

双屈服点屈曲约束支撑开发 (Double-stage Yield BRB)

清华大学土木工程系
潘鹏

1

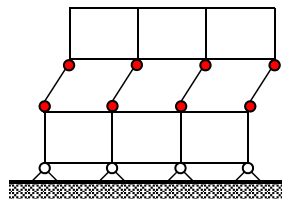
主要内容

- 一、研究背景
- 二、基本原理
- 三、具体构造
- 四、算例分析

2

研究背景

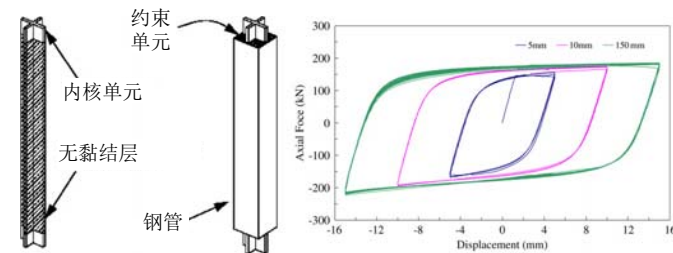
- 楼层变形集中产生的层屈服破坏在历次地震中屡见不鲜，是主要破坏模式之一
- 未能充分利用结构抗震储备，大大增加了结构倒塌的风险，且不利于震后修复



3

研究背景

- 屈曲约束支撑(BRB)已经得到广泛使用，其耗能能力强，滞回曲线饱满，拉压性能相同，疲劳性能好



4

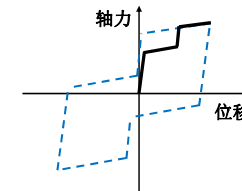
研究背景

- 常规BRB的不足：
 - 小震下通常设计为不屈服，基本没有耗能能力
 - 大震下屈服，屈服后刚度小，一般不超过5%，不能阻止该楼层变形的快速增长，即对于改善楼层变形集中现象没有帮助

5

研究背景

- 针对普通BRB的以上不足，提出了双屈服点屈曲约束支撑 (Double-stage Yield BRB, DYB)
- 使不同楼层安置的DYB处于不同的工作状态，调节结构变形模式，实现楼层变形均匀分布



6

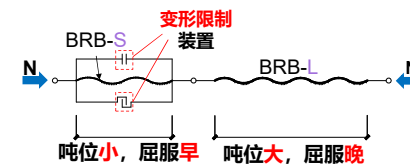
主要内容

- 一、研究背景
- 二、基本原理
- 三、具体构造
- 四、算例分析

7

基本构造

- 主体为两段串联的普通BRB，其中：
 - BRB-S：屈服承载力低，屈服位移小
 - BRB-L：屈服承载力高，屈服位移大
- 在此基础上附加的变形限制装置：
 - 用于限制BRB-S的可变形范围

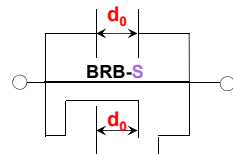


8

基本原理

变形限制装置:

- 1、根据需要，预先设定允许BRB-S的最大可变形值
- 2、BRB-S的变形达到此预定值时，该装置才激活
- 3、装置未激活时，BRB-S可自由变形；
装置激活后表现为刚性，BRB-S不可继续增加变形
- 4、装置本身可承担一定的拉（压）力



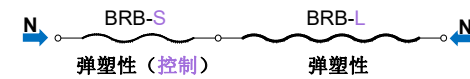
d_0 : 人为设定的最大允许变形量
(一般设定为拉压相同)

9

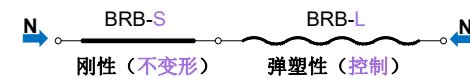
基本原理

两串联BRB:

- 1、装置未激活时，二者串联，整体承载力由承载力小的BRB-S控制

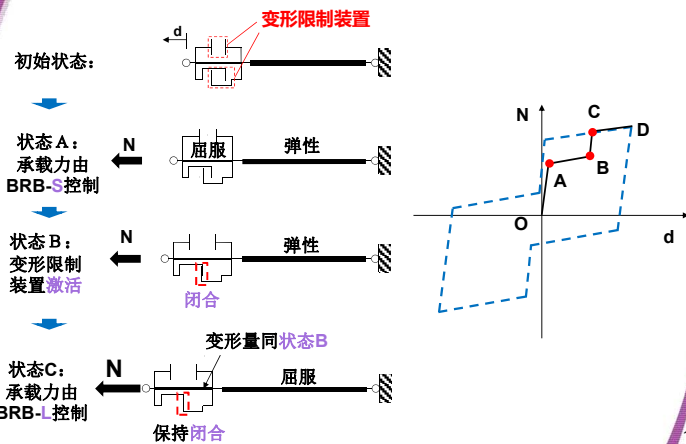


- 2、装置激活后，BRB-S可视为刚体，整体承载力由BRB-L控制



10

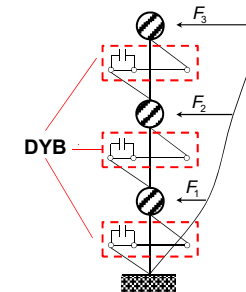
特征状态点



11

DYB使楼层变形分布均匀

不同楼层DYB处于不同工作状态，调整位移分布

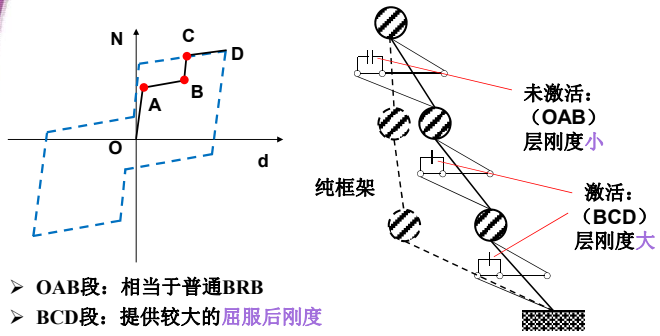


集中质量模型
(假定首层变形集中)

12

DYB使楼层变形分布均匀

不同楼层DYB处于不同工作状态，调整位移分布



- OAB段：相当于普通BRB
- BCD段：提供较大的屈服后刚度
抑制相应楼层变形增加
- CD段：第二屈服段防止连接节点破坏

13

主要内容

- 一、研究背景
- 二、基本原理
- 三、具体构造（全钢式DYB）
- 四、算例分析

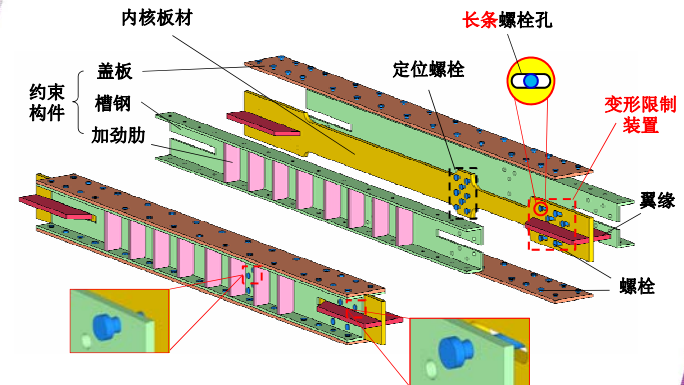
14

全钢式DYB

- 根据以上原理，设计了一种切实可行的DYB产品
- 本产品完全采用钢材制造，以低屈服点钢材为内核材料，以槽钢为主要约束构件，通过螺栓进行连接。
- 在内核与槽钢间填充橡胶作为无黏结材料
- 本产品设计与普通BRB相似，自重轻，加工简单

15

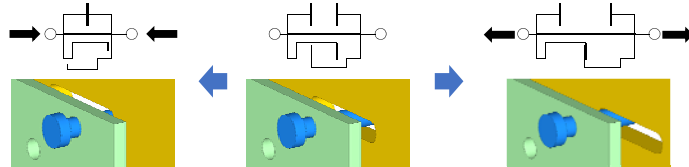
全钢式DYB



16

全钢式DYB

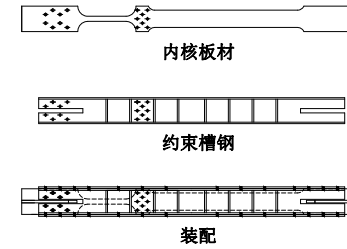
- 内核板材采用疲劳性能优秀的低屈服点钢材，定位螺栓将其分为大、小两个工作段，从而实现BRB-S与BRB-L的串联
- 内核板端部螺栓孔为长条螺栓孔，允许螺栓在孔内滑动。最大滑移量不超过半孔长，实现对BRB-S最大变形的限制



- 与普通BRB不同，螺栓顶住孔壁后，槽钢和盖板承担轴力作用

17

拟静力试验



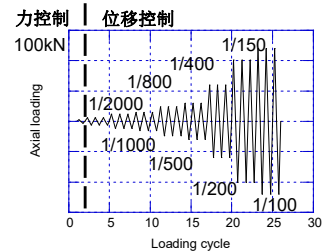
- 内核: LY225; 其余: Q235
- 整体尺寸: 4.0m × 300mm × 300mm
- BRB-S: 长450mm, 截面积1800mm²
- BRB-L: 长1680mm, 截面积6000mm²
- BRB-S最大许可变形: 5mm

18

拟静力试验



加载装置

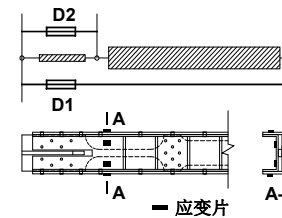


加载制度
(每级循环加载3周)

19

拟静力试验

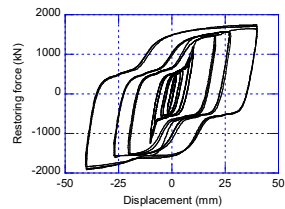
量测方案



- D1位移计: 量测整体变形
- D2位移计: 量测BRB-S变形
验证变形约束效果
- 应变片: 布置在槽钢与盖板上
监测约束部件状态
计算约束部件受力

20

拟静力试验



- 按预想出现双屈服机制
- 变形限制装置正常工作
- 滞回曲线饱满，拉压对称，保留了BRB的优点
- 约束构件始终保持弹性（应变片最大数值为 $400\mu\epsilon$ ）
- 加载过程中未出现失稳
- 良好的疲劳性能

21

拟静力试验

实测性能点

	第一屈服点		第二屈服点		最大位移点	
	Disp. (mm)	Force (kN)	Disp. (mm)	Force (kN)	Disp. (mm)	Force (kN)
拉	2.14	511.2	10.99	1309.2	39.97	1729.6
压	2.09	480.0	10.50	1430.4	40.27	1843.2

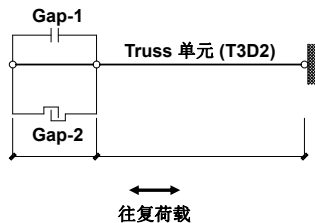
- 屈服点处实测值与理论值基本相同
- 受拉与受压时性能基本相同
- 受压变形较大时由于内核与槽钢摩擦，承载力略大于受拉时

22

数值模型

有限元模型 (ABAQUS)

- 用 Truss 单元 (T3D2) 模拟内核部分，使用随动硬化模型模拟钢材在往复荷载下的行为
- 用 ABAQUS 提供的 Gap 单元 (GAPUN) 模拟变形限制装置
- 认为约束构件的约束效果足够强，用对 Truss 单元的面外自由度约束代替约束构件建模，仅允许 Truss 单元发生轴向变形



23

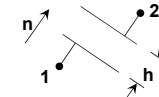
数值模型

Gap 单元力学模型

- 需要手动设置初始距离 d_0 以及单元方向 \vec{n}
- 节点当前距离 h 计算式为

$$h = d_0 + \vec{n} \cdot (\vec{u}^2 - \vec{u}^1) \geq 0$$

当 h 将小于 0 时，单元闭合，并保持约束 $h = 0$ 不变

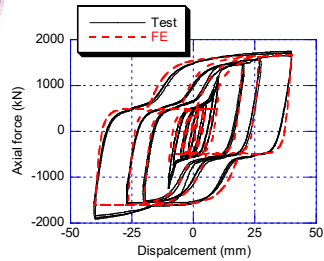


- 闭合后单元不可变形，但可以传递力

24

数值模型

滞回曲线对比

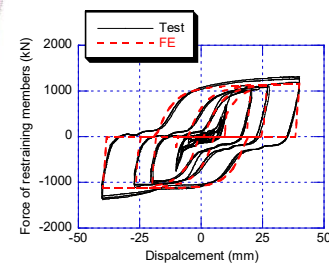


- 此简化模型对支撑的整体性能模拟效果良好
- 由于未考虑受压时内核与槽钢之间的摩擦，受压侧承载力略低于试验值

25

数值模型

约束构件受力对比



- 试验值根据约束构件应变数据，按弹性计算得到
- Gap单元对受力模拟可靠
- 在DYB中，约束构件将承受一定轴力作用，最大值约为两段内核屈服承载力之差
- 在设计时应针对约束构件进行验算，确保其约束效果

D2

26

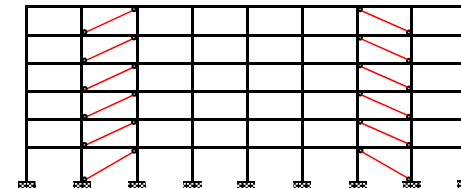
主要内容

- 一、研究背景
- 二、基本原理
- 三、具体构造
- 四、算例分析

27

算例分析

结构模型（框架）

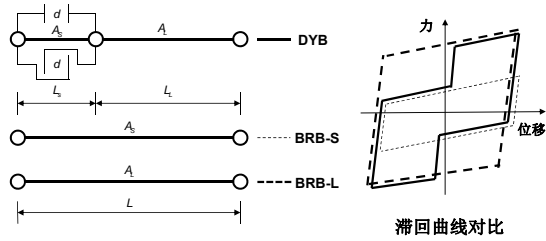


- 7度区框架结构，6层8跨，首层变形集中
- 首层层高3.6m，其他层3m，每跨长5.85m
- 各层梁柱截面相同（柱：0.45m×0.6m，梁：0.2m×0.65m）
- 纤维模型（PQ-Fiber）
- 根据使用的支撑类型，共4个结构模型：
纯框架、安装DYB、安装BRB-S、安装BRB-L

28

算例分析

结构模型（支撑）



- 所有支撑有效长度相同（3.0m），DYB的小段与大段长度分别长0.4m和2.6m
- BRB-S与BRB-L分别是DYB承载力的**第一屈服力**与**第二屈服力**，内核截面积分别为1040mm²和5200mm²
- 变形限制装置设置为层间变形达到1/200时被激活

29

推覆分析

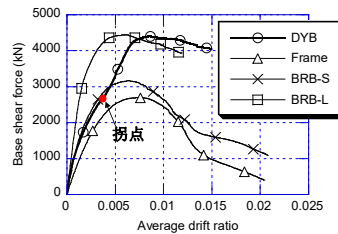
侧力模式比例与结构一阶振型相同



30

推覆分析

推覆曲线

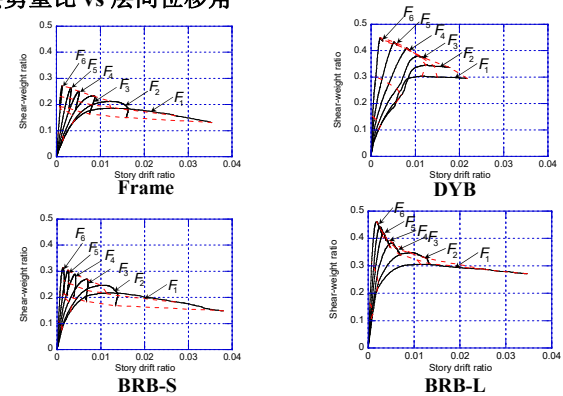


- 屈曲约束支撑能有效提高结构的承载力与延性
- DYB中可观察到**拐点**，DYB前期性能类似BRB-S，后期性能接近BRB-L

31

推覆分析

层剪重比 vs 层间位移角



（红线为同一顶点位移时连线）

32

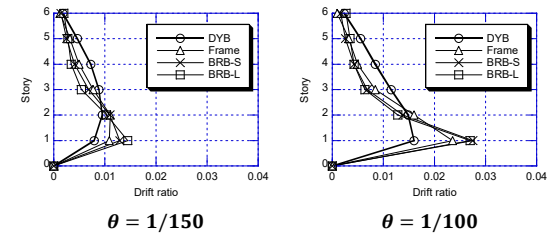
推覆分析

- 层剪重比 vs 层间位移角
 - 纯框架
 - 楼层变形明显集中于首层
 - 在推覆后期，上部楼层剪力下降
 - 布置普通BRB
 - 能提高楼层承载力
 - 对楼层变形集中没有效果
 - 布置DYB
 - 能提高楼层承载力
 - 能明显改善楼层变形集中现象

33

推覆分析

- 各楼层位移角分布

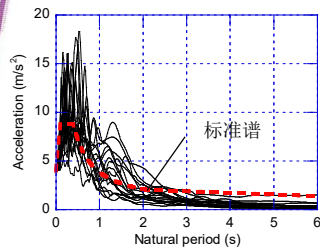


DYB明显改善楼层变形集中情况

34

弹塑性时程分析

- 地震波



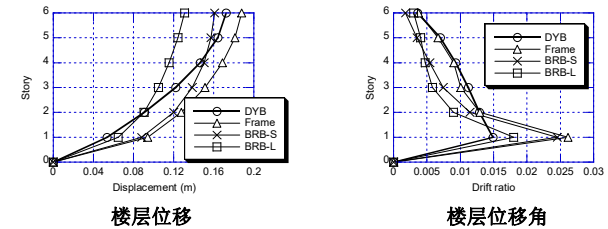
反应谱

- 选取FEMA推荐的22条地震波进行弹塑性时程分析
- 每条地震波按8度大震(400gal)调幅，持时30s

35

弹塑性时程分析

- 层间变形包络（平均值）



楼层位移

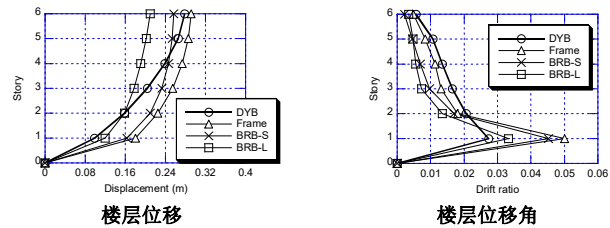
楼层位移角

- DYB使得楼层变形分布均匀，明显抑制了楼层变形集中出现
- 大部分工况下，1~3层DYB进入第二屈服段，4~6层DYB保持弹性或进入第一屈服段
- 下部楼层变形与布置BRB-L接近，上部楼层变形与布置BRB-S接近

36

弹塑性时程分析

- 层间变形包络 (平均值+1倍标准差)

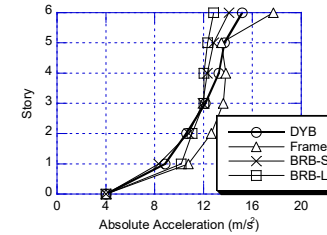


- 在统计意义上验证了上述结论

37

弹塑性时程分析

- 楼层加速度包络



- 尽管DYB过程中存在着螺栓与孔壁的硬接触, 但并不会造成楼层加速度增加

38

总结

- 提出“双屈服点BRB”以使楼层变形分布均匀
- 提出具体实现方式并加以实验验证
- 建立有限元模型, 并进行推覆分析与时程分析, 证明DYB对阻止楼层变形集中, 防止倒塌有明显效果

39

Thanks for your attention!

谢谢!

40