震技术规程[S].
- [4] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].

---

作者简介：宫海，工学博士，一级注册结构工程师，主要从事建筑减震技术产品及软件研发工作，Email：gonghai@lankebrb.com。