

## 消能减震技术在既有建筑加固改造中的应用研究

### 一、既有建筑加固的背景与意义

在既有建筑出现问题时，受经济水平、社会、环境等因素的限制，采取全部拆旧建新的方法，势必带来社会资源的巨大浪费，采取加固改造的办法可节省大量的基建投资。从 80 年代后期开始，美国、英国等发达国家的建筑加固改造在总建筑业投资中，所占的比率不断上升，美国到 2004 年建筑加固改造的工程规模已占建筑业总产值的 1/3 以上，英国 2004 年建筑加固改造的工程规模已占建筑业总产值的 50% 以上。

经过改革开放以来 30 多年的大发展，我国的建筑业已经开始从大规模的新建时期迈向既有建筑的加固和改造时期，从经济、社会及环境等角度分析，目前需要加固的建筑主要可分为 2 类：

- 1) 随着我国抗震设防标准的逐步提高，很多老旧建筑，特别是 20 世纪 80 年代以前的建筑已远远满足不了现行抗震规范的要求，在地震作用下框架结构的柱端及梁柱节点处极易发生破坏，使得结构丧失承载力而发生倒塌，有必要对这些存在安全隐患的老旧建筑物进行抗震加固和修复。
- 2) 由于决策、城市规划、城市功能分区等变化使得既有建筑及建筑群的功能发生改变，特别是随着我国城市化进程加快，城市的社会、经济结构发生了改变，而随之的城市产业结构、用地格局的调整，则使得城市中心的一些效益差、污染重的工厂或关闭或向城外搬迁，使这些既有建筑物面临功能改变而需改造加固。

当前我国大量的既有老旧建筑由于在安全、使用等方面的功能无法满足要求而需要加固改造。2012年,我省宁波江东区的一栋居民楼突然倒塌,事故造成两人被困,其中一名被困人员脱险后经抢救无效死亡,如何经济有效得对既有建筑进行加固改造成为亟待解决的问题。

## 二、 防屈曲耗能支撑 ( JK-BRB ) 简介

### 1、 消能减震技术原理

传统的结构抗震方法抗震设计采用确定性方法进行设计,通过增强结构本身的性能来“抗御”地震作用的,即由结构自身储存和消耗地震能量。传统的,并且结构的抗震性能不具备自我调节与自我控制的能力。但是迄今为止,人们尚不能准确地预测未来可能发生地震动的强度、频谱和持时等特性,因此按照传统抗震方法设计的结构在不确定性的地震作用下,很可能不满足安全性的要求,产生严重破坏,甚至倒塌,造成重大的经济损失和人员伤亡。

消能减震方法是近几十年来发展起来的一种新型抗震方法。从能量的角度,消能减震的原理可以按如图 2.1 所示来描述:

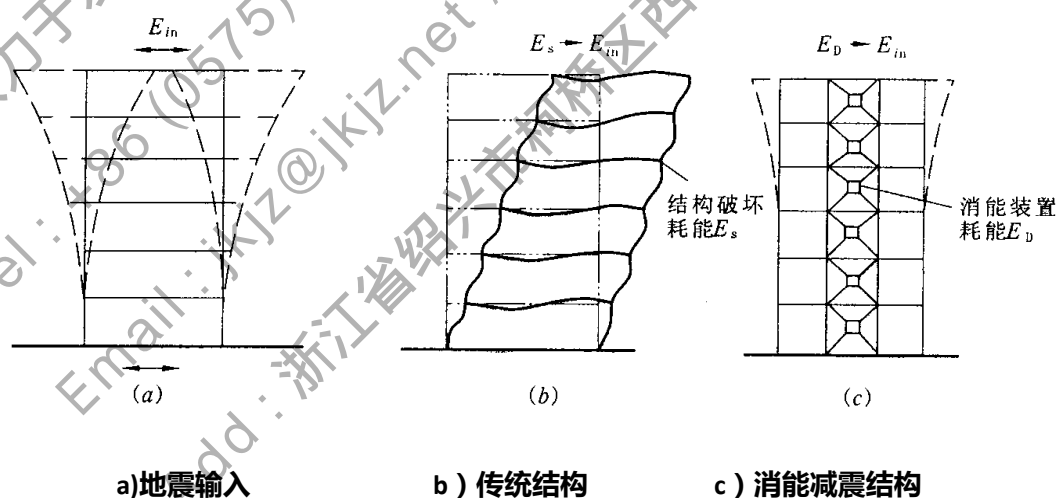


图 2.1 地震输入能量转换途径对比

在地震中任意时刻，传统抗震结构和消能减震结构的能量方程分别为：

传统抗震结构： $E_{in}=E_v+E_c+E_k+E_h$

消能减震结构： $E_{in}=E_v+E_c+E_k+E_h+E_D$

$E_{in}$ ——地震输入结构体系的能量；

$E_v$ ——结构体系的动能；

$E_c$ ——结构体系的阻尼耗能；

$E_k$ ——结构体系的弹性应变能；

$E_h$ ——结构体系的塑性变形耗能；

$E_D$ ——耗能（阻尼）装置或耗能元件耗散或吸收的能量；

在上述能量方程中，结构体系动能  $E_v$  和弹性应变能  $E_k$  只是进行了能量转换，无法耗能。结构体系自身的阻尼耗能  $E_c$  只能耗散地震输入能量的很小部分，一般混凝土结构约 5% 左右，而钢结构建筑为 2%~4%。上述分析可见：在强震作用下，传统抗震结构主要依靠结构体系自身塑性变形  $E_h$  消耗输入结构的地震能量，但因结构构件在利用其自身弹塑性变形消耗地震能量的同时，构件本身将遭到严重破坏甚至导致结构发生整体倒塌。

在采用了消能减震方法后，消能装置在主体结构进入塑性变形前率先集中大量消耗输入结构体系的地震能量，结构本身需消耗的能量很少，从而大大减小了结构反应，有效地保护了主体结构。

## 2、 防屈曲耗能支撑（JK-BRB）的构造原理

屈曲约束支撑是目前最为常用的消能构件，屈曲约束支撑(buckling-

restrained brace, 简称 BRB)。如图 3.1 所示, 屈曲约束支撑主要由芯材、钢套管、填充材料以及无粘结材料组成。在大震作用下, 由芯材来承担轴力, 通过金属屈服消耗输入的能量, 钢套管不承担轴力, 其作用为约束芯材提供束缚来防止支撑构件受压时发生整体屈曲或局部屈曲破坏。

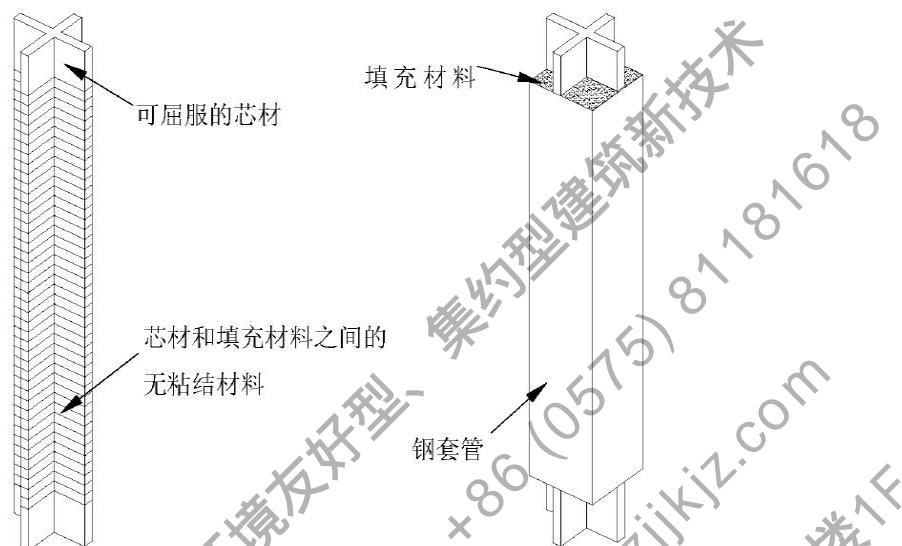


图 3.1 屈曲约束支撑构造示意图

屈曲约束支撑的这一特性使得内核在拉压交变荷载下可充分发挥钢材强度, 具有比普通钢支撑更优良的抗震性能。屈曲约束支撑作为一种重要耗能减震技术已经得到国内外研究者的广泛重视, 未来在我省建筑业中具有巨大的发展潜力。

### 三、加固方案分析

既有建筑结构加固是一个非常复杂的综合决策问题, 技术安全可靠, 费用成本合理, 施工便捷等都是进行结构加固设计时必须考虑的指标, 不仅应考虑材料用量等直接成本, 还应当考虑到施工周期及交付时间相关的经济效益。

加固施工周期越短, 施工企业投入的人力, 材料、设备等就越少, 建筑物

的使用功能就能够尽早实现，建筑投入使用获得的价值就越高，加固工程的综合经济效益也就越好。

在保证加固工程质量可靠的前提下，加固过程中应尽量降低甚至不要对结构的受力性能产生影响。因此选择施工简单可行的加固方案对减少难度、加快施工进度、缩短工期、提高施工效率以及抗震性能的实现具有重要的意义。特别是对于学校建筑，需要尽早实现其教学的功能，加固方案选择的过程中工期因素是一项重要的评判指标。

### 3、常用的加固方法概述

加固方案对加固最终的抗震效果至关重要，目前常用的加固方法进行了比较，各自的优劣如下：

- 1) 增设抗震墙：本质上是一种改变结构体系的方法，由框架结构变为框架抗震墙结构，结构整体刚度增大，地震作用下变形减小。但新增的抗震墙需要增设基础，增加了工程造价和开挖量，对建筑的采光性能有很大影响。此外，具有施工周期长，施工期间对建筑结构的使用有很大影响等诸多问题。
- 2) 加大截面法：对梁柱混凝土构件外包一定厚度的混凝土并配以适量的钢筋，外包钢筋伸入节点区，并对节点区进行箍筋加密，以提高构件的承载力。这种方法施工工艺较简单，设计和施工经验都很成熟。但是该方法会减小建筑净空，并且施工周期长。

- 3) 外包钢法：在梁柱构件的四角外包角钢或钢板，角钢间扁钢焊接形成钢构套，可以有效提高结构的承载能力和延性。此法构件截面增加不大，对建筑净高影响较小，但是用钢量较大。
- 4) 碳纤维加固法：将碳纤维粘贴于构件表面可以提高构件的承载力，而且由于碳纤维质量轻厚度小，加固后对建筑物的净空基本上没有影响。采用此种方案样严重破坏原有建筑内的天花板、设备和装饰材料，而且加固施工周期时间长，加固施工难度大。
- 5) 增设钢支撑：可以提高抗侧力体系的刚度，且具有对建筑采光影响较小，便于施工等特点。普通钢支撑为了满足自身稳定往往需要比实际更大的截面积，这样不仅对建筑的使用功能造成影响，同时还会因为整个结构的刚度明显增加，地震响应也会随之增加，对结构不利

#### 4、 屈曲约束支撑用于建筑加固的优点

采用防屈曲耗能支撑（JK-BRB）对既有建筑进行加固不仅适用于钢结构体系，还可用于混凝土结构体系以及桥梁、通信铁塔等结构设施，其优点主要包括如下几点：

- 1) 屈曲约束支撑在小震下为加固结构提供稳定的附加刚度，在大震下为结构提供附加阻尼，减轻结构在地震作用下的动力反应，控制结构的变形。
- 2) 普通支撑由于受长细比限制，截面一般较大，对结构刚度有很大影响，客观上加大了结构的地震力。同等截面下，屈曲约束支撑承载能力比普通支撑高 2-10 不等，其截面可大大减小，对原有结构的受力影响较小。

3) 屈曲约束支撑可采用双线性滞回模型，而普通钢支撑为拉压不对称滞回模型。屈曲约束支撑于普通钢支撑之间的性能对比如图 3.2 所示，在极限状态下的受力状态分别如图 3.3 和图 3.4 所示，可见，屈曲约束支撑具有比普通钢支撑更为优良的抗震性能。

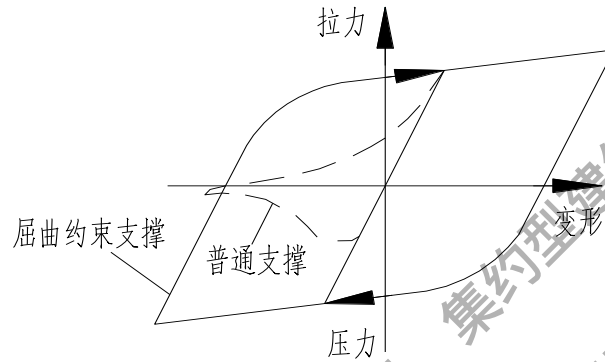


图 3.2 曲约束支撑与普通钢支撑的性能对比

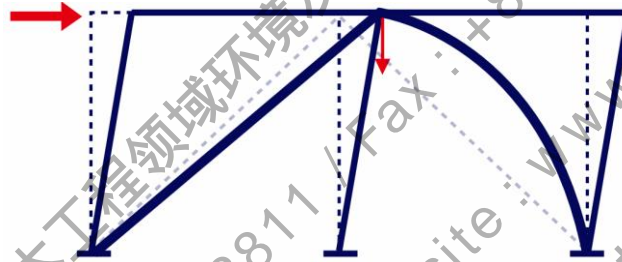


图 3.3 常规钢支撑在极限状态下的受力状态

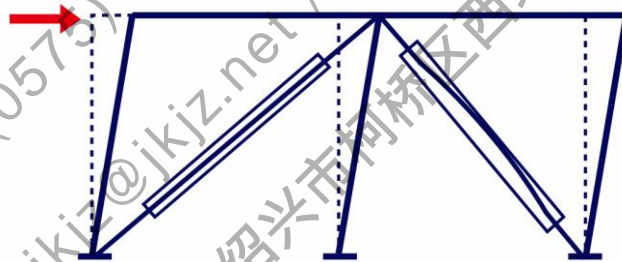


图 3.4 屈曲约束支撑在极限状态下的受力状态

- 4) 屈曲约束支撑现场安装方便, 施工周期短, 安装费用小, 可在建筑结构中灵活布置, 基本不影响建筑物美观及采光, 综合各种费用, 屈曲约束支撑为抗震加固较为经济的手段。

#### 四、 消能屈曲支撑的加固工程案例

防屈曲耗能支撑 ( JK-BRB ) 在美、日等国家已经大量应用于既有建筑的加固, 据统计, 在日本, 每年有约一半的屈曲约束支撑用于各类建筑抗震加固中。

表 4.1 所示节选了部分成功的加固案例:

表 4.1 屈曲约束支撑用于既有结构的加固案例

项目名称	区域	工程性质及规模
加利福尼亚希尔德布兰特大厅	美国	混凝土结构加固, 3 层
华莱士班尼特联邦大厦	美国	混凝土结构加固, 8 层
西雅图 KING 郡法院	美国	混凝土结构加固, 12 层
台积电晶圆厂八号厂	中国台湾	钢结构加固, 6 层
台中国泰世华国际大楼	中国台湾	钢结构加固, 46 层
基隆某住宅大楼	中国台湾	钢结构加固, 31 层
日本竹中公司办公楼	日本	混凝土结构加固, 16 层
静冈县新厅大厦	日本	混凝土结构加固, 9 层
北京师范大学幼儿园	中国大陆	混凝土结构加固, 3 层
上海机械学院教学楼	中国大陆	混凝土结构加固, 9 层





图 4.1 华莱士班尼特联邦大厦加固实景图

图 4.1 所示为美国华莱士班尼特联邦大厦的加固实景图，该大楼建于 20 世纪 60 年代，8 层钢筋混凝土结构，总建筑面积为 2.79 万平方米，在结构外柱之间增设了 344 根十字芯屈曲约束支撑加固处理，获得美国绿色建筑委员会 LEED 认证。



图 4.2 北京师范大学幼儿园

北京师范大学幼儿园，主教学楼为钢筋混凝土框架结构。根据国家对中小学校抗震设防水平调整需进行抗震加固，为更好的提高结构抗震性能，经计算

分析，该工程采用了 64 根屈服承载力为 100 吨的屈曲约束支撑，加固期间几乎不影响建筑的正常使用，加固工程取得了良好的综合经济效益。

## 五、 某中学教学楼加固实例

### 1、 工程概况

某中学加固工程案例：6 层单跨混凝土框架，建筑结构高度 21.6m，总面积为 3632m<sup>2</sup>，层高 3.6m，建筑抗震设防类别均为重点设防类。柱截面尺寸 500mm×500mm、500×550mm、550mm×550mm，梁截面尺寸 250mm×700mm、250mm×600mm、300mm×600mm，各层楼板厚均为 100mm，梁板柱的混凝土强度等级均为 C30。教学楼 1~6 层的结构平面图如图 5.1 所示。

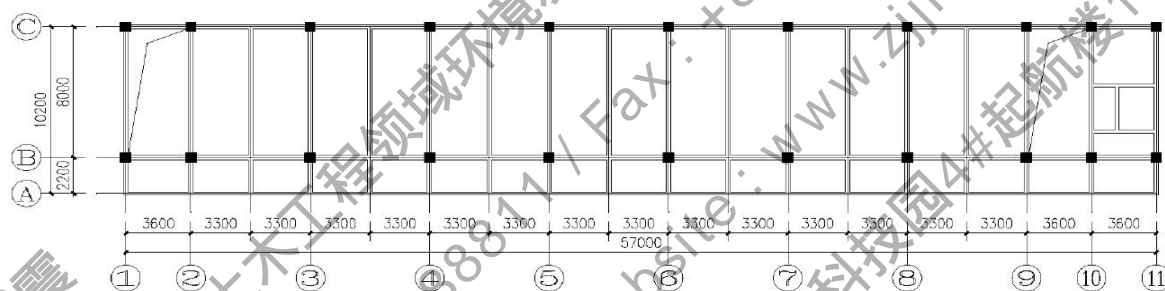


图 5.1 某中学教学楼 1~6 层平面图



图 5.2 某中学教学楼实景图

教学楼的外观实景如图 5.2 所示，根据鉴定结果，结构安全性能上存在的问题包括：结构体系为单跨框架，角柱配筋不足，节点构造不满足要求；水平承载力不满足要求，抗震措施不满足《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)的要求。

## 2、加固方案

由于校舍资源紧张，工程的加固施工时段仅限于暑假，鉴于如此严峻的施工周期，经过综合考虑，采用屈曲约束支撑钢筋混凝土框架进行加固，后续服役年限为 40 年。

经计算，分别在 1、6 以及 11 轴框架内布置了国产屈曲约束支撑，屈曲约束支撑的立面布置如图 5.3 所示。

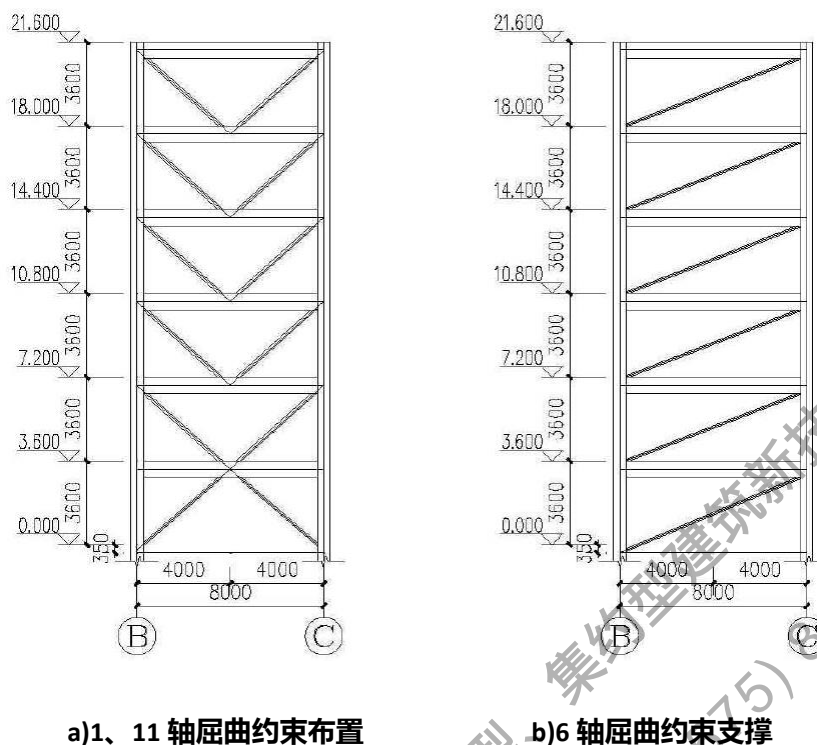


图 5.3 屈曲约束支撑布置位置

各层采用的屈曲约束支撑力学性能参数如表 5.1 所示。

表 5.1 屈曲约束支撑力学参数

轴号	楼层	弹性刚度 (N/mm)	等效截面 (mm <sup>2</sup> )	屈服承载力 (kN)
1	1、2、3层	29238	905	200
	4、5、6层	14538	450	100
6、11	1、2、3层	55500	925	200
	4、5、6层	27900	465	100

本工程采用的屈曲约束支撑约束套筒为矩形，芯材截面为十字形，芯板材料采用常规的 Q235 钢材，节点连接类型为焊接型。在实际施工时，如图 5.4 所

示，屈曲约束支撑为工厂加工。现场施工时只需要在相关的框架梁、柱中设置化学锚栓以及连接节点，施工非常方便，焊接量少，施工周期短，整个加固施工在暑期内完成，施工完成后基本不影响原有的建筑空间。



a)梁底化学锚栓施工

b)梁柱化学锚栓施工



c)梁柱节点

d)梁节点

图 5.4 屈曲约束支撑加固节点

### 3、小震下的分析

该加固项目采用了美国 CSI 公司系列软件 ETABS 进行了加固前后的受力对比分析，首先分别建立了原结构和加固后结构的分析模型，其中加固后的分

析模型如图 5.5 所示。

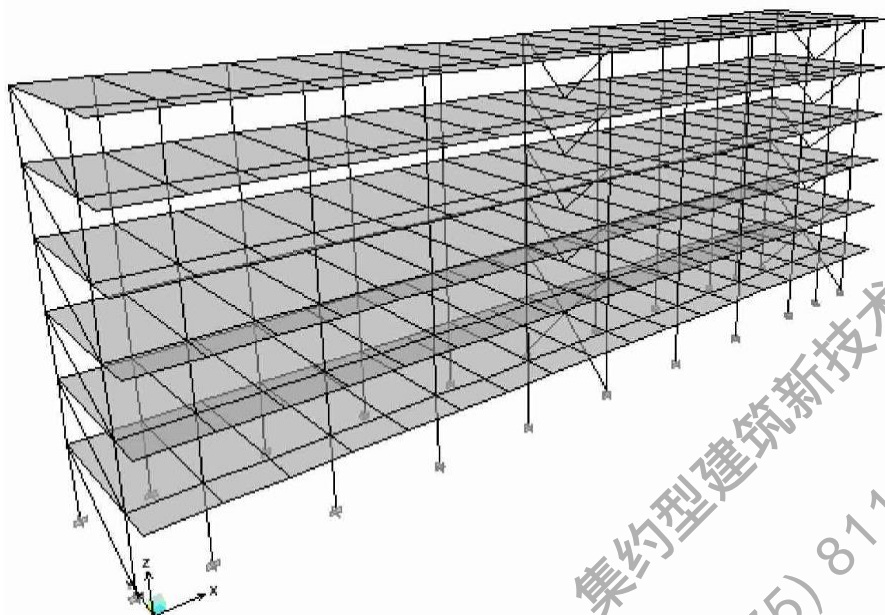


图 5.5 某中学教学楼加固后的有限元分析模型

该加固方案的特点是屈曲约束支撑仅在 Y 向布置。小震作用下加固前后的主要分析结果对比如表 5.2 所示。从结果可见，增加屈曲约束支撑后，结构的整体刚度略增大，结构的自振周期有所减小，X 向基底剪力、最大楼层位移、最大层间位移角则基本不变。Y 向基底剪力增大，Y 向的最大楼层位移和最大层间位移角都有不同程度的减小。

表 5.2 加固前后的指标变化

比较项	周期/s	基底剪力/kN		最大楼层位移/mm		最大楼层位移角	
		X	Y	X	Y	X	Y
加固前	1.19	1203	1046	15.7	24.4	1/1000	1/625
加固后	1.02	1247	1183	16.5	21.5	1/947	1/800

## 4、 大震下的分析

在大震作用下的弹塑性分析得到的层间位移角分布如图 5.6 所示。可见，加固前后的 X 向层间位移角分布无明显变化，这是由于 X 向未设置屈曲约束支撑。Y 向最大层间位移角有不同程度的减小，减小幅度在 30% ~ 50%，且均满足规范要求限值，表明屈曲约束支撑对限制结构的弹塑性层间位移角有显著的作用。

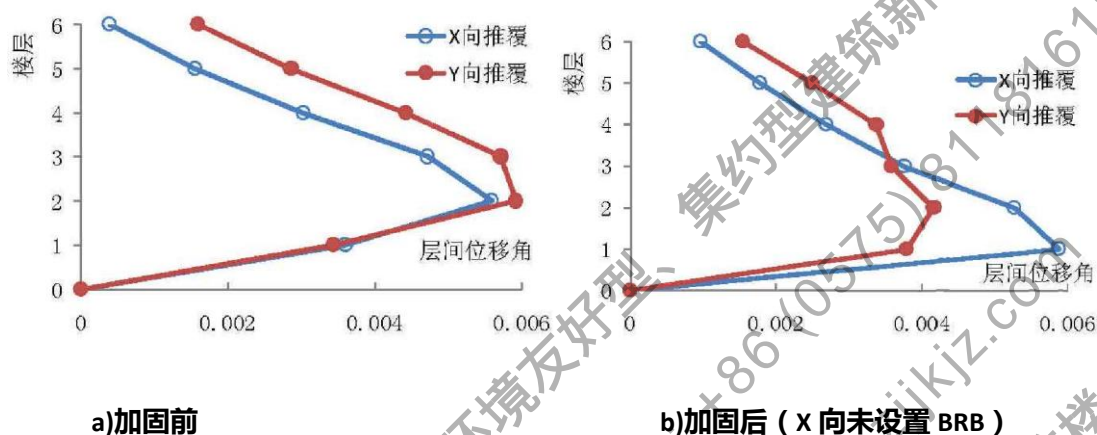


图 5.6 加固前后的层间位移角对比

底部的剪力为各楼层最大，合理的出铰顺序应为自下向上逐渐发展，且消能屈曲支撑应当先于主体结构率先进入塑性耗能。

图 5.7 和图 5.8 分别为 1 轴和 6 轴框架的塑性发展过程。从图中可见，塑性铰最早只出现在屈曲约束支撑上，而主体框架结构仍然处于弹性工作状态。随着楼层位移的加大，屈曲约束支撑中的塑性铰逐渐上移。随着地震输入的进一步加大，主体框架结构中塑性也开始发展，底层梁的两端开始屈服。最后，底层框架柱中也开始出现塑性铰，这表明结构具有合理的耗能机制。

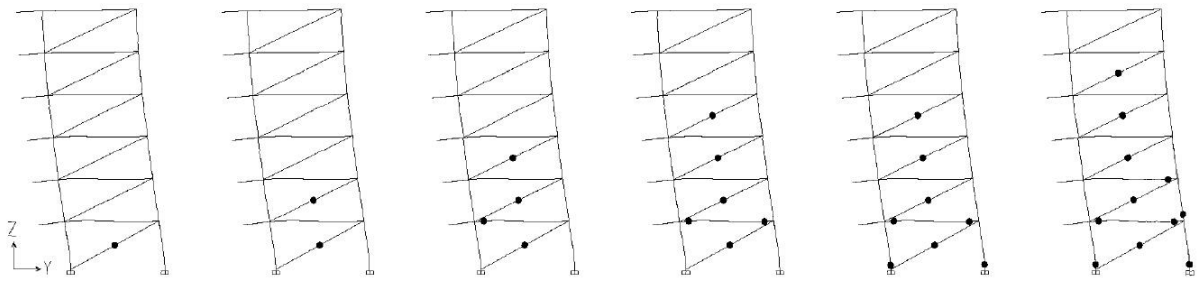


图 5.7 某中学教学楼 1 轴构件塑性屈服发展顺序

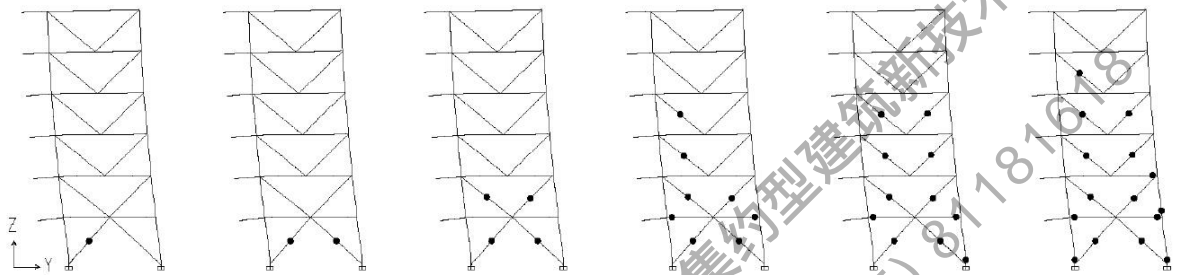


图 5.8 某中学教学楼 6 轴构件塑性屈服发展顺序

上述分析可见：

**在小震作用下，屈曲约束支撑可以明显改善结构的强度；在大震作用下，屈曲约束支撑可以先于梁柱构件率先屈服，提前集中消耗地震能量，从而主体结构的地震反应减小。**

浙江建科减震科技有限公司

2016 年 1 月