

# 第一讲 绪论

任晓丹

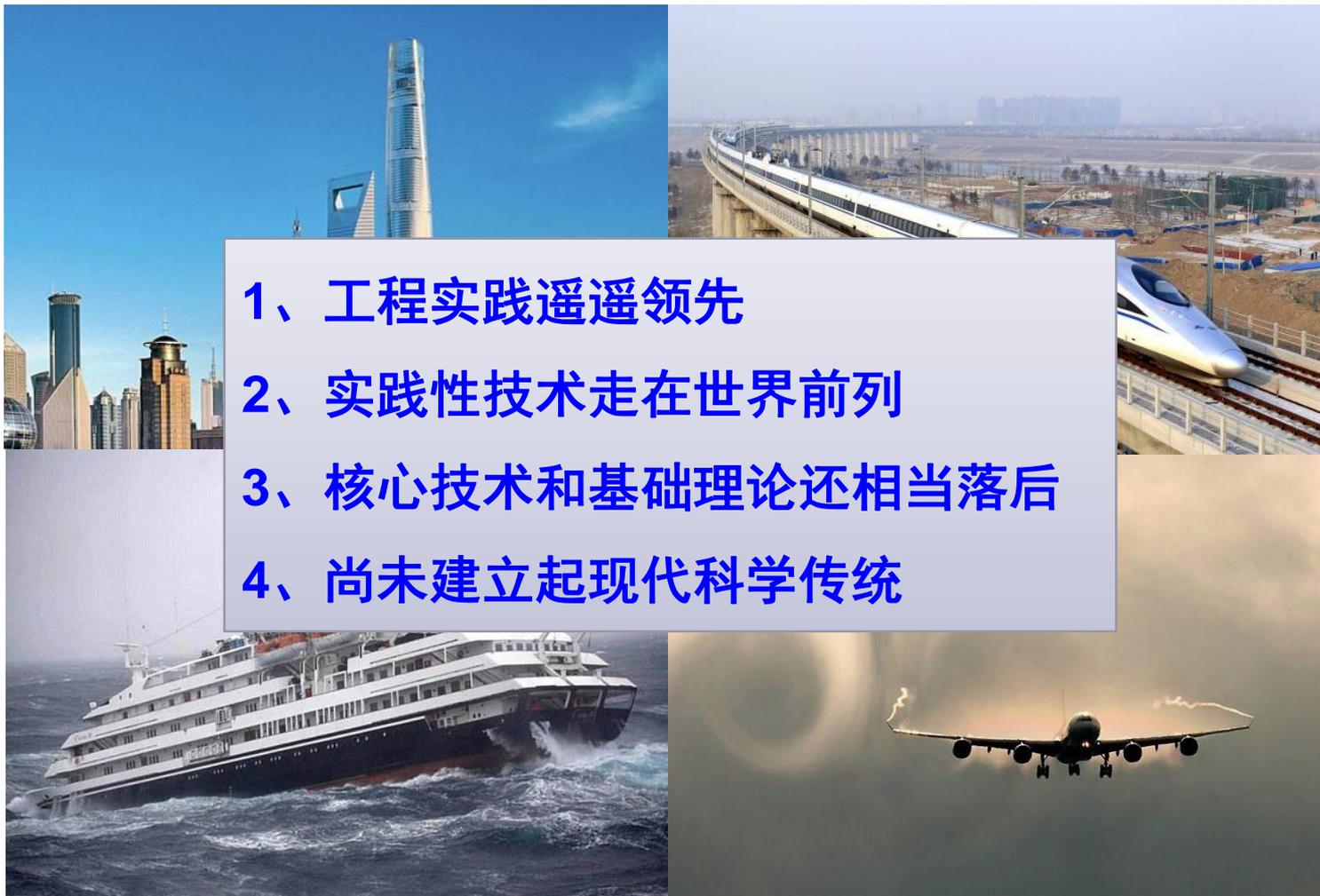
[rxdtj@tongji.edu.cn](mailto:rxdtj@tongji.edu.cn)

[www.renxiaodan.com](http://www.renxiaodan.com)

同济大学土木工程学院



# 背景与挑战

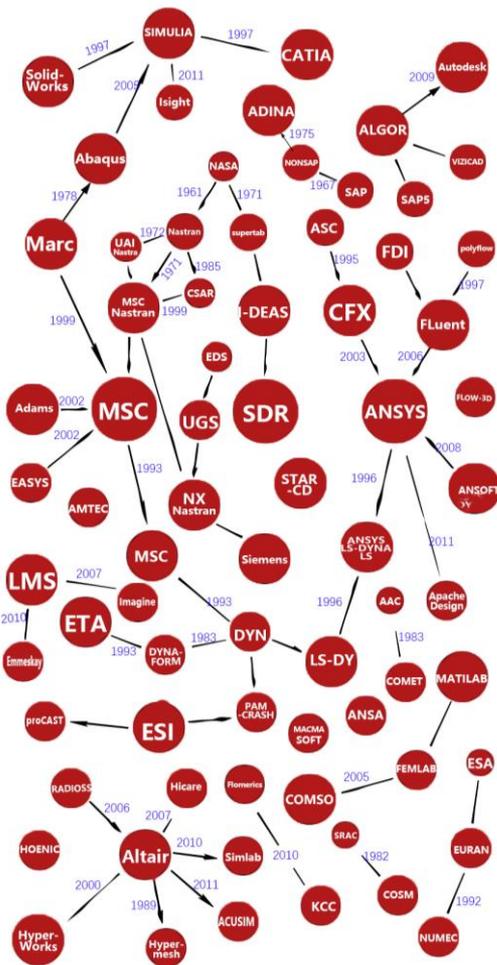


- 1、工程实践遥遥领先
- 2、实践性技术走在世界前列
- 3、核心技术和基础理论还相当落后
- 4、尚未建立起现代科学传统

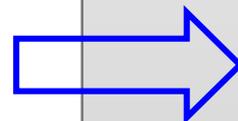
# 背景与挑战



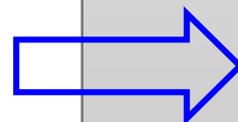
# 背景与挑战



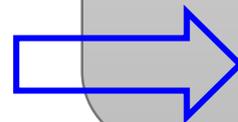
计算机：  
软硬件、前后处理



计算力学：  
分析与求解



结构专业：  
本构关系



我国的制造和建设大国，  
但还算不上强国。

高精尖技术（如大型工业软件）是短板，存在被‘卡脖子’的隐患。

本构关系，及其物理力学基础和数值算法，是短板中的短板！

# 机遇与挑战并存



# 土木建筑行业



## “经济新常态”

### ➤特点之一：

从高速增长转为中高速增长

### ➤特点之二：

经济结构不断优化升级

### ➤特点之三：

从要素和投资驱动转为创新驱动



# 结构地震破坏



# 结构地震破坏



# 反应堆泄漏



(a) 0 degrees Azimuth



(b) 90 degrees Azimuth



(a) 180 degrees Azimuth



(b) 270 degrees Azimuth



# 结构工程的两个基础性问题

- 结构受力力学行为的科学反映
- 工程中客观不确定性的合理度量

构成了结构理论的历史的、符合逻辑的发展线索

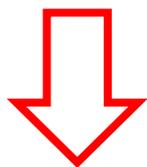
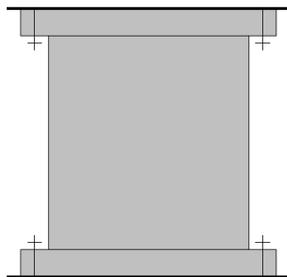
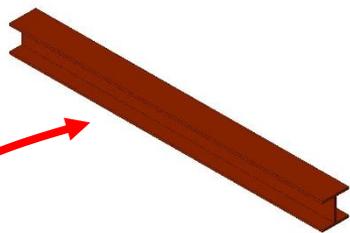


# 结构分析的基本思路



结构

构件



材料



大而化之之谓圣  
《孟子·尽心下》



# 第一代结构理论

容许应力设计方法：
$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_u}{k}$$

## 材料力学（从构件到应力）

1638, Galileo对矩形悬臂梁的研究（刚体平衡）

1705, Bernoulli 假定（平截面假定），弹性变形概念引入

1825, Navier, 梁、板、壳理论

## 结构力学（从结构到构件）

1850, Culmann, 静定框架

1864, Maxwell, 虚力原理

1903, Kirpichev, 静不定框架的分析理论

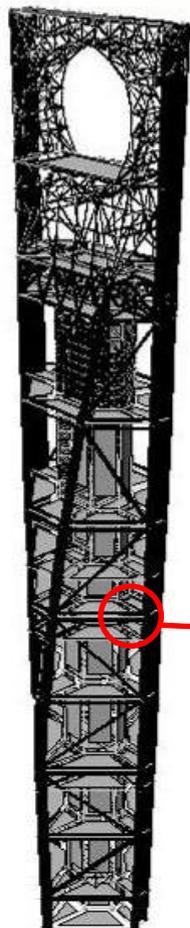


# 第一代结构理论

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_u}{k}$$

优点：安全

缺点：不经济、不合理



百米大厦  
毁于一点？



# 第二代结构理论

基于内力的设计方法： $F \leq F_u$

**非线性材料力学（构件极限承载力理论）**

1914, Kazinczy, 钢梁的极限承载力试验

1930, Fritsche, 钢梁的极限承载力分析理论

1935-1952, 关于塑性铰方法（极限承载力设计）的争论

1936, Gvozdev, 极限承载力设计的基本理论

1910s-1950s, 钢筋混凝土基本构件理论

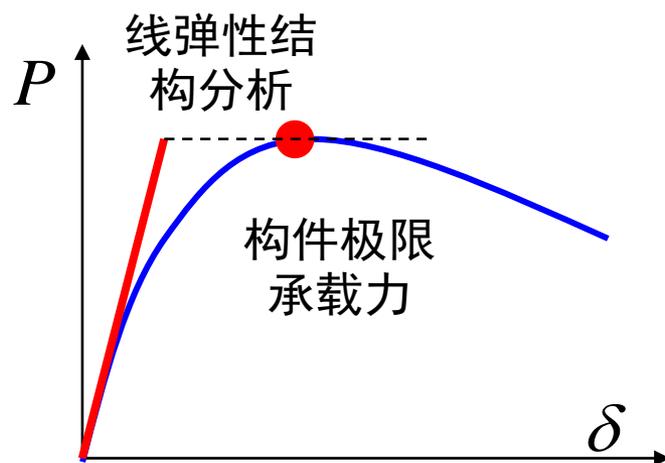
**结构层次线弹性分析，构件层次极限承载力设计**



# 第二代结构理论

至20世纪60年代，世界主要发达国家的结构设计规范大都采用了第二代结构理论作为编制依据。

然而，采用这一理论导致的问题（诸如混凝土结构的开裂、钢结构变形过大等）引起了工程师们的严重关切。这一现实需求，极大推动了结构极限状态设计理论的确立。

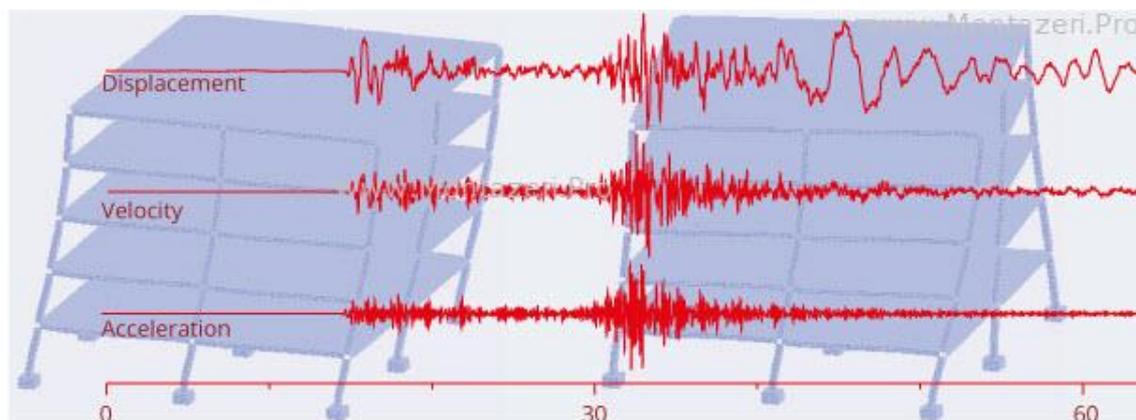
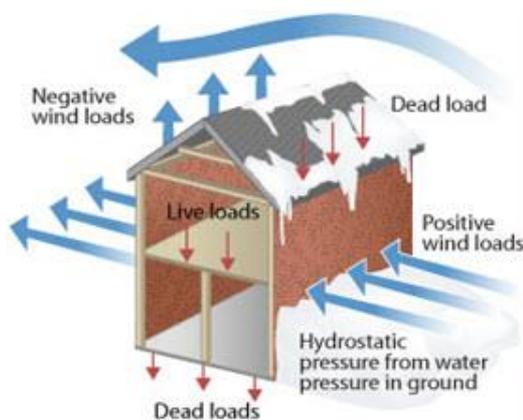


# 第二代结构理论



# 第三代结构理论

起步于20世纪70年代的**结构非线性全过程分析**研究热潮，  
可以视为新一代结构设计理论开始萌芽的象征。其核心科学基  
础，是**固体力学理论**与结构分析的**有限单元法**。

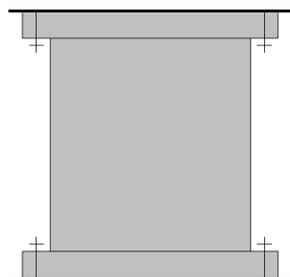


# 现代结构分析方法



结构

单元 (构件)



材料



$$\mathbf{K}^e \mathbf{u}^e = \mathbf{F}^e$$

$$\mathbf{F}_{int}^e(\mathbf{u}^e) = \mathbf{F}_{ext}^e$$

$$\sigma = \mathbf{f}(\epsilon)$$

本构

**A**

平衡、协调

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}$$

$$\mathbf{F}_{int}(\mathbf{u}) = \mathbf{F}_{ext}$$



土木工程学院  
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING

# 第三代结构理论

## 固体力学的发展

1678, Hooke定律

1705, Bernoulli 提出平均值意义上的应力、应变概念

1727, Euler 假定: 应力与应变成正比

1822, Cauchy应力概念 (微分关系), 固体力学发端

1821-1864: 弹性力学理论

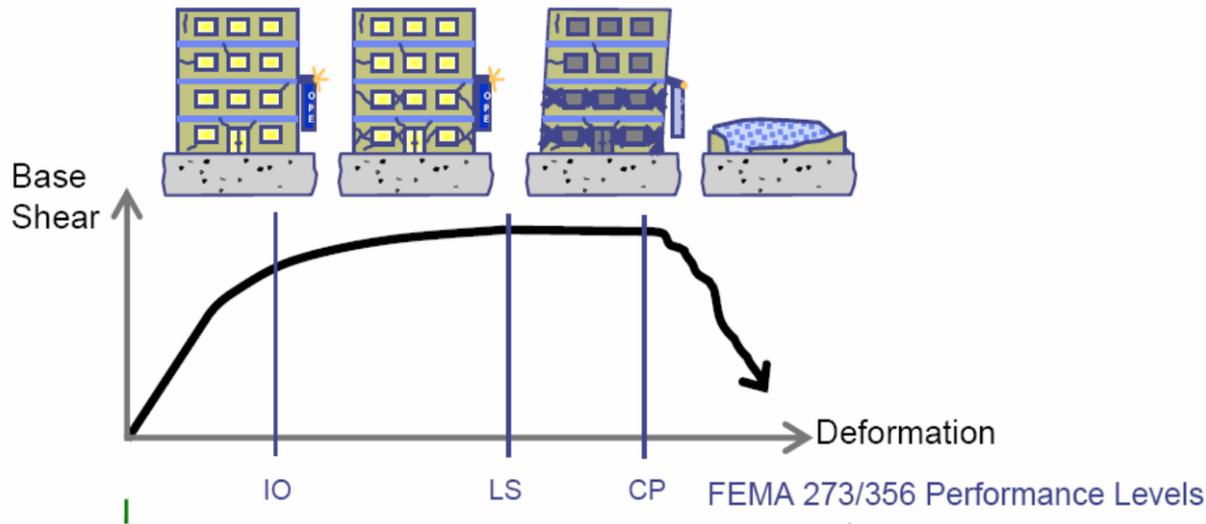
1864-1961: 金属弹塑性力学理论

1960s-1980s: 其它材料弹塑性力学理论

1980s-2010s: 损伤力学理论



# 第三代结构 (设计) 理论



性能化  
设计

**Immediate occupancy IO:** damage is relatively limited; the structure retains a significant portion of its original stiffness and most if not all of its strength.

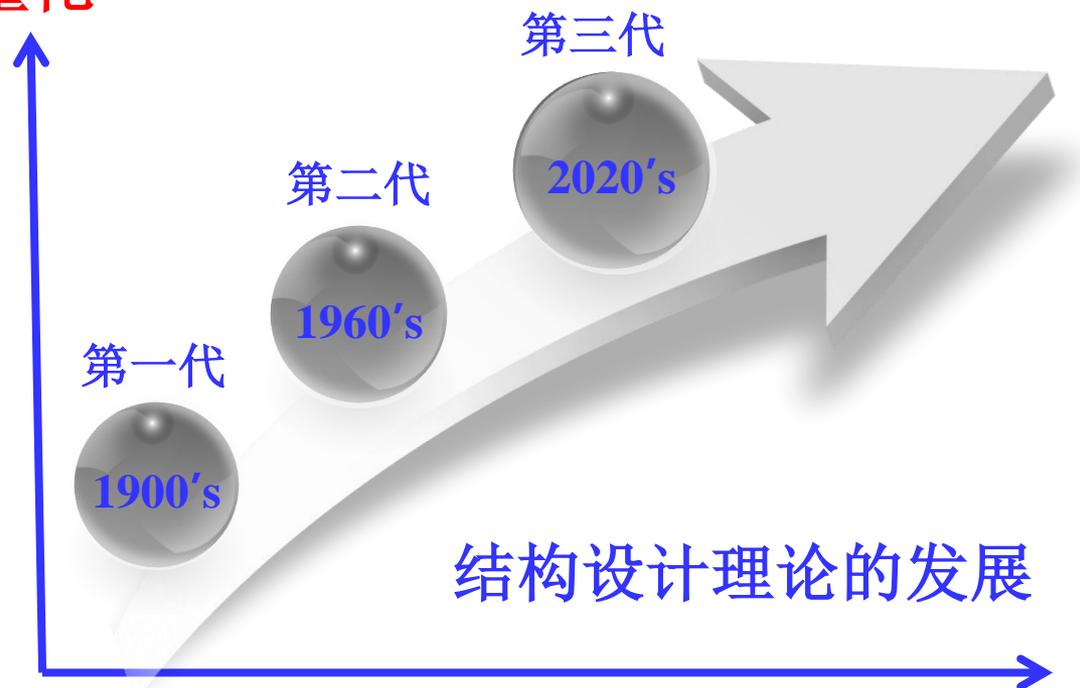
**Life safety level LS:** substantial damage has occurred to the structure, and it may have lost a significant amount of its original stiffness. However, a substantial margin remains for additional lateral deformation before collapse would occur.

**Collapse prevention CP:** at this level the building has experienced extreme damage, if laterally deformed beyond this point; the structure can experience instability and collapse base shear.



# 论第三代结构设计理论

不确定性的  
量化



力学分析



李杰 教授

《**同济大学学报**》  
(2017, V45, No.5)  
同济大学110年校庆专稿





李杰 教授



朱伯龙 先生

理論聯系實際

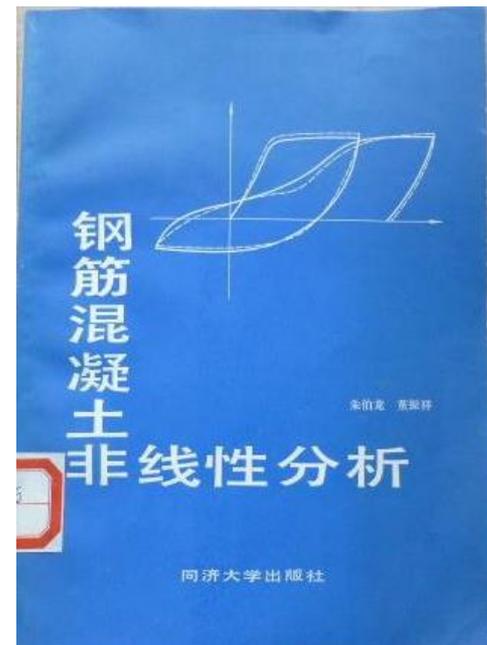




朱伯龙 先生



1983年建立了中国第一个模拟地震振动台

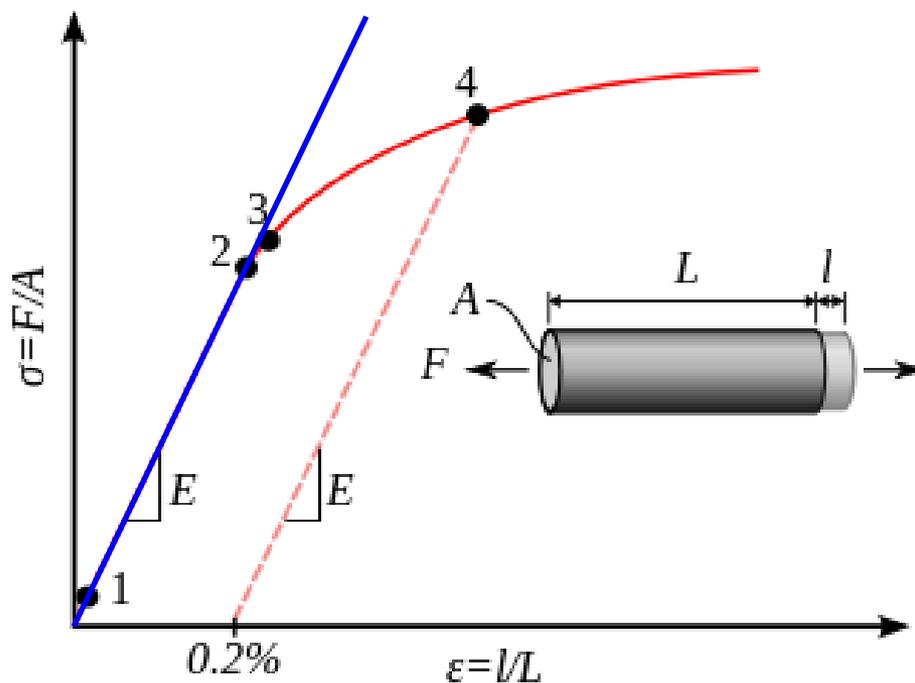


1985年出版了中国第一本混凝土结构非线性分析的学术著作



# 本构关系

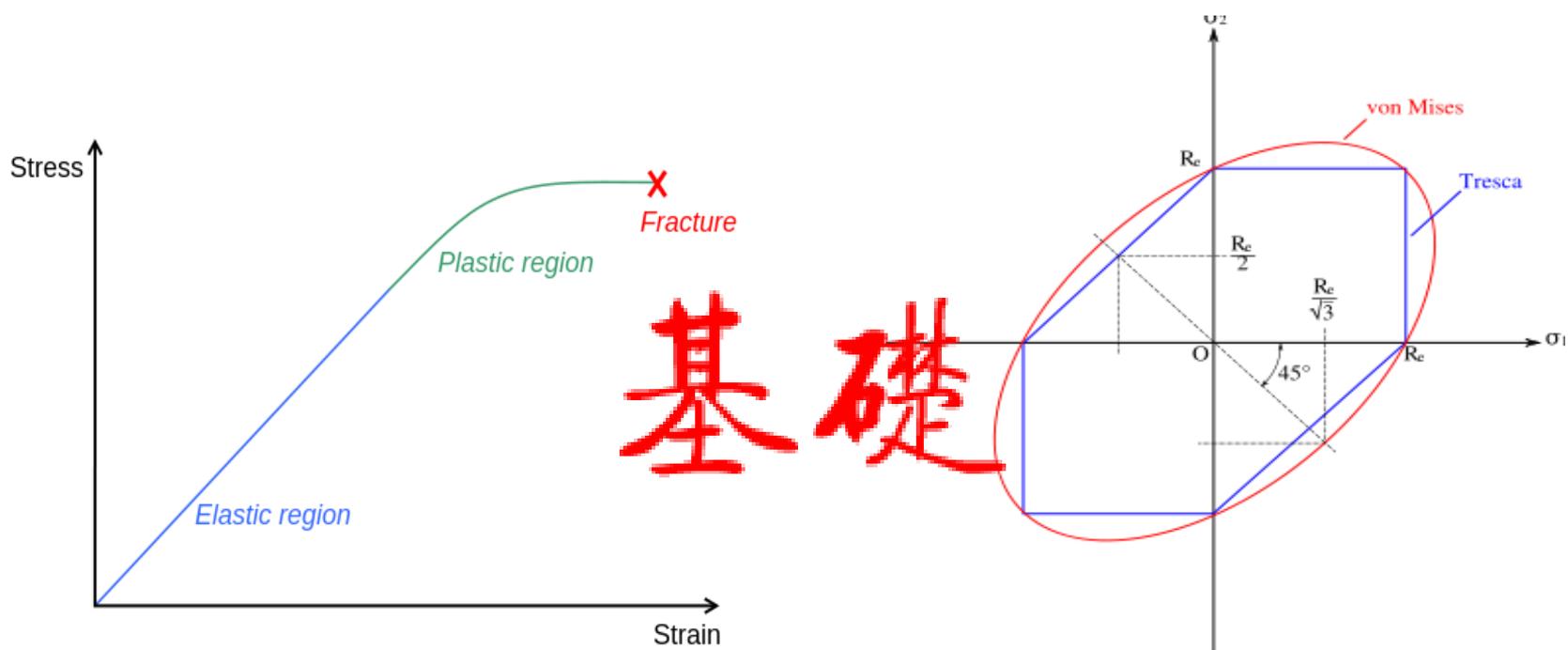
$$\sigma = f(\varepsilon)$$



弹塑性理论、损伤理论、粘塑性理论。 。 。 。 。



# 弹塑性理论三要素：



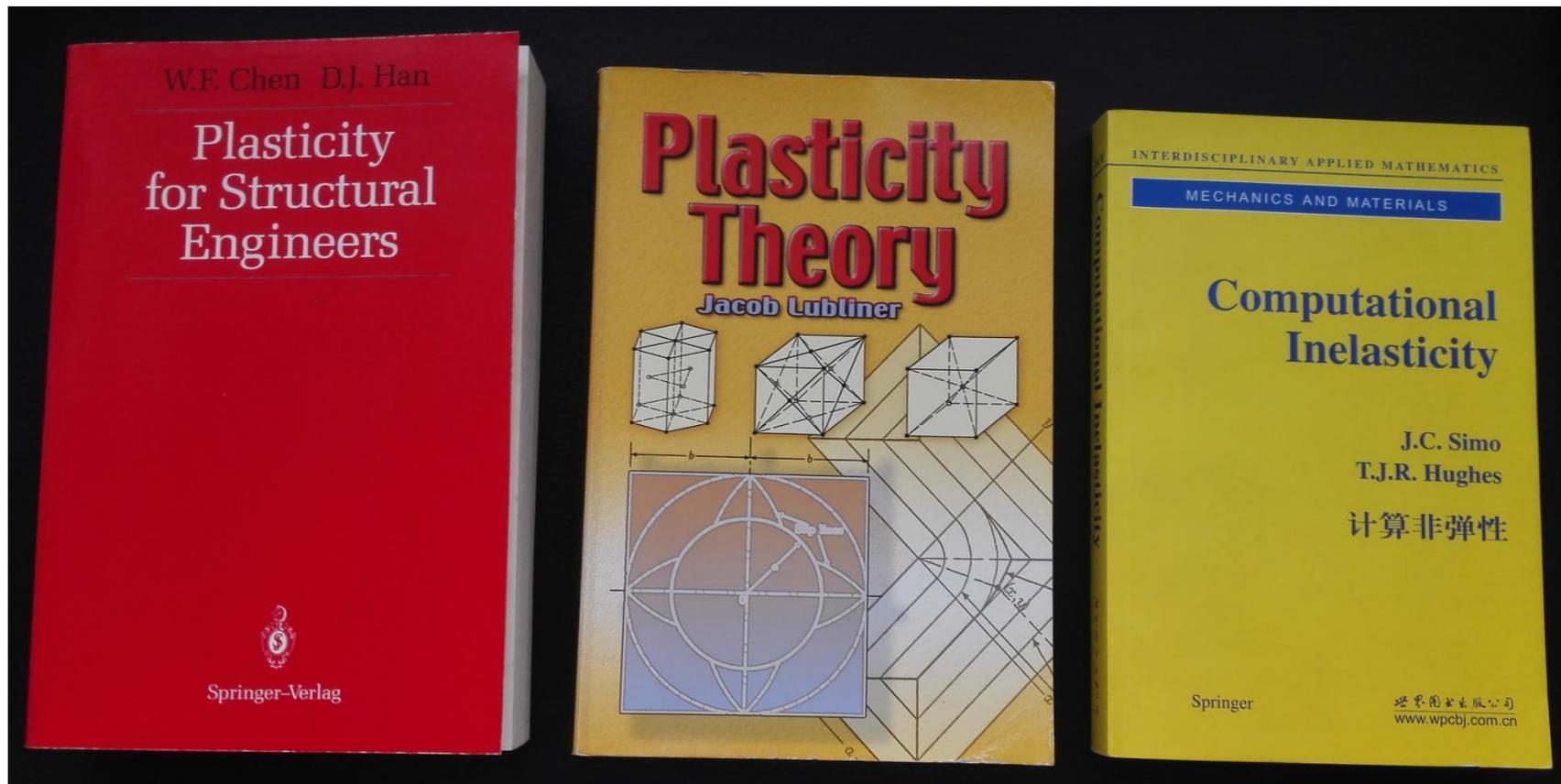
# 基础

非线性

多维



# 参考书

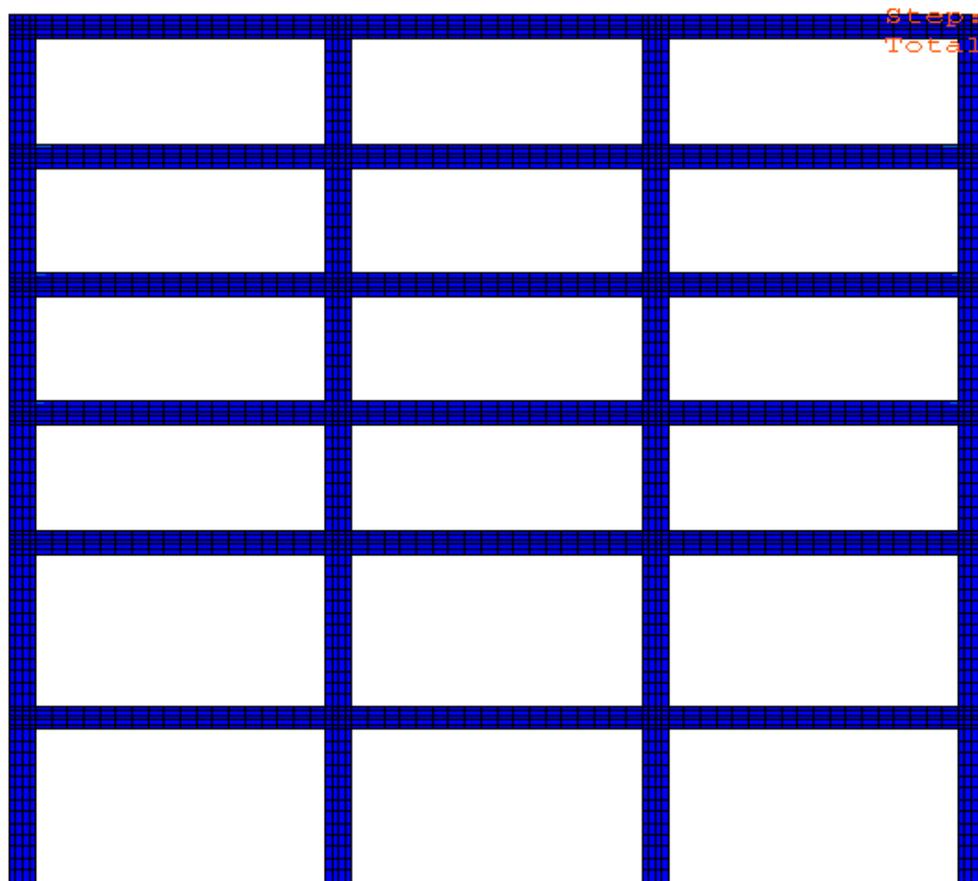


土木工程学院  
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING

# 一些工程结构破坏 分析示例



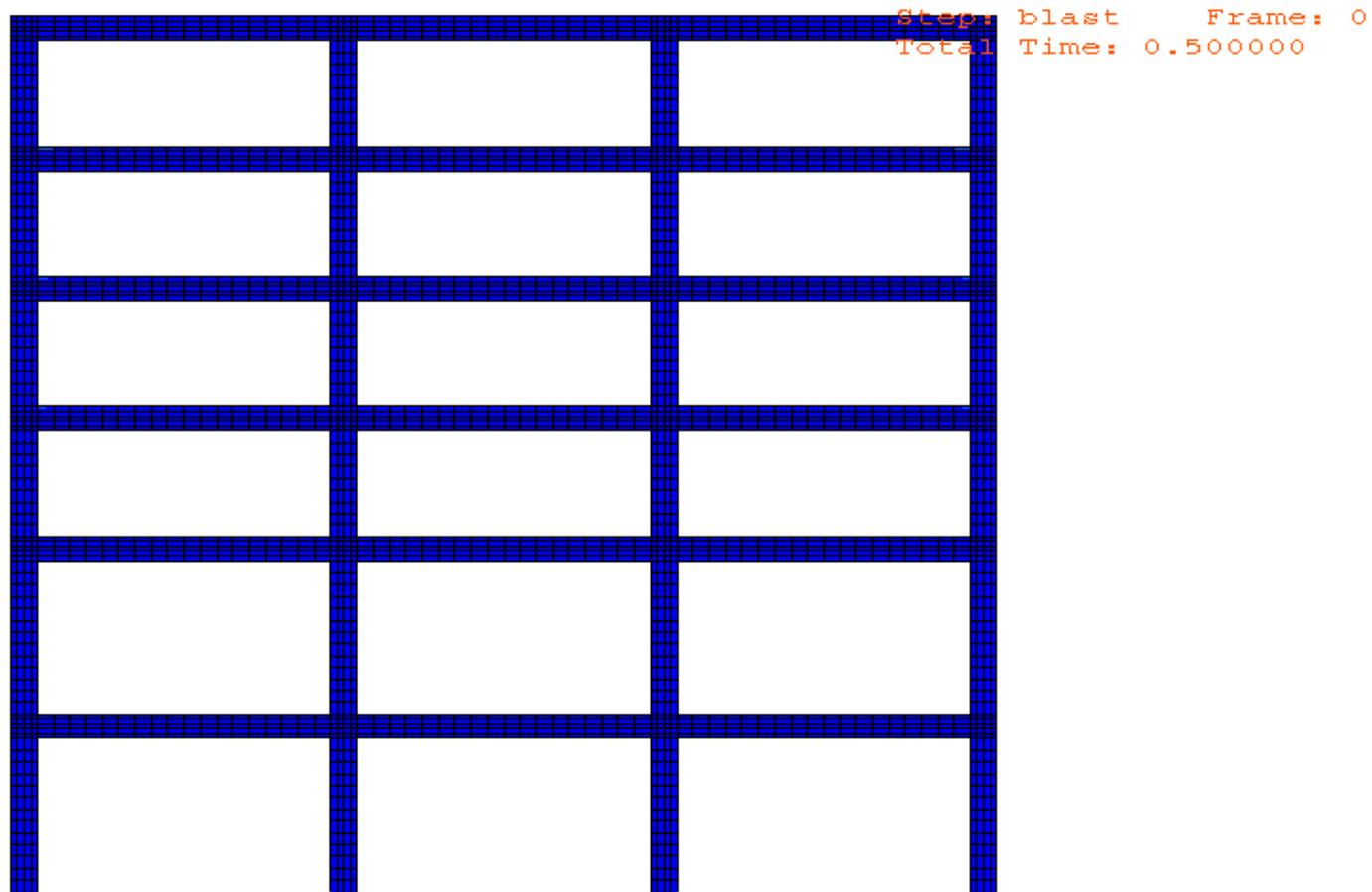
# 框架结构爆破倒塌模拟



Step: blast      Frame: 0  
Total Time: 0.500000

倒塌动画

# 框架结构爆破倒塌模拟

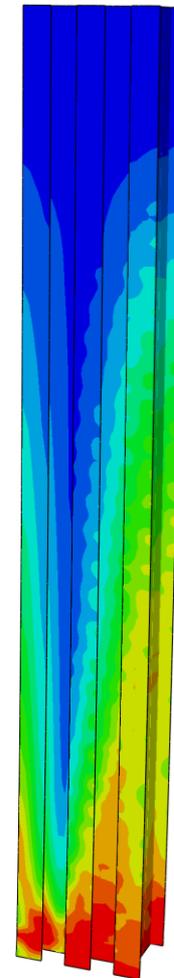
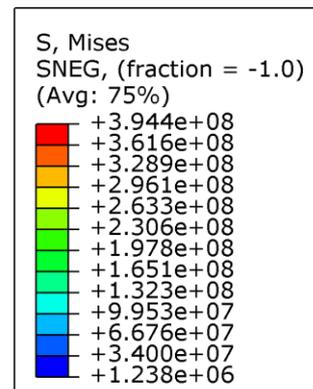
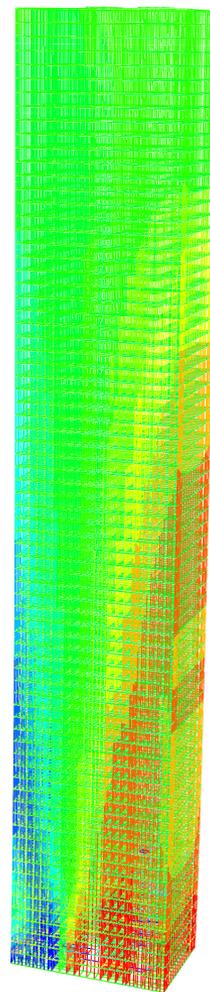
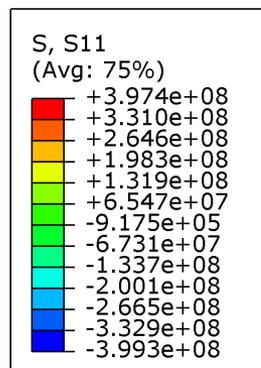
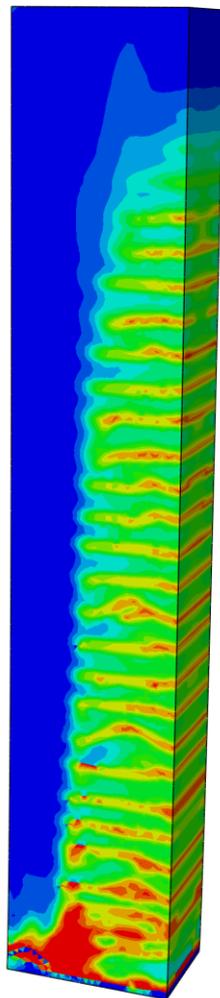
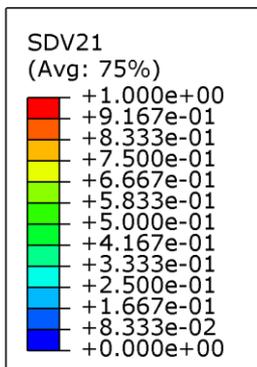


倒塌动画

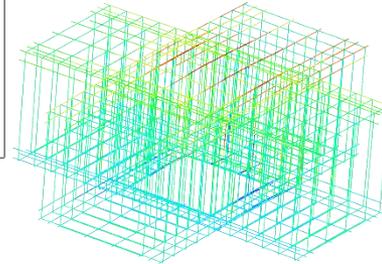
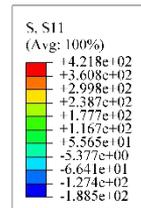
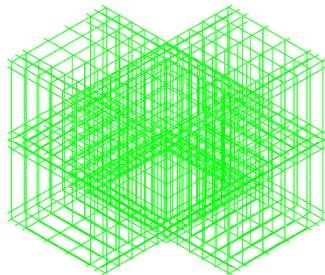
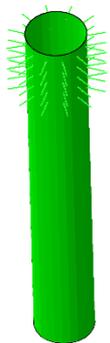
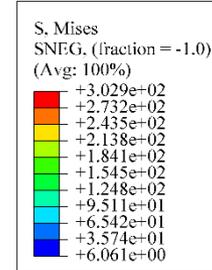
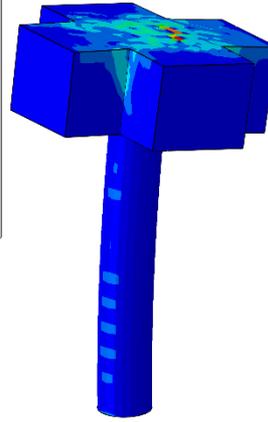
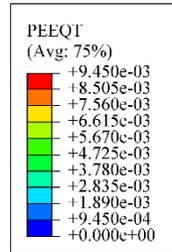
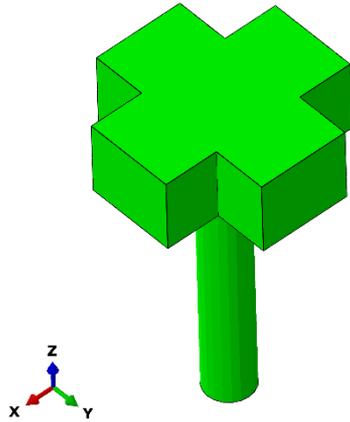
# 巨型构件分析



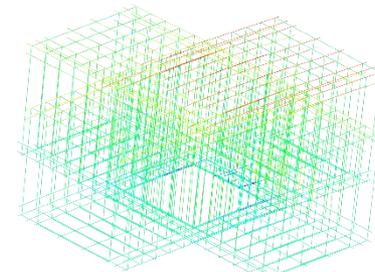
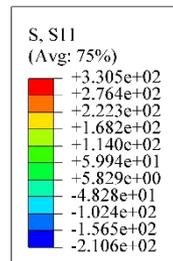
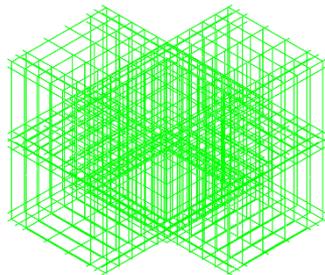
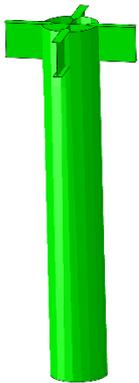
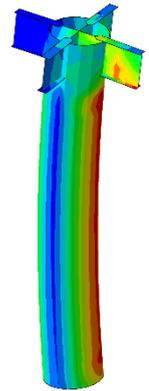
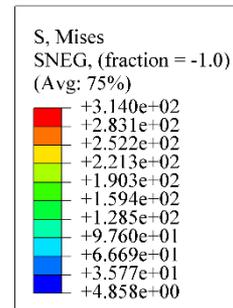
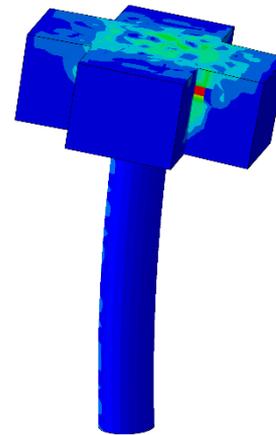
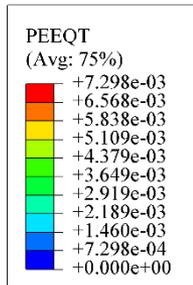
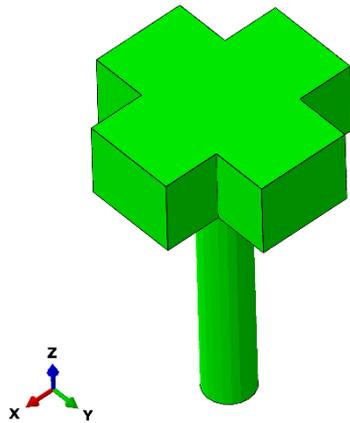
# 巨型构件分析



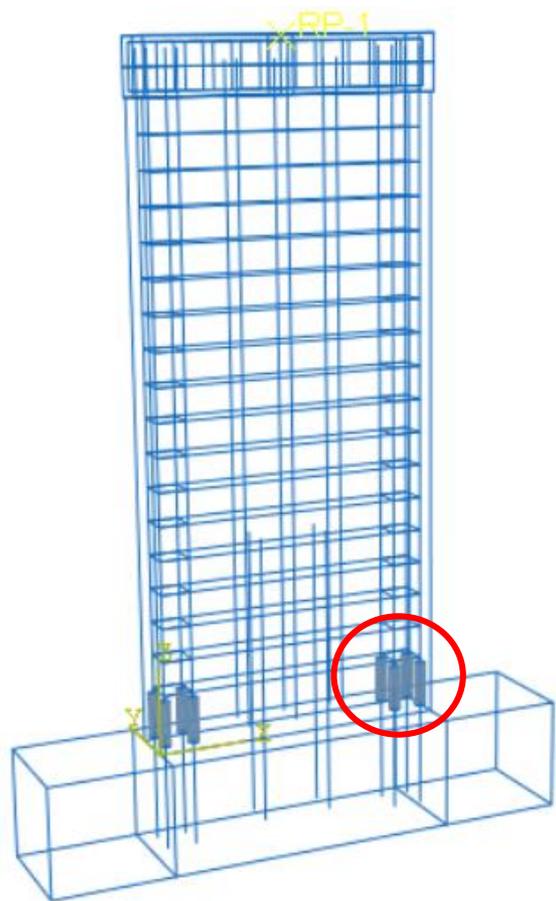
# 钢管混凝土结构节点



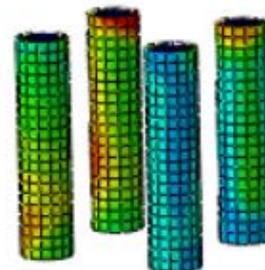
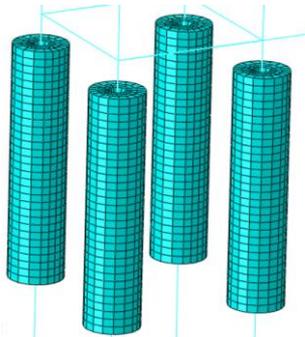
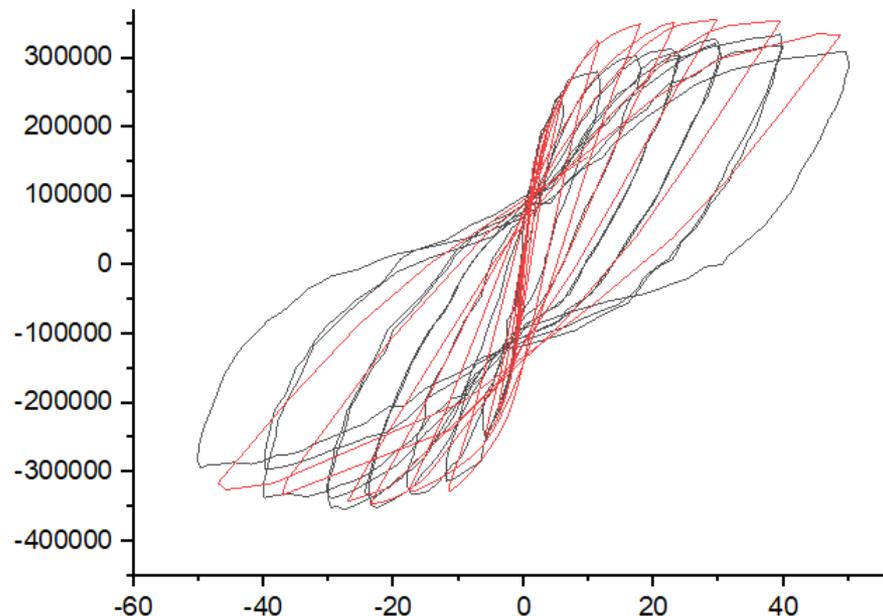
# 钢管混凝土结构节点



# 装配式剪力墙

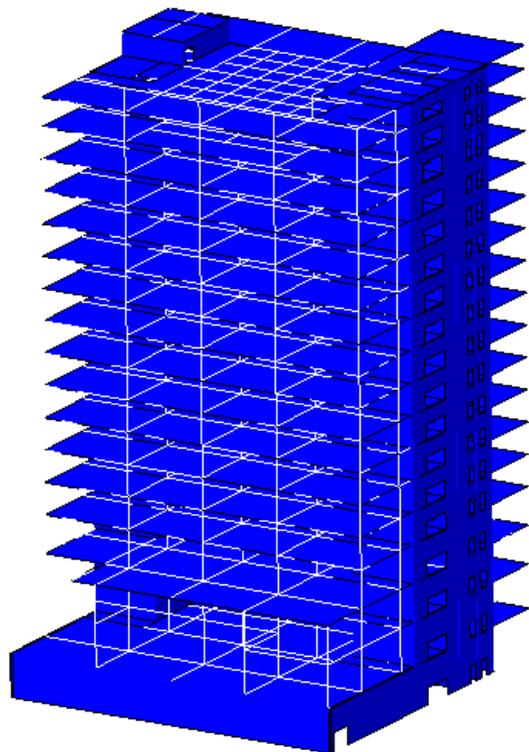


剪力墙有限元模型

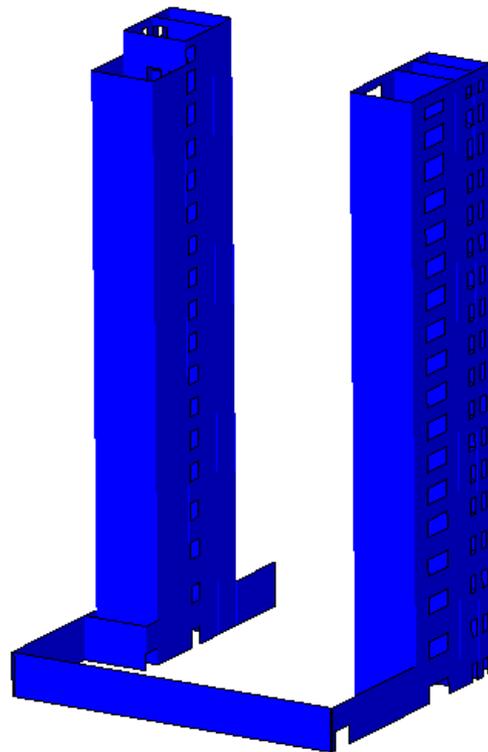


# 上海浦东广电中心

Step: Step-1 Frame: 0  
Total Time: 0.000000



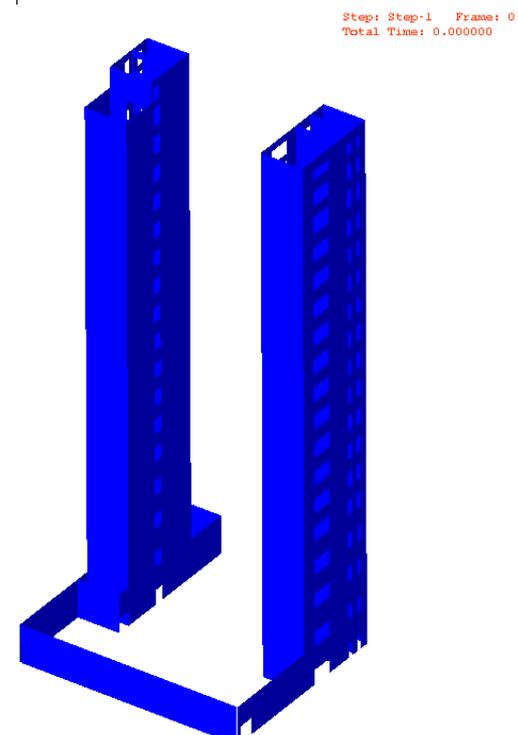
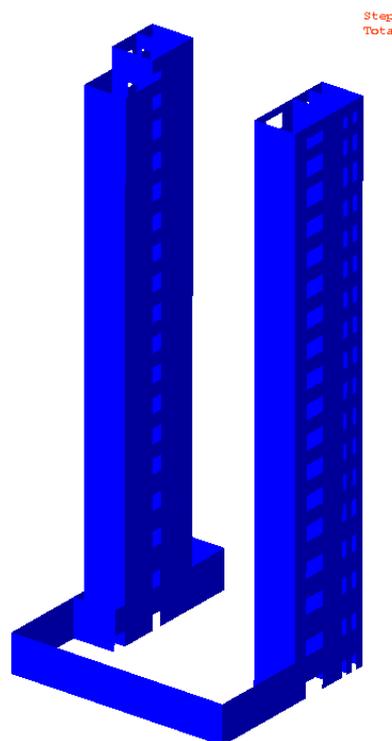
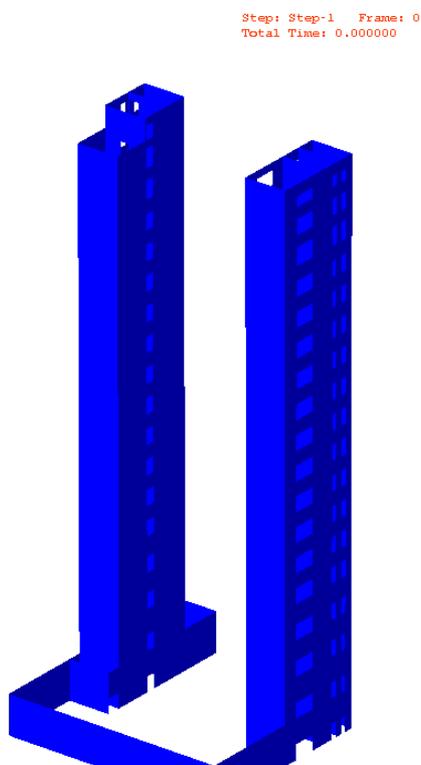
Step: Step-1 Frame: 0  
Total Time: 0.000000



by 黄天璨@广州大学



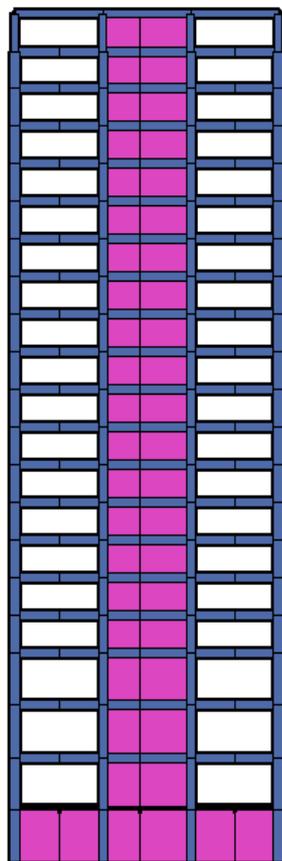
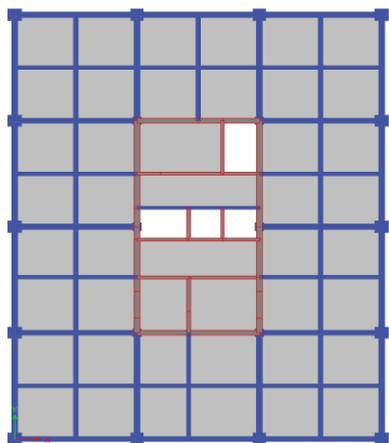
# 上海浦东广电中心



by 周浩@华南理工大学



# 型钢混凝土框架-核心筒结构大震非线性分析



框架核心筒结构

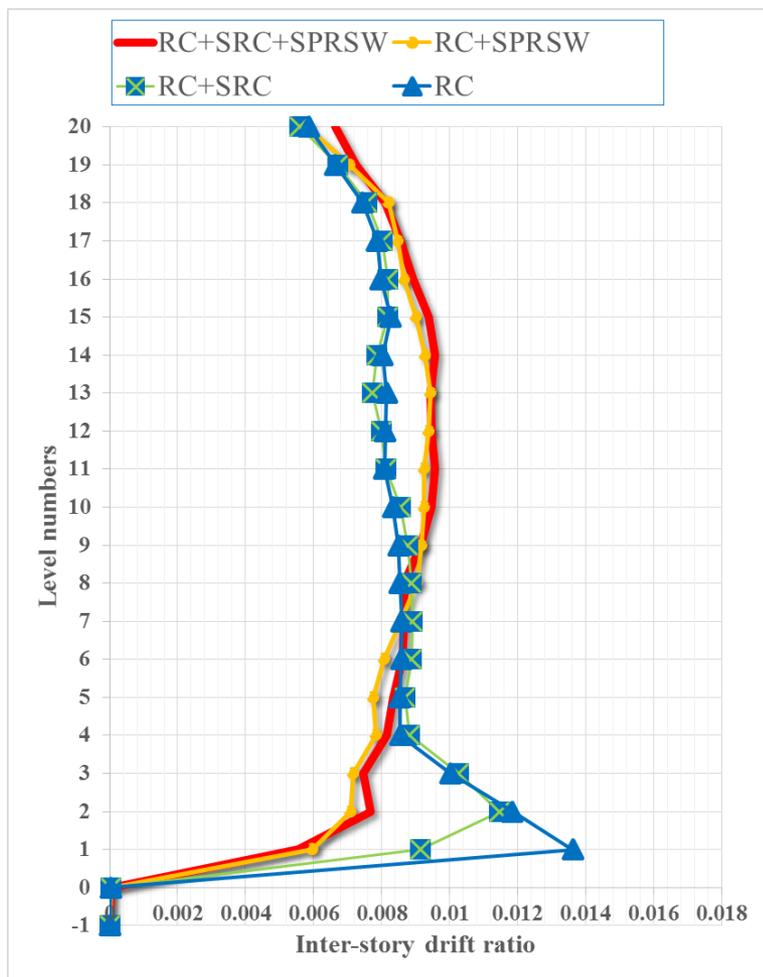
工程概况：

抗震设防烈度8度（0.2g）设计，设计地震分组第三组。结构总高度81.2米，地下1层，地上20层。工程采用框架-核心筒结构体系，结构方案分为钢筋混凝土框架-核心筒结构方案（以下简称**结构方案A**）与型钢混凝土框架-核心筒结构方案（以下简称**结构方案B**）两种。

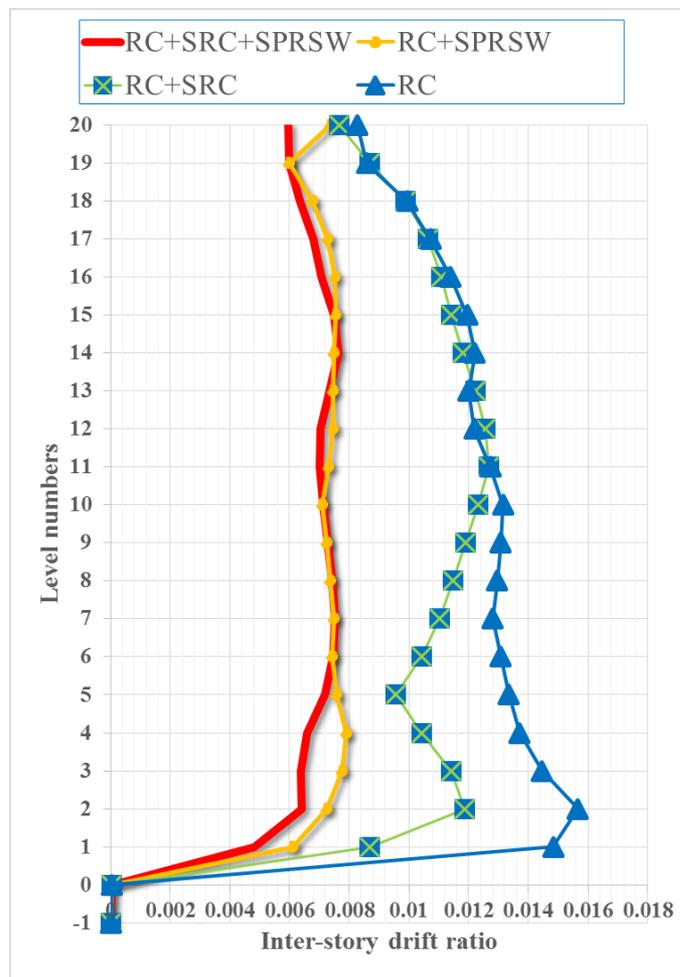
方案B在方案A基础上适当修改并建模，除在框架梁、柱内加入型钢，并对框架梁、柱配筋做相应调整外，其他部分均与模型A相同。



# 型钢混凝土框架-核心筒结构大震非线性分析



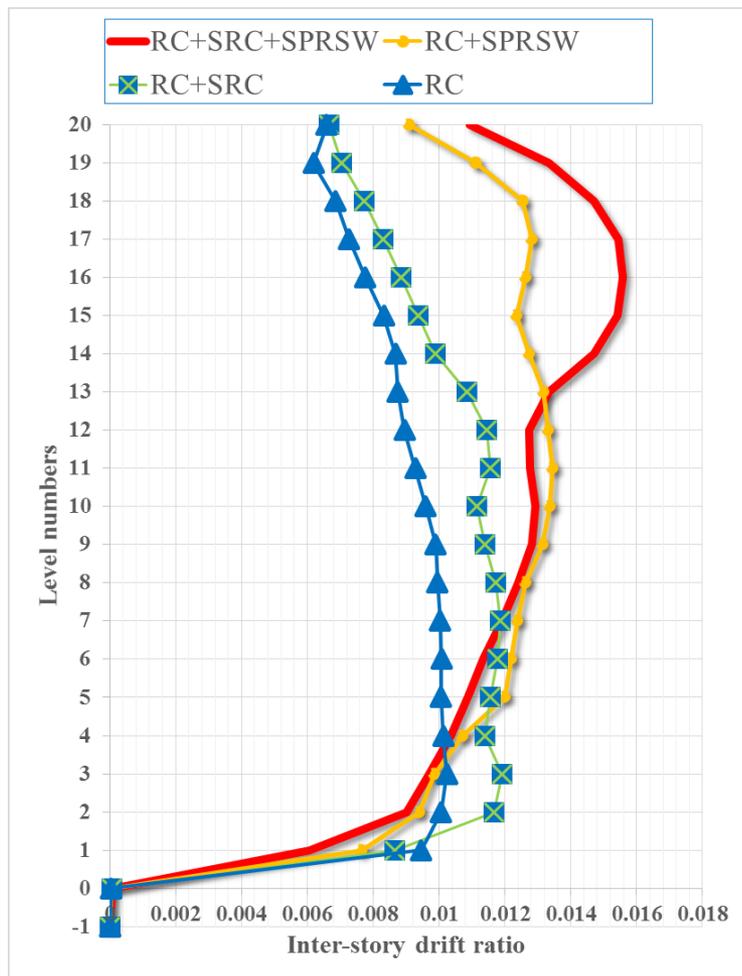
El-Centro



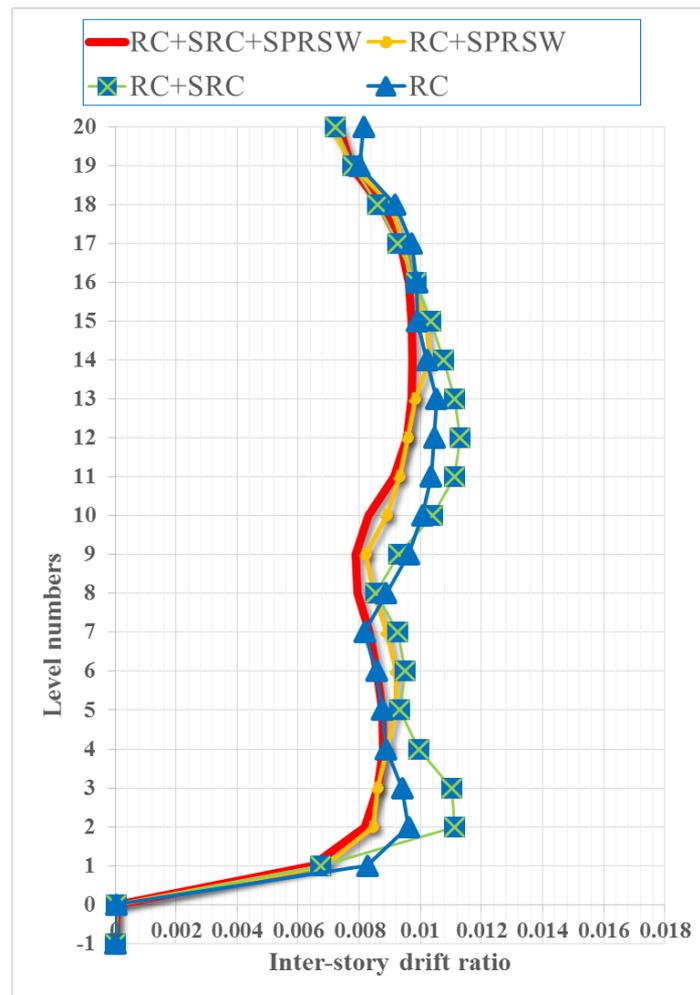
Taft

层间位移角 (PGA=620gal)

# 型钢混凝土框架-核心筒结构大震非线性分析



ChiChi-1404



ChiChi-1502

层间位移角 (PGA=620gal)

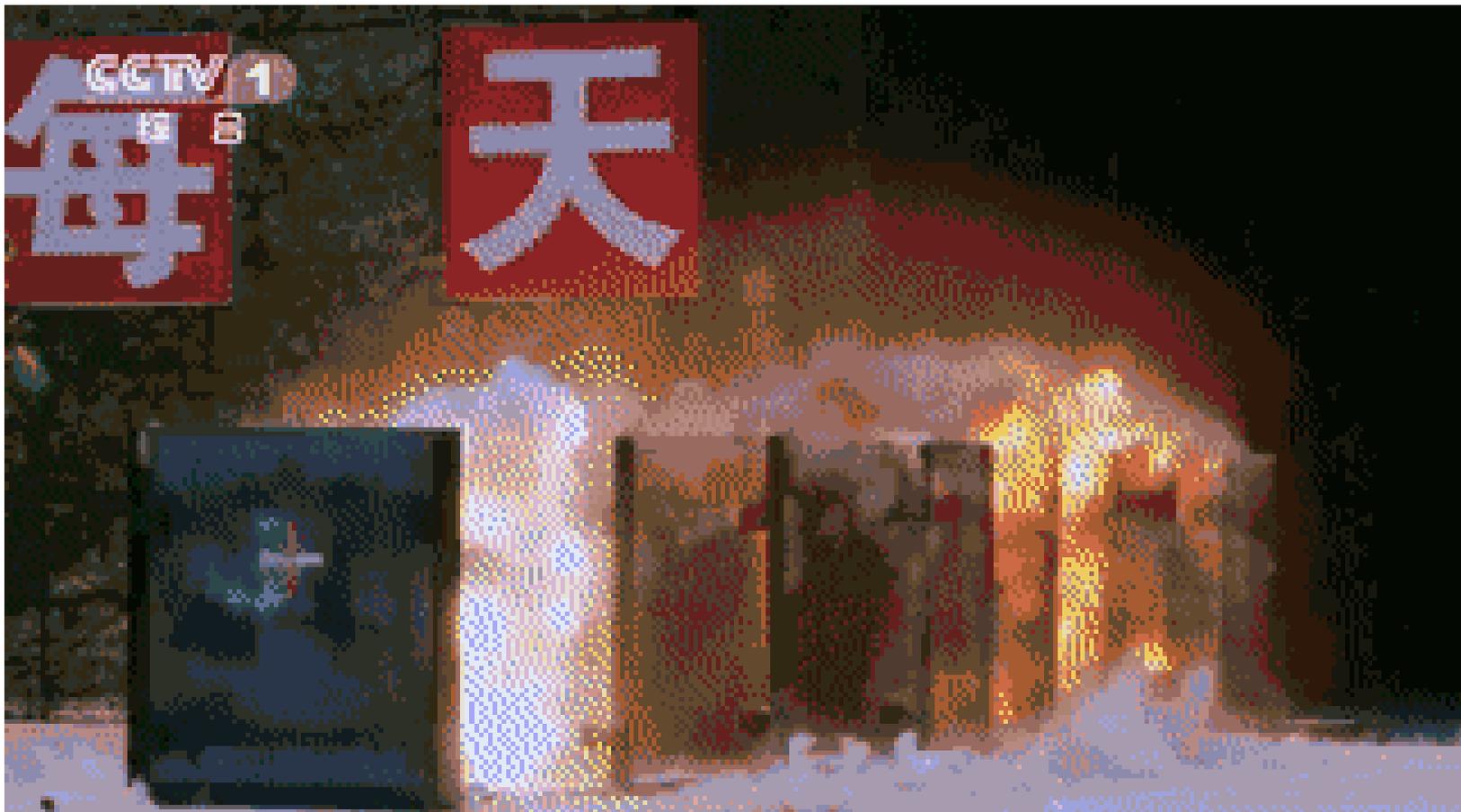


Prof. J.S. Chen

Ted Belytschko

**The methods with simplicity (and fundamentally sound) win the game.**

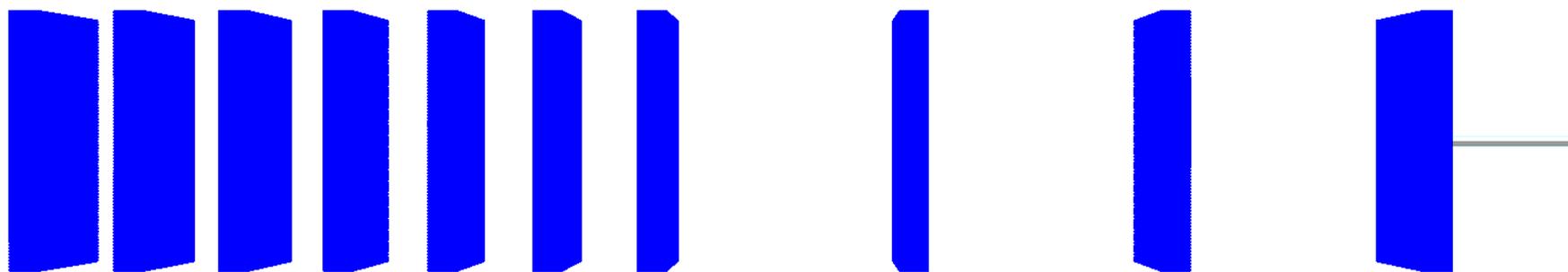




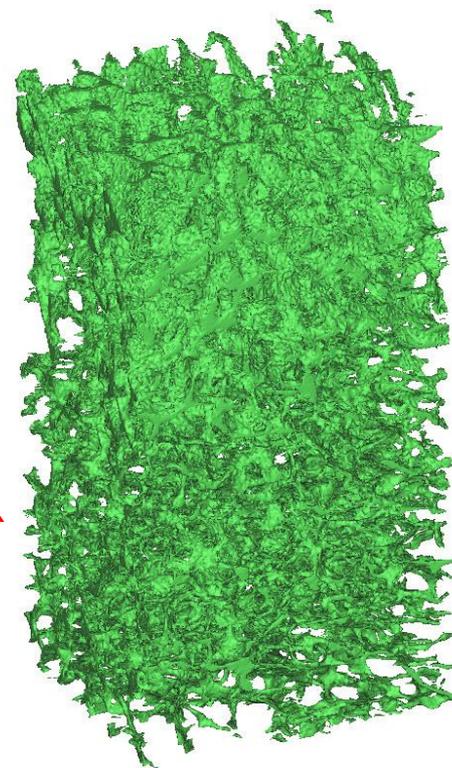
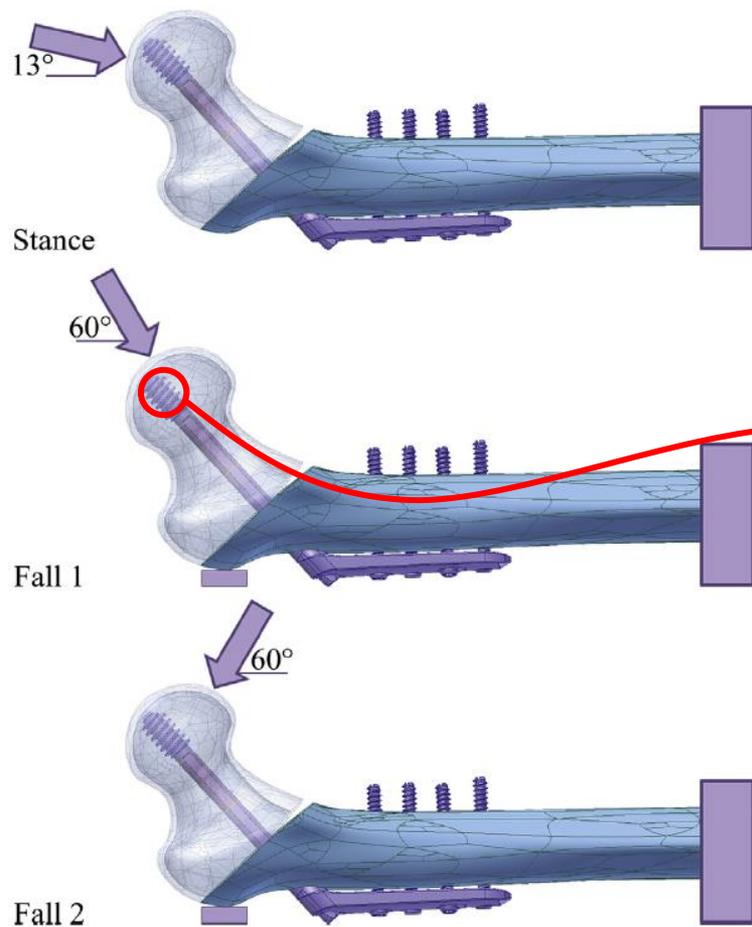


土木工程学院  
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING

Step: Step-1 Frame: 0  
Total Time: 0.000000



# 股骨植入手术

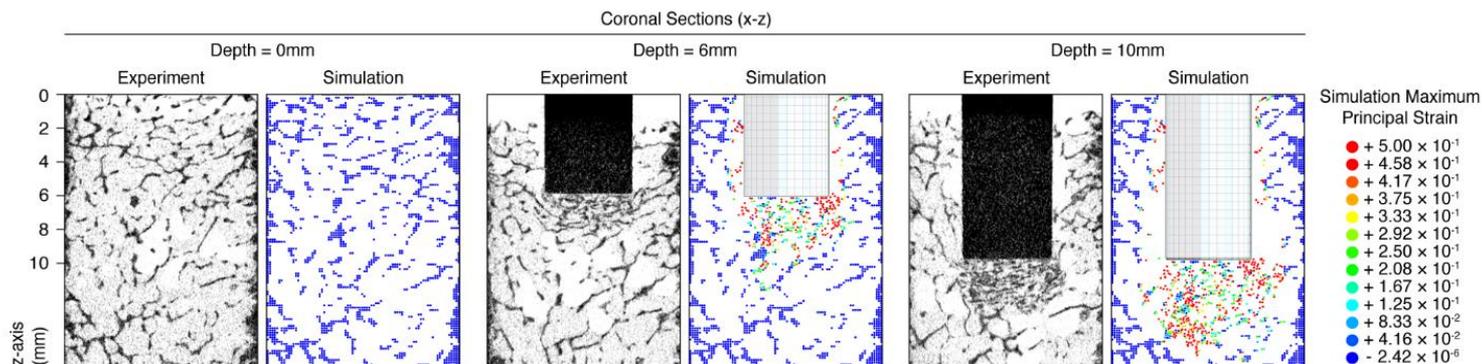


松质骨CT模型

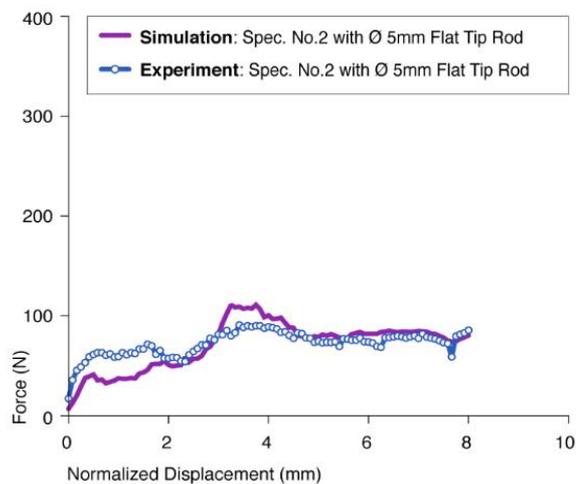


# 松质骨无网格分析模型

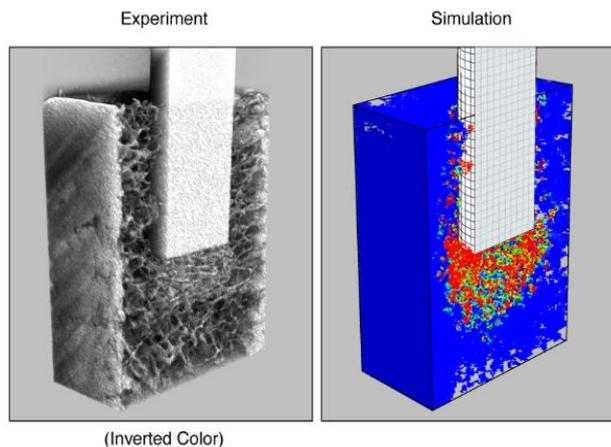
## Experimental vs. Simulated Results – Human Trabecular Bone (Specimen No.2) with $\varnothing$ 5mm Flat Tip Rod

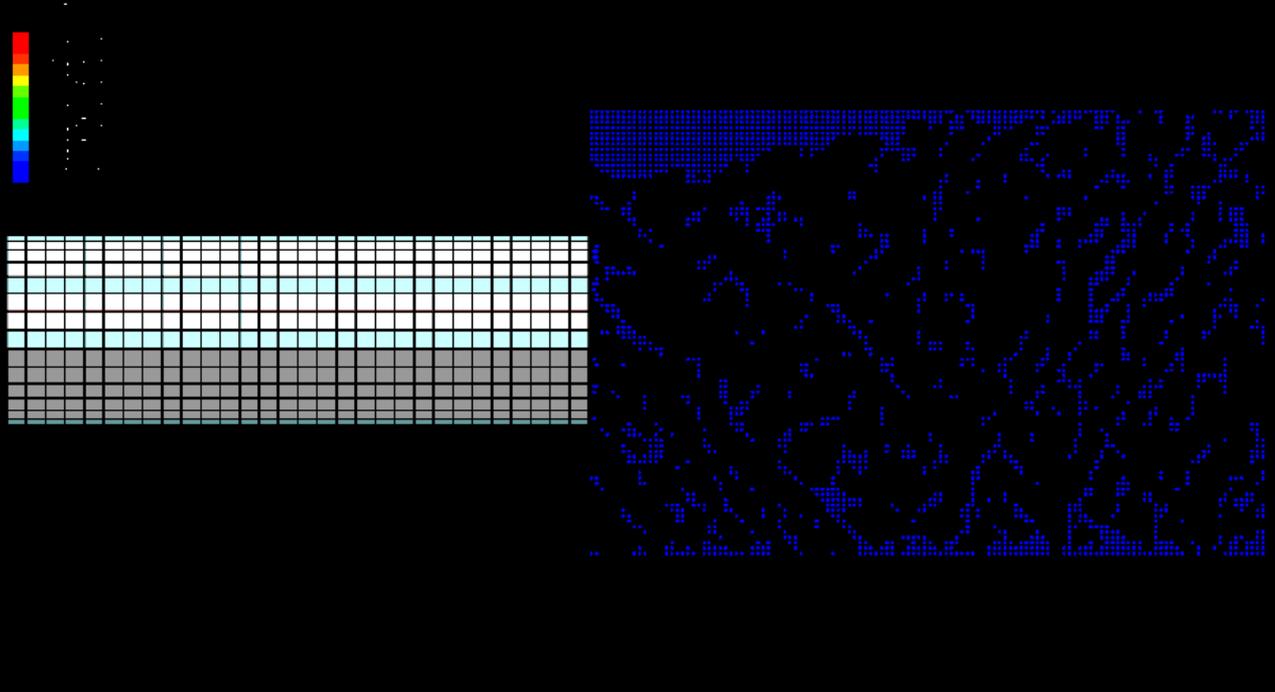
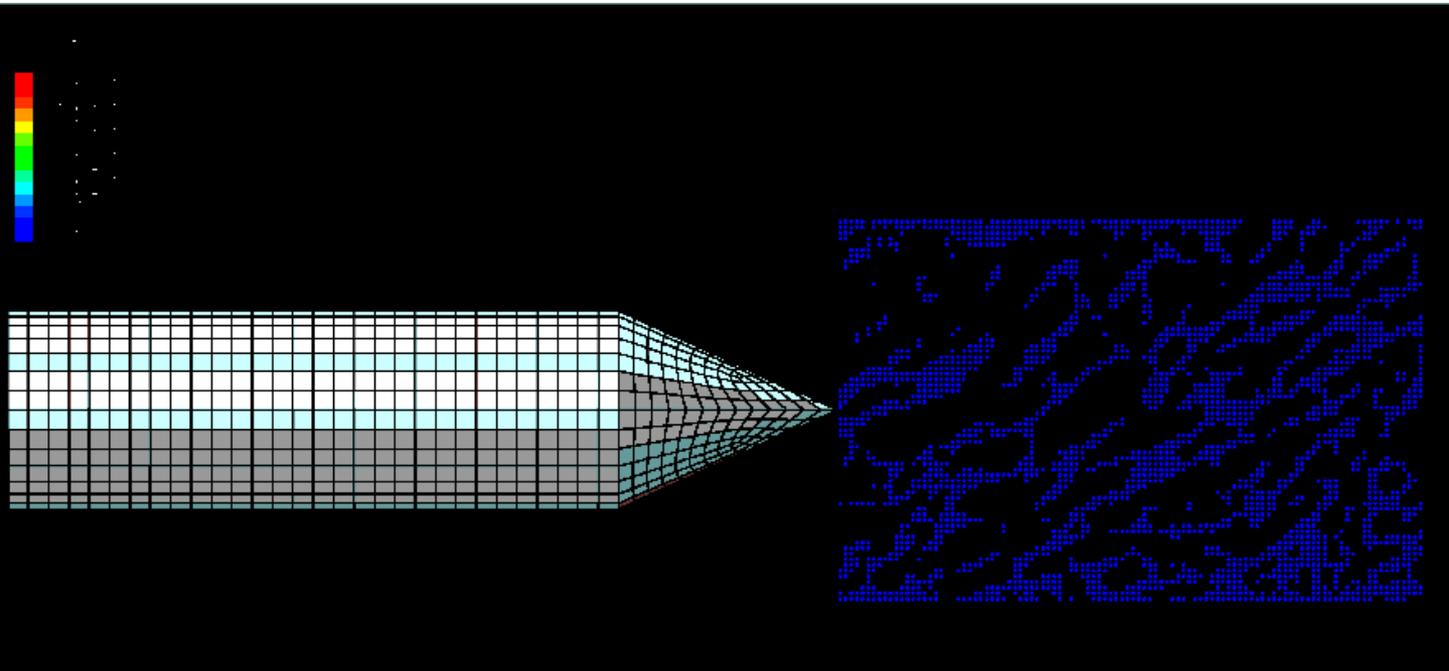


Force-Displacement Curves



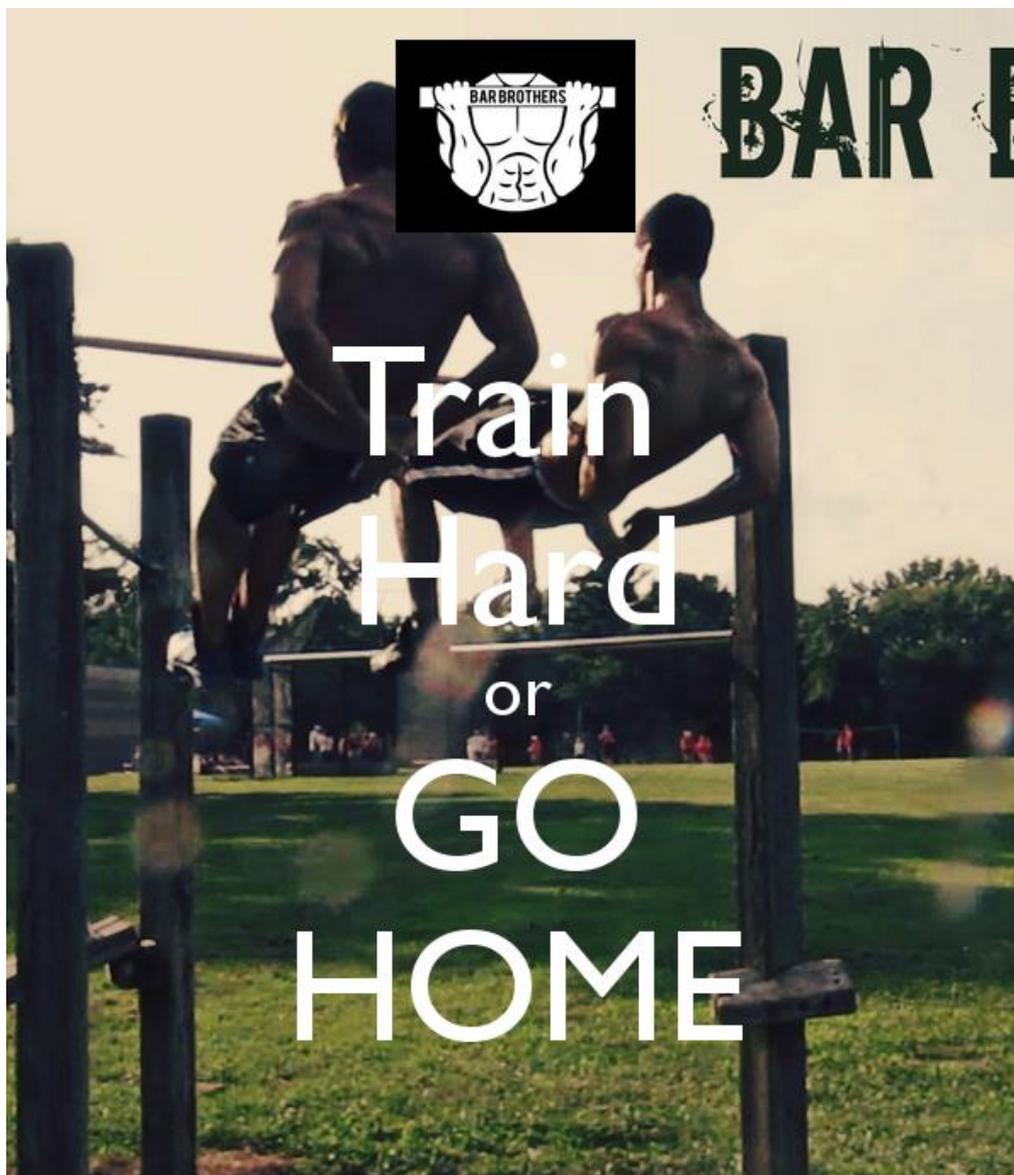
3D Section Through Coronal Plane at 10mm Displacement





Kulper, S. A., Fang, C.  
X.\*, [Ren, X.\\*](#), Guo, M.,  
Sze, K., Leung, F. K. and  
Lu, W. W. (2018)  
[J. Orthopaedic Research](#)  
doi:10.1002/jor.23734

寄语



任晓丹

同济大学土木工程学院

[rxdtj@tongji.edu.cn](mailto:rxdtj@tongji.edu.cn)

[www.renxiaodan.com](http://www.renxiaodan.com)

