

结构抗震设计的 损伤控制与可恢复

周 臻

东南大学土木工程学院

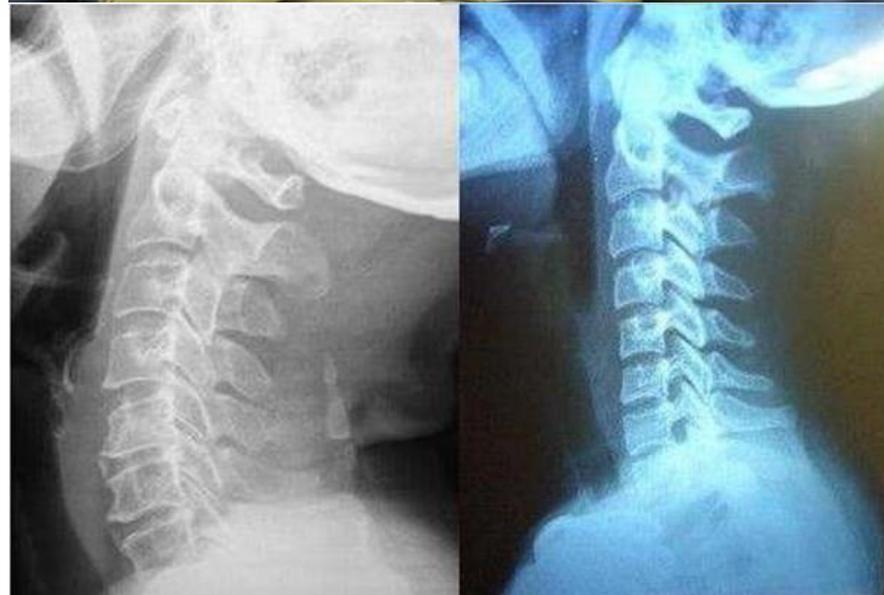


损伤

低头看手机，**可让颈椎承受
27公斤重压，导致曲度变直**

恢复

抬头听课
仰望天空





- ① **地震对结构的作用**
- ② **结构的损伤与控制**
- ③ **功能可恢复结构**
- ④ **思 考**





1.地震对结构的作用

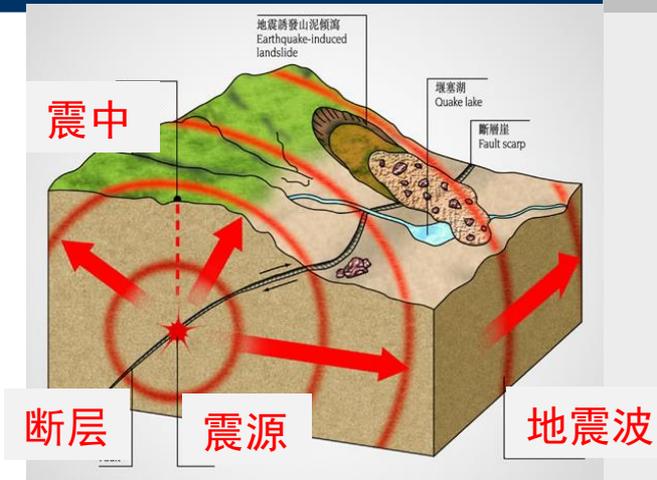
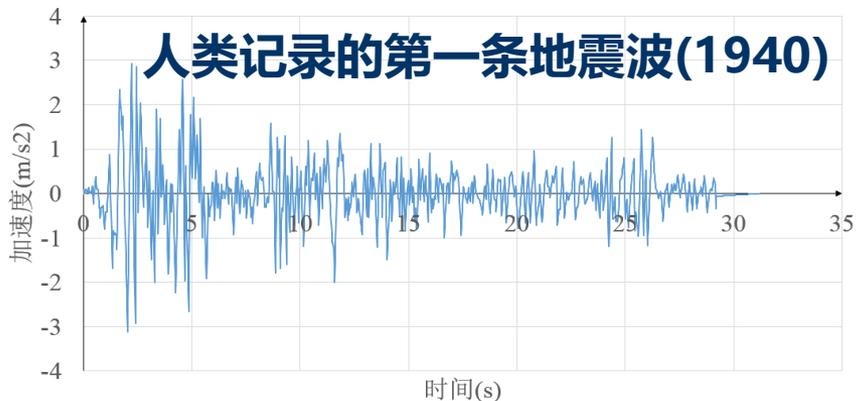
7级以上破坏性大震

20世纪平均**18次/年**； 21世纪平均**20次/年**；

地点	时间	震级(里氏)	灾害损失情况
尼泊尔博克拉	2015年4月25日	8.1	6,621人死亡；14,023人受伤；53万座房屋受损；直接经济损失¥310亿
中国四川雅安	2013年4月20日	7.0	193人死亡；25人失踪；200万人受灾；直接经济损失¥500亿
土耳其凡省	2011年10月23日	7.3	481人死亡；1650人受伤；2262座建筑物遭破坏；¥120亿
东日本	2011年3月11日	9.2	15,843人死亡；3469人失踪；直接经济损失约¥1.36万亿
智利康塞普西翁	2010年2月27日	8.8	214人死亡；150万所住宅受损；直接经济损失超过¥1800亿
中国青海玉树	2010年4月14日	7.1	至少2698人遇难；270人失踪；12,135人受伤 直接经济损失约¥228亿
海地	2010年1月12日	7.3	22.26万人死亡；19.6万人受伤；直接经济损失¥480亿
中国四川汶川	2008年5月12日	8.0	69,227人死亡；374,643人受伤；17,923人失踪；直接经济损失¥8451亿

1.地震对结构的作用

El Centro



地震震级：震源放出的能量大小等级。

地震烈度：地震的破坏程度。

设防烈度：按国家规定的权限批准的作为一个地区抗震设防依据的地震烈度。

汶川建起“超五星”小学 能抗八级以上地震(图)

2009-08-24 11:20:36 来源：人民网-人民日报(北京) 跟贴 138 条 手机看新闻

核心提示：新学期即临，广州对口援建的汶川第一小学、汶川第二小学、汶川第一幼儿园全部竣工，数千名灾区儿童将重新回到汶川上学。这3所学校建筑均能抗8级以上地震，硬件设施先进。汶川第一小学校长王宏称赞：“简直是超五星级的感觉。”

搜狐新闻 > 最新要闻 > 世态万象

网传重庆一小区椭圆形楼抗12级地震 业主：不清楚

正文

我来说两句(0人参与)

扫描到手机

2015-10-30 07:07:19 来源：综合 作者：重庆商报

手机看新闻 | 保存到博客 | 分享 | 打印

1.地震对结构的作用

地震本身不会杀人，而建筑会杀人！

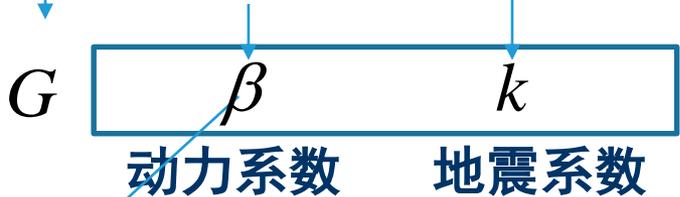


1. 地震对结构的作用

地震作用在结构上的等效地震力

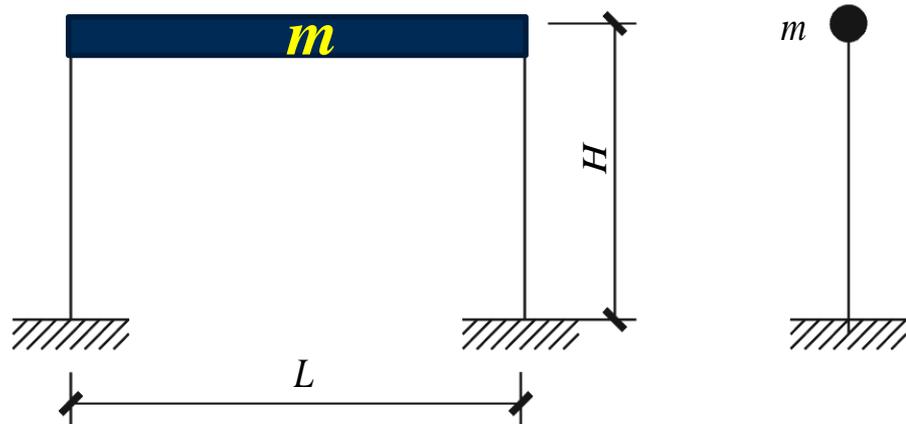
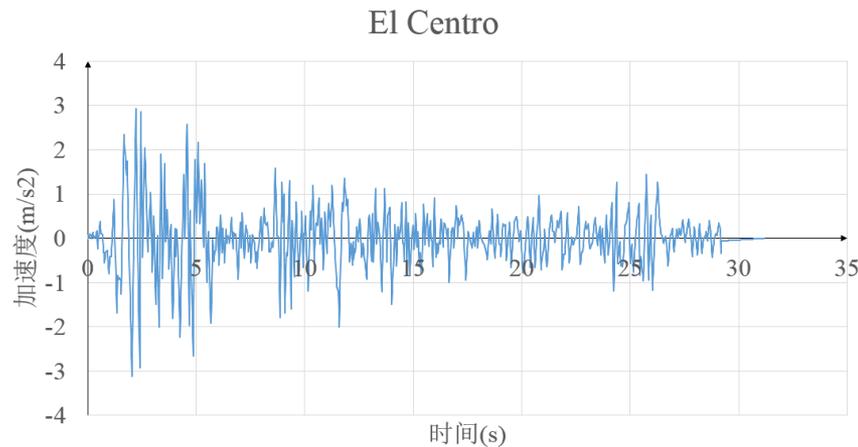
$$F = m \left| \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) \right|_{\max} = m S_a$$

$$F = mg \frac{S_a}{\left| \ddot{x}_g(t) \right|_{\max}} \cdot \frac{\left| \ddot{x}_g(t) \right|_{\max}}{g}$$



$$F = \alpha G$$

α —— 地震影响系数



1.地震对结构的作用

总地震力

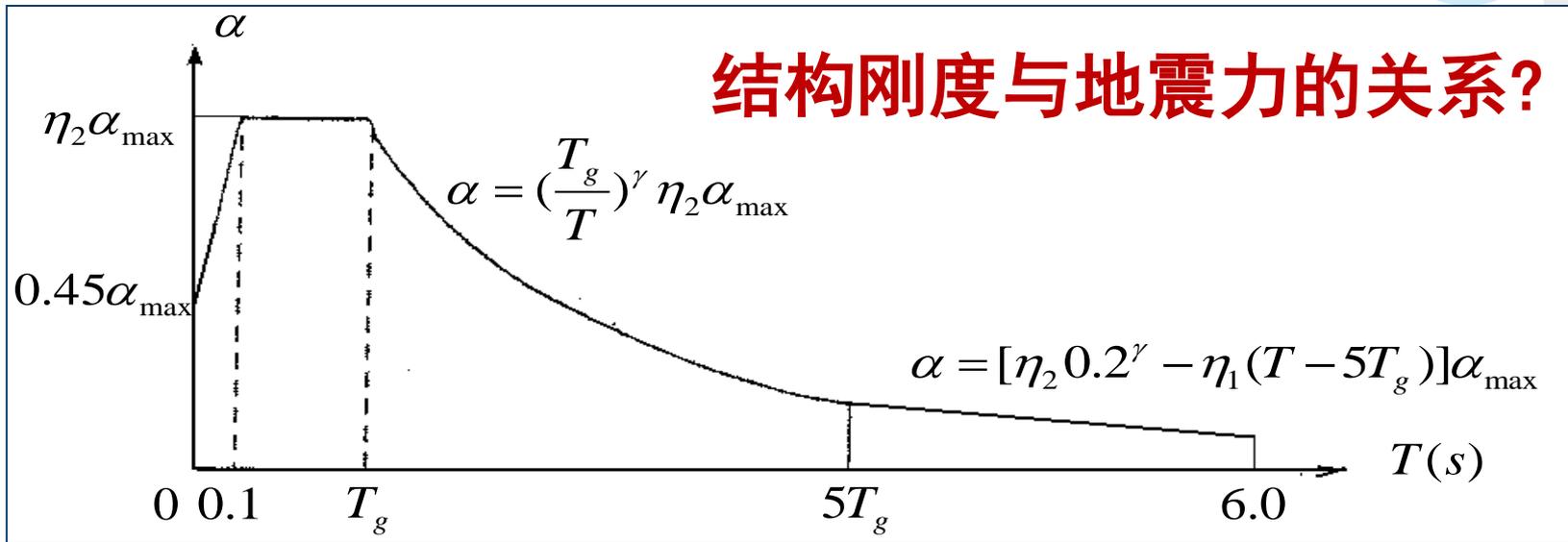
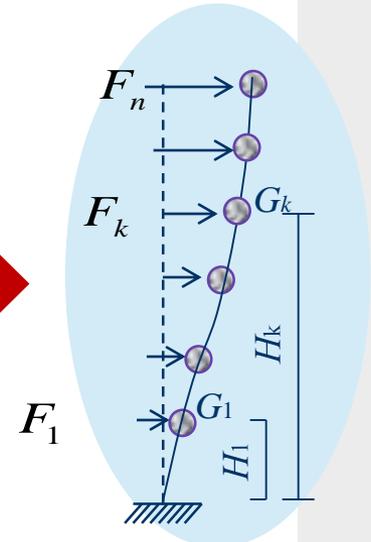
$$F_{EK} = \alpha G_{eq}$$

结构等效总重力荷载代表值, **0.85G**

各层地震力

$$F_i = \frac{H_i G_i}{\sum_{k=1}^n H_k G_k} F_{EK}$$

F_{EK} 

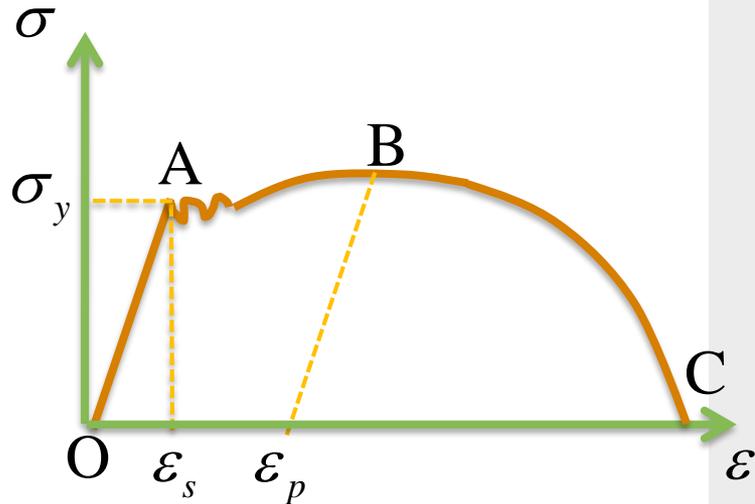




2. 结构的损伤与控制

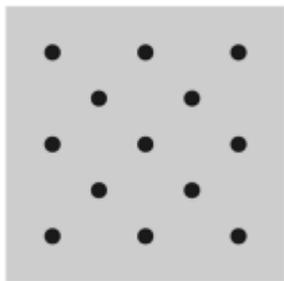
结构为什么会产生损伤？

✓ 损伤的定义：固体材料在外部作用下内部微观裂纹、微观孔洞的萌生、汇合、扩展造成材料的局部劣化。

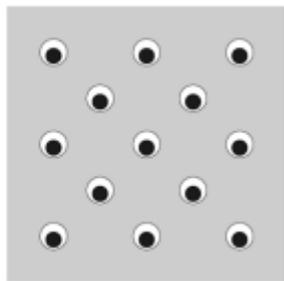


塑性变形是结构损伤的原因！

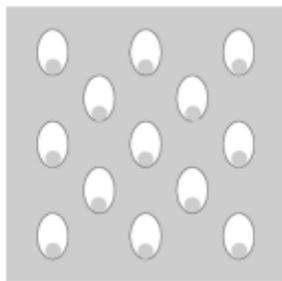
$$\frac{dR}{R} = c \exp(1.5T) \cdot d\epsilon_p$$



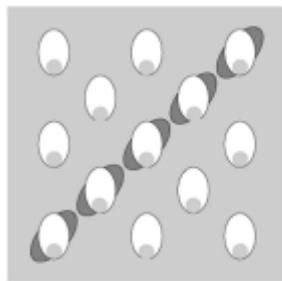
(a) 杂质



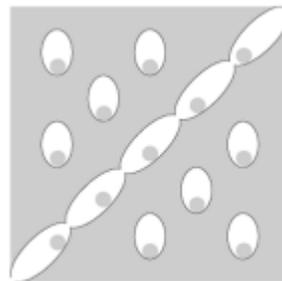
(b) 微空洞



(c) 空洞增长



(d) 空洞颈缩



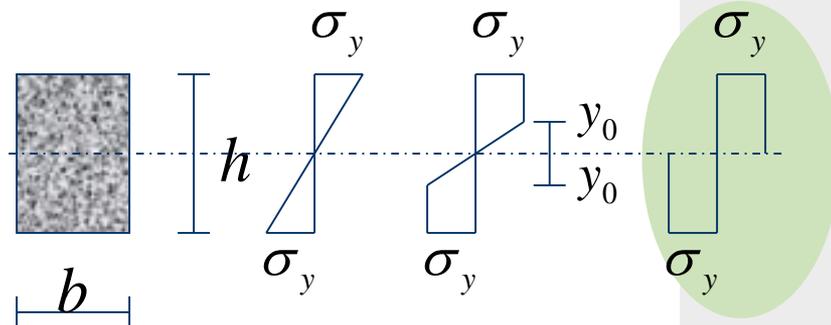
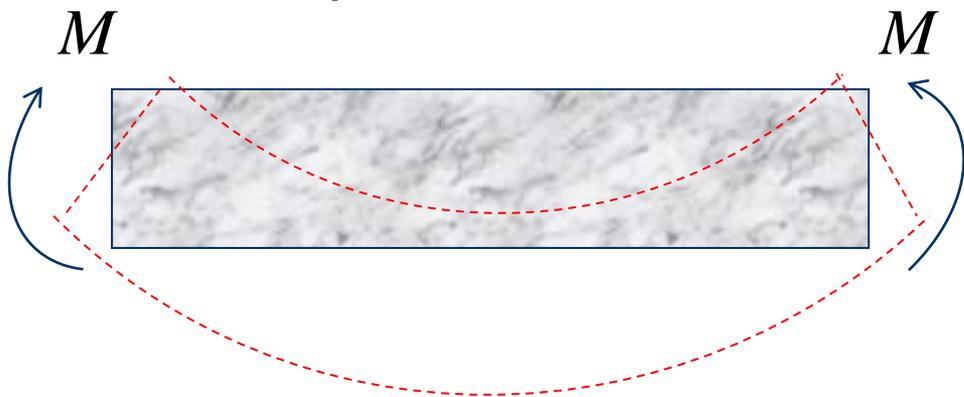
(e) 空洞联合



2. 结构的损伤与控制

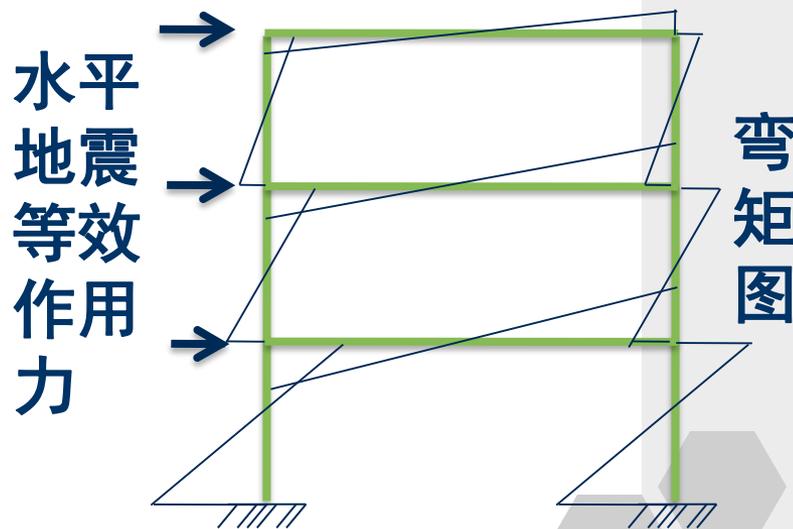
$$M_u = \frac{bh^2}{4} \sigma_y \text{ --- 塑性极限弯矩 (简称为极限弯矩)}$$

塑性铰



塑性铰可能出在哪里？

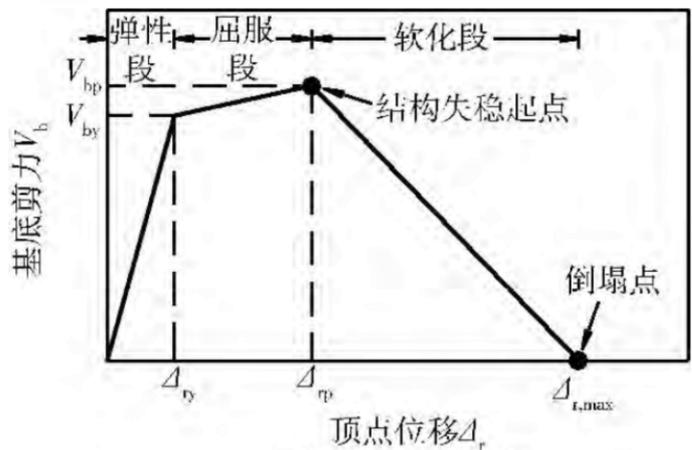
什么样的破坏模式更为有利？



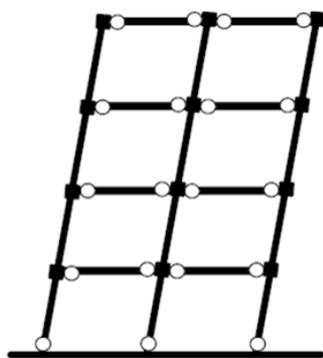


2. 结构的损伤与控制

框架结构的损伤机制

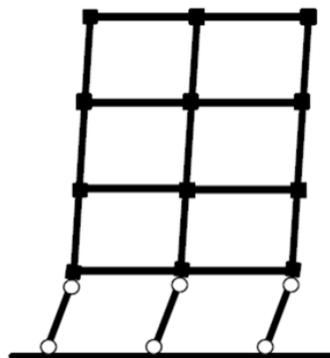


结构的推覆曲线



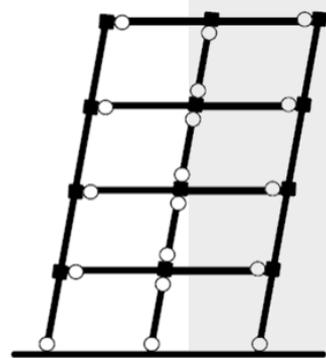
梁铰机制

理想损伤机制



柱铰机制

危险应避免



混合机制

可接受

抗震设计之重要原则

“强柱弱梁”

“强剪弱弯”

“强节点弱构件”

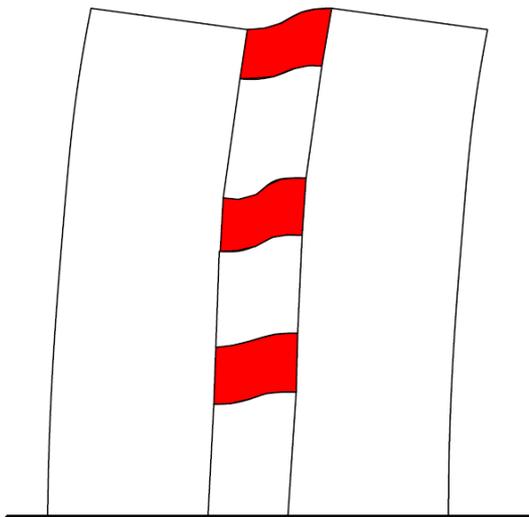


汶川地震教学楼

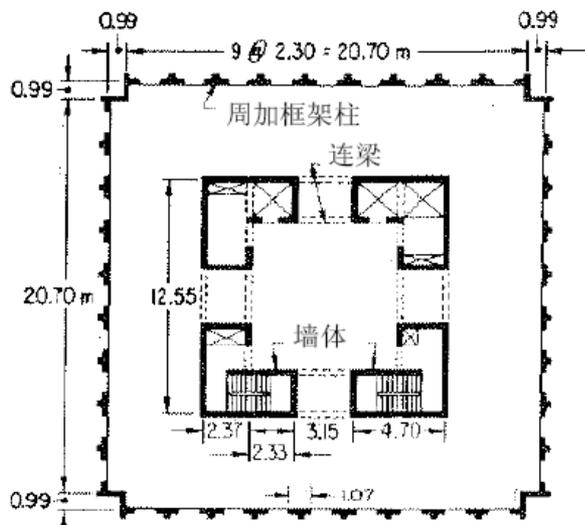


2. 结构的损伤与控制

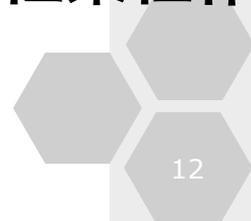
剪力墙结构的损伤机制



1972年马那瓜大地震毁坏了10000多栋建筑，5000多人死亡，马那瓜美洲银行大楼(18层、61m高)仅出现少量裂缝。



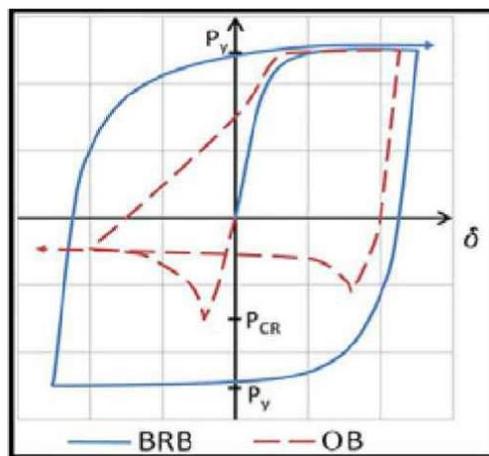
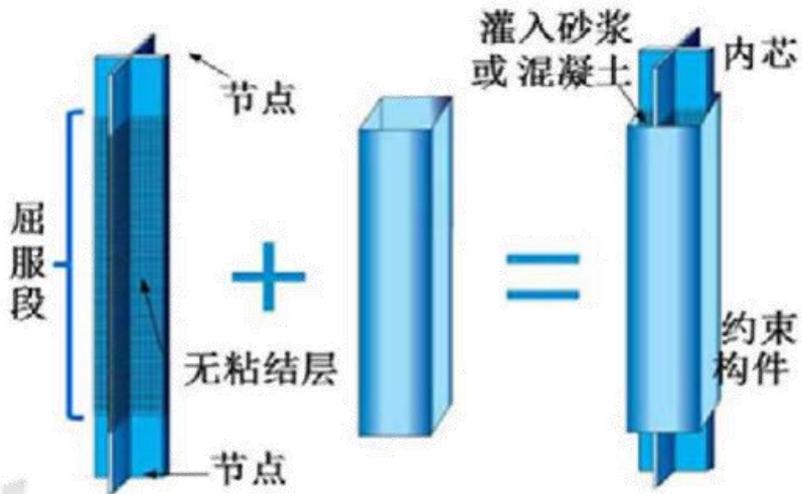
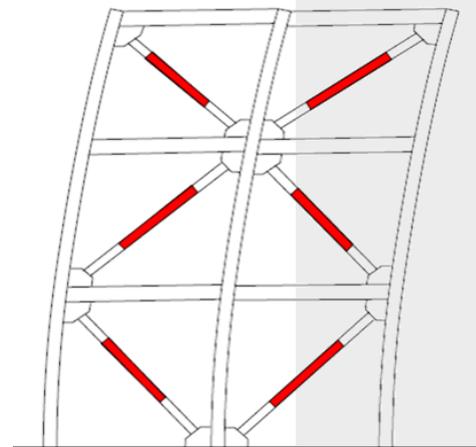
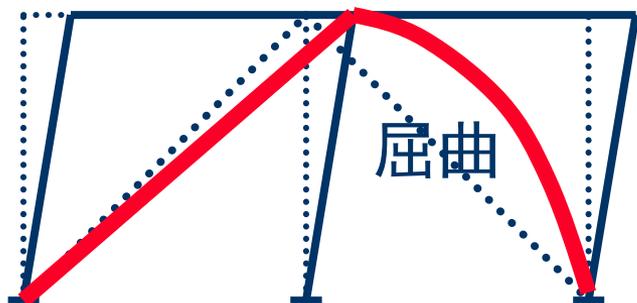
连梁大量屈服并承担主要耗能；部分框架梁弯曲屈服，作为补充；墙肢的屈服应尽量推迟，并只发生在底部；框架柱作为结构后备抗震防线，保持弹性。





2. 结构的损伤与控制

支撑框架结构的损伤机制



屈曲约束支撑(BRB)

“保险丝”理念

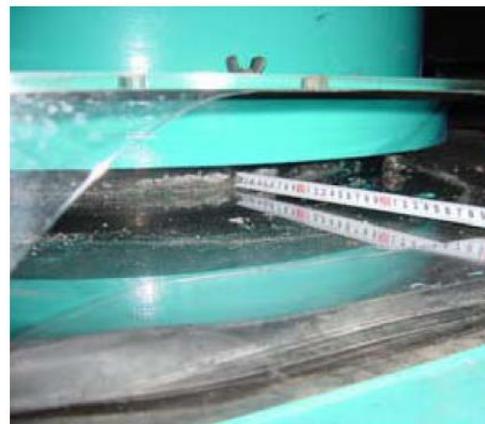
损伤集中于支撑
(耗能部件次结构),
框架结构(主结构)
损伤较小, 维持正
常使用。支撑震后
可更换。



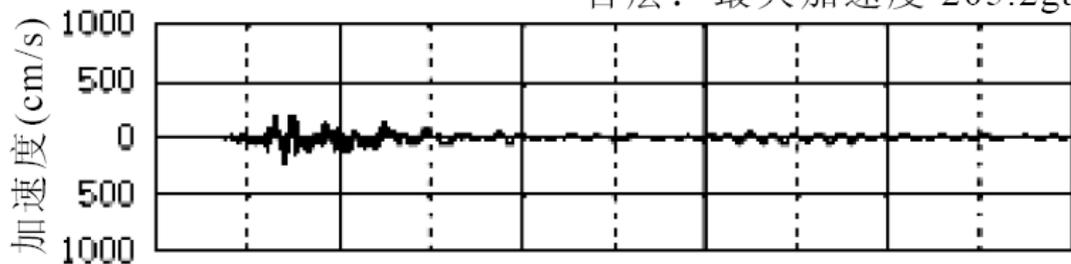
2. 结构的损伤与控制

隔震结构的损伤机制

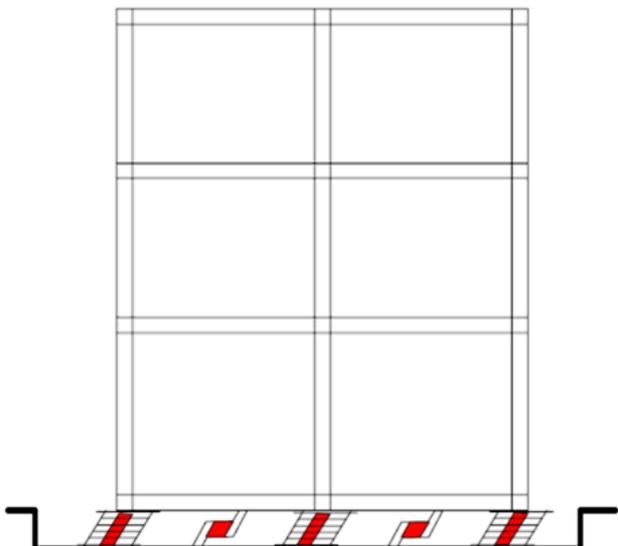
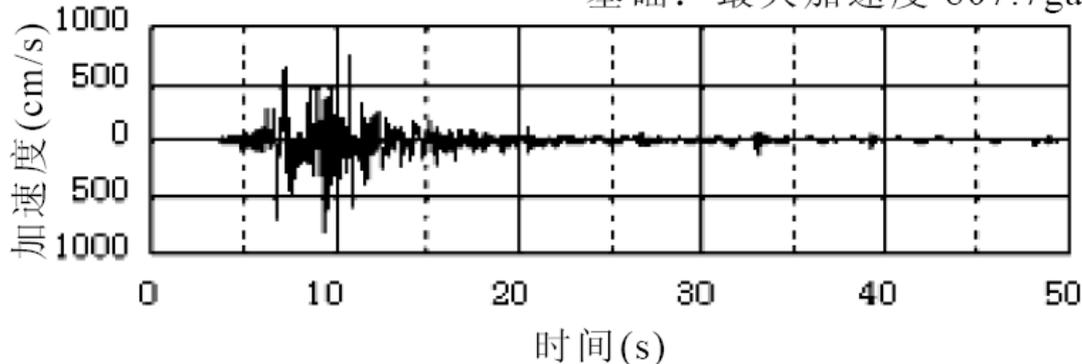
结构变形与损伤主要集中在由隔震支座和各种阻尼器组成的隔震层中，而上部结构基本保持弹性。



首层：最大加速度 205.2gal



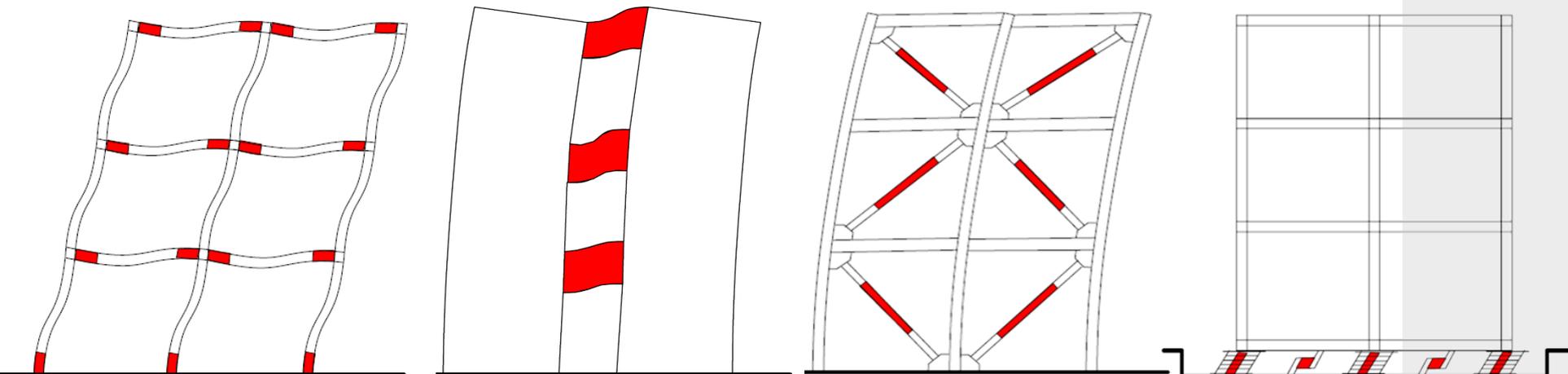
基础：最大加速度 807.7gal



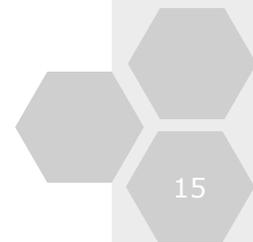


2. 结构的损伤与控制

结构的损伤控制

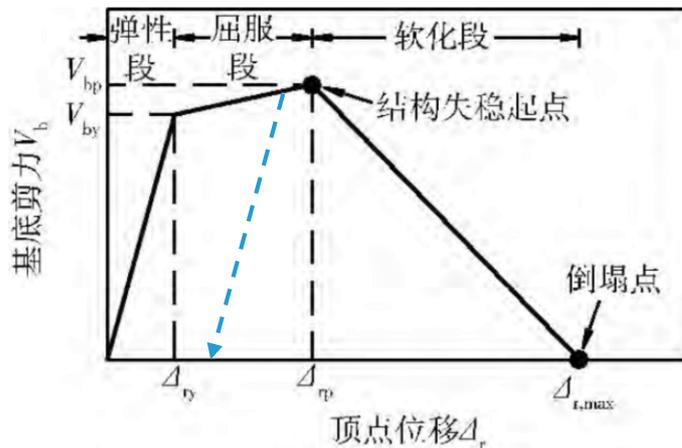
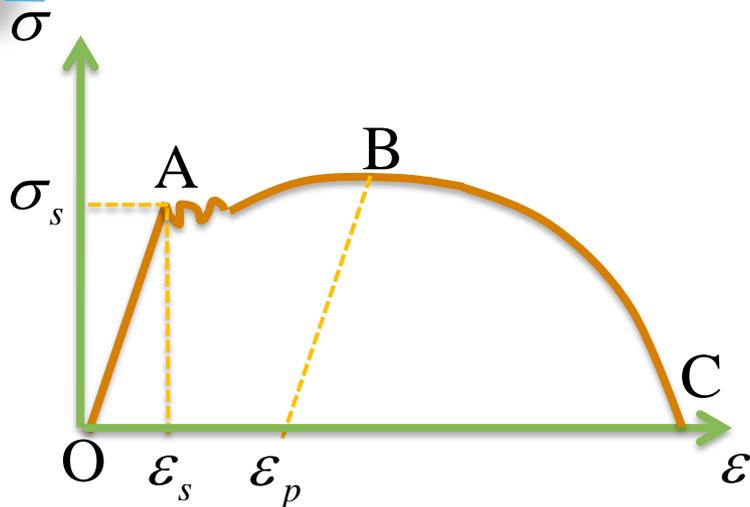


- 关键在于：
- (1) 控制结构的变形模式；
 - (2) 合理选择预期损伤部位。



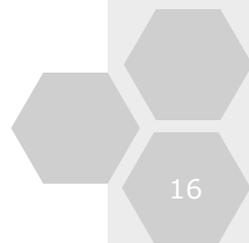


2. 结构的损伤与控制



主体结构损伤 → 结构震后残余变形。

- ✓ 当残余变形大于0.5%时，结构的**修复成本将超过重建费用**。
- ✓ 残余变形过大还会**影响结构抵抗余震的能力**，导致结构可能在余震过程中倒塌

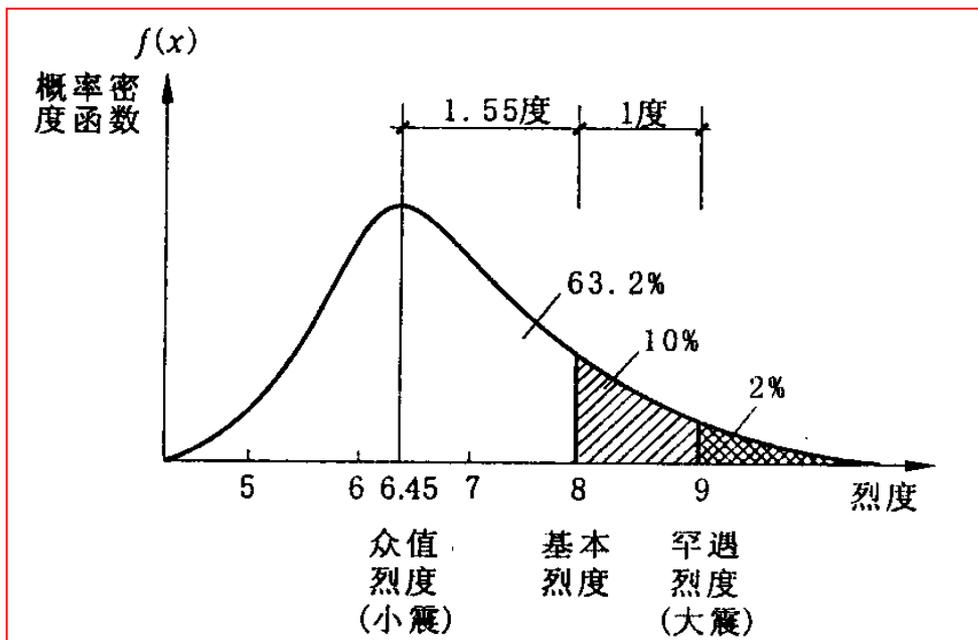




3. 功能可恢复结构

目前抗震设计准则：小震不坏，中震可修，大震不倒。

2009 年以来，Resilience 逐渐成为国际地震工程热点。



功能可恢复结构
(resilient structure)

地震后不需修复或稍加修复即可快速恢复其使用功能的结构

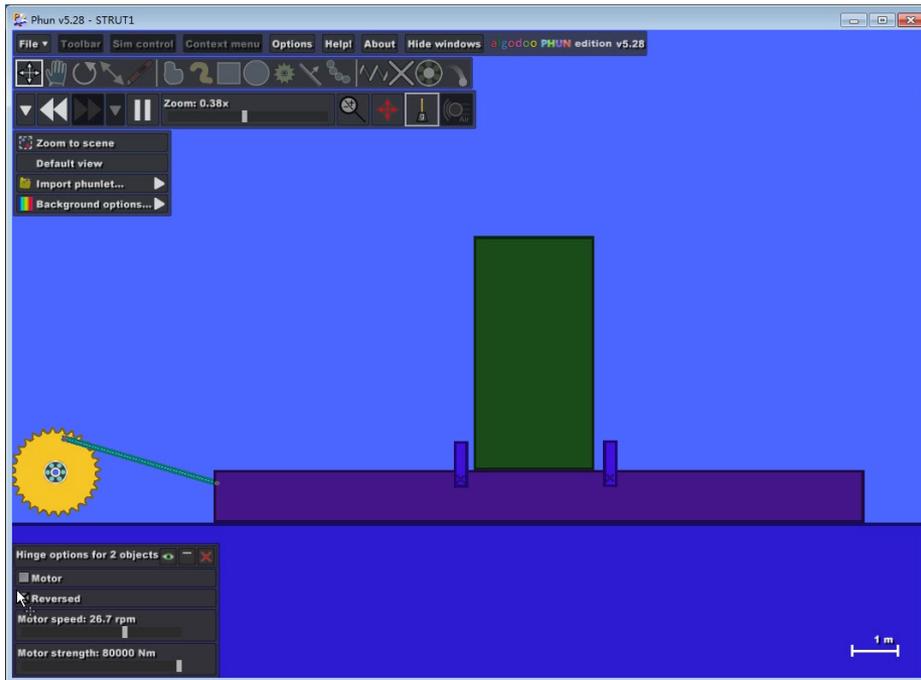
抗震设计发展方向：

大震不倒 → 损伤可控 → 大震可修 → 韧性恢复



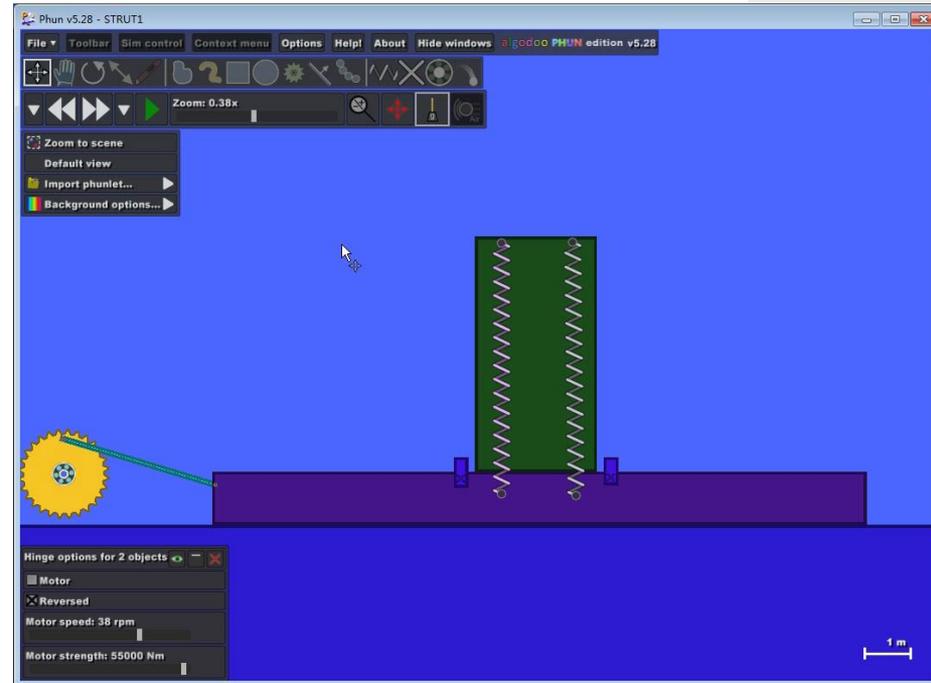
3. 功能可恢复结构

美国、日本、新西兰、欧洲等有很多工程应用



摇摆结构

Rocking



预应力自复位结构

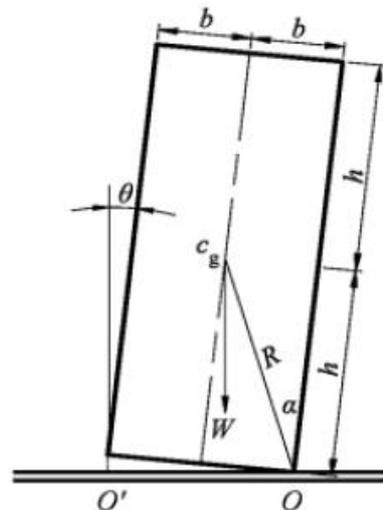
Self-centering



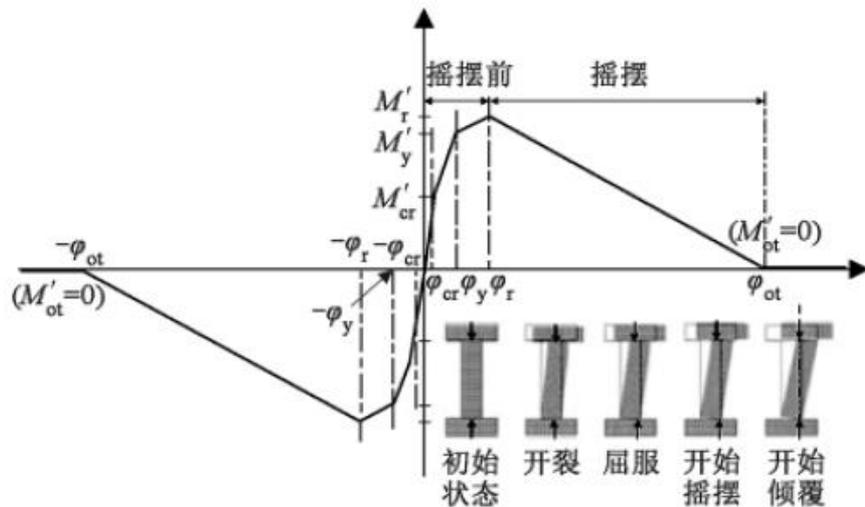


Housner对高位水槽的基础不经意做了弱化处理，允许整体结构发生摇摆(rocking)，大地震中免遭破坏。

类似的概念拓展到其他摇摆结构



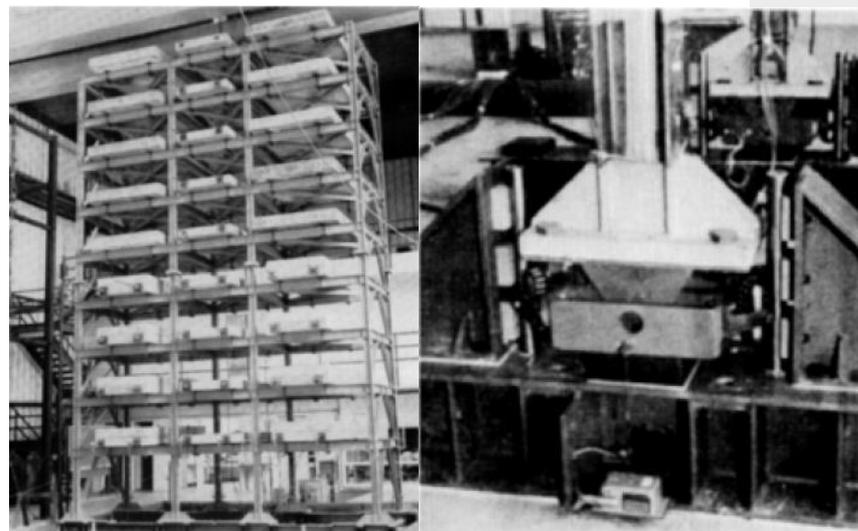
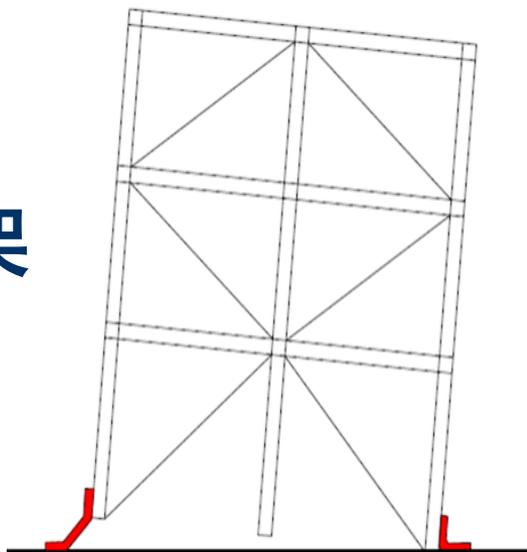
摇摆柱



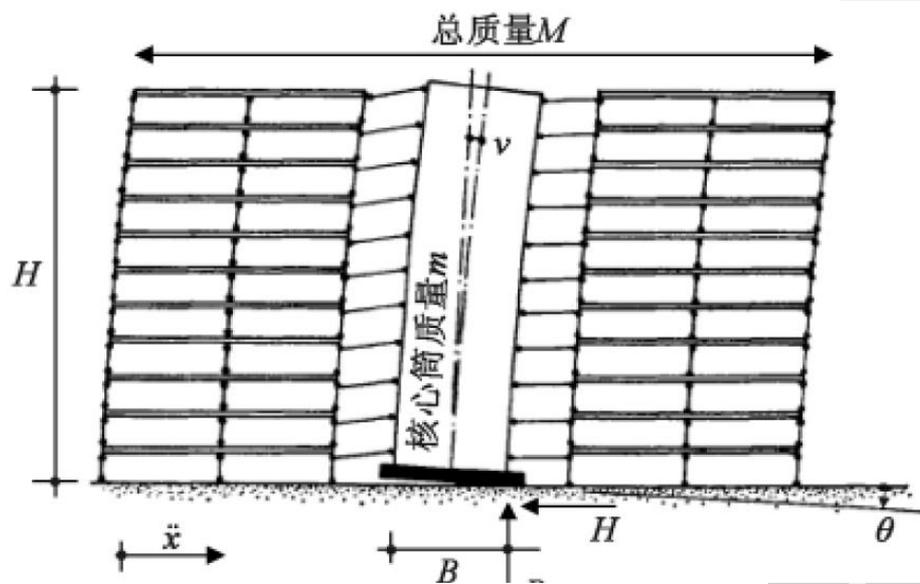
摇摆柱弯矩-曲率



摇摆框架



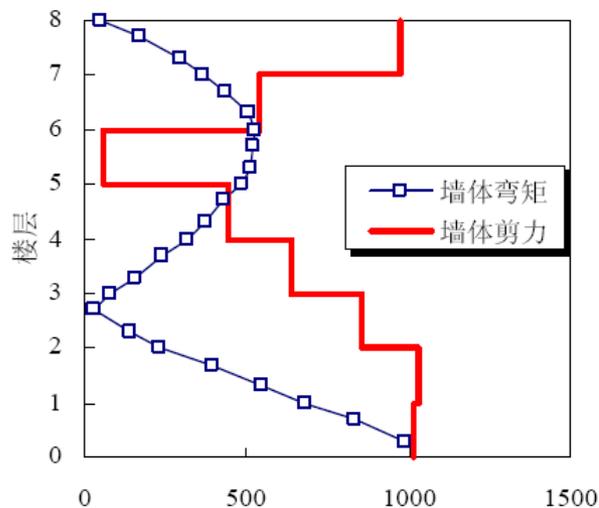
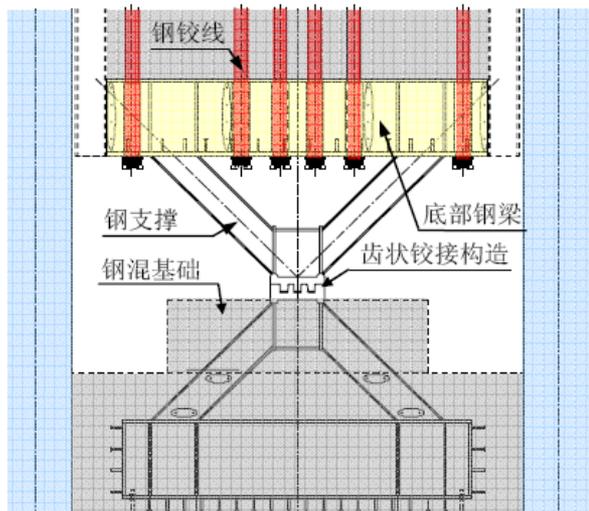
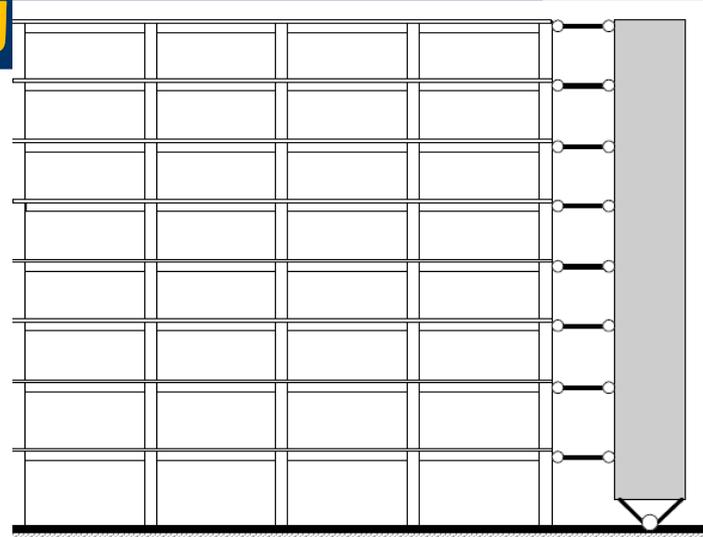
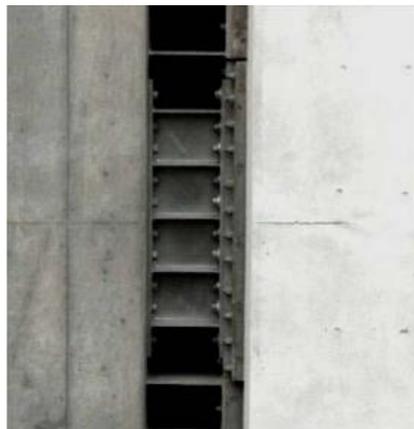
摇摆核心筒



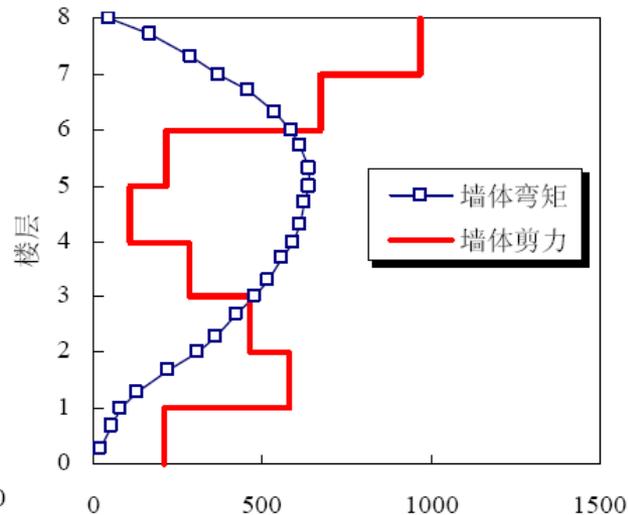


3. 功能可恢复结构 摇摆结构

框架-摇摆墙结构



(a) 传统剪力墙



(b) 摇摆墙

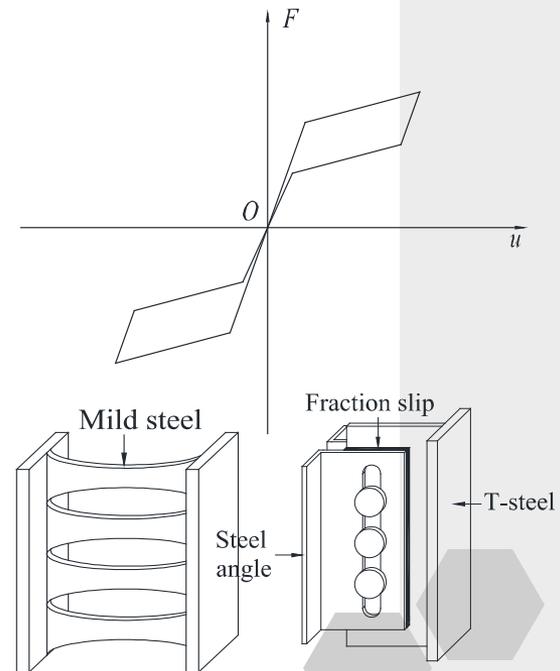
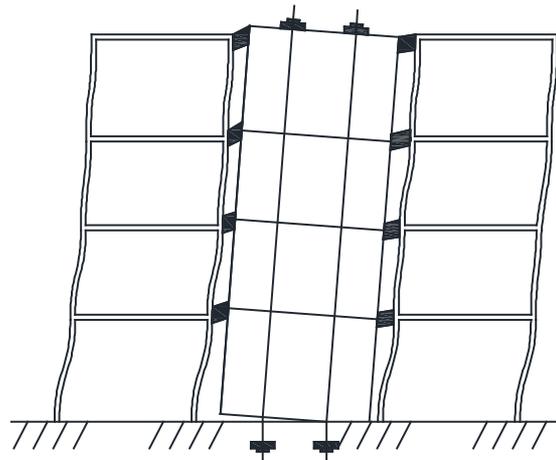
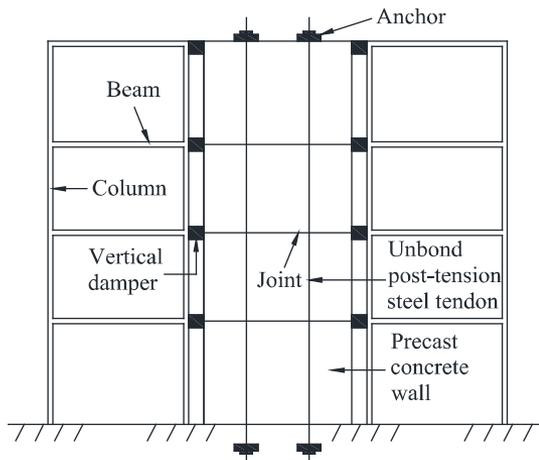
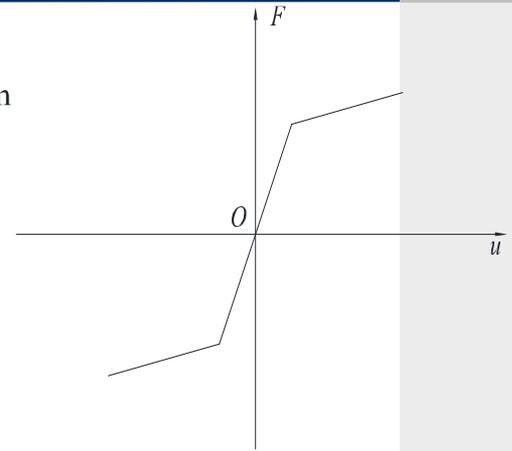
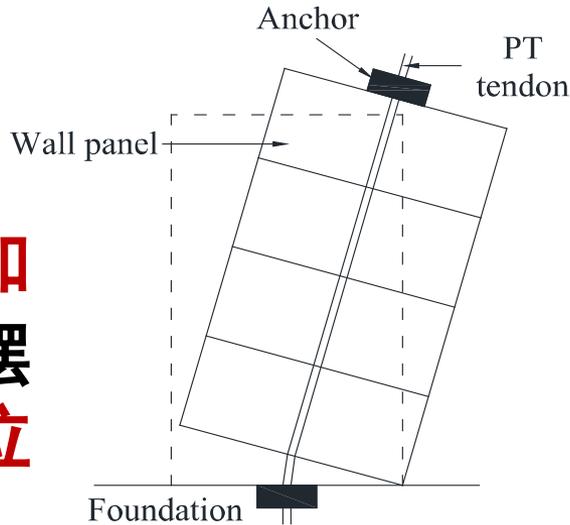


3. 功能可恢复结构

预应力自复位结构

自复位墙结构

摇摆结构基础上附加
预应力系统，墙体摇摆
过程中始终能够自复位

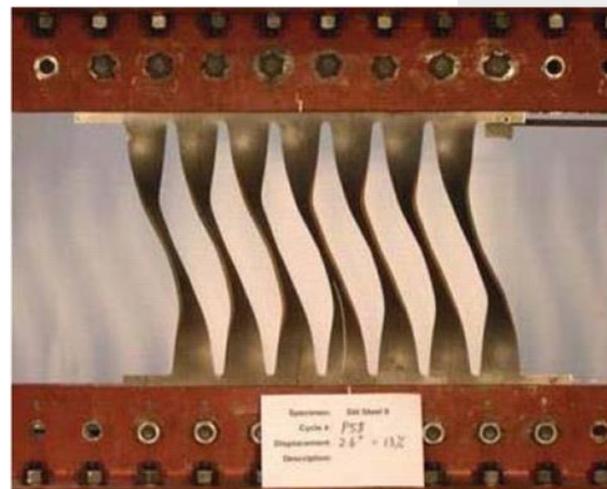
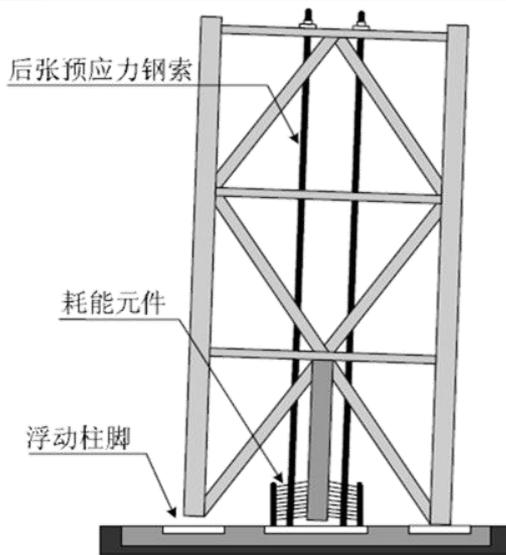
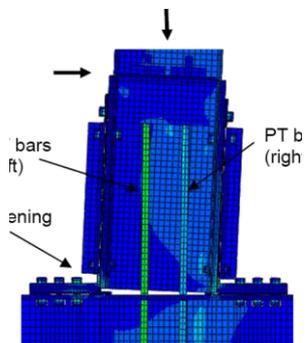




3. 功能可恢复结构

预应力自复位结构

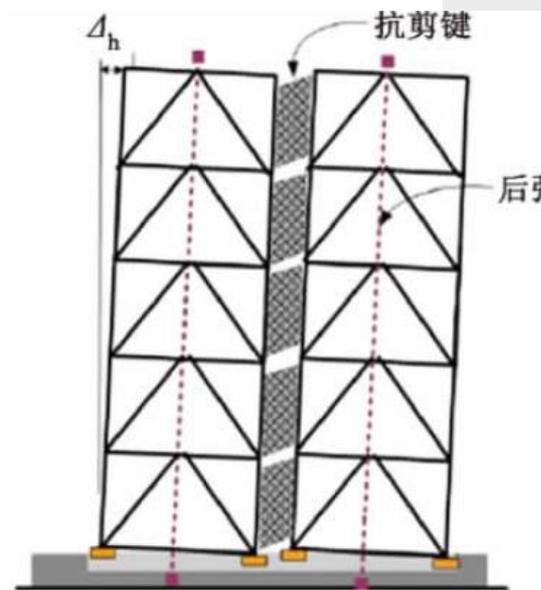
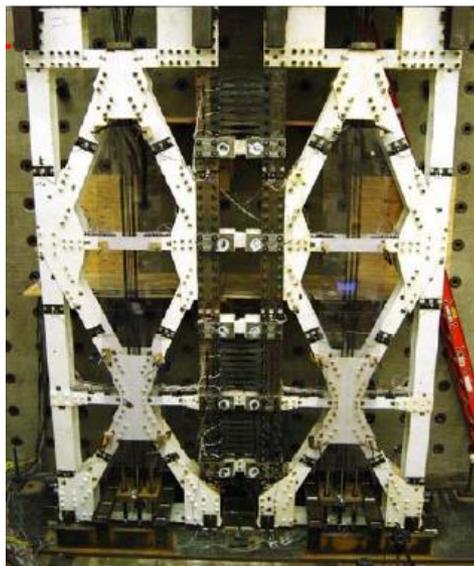
自复位柱-框架



主体框架摇摆

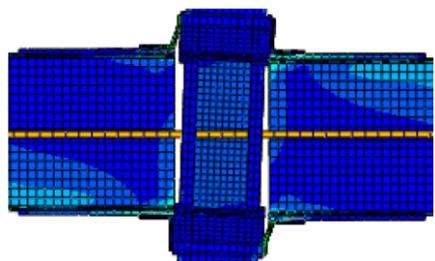
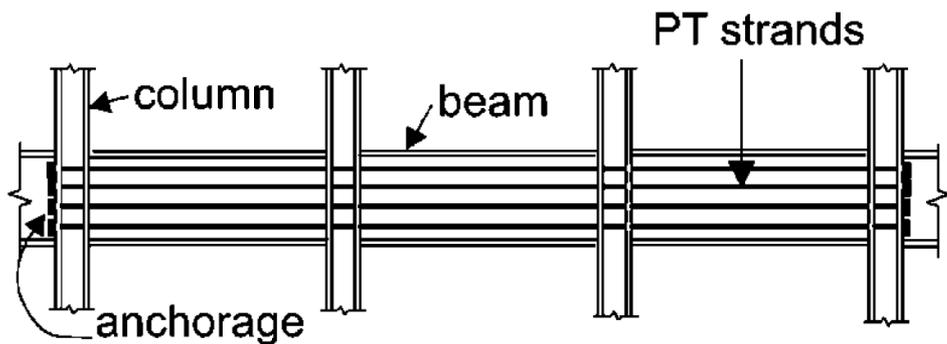
预应力筋复位

阻尼器耗能

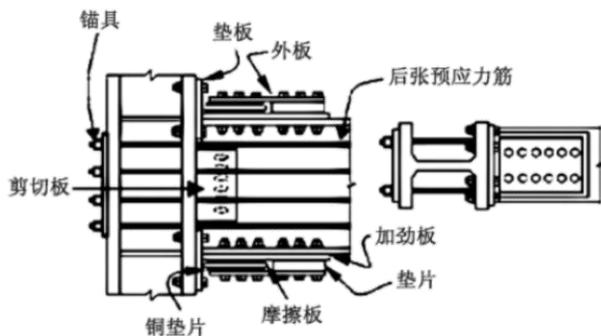




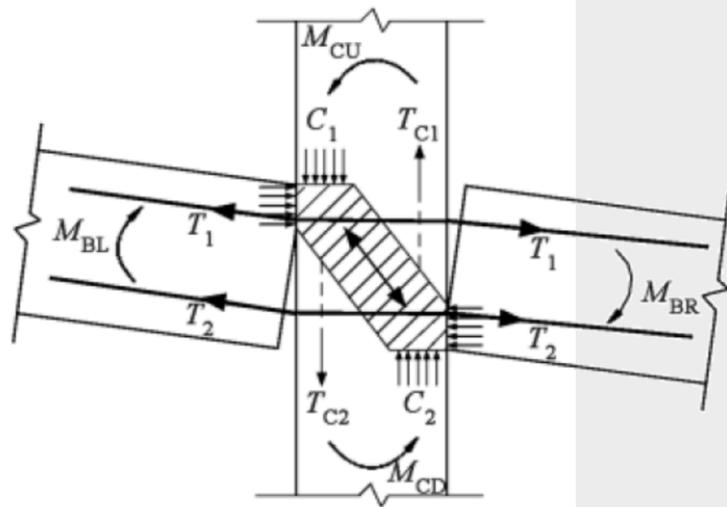
自复位梁柱节点



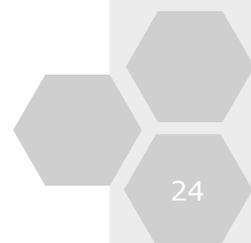
角钢



摩擦

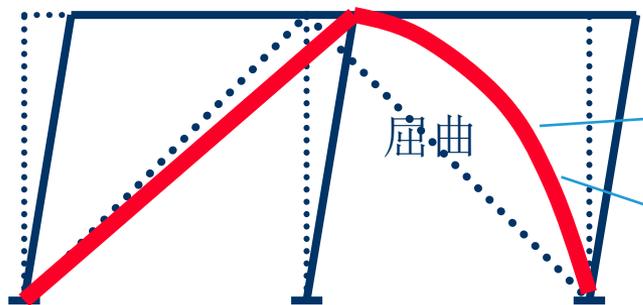


梁-柱截面张开间隙
预应力筋复位
角钢或摩擦板耗能

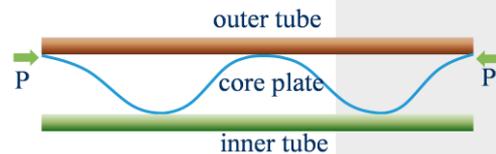




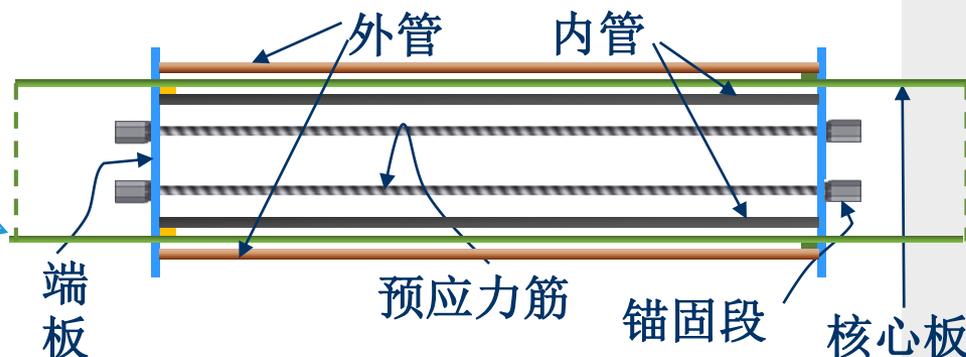
■ 自复位支撑



屈曲



Restrained Buckling



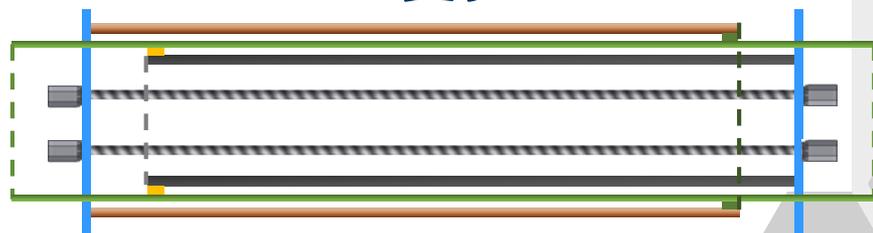
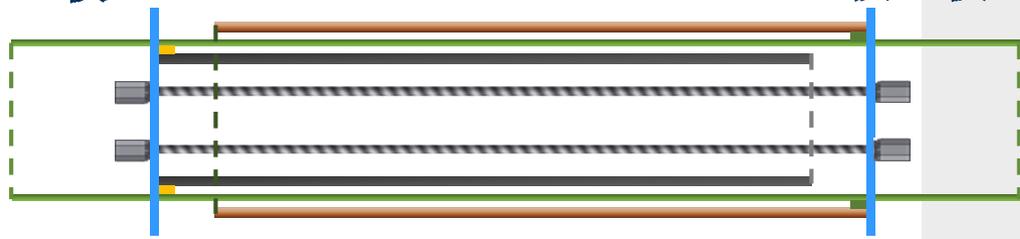
端板

预应力筋

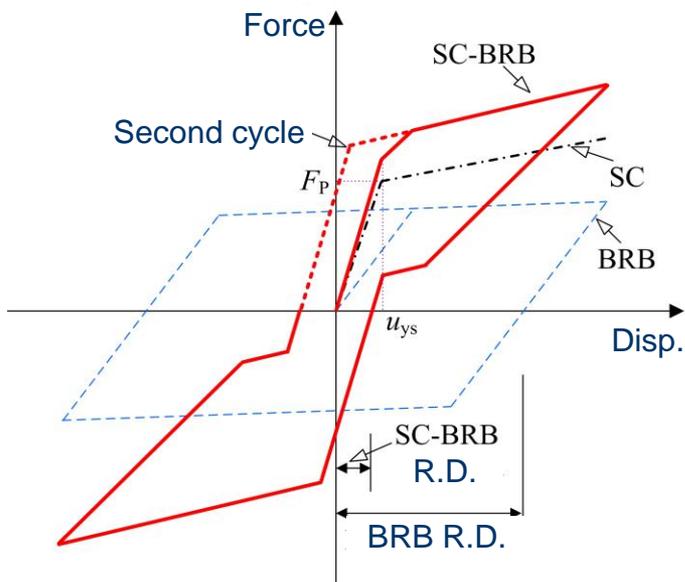
锚固段

核心板

受拉



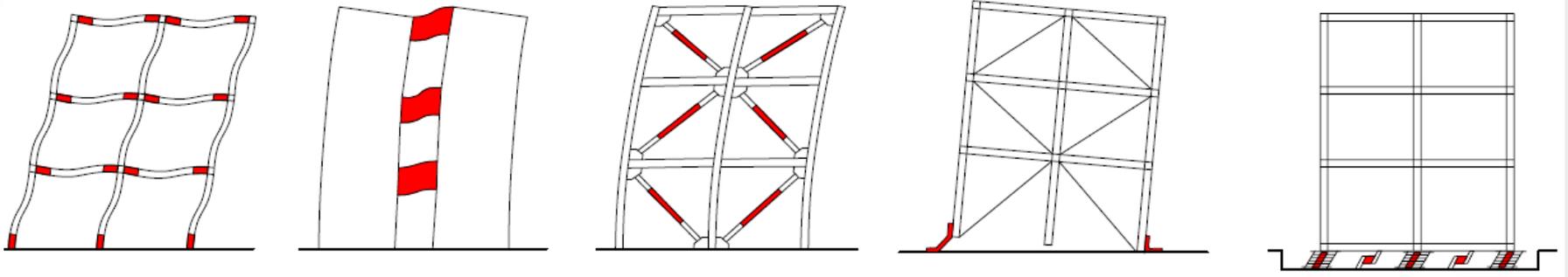
受压



SC-BRB滞回曲线



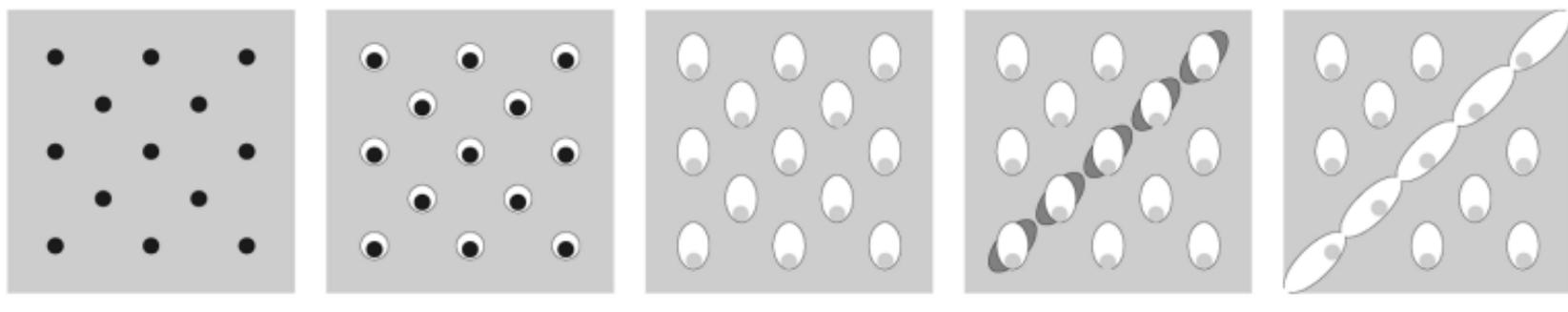
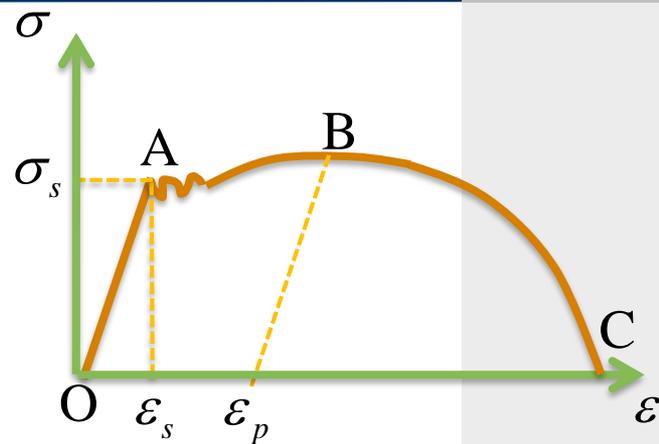
4. 思考



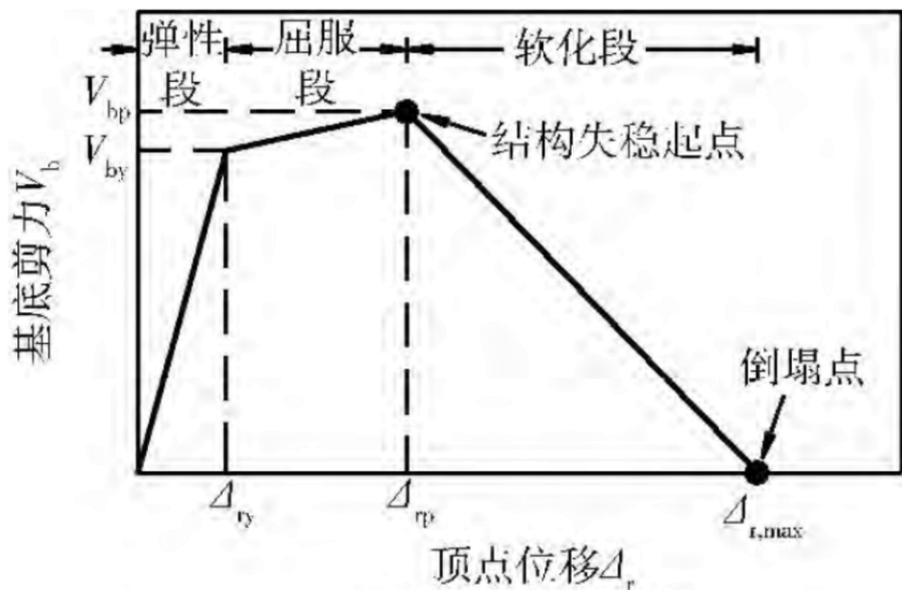
- ✓ 损伤不可避免，但希望尽可能按照预期，然而地震的随机性带来了挑战，因此要引入**损伤控制技术**！
- ✓ 与加强主体结构相比，弱化次结构(构件)或界面更易实现，且震后更易滑移，起到**抗震保险丝**作用！
- ✓ **功能可恢复结构**是有效的结构损伤控制机制，结构抗震设计由“**抗倒塌**”逐步向“**可恢复**”发展。

材料损伤的人生启示

内心中的空洞要及时用正确的方式填满，否则会导致人生的屈服甚至断裂！

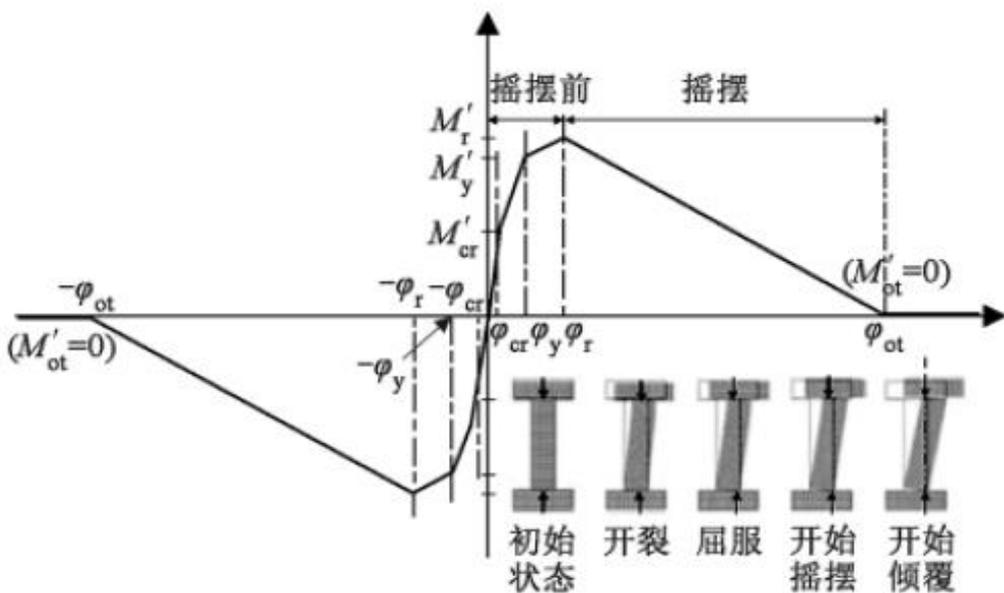


结构损伤的人生启示



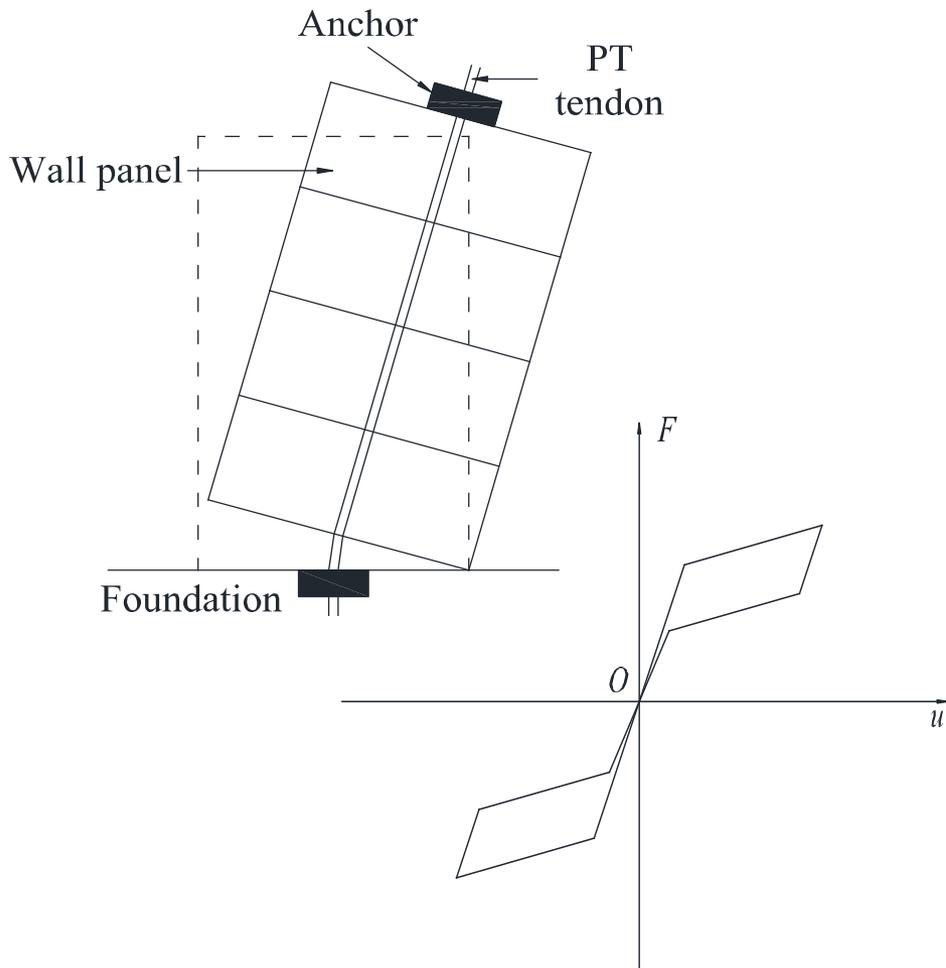
面对压力时，情绪上的负能量就是你人生的负刚度，累积到一定程度，足以毁灭你的人生！

摇摆结构的人生启示



随波逐流的人生或许
会省去很多烦恼，但
没有原则和底限的摇
摆，在突破临界点后
将会轰然坍塌！

自复位结构的人生启示



人生面对诱惑风险、
患难风雨时，难免摇摆，
但只要有信仰之绳、灵
魂之锚，就能坚守正道，
永不倒塌。



Resilience 韧性

祝同学们都拥有
强大的韧性
精彩的人生

