

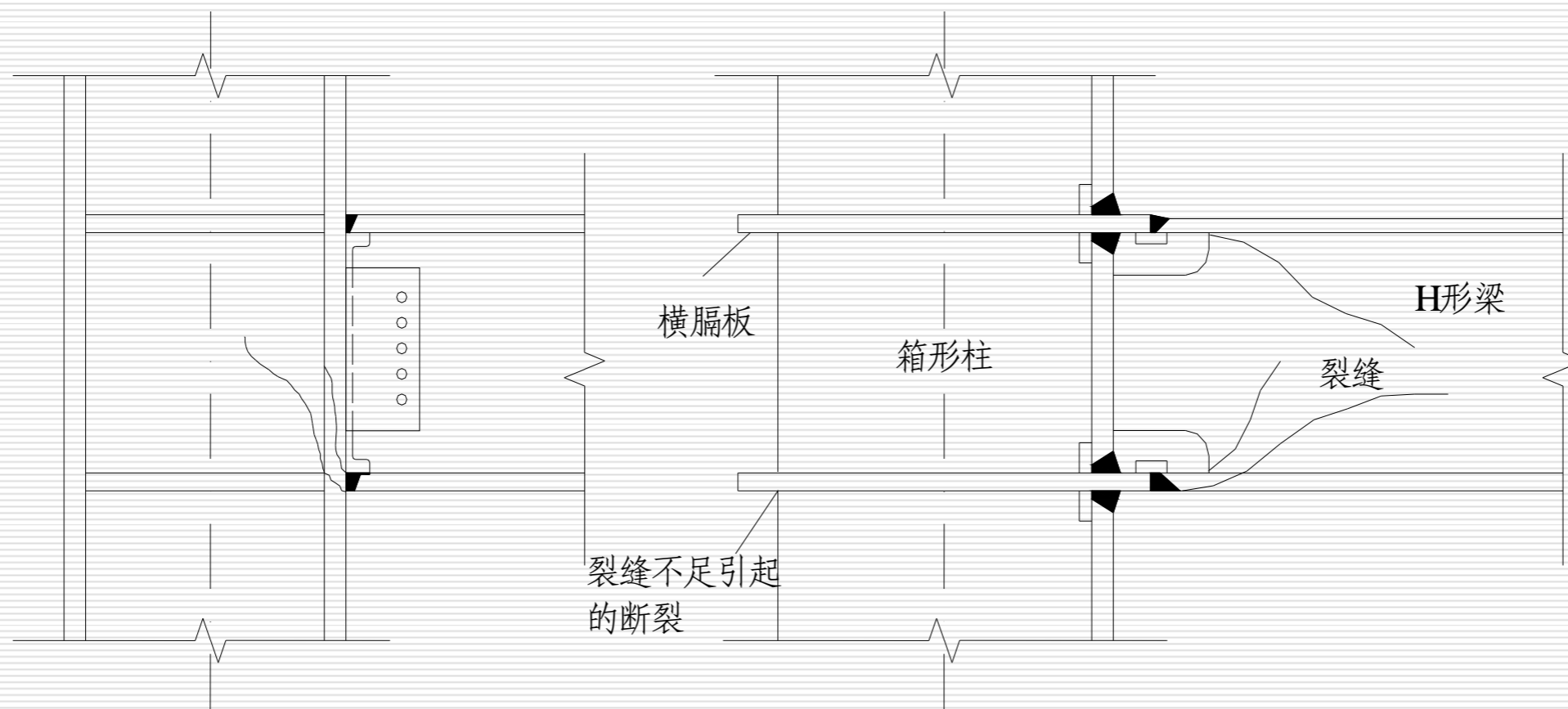
钢结构抗震的若干问题 及应对措施

李国强

同济大学

钢结构在地震中的破坏

- 梁柱连接节点破坏
- 支撑破坏



美国Northridge地震

日本阪神地震

梁柱刚性连接的典型震害现象

地震下刚性连接节点脆性破坏



- 普通支撑：地震下易屈曲破坏

→ 支撑防屈曲问题



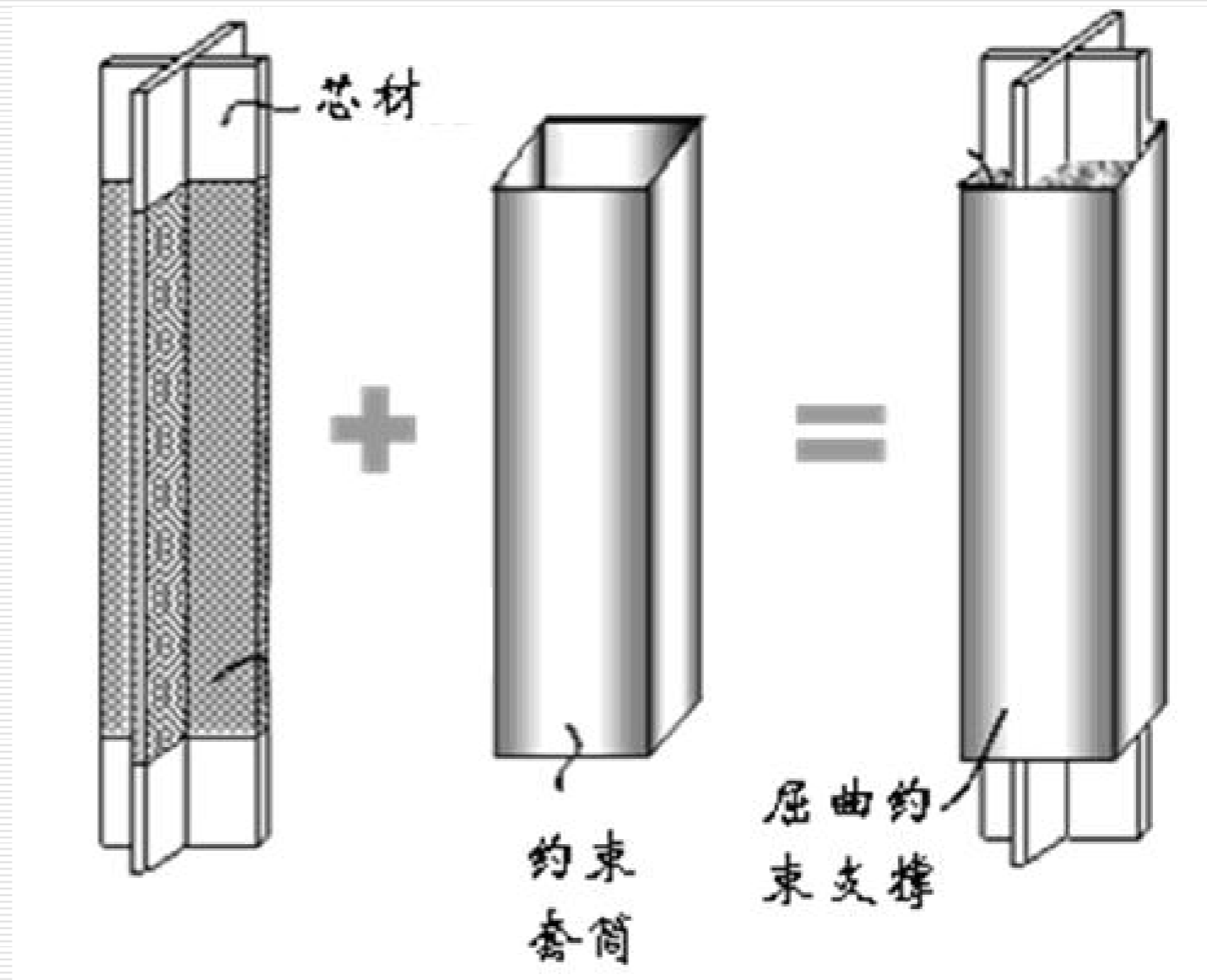
1995年, 日本阪神地震

2008年, 汶川地震

如何避免支撑破坏？

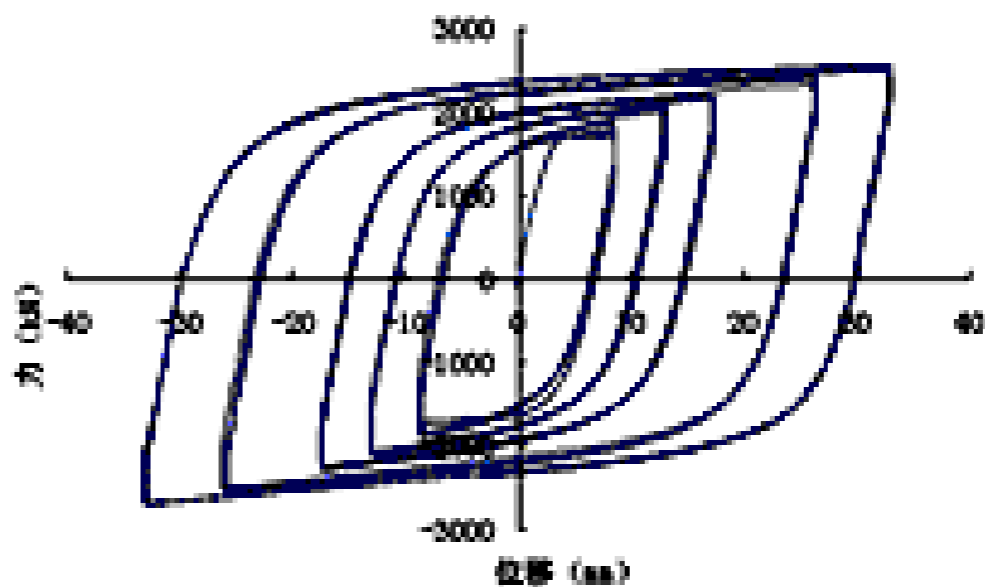
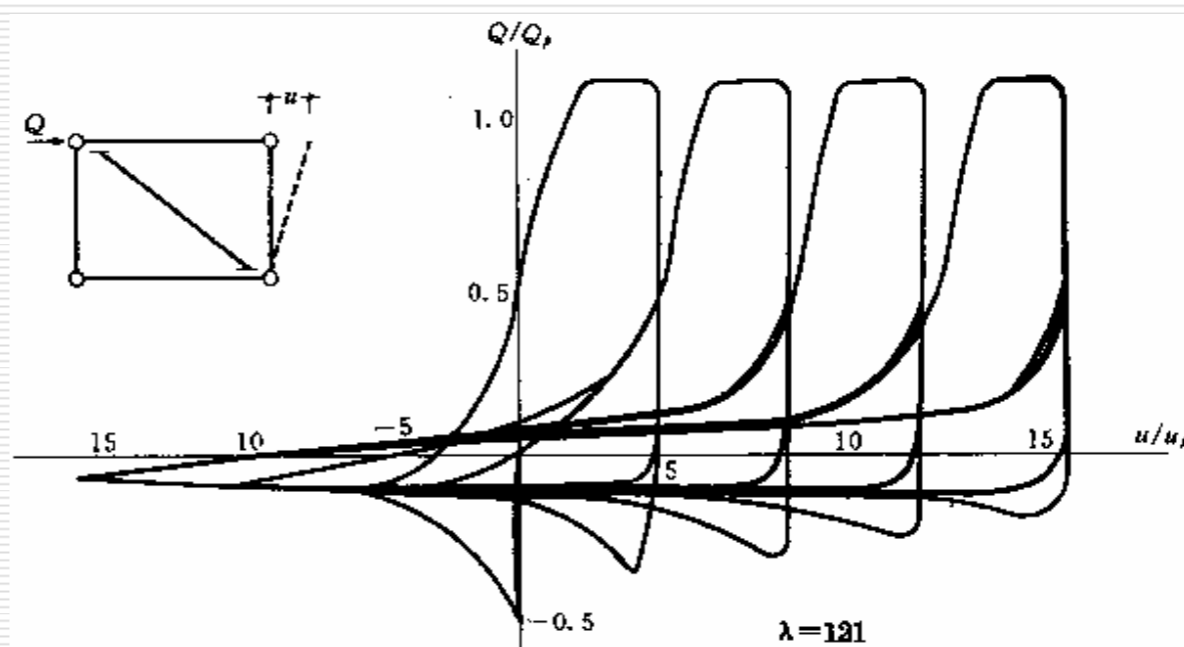
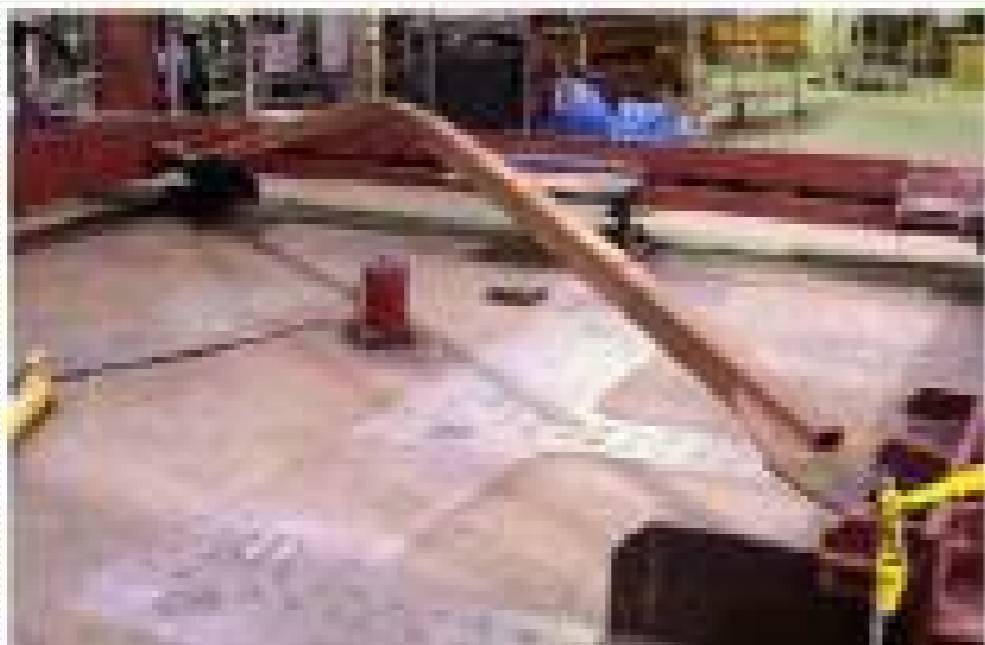
屈曲约束支撑的概念

通过外加套筒，约束支撑不发生屈曲。



屈曲约束支撑构件组成示意图

屈曲约束支撑的优点



屈曲约束支撑的优点

□ 承载力高

普通支撑轴向承载力设计值

$$N_b = \frac{\varphi Af}{1 + 0.35\lambda_n}$$

屈曲约束支撑轴向承载力设计值

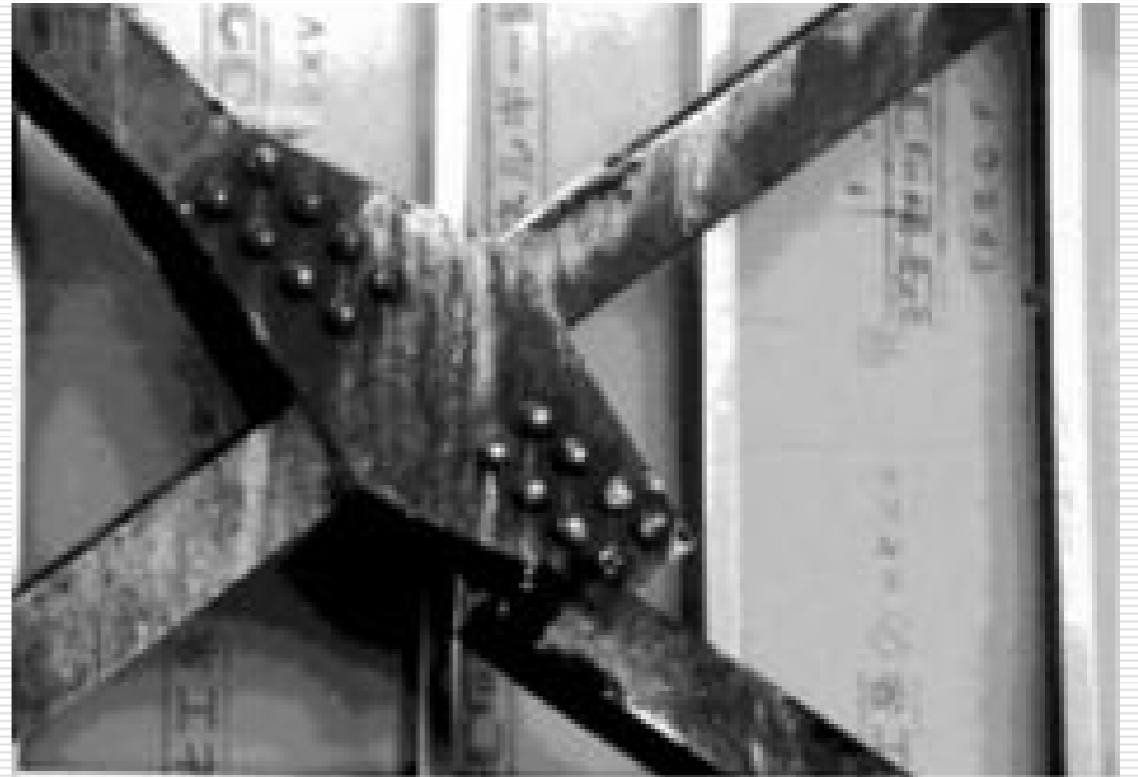
$$N_b = Af$$

□ 承载能力比普通支撑提高2-10倍

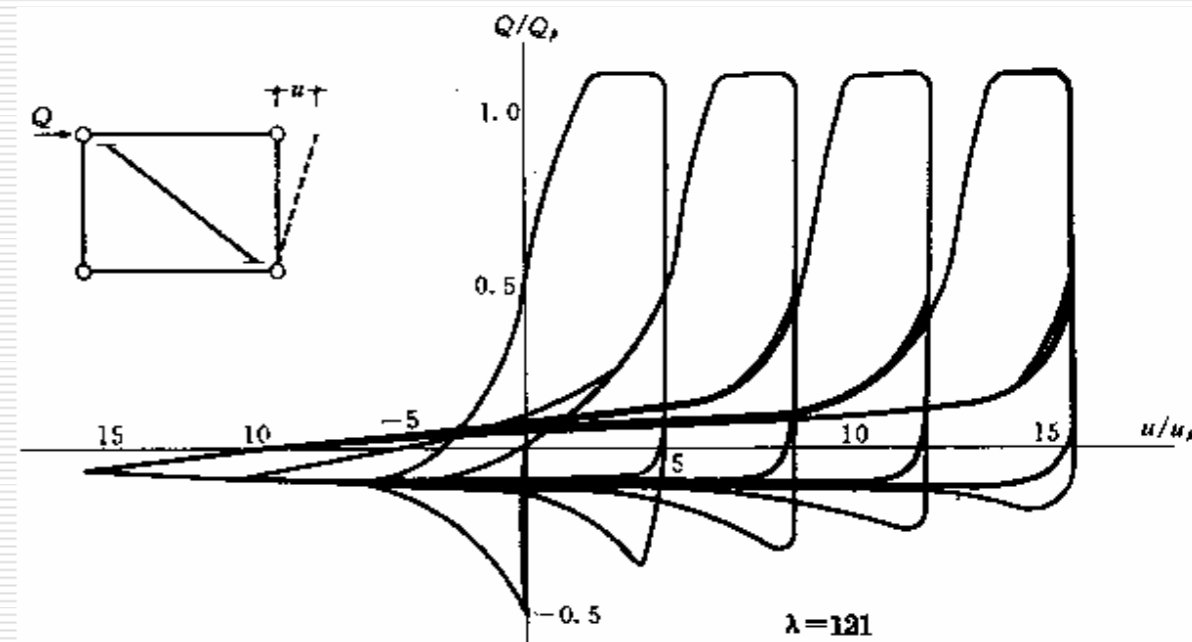
屈曲约束支撑的优点

□ 减小相邻构件受力

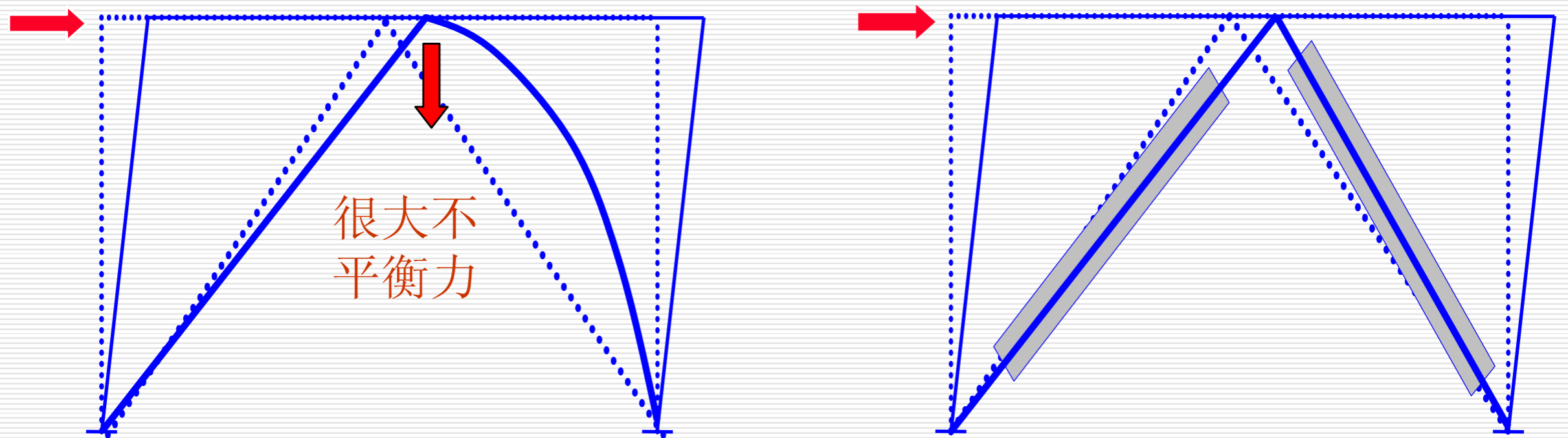
普通支撑受压屈曲，受拉与受压承载力差异很大，支撑的内力由**支撑受压承载力**控制，而与支撑相邻构件的内力由**支撑受拉承载力**控制。



屈曲约束支撑受拉与受压承载力差异很小，可大大减小与支撑相邻构件的内力。



屈曲约束支撑的优点

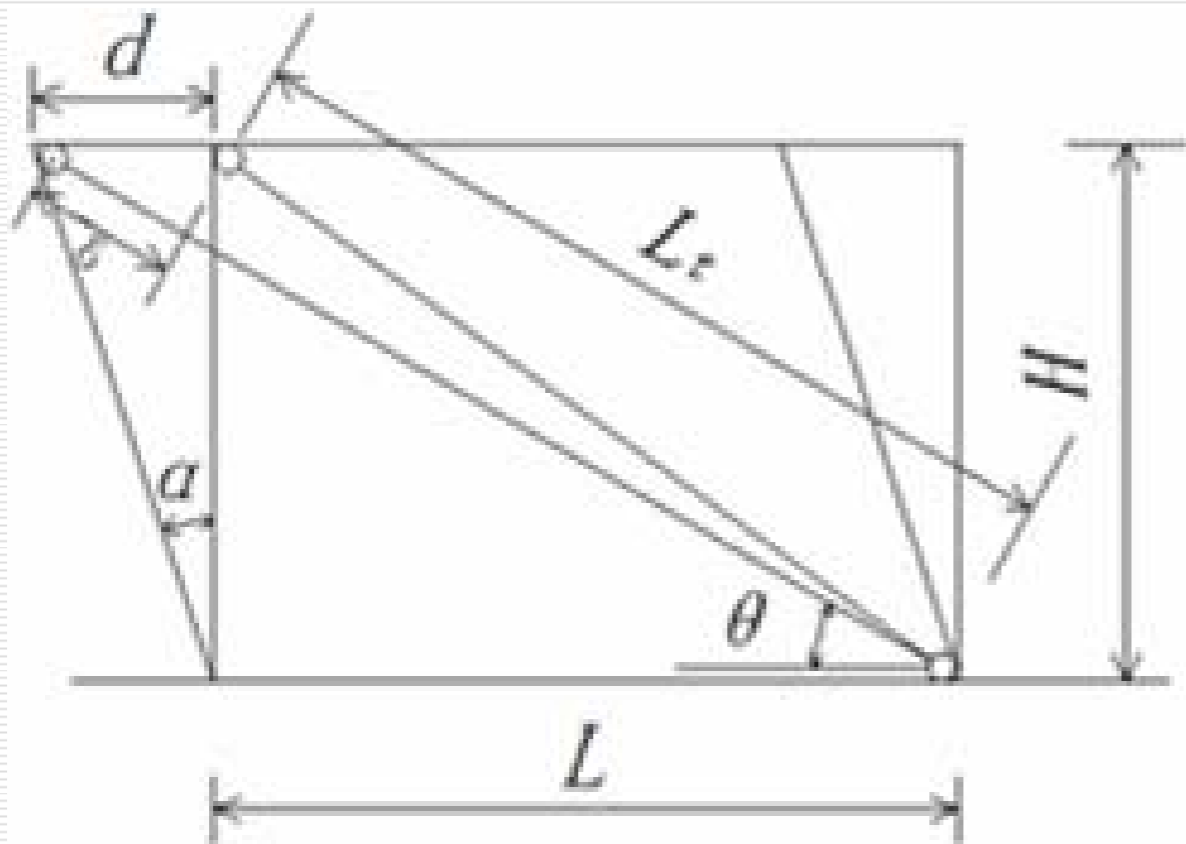


大大减小人字型支撑因受压支撑屈曲产生的不平衡力对梁的影响

屈曲约束支撑最大变形要求

中国《建筑抗震设计规范》
(GB50011) 结构层间要求

$$\frac{d}{H} \leq \frac{1}{50}$$



支撑最大容许轴向变形

$$\frac{\delta}{L_t} \approx \frac{d}{2H} = \frac{1}{100}$$

屈曲约束支撑最大累积塑性变形要求

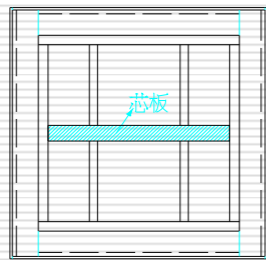
美国钢结构协会钢结构抗震规范规定ANSI/AISC
341-05

循环加载累积轴向塑性变形 $\geq 200 \Delta_{by}$

Δ_{by} 为支撑轴向屈服变形

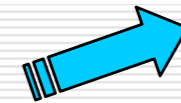
国产屈曲约束支撑研制

- **TJ-I型BRB支撑：纯钢约束型**

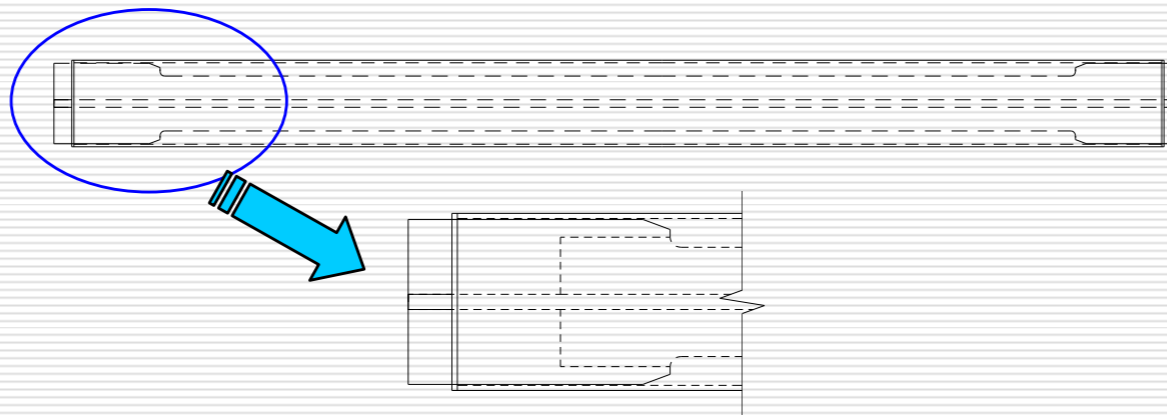
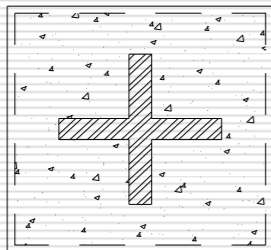


构造难点：

连接段不压折



- **TJ-II型BRB支撑：填充约束型**



TJ型屈曲约束支撑试验



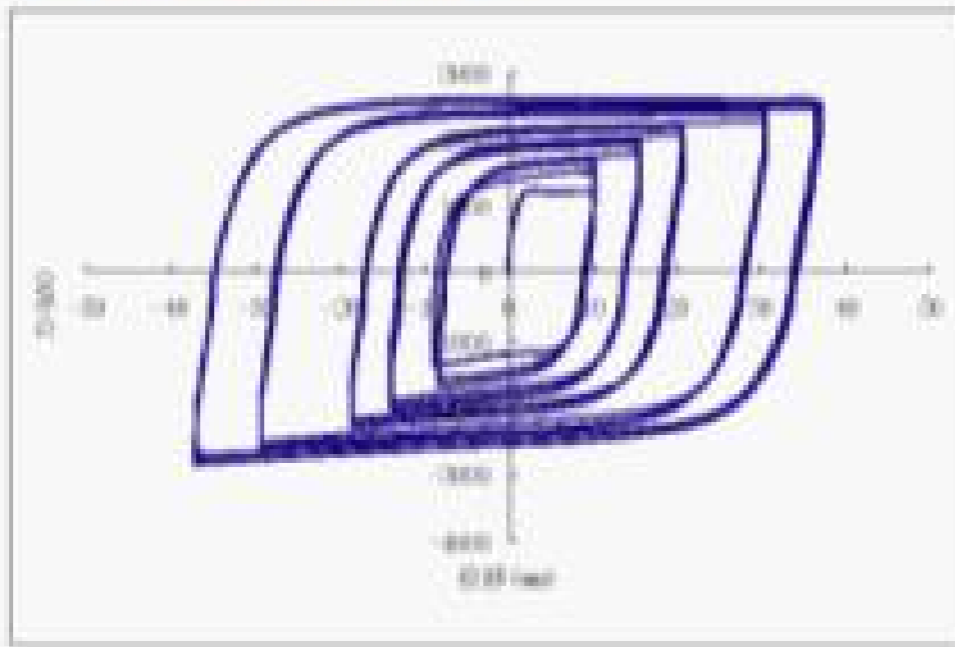
TJ-I型试验



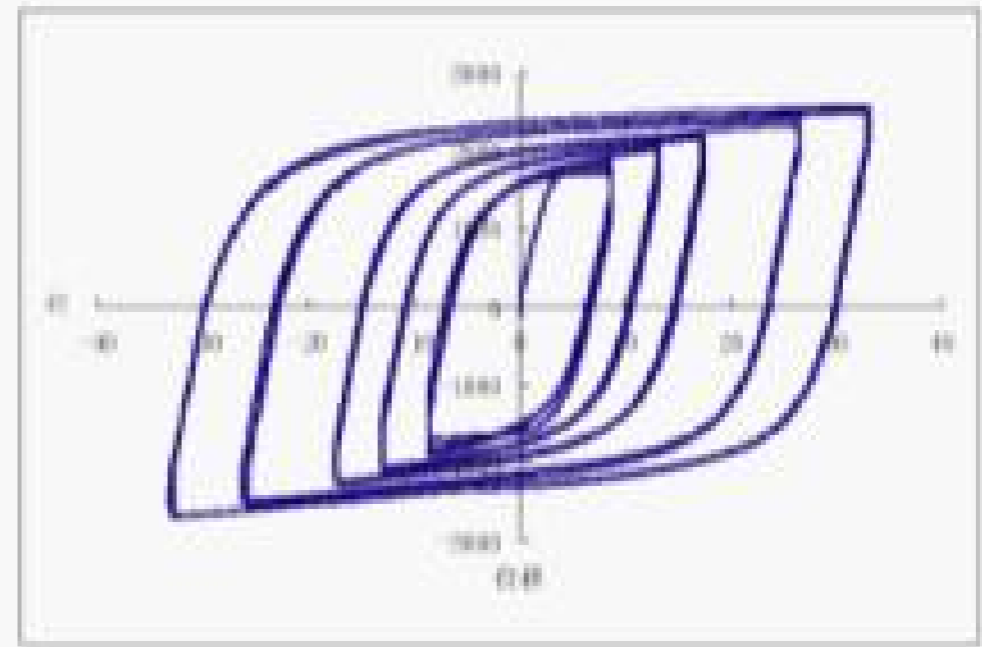
TJ-II型试验

TJ型屈曲约束支撑试验结果

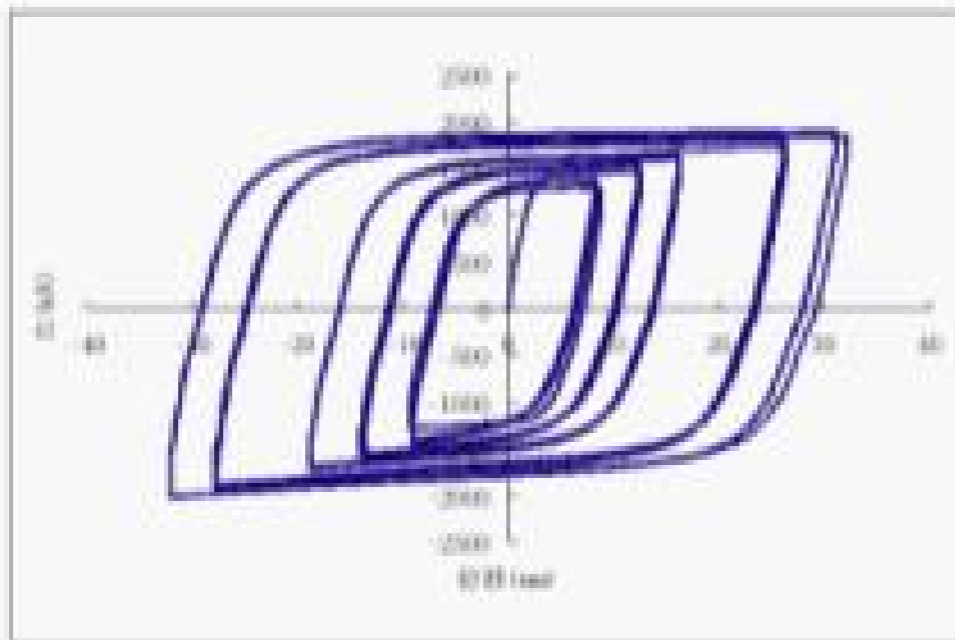
产品实验曲线：



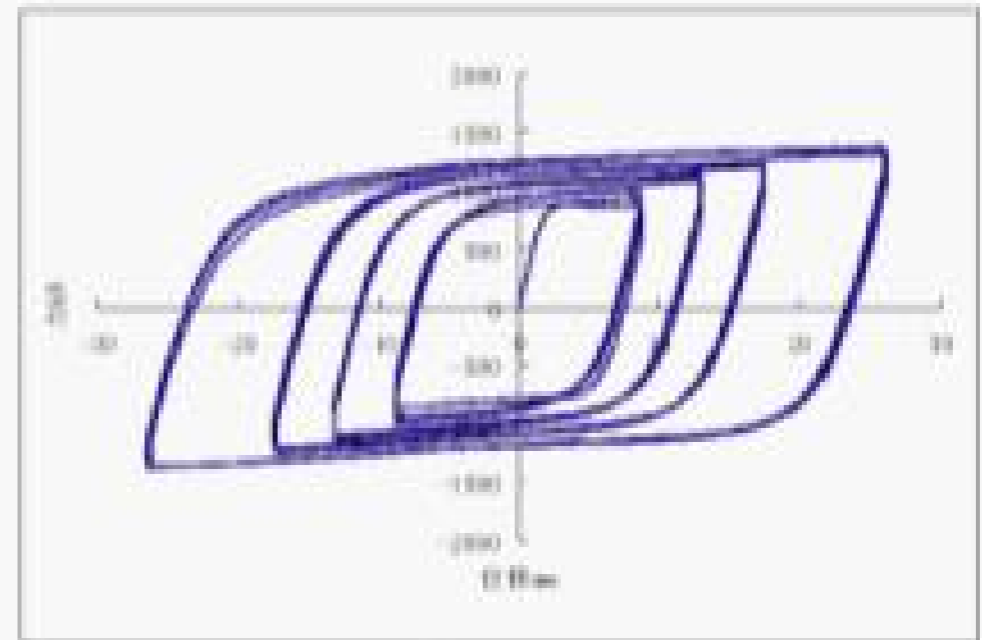
BLY160



Q195



BLY225



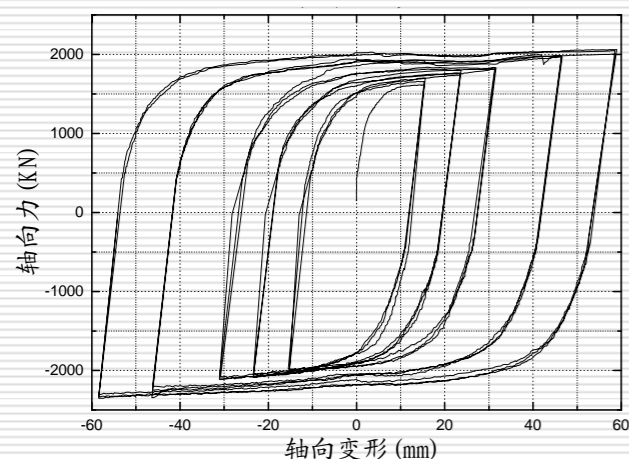
Q235

TJ型屈曲约束支撑试验结果

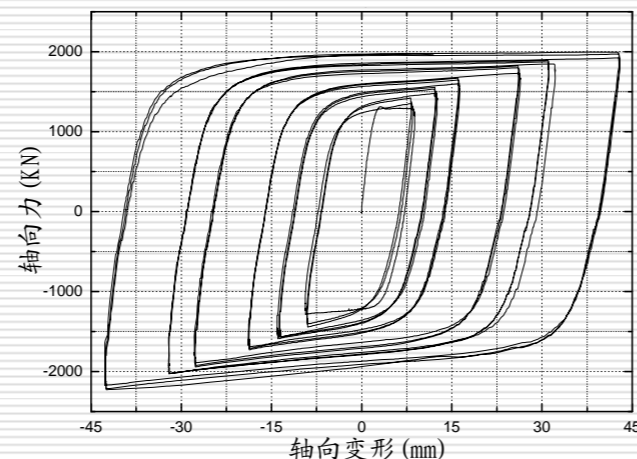
序号	芯板材料	屈服承载力 (t)	最大相对变形	相当于层间位移角	最大拉力 (t)	最大压力 (t)	应变强化系数	屈服位移 D_y (mm)	累计塑性变形 ($\times D_y$)
1	BLY160	121	1/80	1/40	256	281	2.12	1.45	842
2	Q195	172	1/80	1/40	251	266	1.46	2.77	361
3	BLY225	130	1/80	1/40	185	199	1.42	2.00	483
4	Q235	87	1/100	1/50	136	136	1.56	1.73	376
5	BLY225	710	1/80	1/40	927	1105	1.30	9.07	337

TJ型屈曲约束支撑与境外产品对比

技术、经济指标	境外产品			本项目产品
	日本	美国	台湾地区	
最大变形能力	L/100	L/100	L/100	L/80
最大累积塑性	视需要定	200 δy	200 δy	> 200 δy
最大屈服承载力	≥ 1000 吨	< 1000 吨	< 1000 吨	≥ 1000 吨
产品价格	高	高	较高	低一半
供货时间	较慢	慢	较慢	快一倍



日本新日铁支撑



TJ型支撑

性能与境外产品相当，
部分指标的要求更高，
价格低，供货周期短。

应用总况

TJ防屈曲支撑的应用：**已在90多个工程应用**

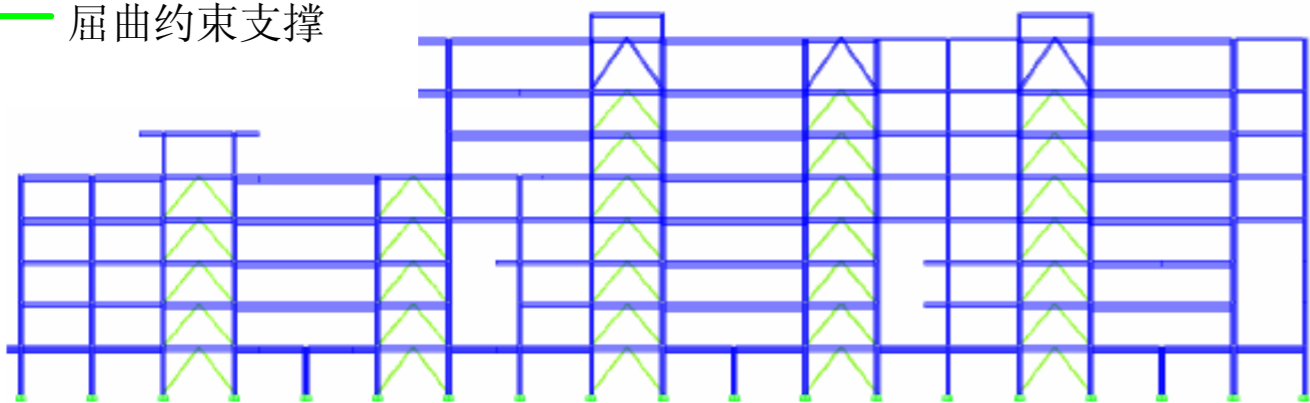
	部分应用工程的名称	建筑面积m ²	支撑数量	承载力t
1	上海世博中心	15.5 万	108	130
2	上海虹桥交通枢纽	150 万	24	1000
3	上海东方体育中心	16.4 万	28	700
4	阿富汗Marriott酒店	3 万	64	400
5	京沪高铁天津西站站房	23万	48	230
6	玉树州红旗小学灾后重建	1.8万	12	130
7	山西图书馆	5 万	82	700
8	武汉保利广场	14万	16	400
9	兰州云天皇冠酒店	10 万	108	840

上海世博中心

- 替代了日本进口产品
- 采用了108根TJI型防屈曲支撑
- 降低工程用钢量约2000吨
- 节省钢结构部分造价2400万元



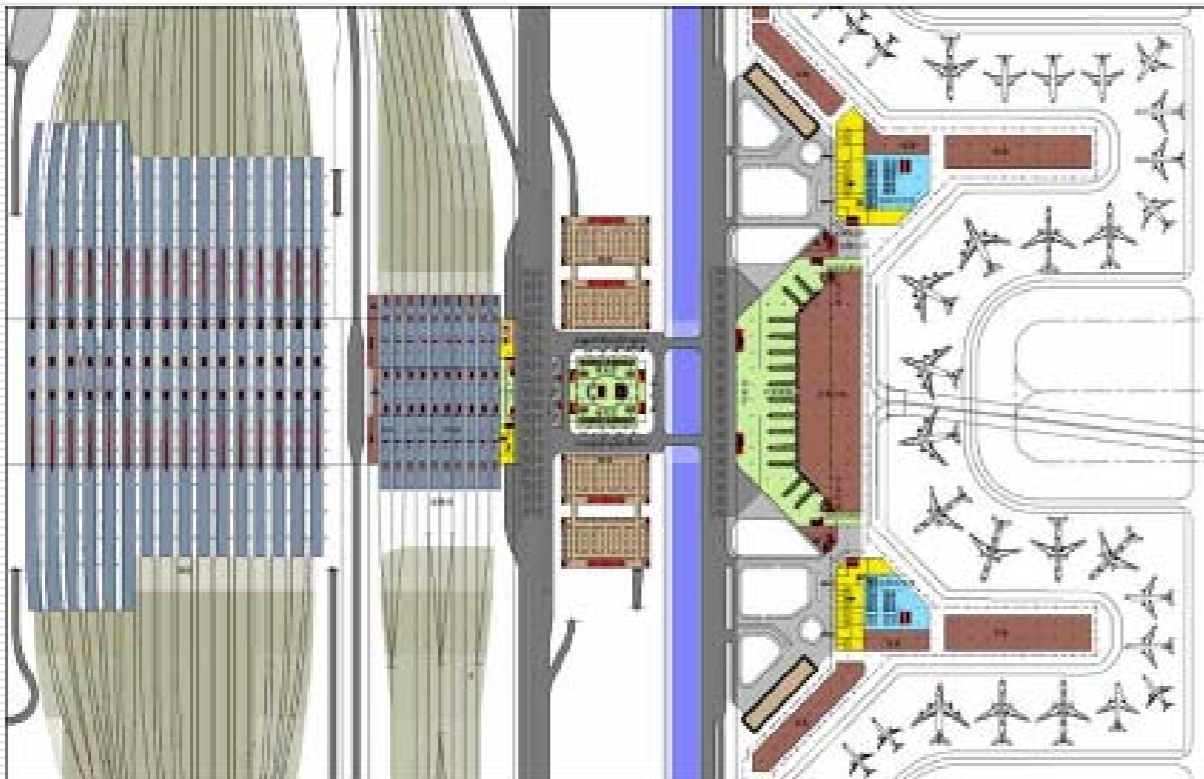
— 屈曲约束支撑



上海虹桥交通枢纽

(总建筑面积: 150万m²)

- 采用了24根TJII型防屈曲支撑
- 支撑屈服承载力1000吨、长度为17m, 世界最大防屈曲支撑
- 节省工程造价700万元



东方体育中心

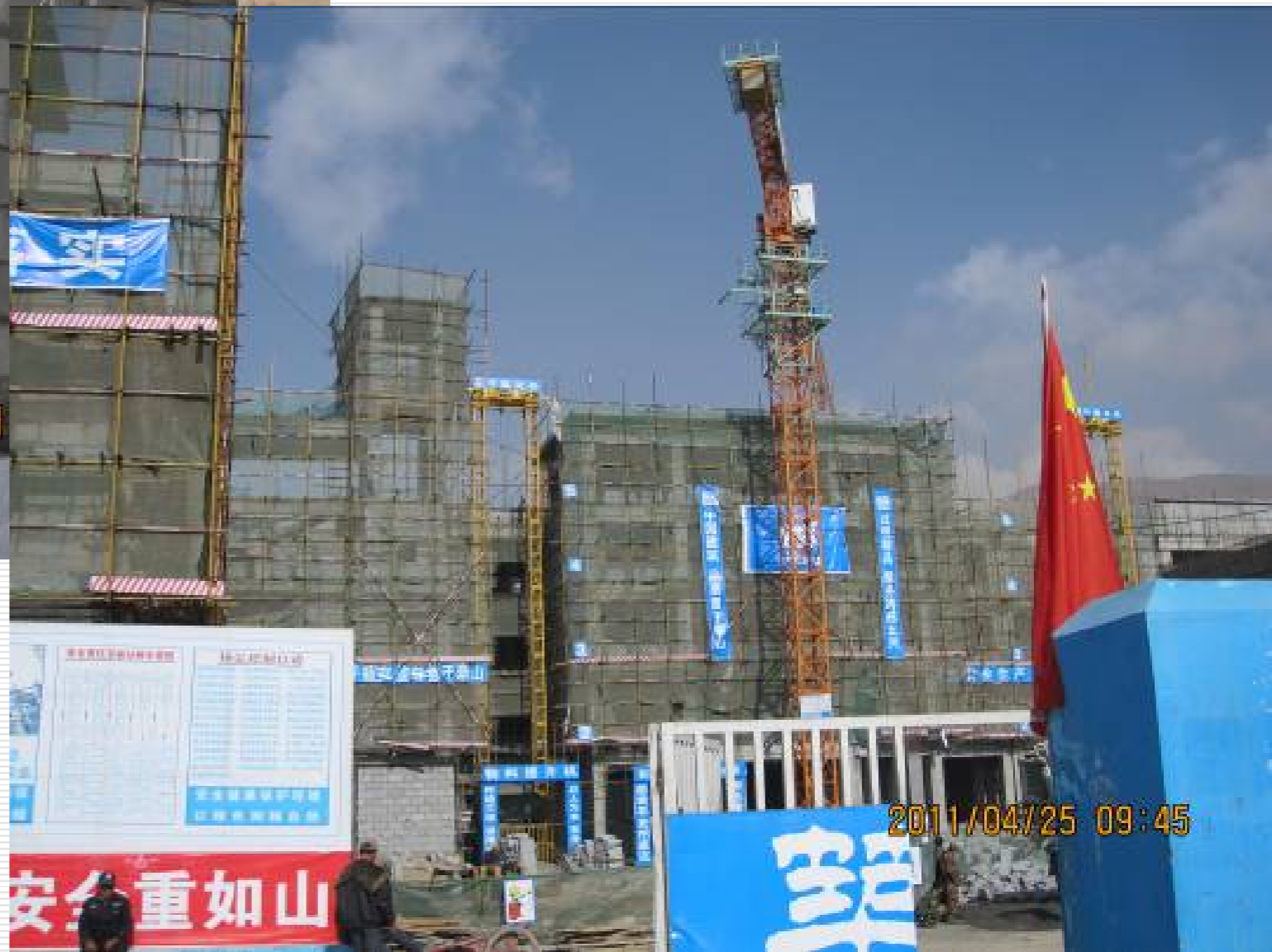


采用普通支撑： $\Phi 300\text{mm}$

采用屈曲约束支撑： $\Phi 200\text{mm}$

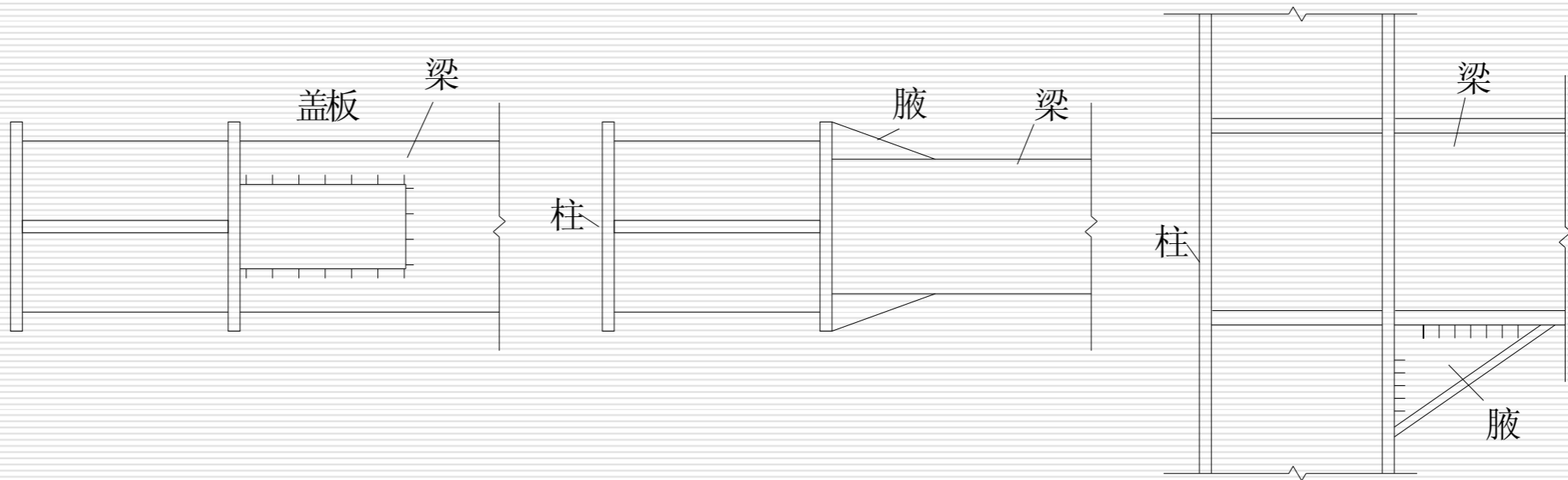


甘肃玉树红旗小学

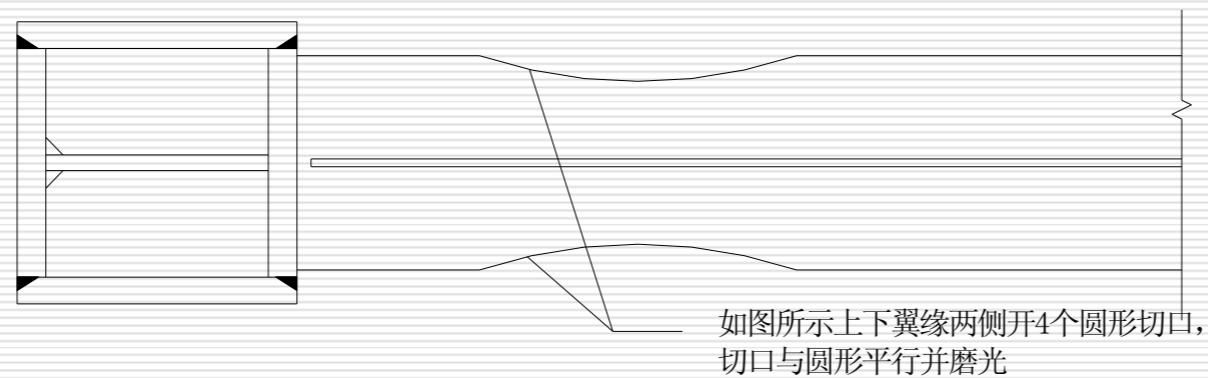


如何避免梁柱连接破坏？

● 改进形式

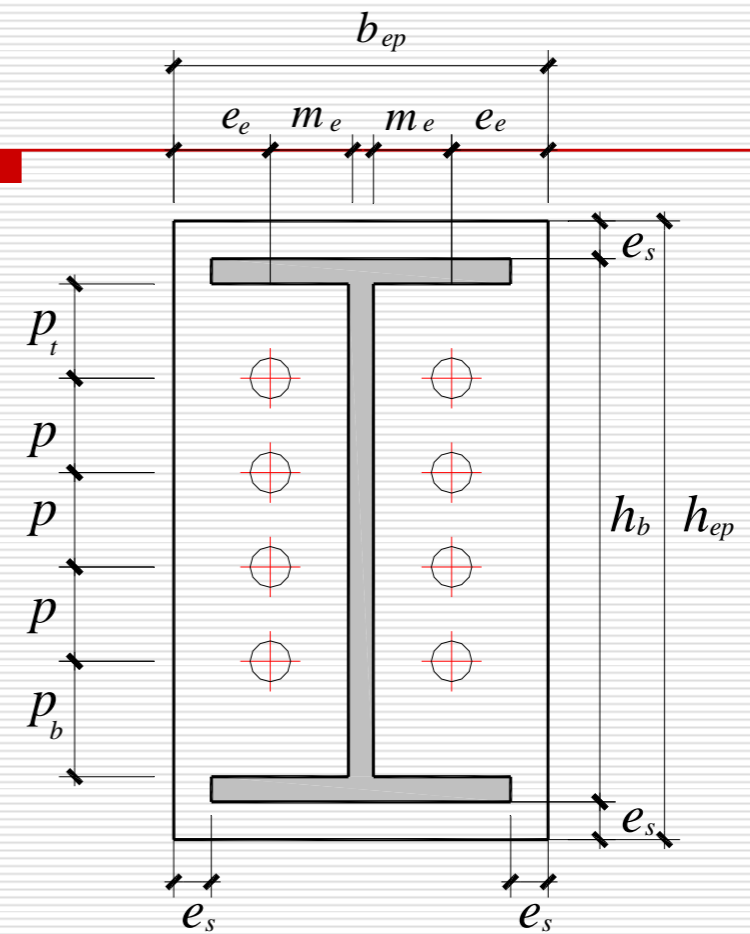
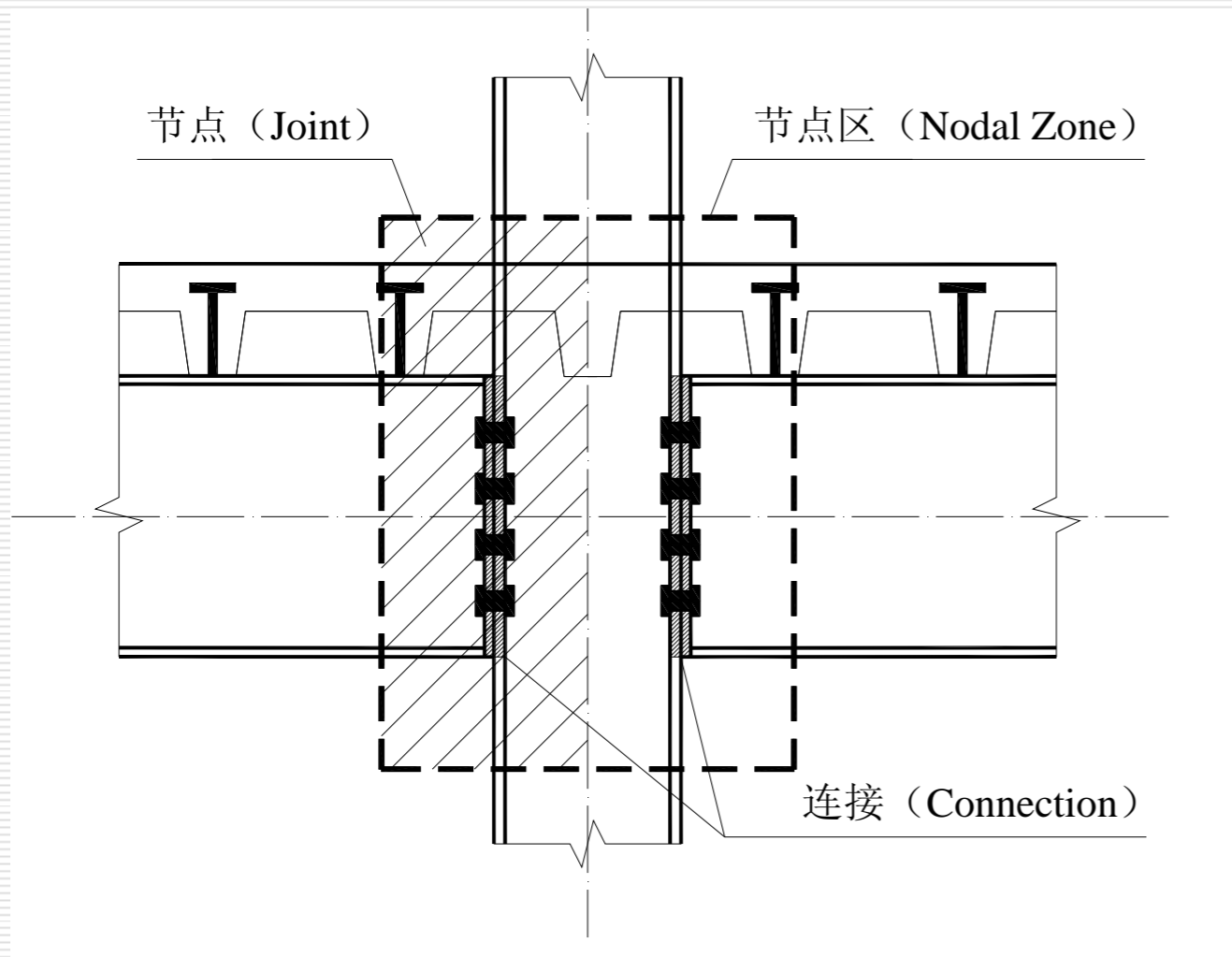


梁柱连接的加强



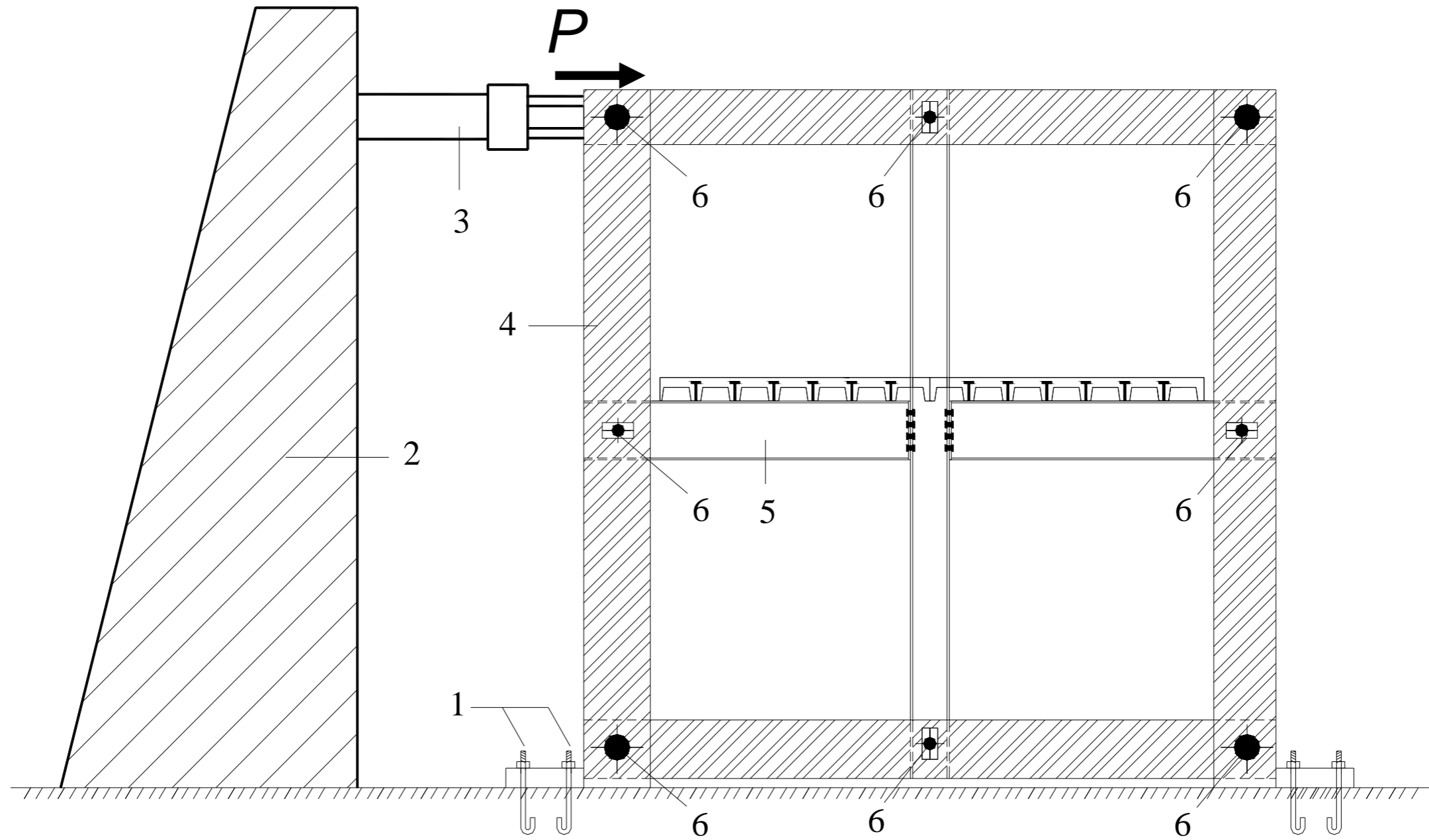
狗骨式设计

半刚性端板连接节点



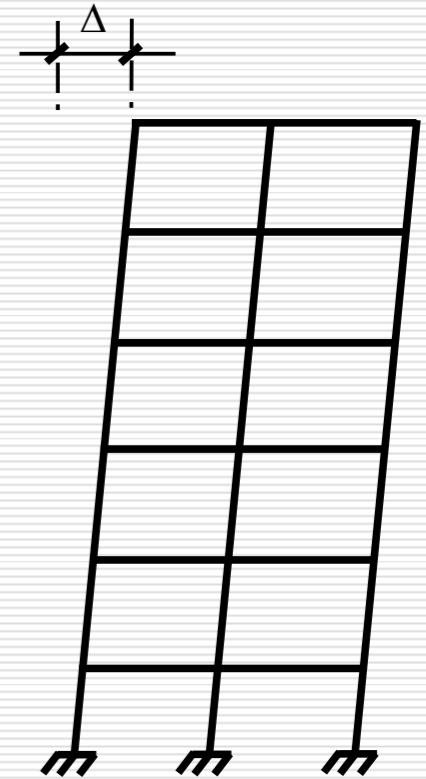
组合节点

半刚性端板连接试验装置图

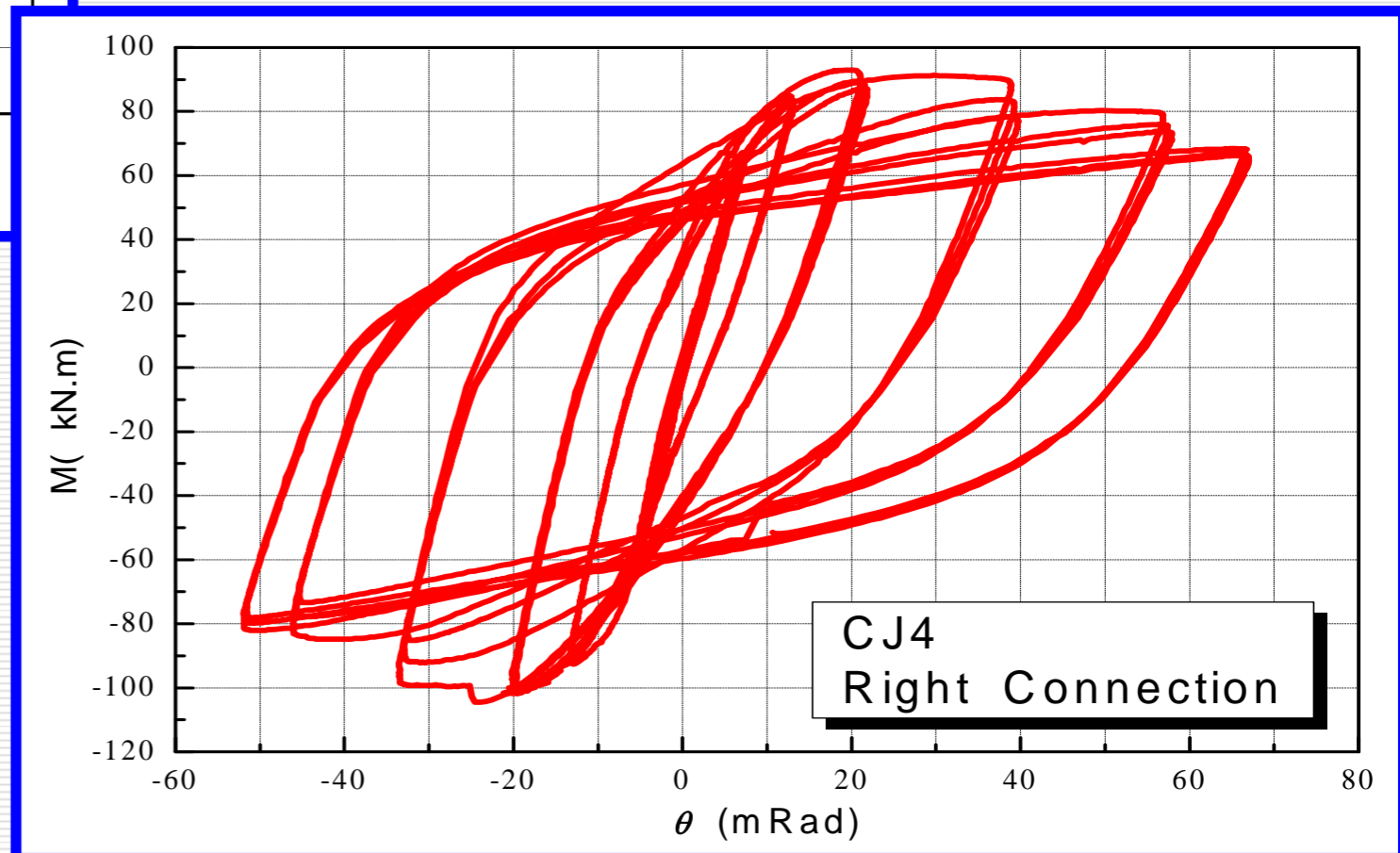
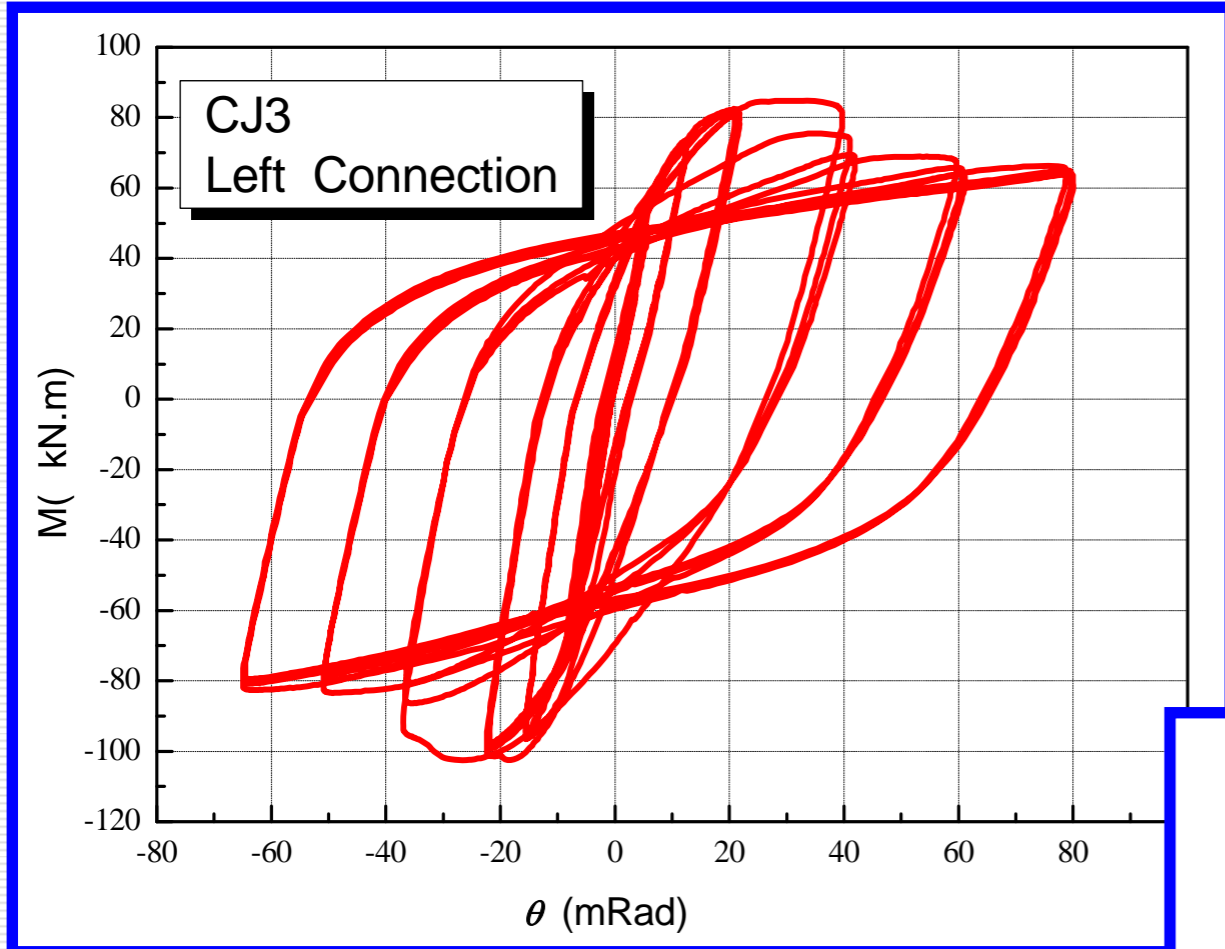


1、地锚螺栓；2、剪力墙；3、作动器；4、加载架；5、试件；6、圆轴（铰接）；

连接弯矩—转角关系曲线



层间位移角
 $\leq 1/50$

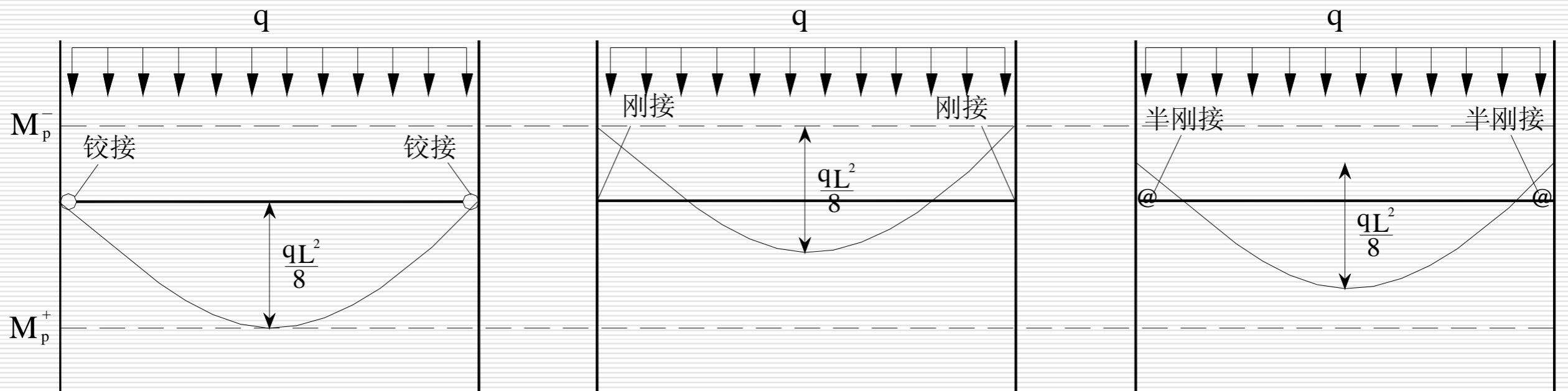
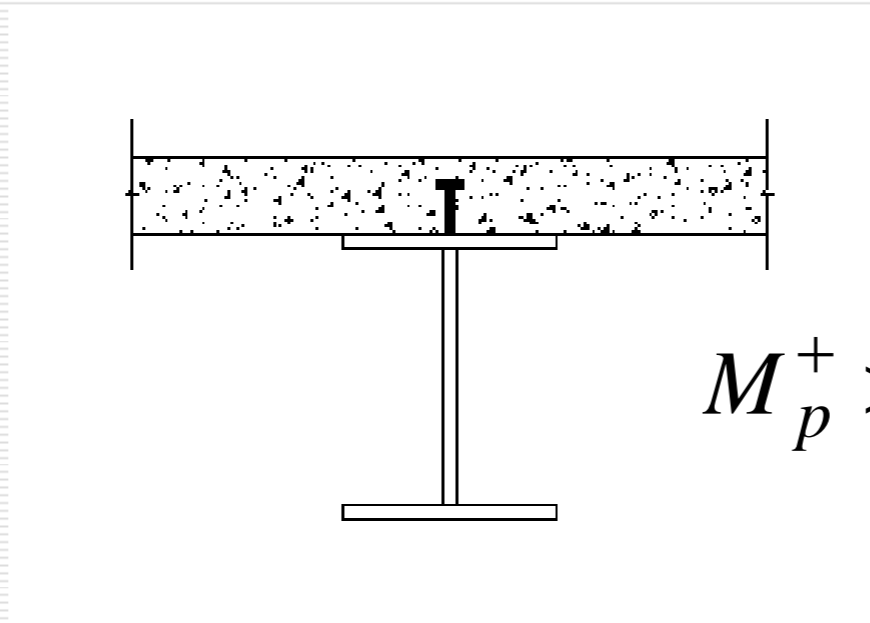


$\theta_a > 0.06\text{rad}$

规范要求: 0.03rad

节点延性破坏





均布荷载作用下不同端部约束梁的内力与组合梁承载力

三层两跨框架的经济性比较

结构形式	梁尺寸	柱尺寸	钢材用钢量(kg)	比较
铰接钢框架	HN450x200x9x14	HW200x200x8x12	4938	1.04
刚接钢框架	HN400x150x8x13	HW250x250x9x14	4756	1.00
半刚性连接钢框架	HN400x150x8x13	HW200x200x8x12	4047	0.85
铰接组合框架	HN350x175x7x11	HW200x200x8x12	3794	0.80
刚接组合框架	HN300x150x6.5x9	HW250x250x9x14	3956	0.83
半刚性连接组合框架	HN300x150x6.5x9	HW200x200x8x12	3247	0.68

现行规范对钢结构抗震不利

抗震设计原则

- 小震不坏 —— 验算结构弹性变形和承载力
- 中震可修 —— 构造要求
- 大震不倒 —— 验算结构弹塑性变形

存在问题

- **结构承载力要求**按小震弹性地震作用考虑，不考虑不同结构延性的区别
- **结构构造要求**与抗震设防烈度及结构高度挂钩，而不与结构延性要求挂钩
- 一般结构不进行结构“大震不倒”验算，或仅进行结构静力推覆分析
 - **不能体现钢结构延性好的抗震优点**

□ 结构阻尼比取值 (GB5011-2010)

混凝土结构

$$\xi = 0.05$$

钢结构

$$\xi = 0.02 - 0.04$$

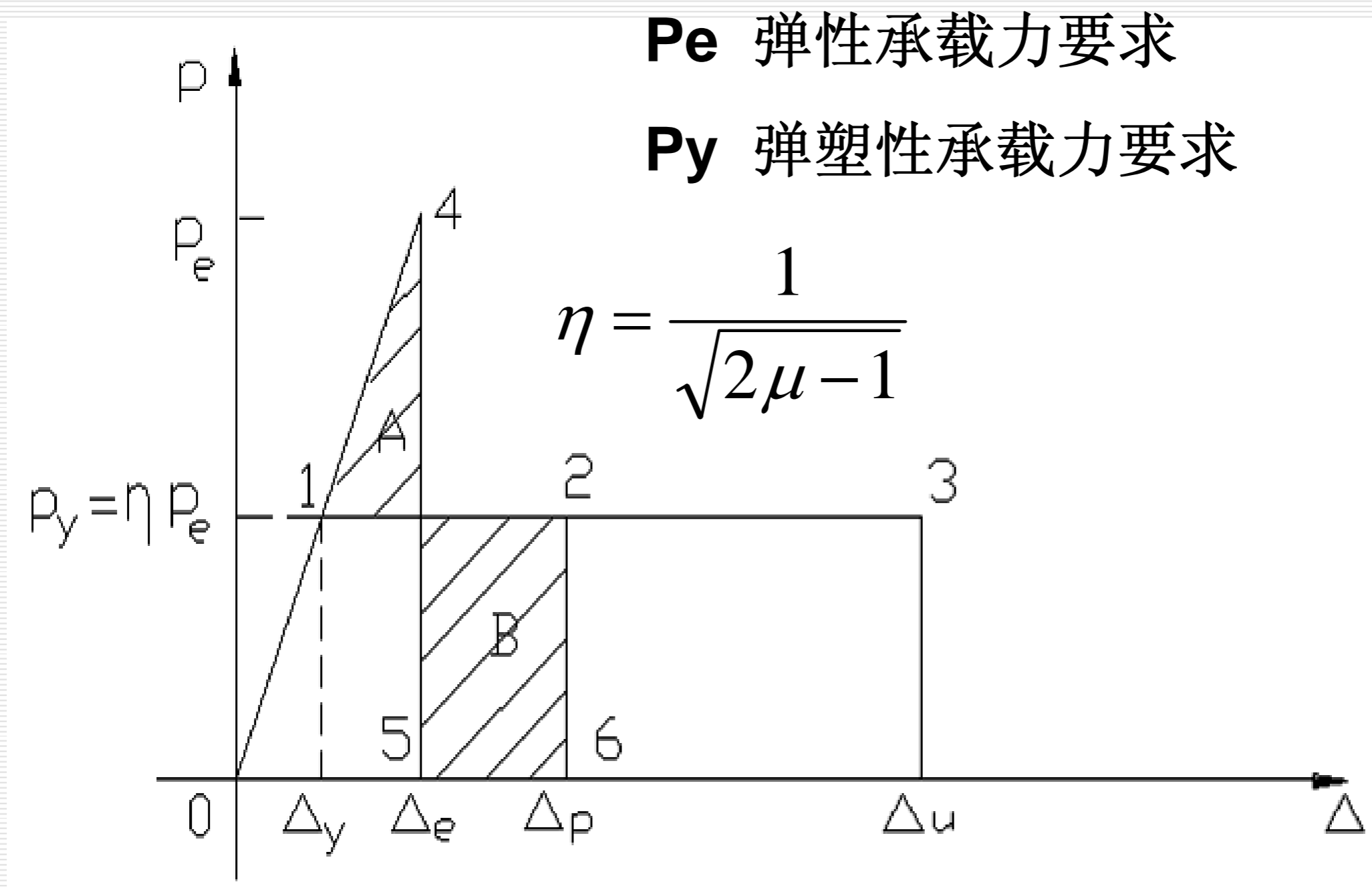
钢结构与混凝土结构地震作用比值

阻尼比	$T \leq T_g$	$T = 5T_g - 1.0$ $T = 1.0 + 5T_g$	平均值
0.035	1.126	1.087	1.107
0.02	1.319	1.215	1.267

抗震设计理念需重新定位

- 确定地震作用准则（结构承载力要求）应建立在基本烈度或大震烈度上，而非小震烈度；并允许结构进入塑性。
 - 美国 大震(50年2%)的2/3
 - 欧洲 中震50年 10%
 - 日本 二阶段：中震弹性，大震延性

结构承载力（地震作用）要求与结构延性的关系



抗震设计原则（结构性能目标）**建议**

□ 小震不坏 —— 验算结构弹性变形

□ 中震可修 —— 验算结构承载力

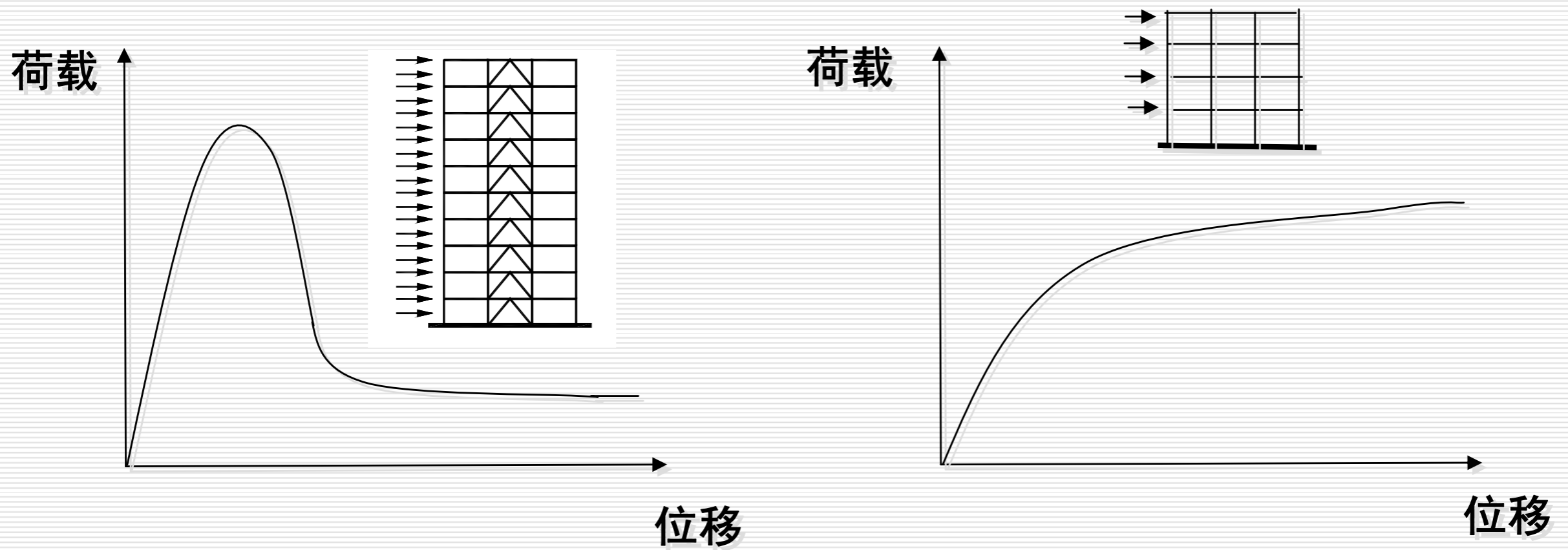
地震作用（承载力要求）考虑不同结构延性性能
结构构造要求与不同结构延性性能挂钩

□ 大震不倒 —— 验算结构弹塑性变形

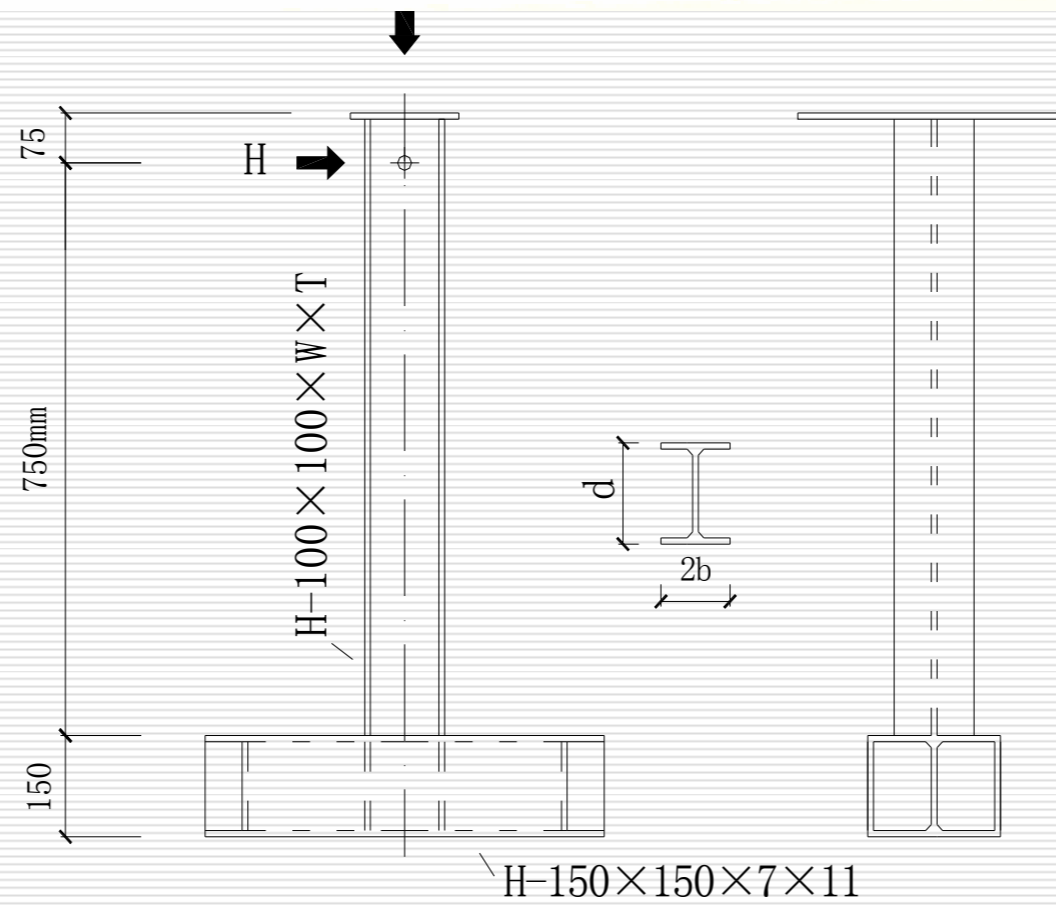
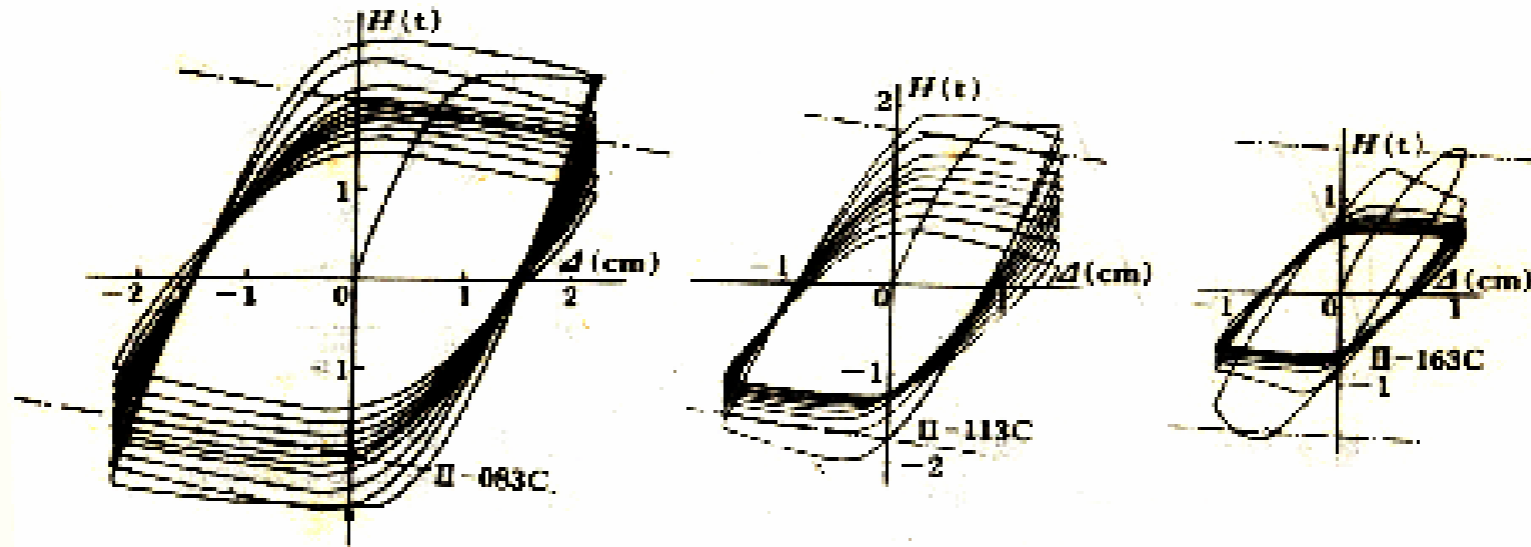
影响结构延性的主要因素

- 结构体系形式 (没考虑)
 - 构件宽厚比 (已考虑)
 - 构件长细比 (已考虑)
 - 构件轴压比 (没考虑)
 - 节点形式 (没考虑)
- 现行抗震规范

□ 结构体系形式对结构延性的影响



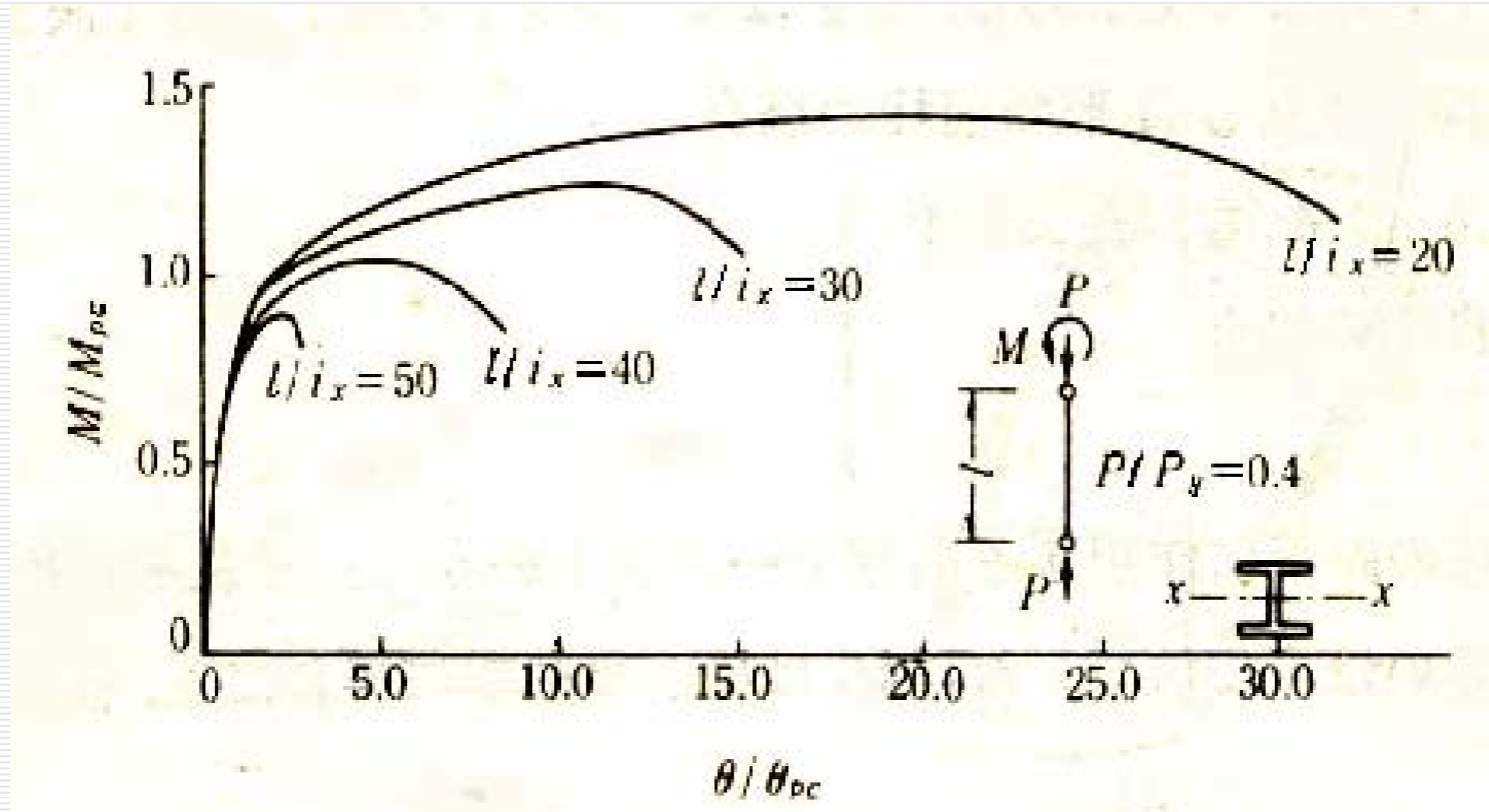
● 宽厚比对延性的影响



(d) 试件

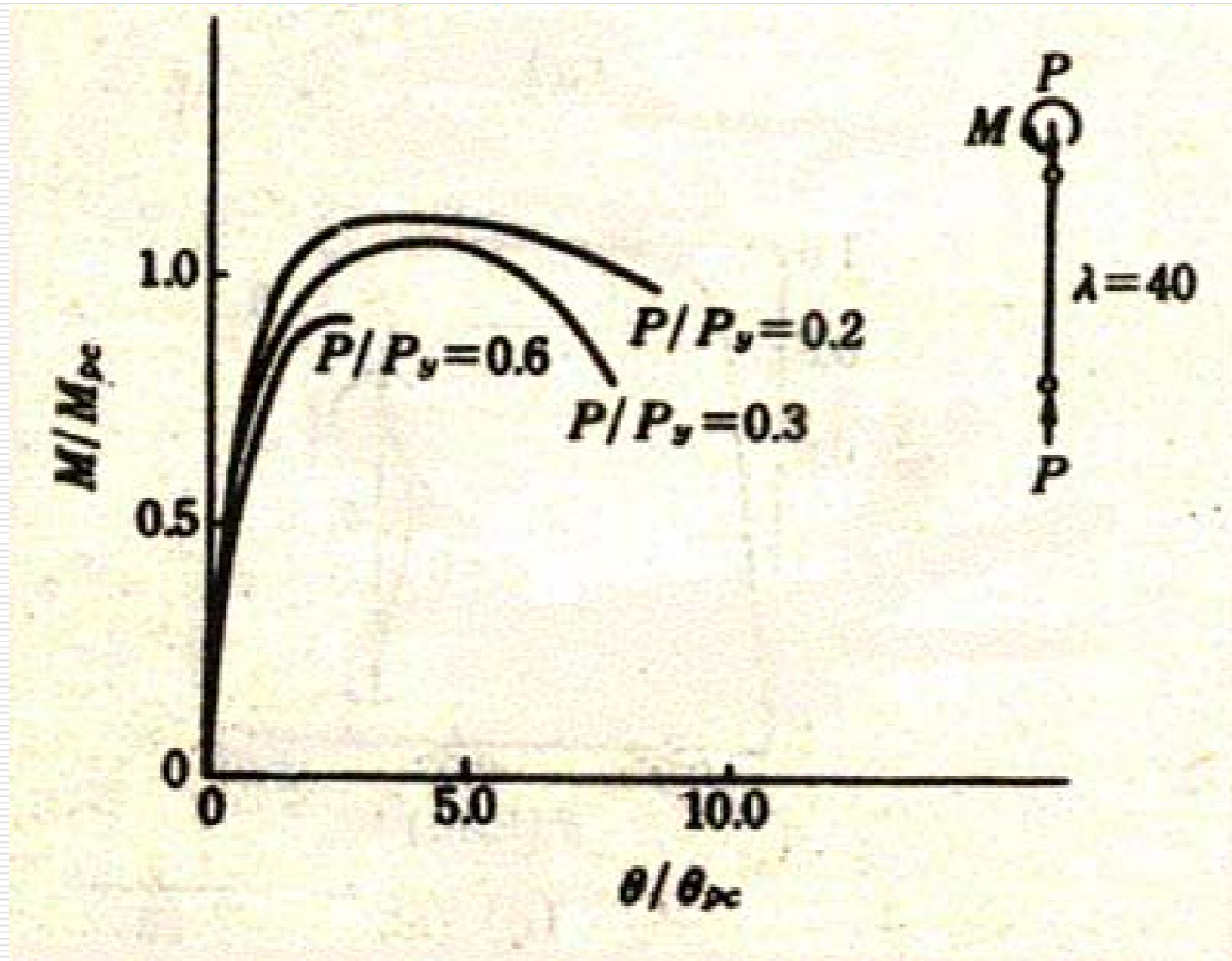
梁柱试件反复加载试验

- 长细比对延性的影响



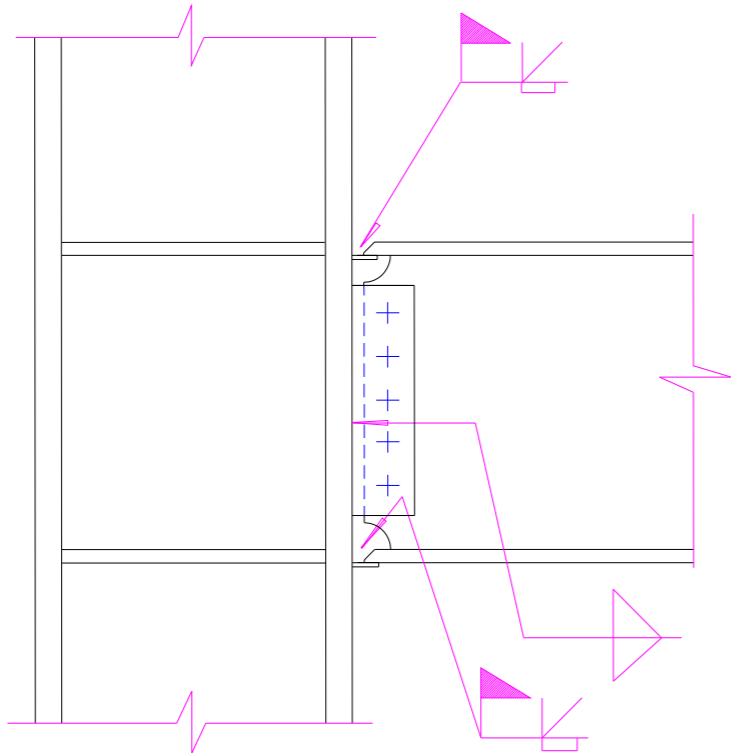
柱的变形能力与长细比的关系

- 轴压比对延性的影响



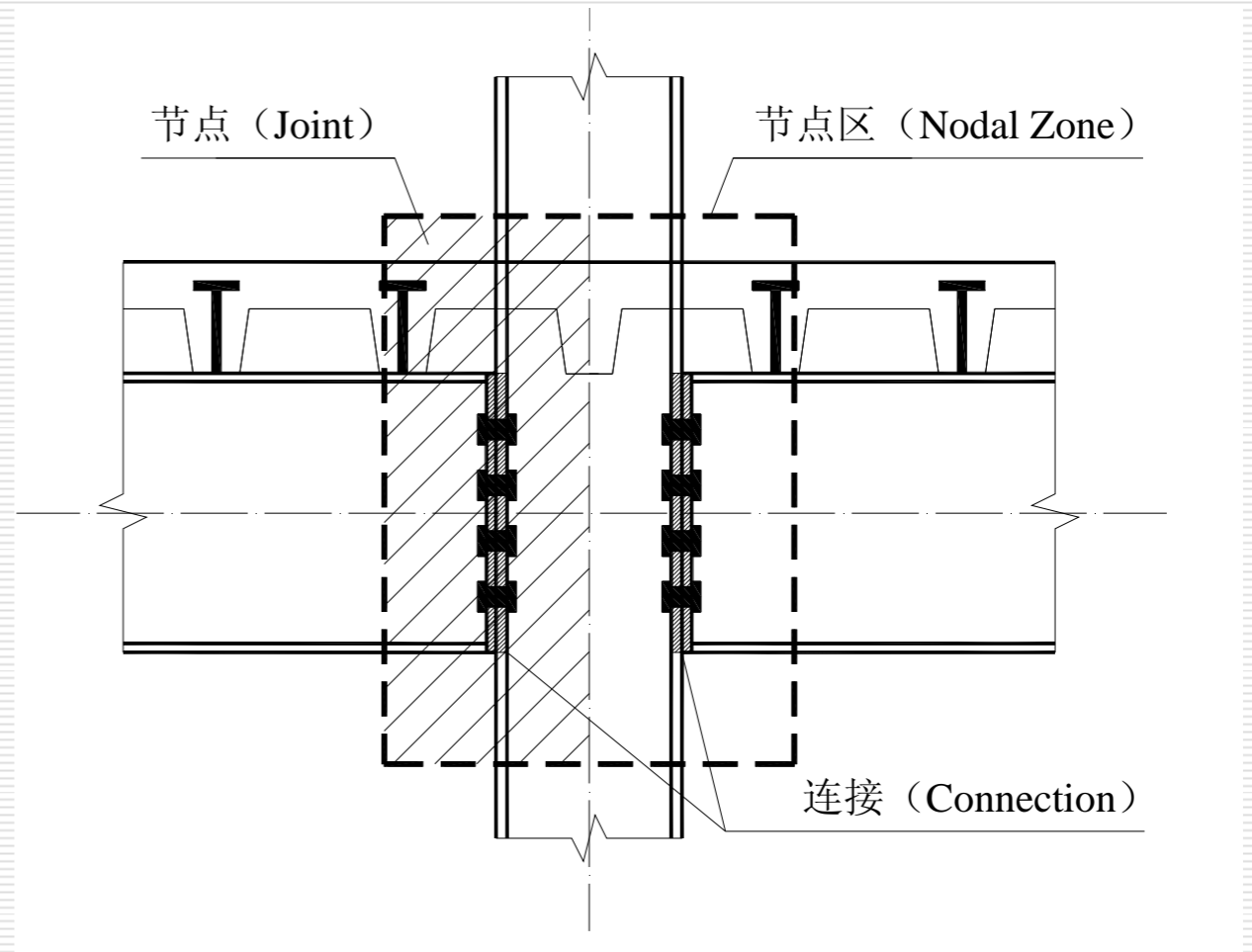
柱的变形能力与轴压比的关系

● 节点形式对延性的影响



栓焊混合连接节点

$$\theta_a < 0.03\text{rad}$$

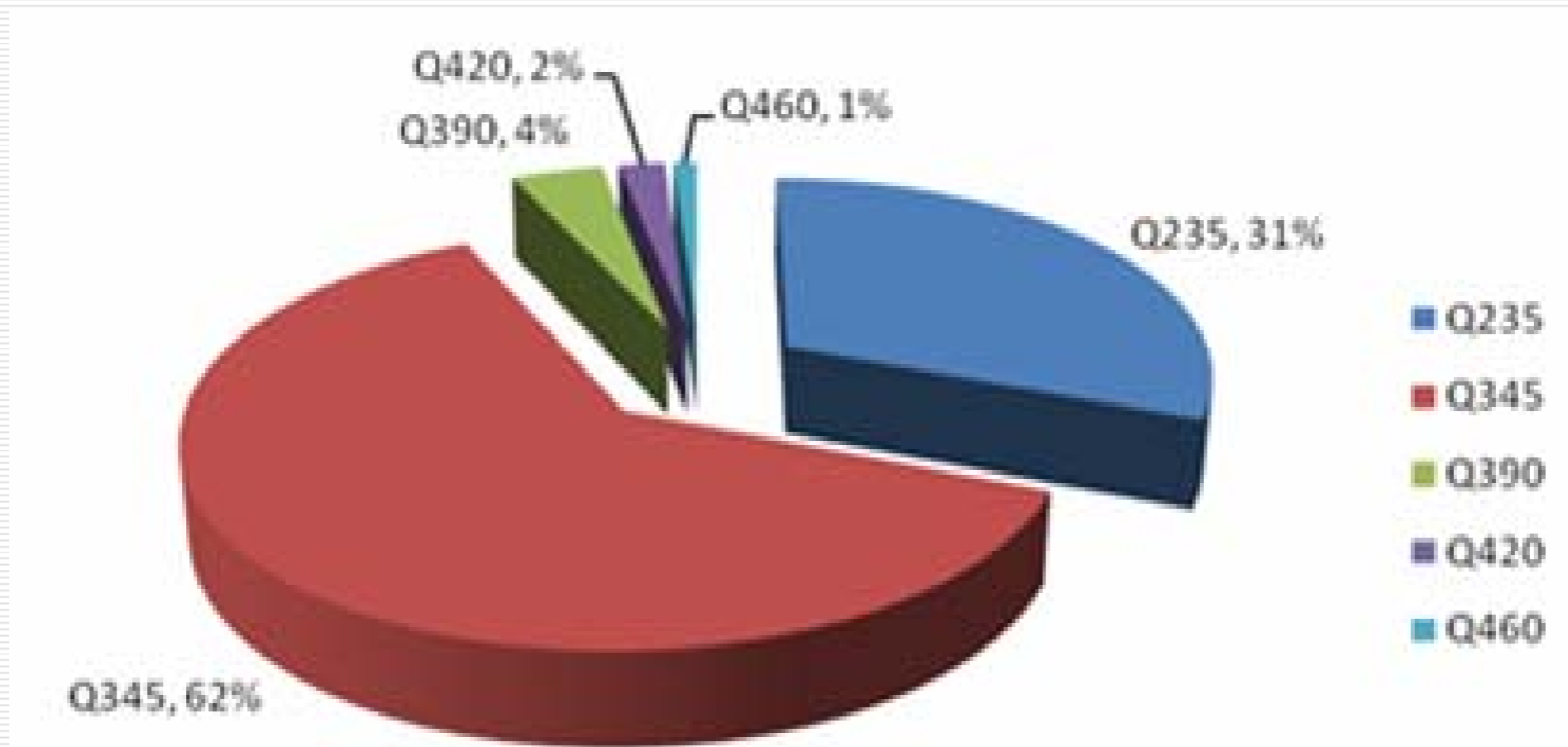


端板连接节点

$$\theta_a > 0.06\text{rad}$$

如何在地震区应用高强钢结构

背景



我国2010年钢结构用钢不同强度等级钢材比率

背景



**Q420钢相比常用
Q345钢材，可节
约用钢量15%~
20%**

高压输电塔

背景



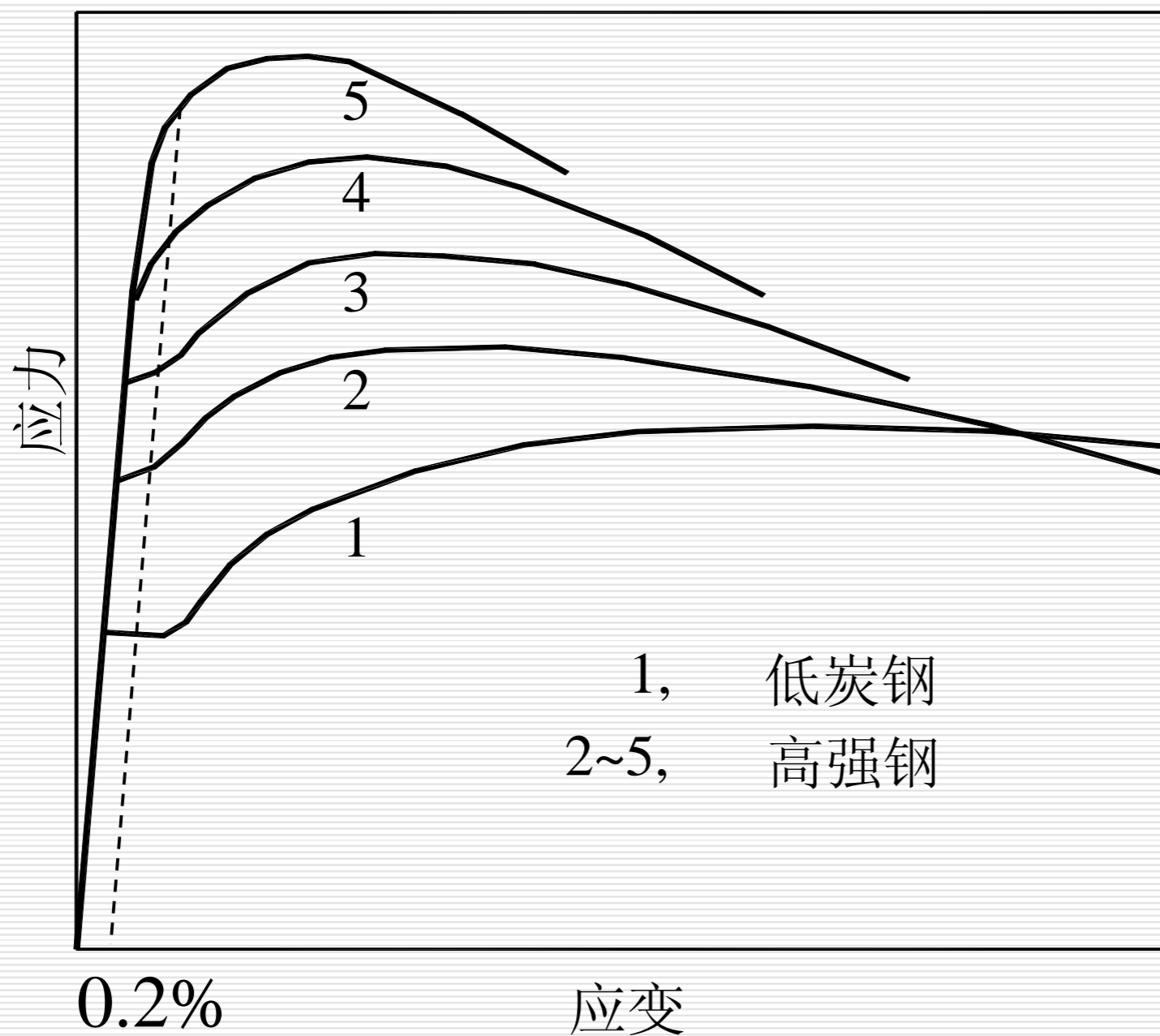
钢板厚度：
220mm(Q345)



110mm(Q460)

国家体育馆

钢材应力应变关系



屈服强度：
屈服平台下限
或
0.2%残余应变
对应应力

抗拉强度：
受拉能达到的最大应力

$$\text{屈强比} = \frac{\text{屈服强度}}{\text{抗拉强度}}$$

伸长率：拉断时相对伸长

GB5011的钢材指标要求

《建筑抗震设计规范》 GB50011规定：

- 1) 伸长率不小于**20%**
- 2) 屈强比不大于**0.85**

GB50017采用的各种钢材的指标

	屈强比	伸长率 (%)
Q235	≤ 0.63	≥ 21
Q345	≤ 0.73	≥ 20
Q390	≤ 0.80	≥ 20
Q420	≤ 0.81	≥ 19

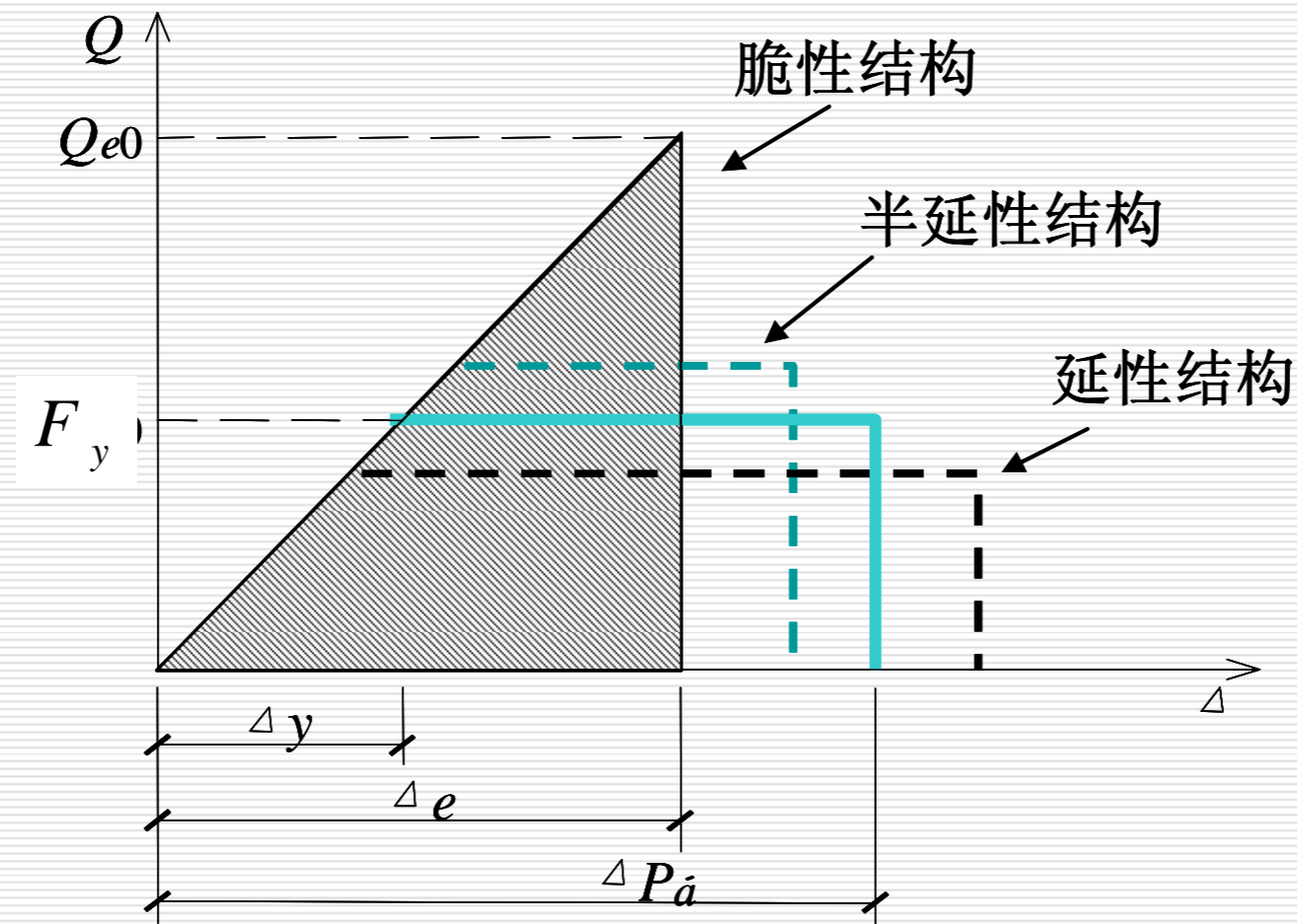
地震区钢结构对钢材的限制

根据屈强比和伸长率指标要求，我国只有**Q235**、**Q345**和**Q390**钢能用于地震区钢结构。

高强钢结构在地震区应用的方式

- 提高高强钢结构的地震作用
- 限制高强钢构件屈服（保持弹性）

提高高强钢结构的地震作用

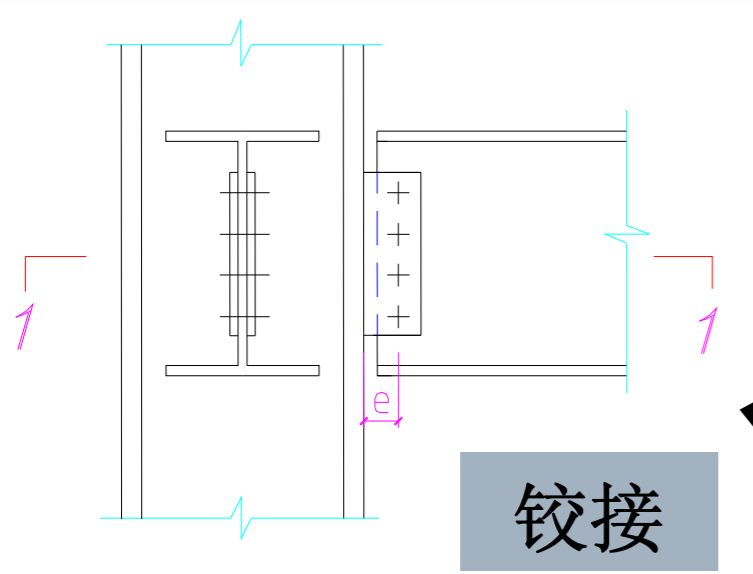


延性结构 伸长率 $\geq 20\%$ 屈强比 ≤ 0.85

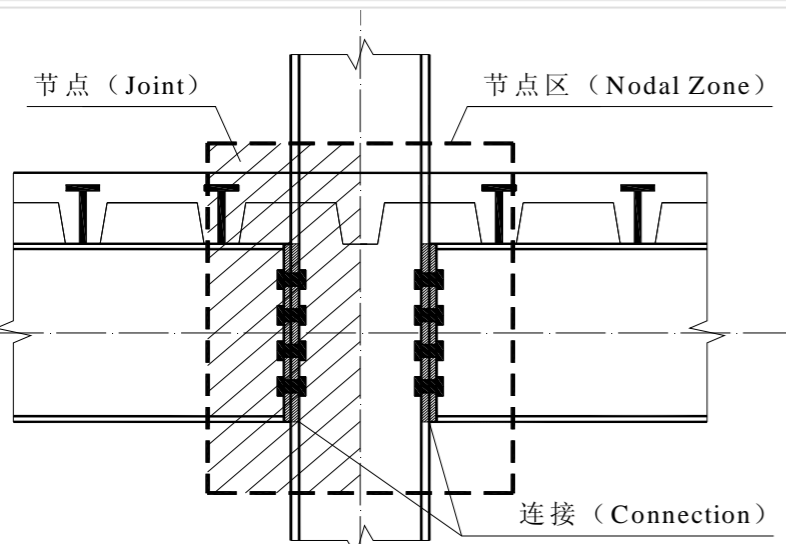
半延性结构 伸长率 $\geq 14\%$ 屈强比 ≤ 0.90

脆性结构 伸长率 $\leq 10\%$

限制高强钢构件屈服



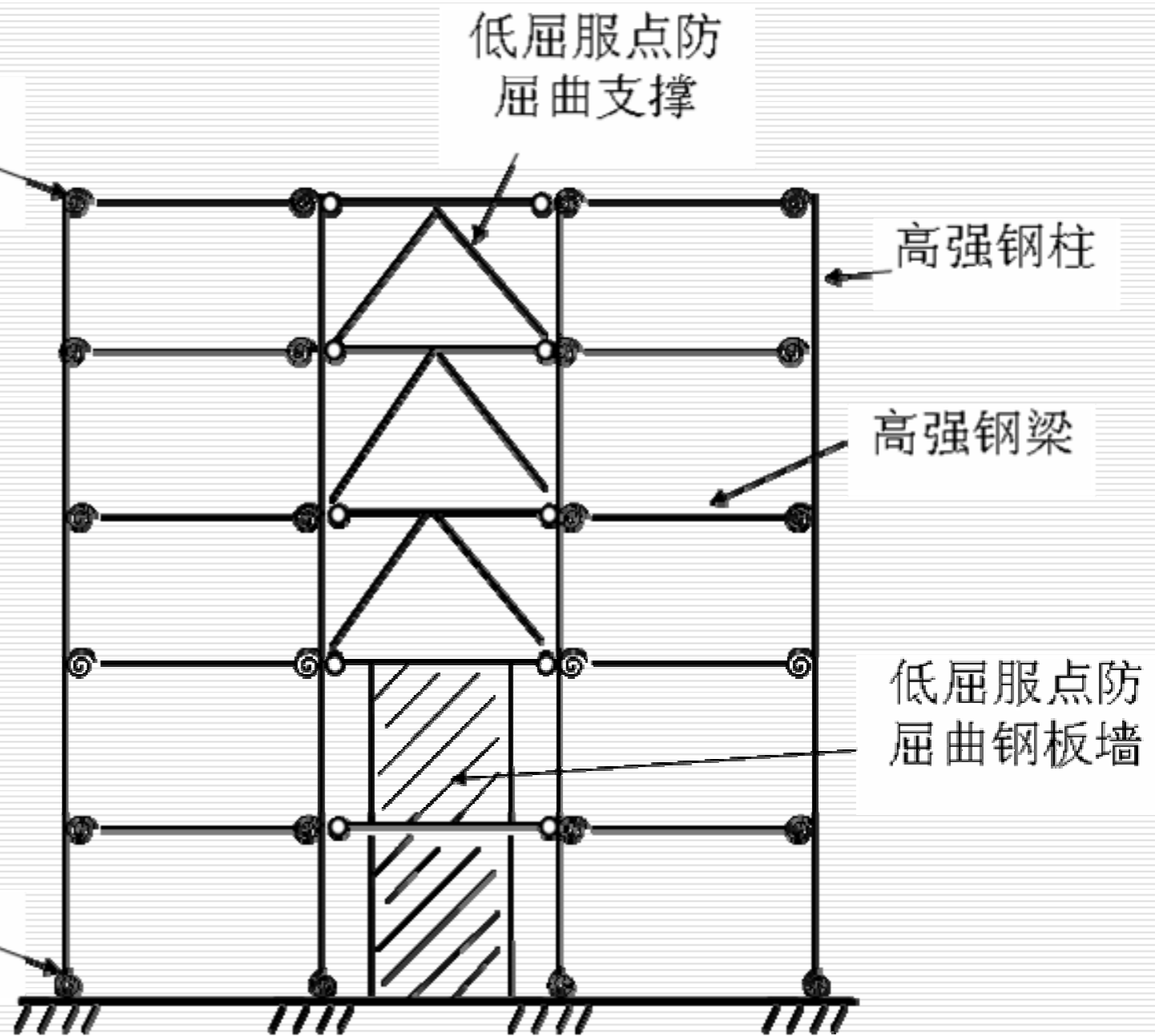
半刚接
(铰接)



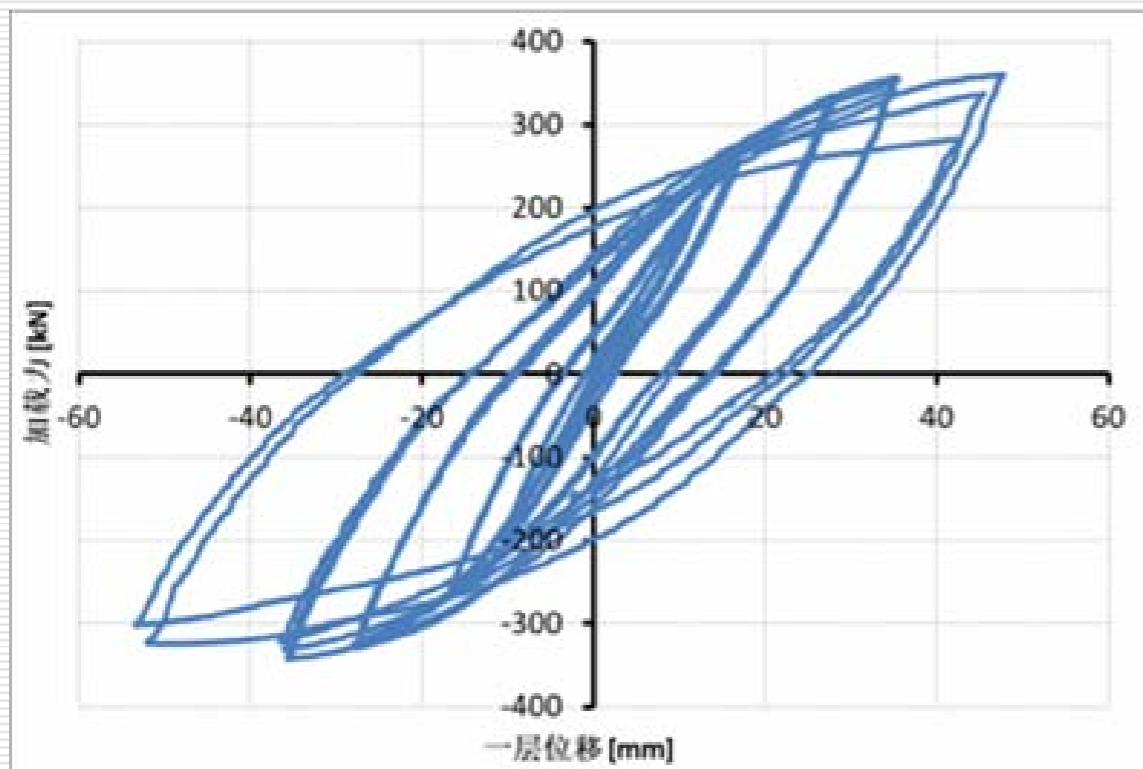
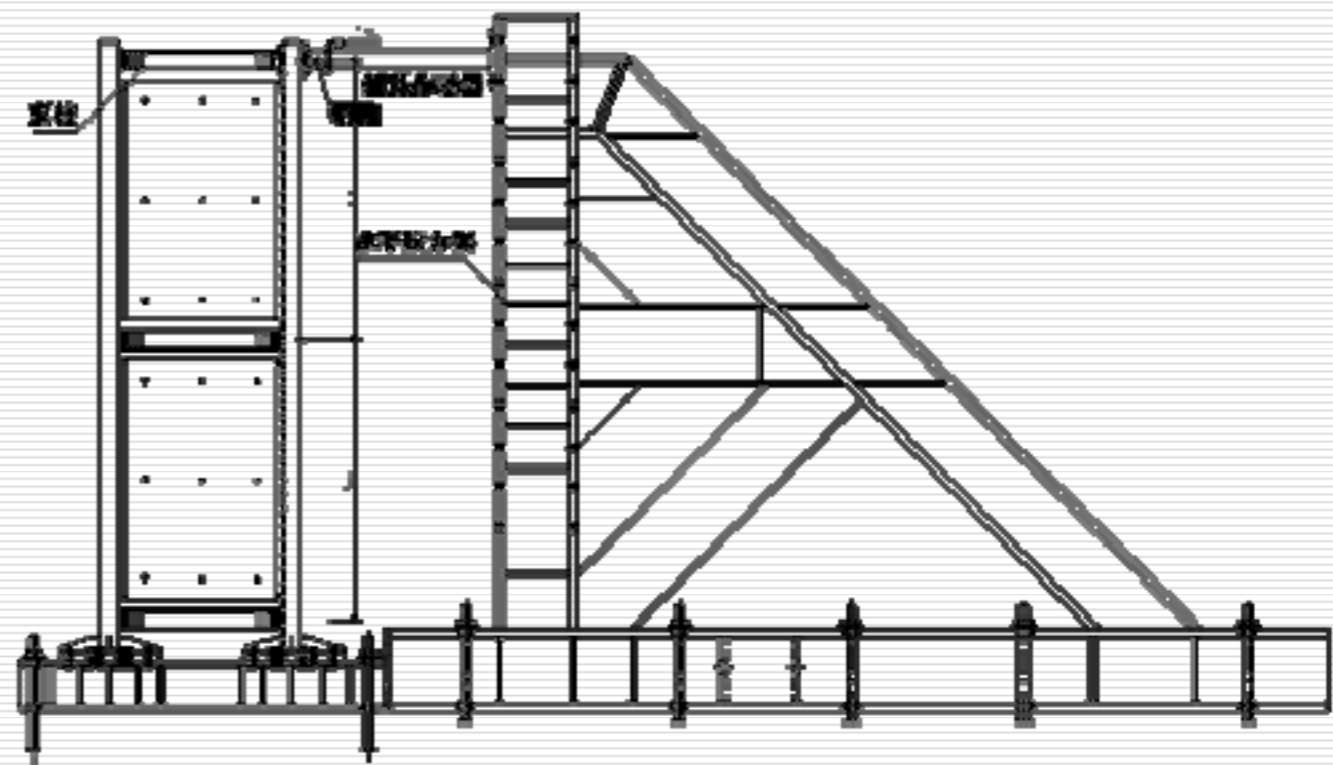
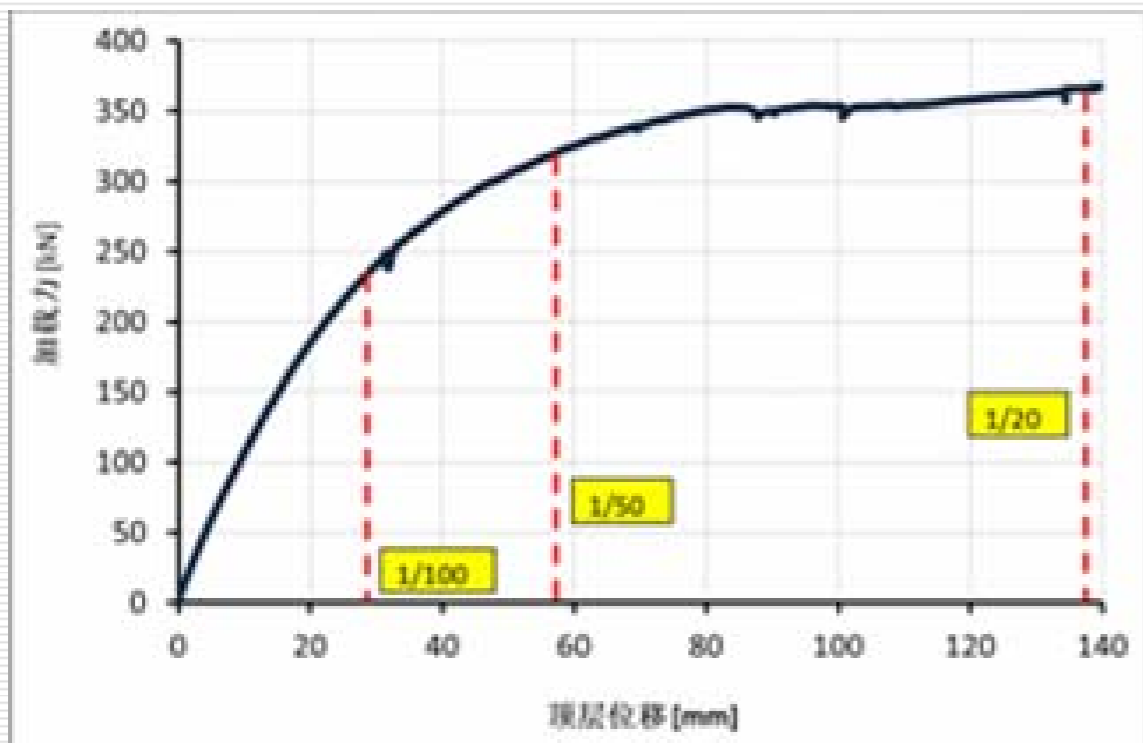
半刚接



半刚接



防屈曲钢板墙框架



结束语

- 防屈曲支撑和端板半刚性节点是解决钢结构在地震中容易发生支撑屈曲和刚性节点开裂破坏的有效措施。
- 我国建筑抗震设计中应重视延性对结构抗震的重要性，强制结构倒塌验算。
- 减小甚至免除结构在地震下的延性需求，是高强钢结构在地震区应用的有效方式。

谢谢！