

# 大跨度桁梁结构构件破断 引发连续性倒塌的研究

**Study on the Progressive Collapse of Large Span Truss-beam Structures  
Induced by Initial Member Break**

陈以一 赵宪忠 王磊 江晓峰  
同济大学

# 主要内容

- 1 引言
- 2 桁梁模型的试验研究
- 3 破坏过程的数值分析和倒塌机理
- 4 防倒塌设计策略研究
- 5 结论

# 引言：研究工作的若干难点

## 理论模型和数值分析方面

- 偶然事故机制和作用的模拟
- 复杂动力过程的重现
- 结构鲁棒性、冗余度、拉结作用、重力荷载传递路径转移的表达

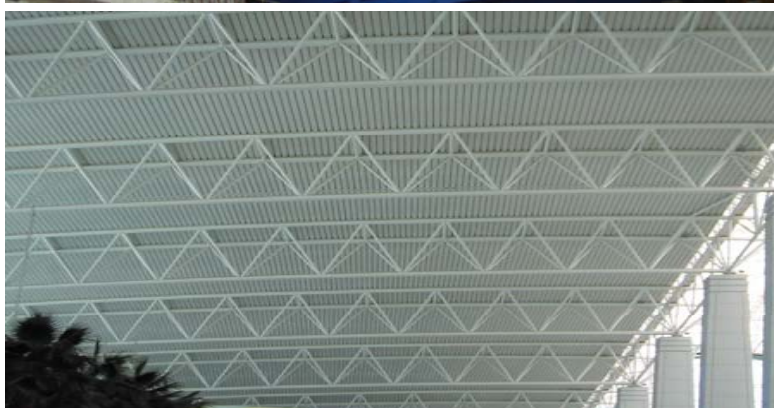
## 试验方面

- 模型制作
- 事故作用的施加
- 局部破坏在期望位置的产生
- 结构倒塌过程的观测和记录

# 引言：“桁梁”体系及特点

## “桁梁”结构描述

- (1) 荷载主要经平面系统传递
- (2) 主要横向受力构件具有格构式构型，例如一般所称的桁架

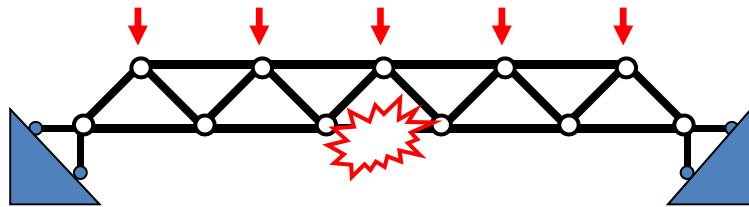


# 引言：“桁梁”体系及特点

## “桁架”模型与实际工程中“桁梁”结构的比较

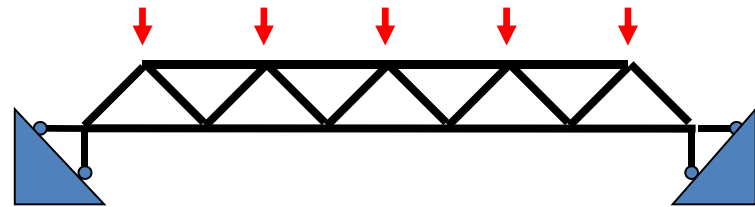
### 作为模型假定的桁架

- ◆ 所有杆件通过全铰连接
- ◆ 忽略节间荷载的情况下杆件只承受轴力
- ◆ 结构的超静定性质依赖于多余杆件或多余支座约束
- ◆ 满足一般工程精度要求，但对于连续性倒塌分析过于保守



### 实际工程中的桁梁结构

- 上下弦通常为连续杆件
- 腹杆与弦杆的连接也存在抗弯刚度
- 结构自身即具有超静定性质
- 定量分析这类结构抵抗局部破坏的能力，能反映真实情况

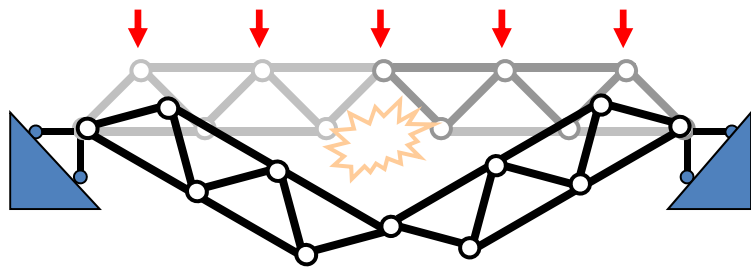


# 引言：“桁梁”体系及特点

## “桁架”模型与实际工程中“桁梁”结构的比较

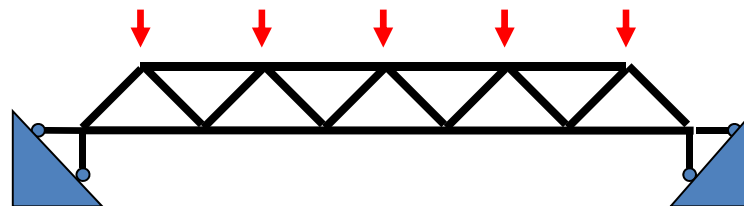
### 作为模型假定的桁架

- ◆ 所有杆件通过全铰连接
- ◆ 忽略节间荷载的情况下杆件只承受轴力
- ◆ 结构的超静定性质依赖于多余杆件或多余支座约束
- ◆ 满足一般工程精度要求，但对于连续性倒塌分析过于保守



### 实际工程中的桁梁结构

- 上下弦通常为连续杆件
- 腹杆与弦杆的连接也存在抗弯刚度
- 结构自身即具有超静定性质
- 定量分析这类结构抵抗局部破坏的能力，能反映真实情况



# 引言：“桁梁”体系及特点

## “桁梁”结构的冗余度特点

- ◆ **构造特性：** 上、下弦通常为连续杆件  
腹杆与上、下弦的连接具有一定转动刚度  
连接具有多余约束，局部构件破坏后内力可重新分布
- ◆ **承载特性：** 与构件实际承载能力相比  
重力荷载等设计荷载所产生的内力效应  
处于一种较低的水平  
构件承载力具有一定的“冗余”
- ◆ **体系特性：** 实际结构为三维系统  
各榀桁梁之间存在相互约束、支承的空间关系  
新的荷载路径可补偿因局部破坏导致的荷载传递路径破坏

# 引言：本研究所进行的工作

- 局部破坏对桁梁结构后续反应影响的模型试验技术
- 理论与数值分析结合对桁梁结构连续性倒塌机理作出解释
- 桁梁结构设计中防止连续性倒塌的措施建议



# 桁梁模型试验：主要内容

定位

对局部构件发生破坏后结构体系的后续反应进行考察

目的

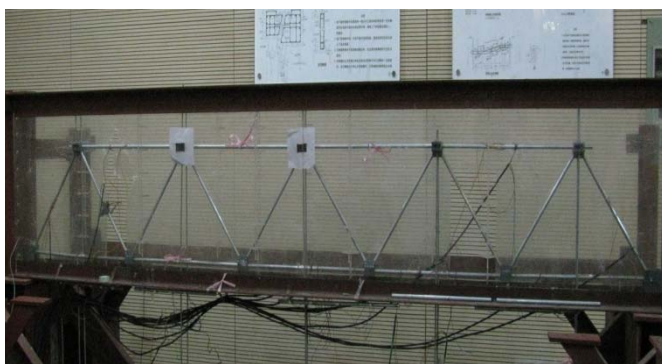
获取桁梁结构局部破坏后连续性倒塌破坏过程的资料

对数值分析的量化结果进行一定程度的验证

修正理论模型和数值模型中可能存在的问题

对象

单榀桁梁结构平面系统模型



多榀桁梁结构三维系统模型

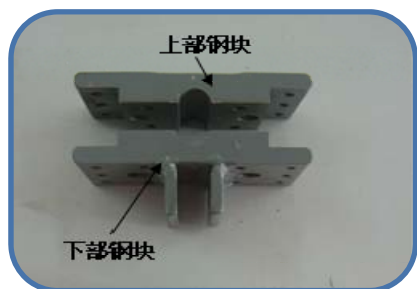


# 桁梁模型试验：主要解决问题

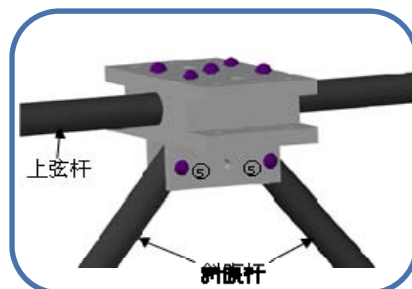
- 模型构建和初始破坏装置研发
- 数据获取方式
- 试验现象观察和数据分析

# 桁梁模型试验：杆件与连接

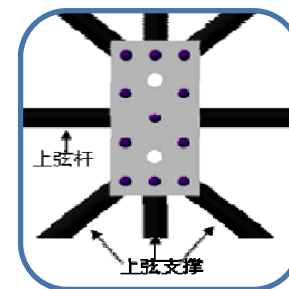
- 杆件采用铝合金圆管（便于实现强度破坏，使试验模型小型化）
- 弦杆为连续杆件（与实际工程接近）
- 连接材料为精制钢材，强度和刚度远大于杆件（保证节点不破坏）
- 采用螺栓连接（易于试验安装拆卸）



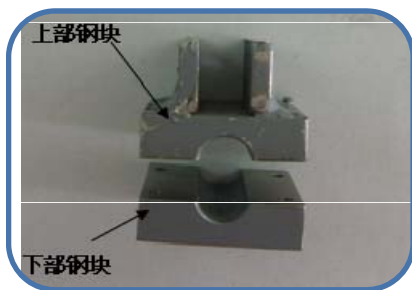
上弦节点实物



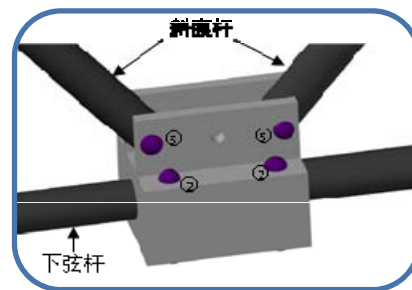
上弦节点与斜腹杆连接



上弦节点与上弦支撑连接



下弦节点实物



下弦节点与斜腹杆连接

# 桁梁模型试验：初始破坏装置

## 装置研发必要性

- 避免材料、几何离散造成的破坏模式不确定和破坏位置不确定
- 理由：使观测点布置成为可能；使结构初始状态分析建立在可重现基础上

## 装置基本设想

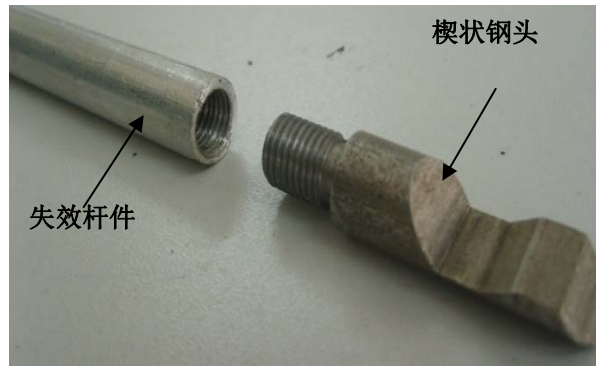
- 初始破坏表现为杆件断裂

## 装置性能要求

- 初始破坏装置对拟破坏构件常规性质的非干扰性
- 破坏发生具有瞬时性
- 破坏的触发具有可控性
- 破坏模式的可模拟性

# 桁梁模型试验：机械式破坏装置

## 构成



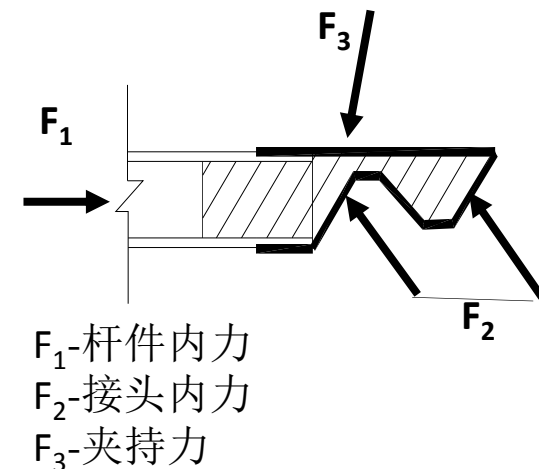
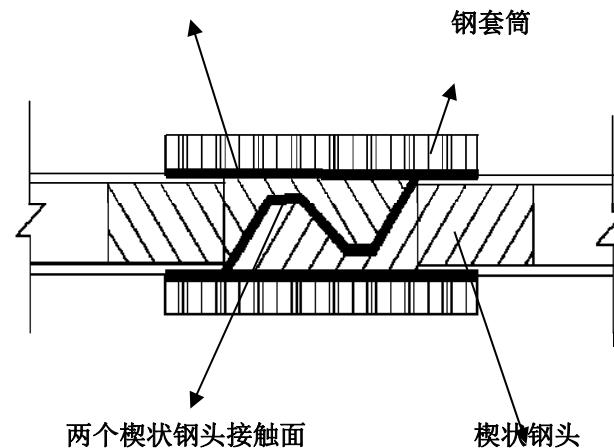
失效构件与楔状钢头构造

钢套筒与楔状钢头接触面



夹持-松弛装置

## 工作原理



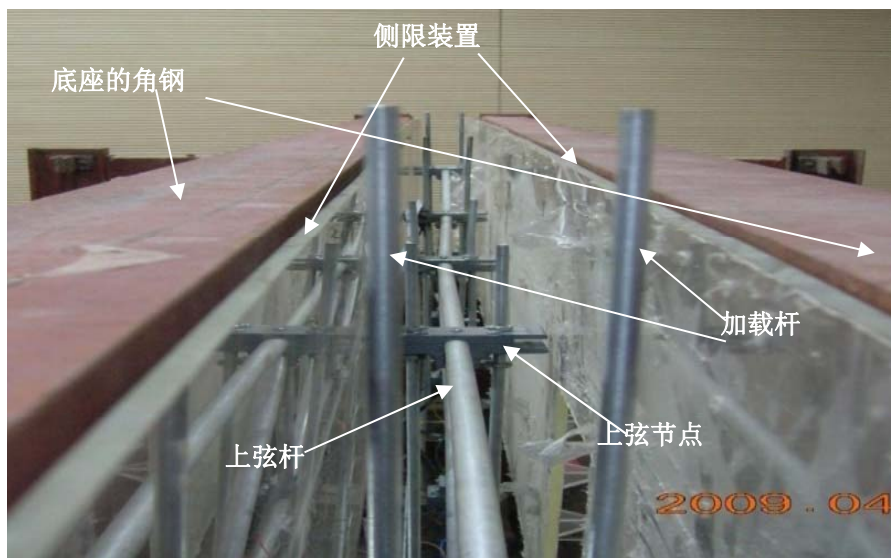
- 夹持-松弛装置闭合，夹住楔状钢头将杆件段连接为一个整体，正常传力。
- 夹持-松弛装置打开，楔状钢头相互滑开，两段杆件分离，平衡力系破坏，两段楔状钢头无法保持平衡，发生滑动，进而装置失效。11

# 桁梁模型试验：磁力式破坏装置

## 概念

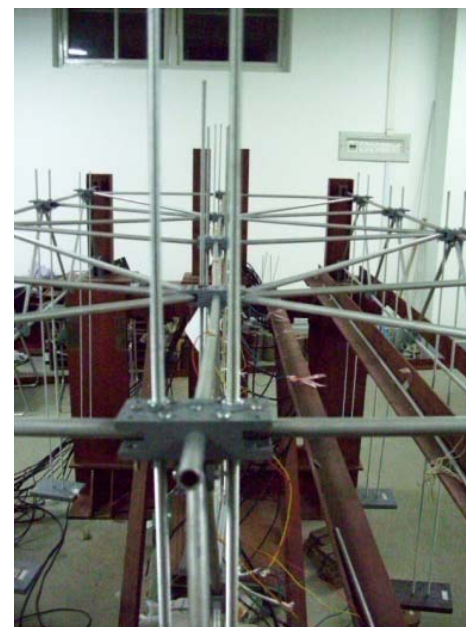
利用磁力的稳定性实现构件破断力的自主控制

# 桁梁模型试验：桁梁面外约束



单榀桁梁结构的侧向约束装置

- 突出平面内内力传递路径变化
- 不能反映周边的拉结作用



多榀桁梁上弦水平支撑

- 反映三维体系整体作用
- 对冗余度的提高

# 桁梁模型试验：非接触式位移测量

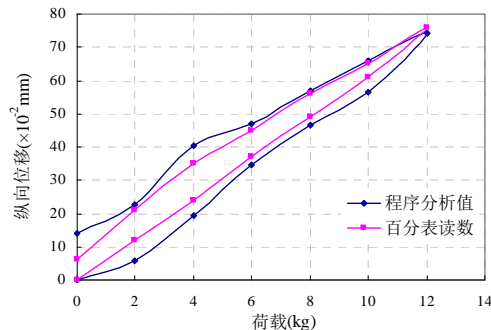
## 需要；测试手段选择

- 追随特大位移
- 方法比较：拉线式位移计/  
加速度计/动位移计

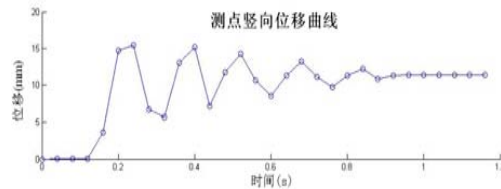
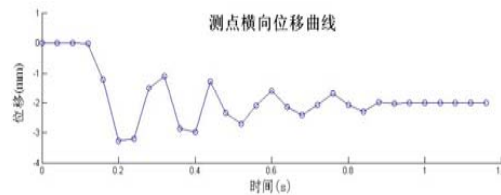
## 基本方法：摄影测量

- 高速摄影记录标记点图像  
要点：无视线阻挡  
标记点清晰度  
可接受角度
- 图像识别转换为位移数据

## 精度分析



- 静位移状态下的比较  
非接触式测量与电测位移计  
最大误差0.2mm



- 动位移状态下的记录  
频率与计算一致





# 桁梁模型试验：高频应变测量

采用动态信号测试分析系统DH5922

最高频率为20kHz

对高达数千赫兹的应变变化频率仍可得到充分的数据

# 桁梁模型试验：倒塌判定

原经一定路径传递到基础的重力荷载直接由地面支承  
局部构件或区域塌落（最轻程度）  
楼层坍塌（局部倒塌，可判定为倒塌破坏）  
结构完全坍塌（完全倒塌）

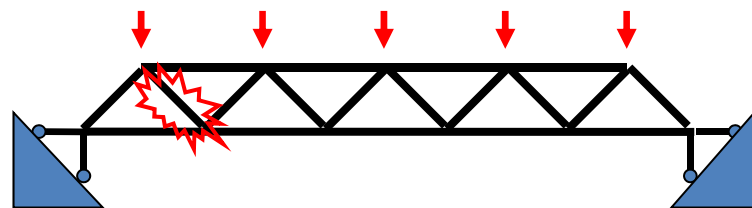
本试验以重力挂载接触地面为参考判据

# 桁梁模型试验：模型 I

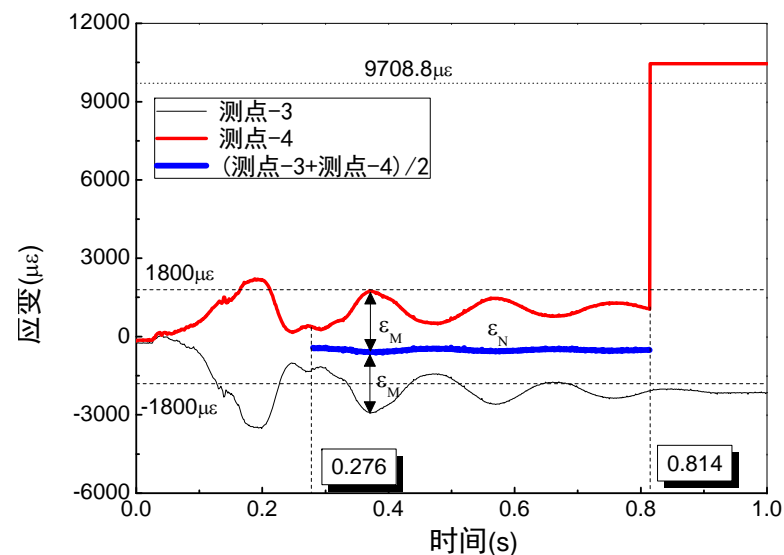
桁梁形式：面外约束单榀桁梁

初始破坏位置：端开间斜腹杆断裂

原结构弦杆应力比： $\gamma = 0.173$



单榀桁梁的最终状态



屈曲杆件测点应变时程曲线

端斜杆破断后反应：经过短时振动，第二根上弦杆发生了屈曲，结构虽有很大变形，但仍能承受原有重力挂载。

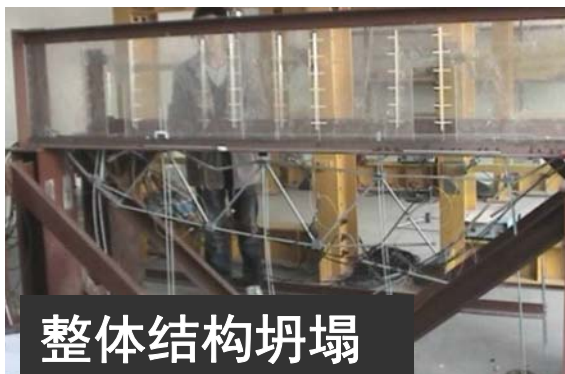
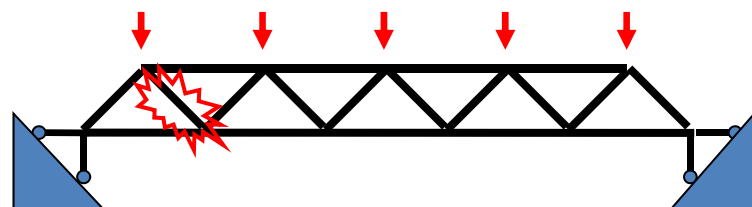
宏观表现：结构连续倒塌过程被中止。

# 桁梁模型试验：模型 II

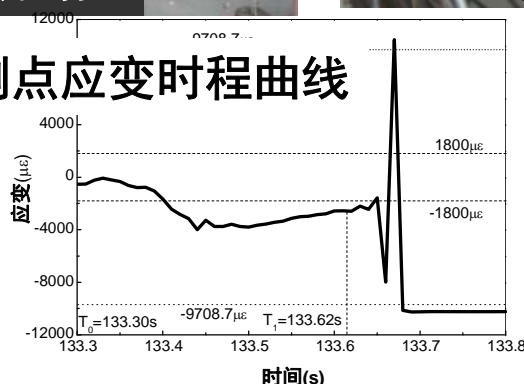
桁梁形式：面外约束单榀桁梁

初始破坏位置：端开间斜腹杆断裂

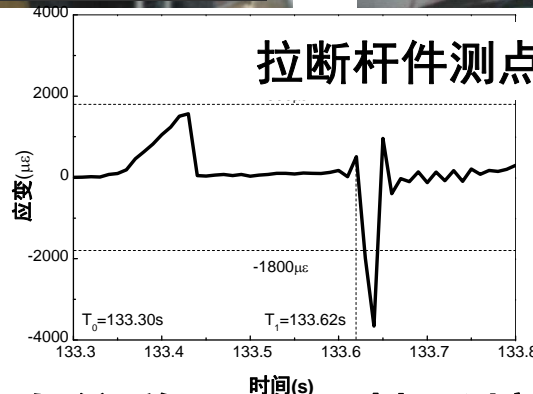
原结构弦杆应力比： $\gamma = 0.288$



屈曲杆件测点应变时程曲线



拉断杆件测点应变时程曲线



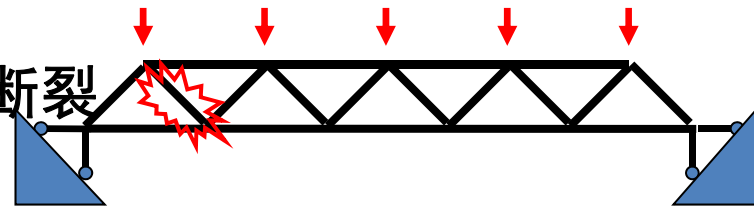
端斜杆破断后反应：结构发生了大位移，连同挂重撞到地面，部分上弦杆和斜腹杆失稳，一侧下弦杆在下弦节点处被拉断。宏观表现：结构发生连续性倒塌。

# 桁梁模型试验：模型 III

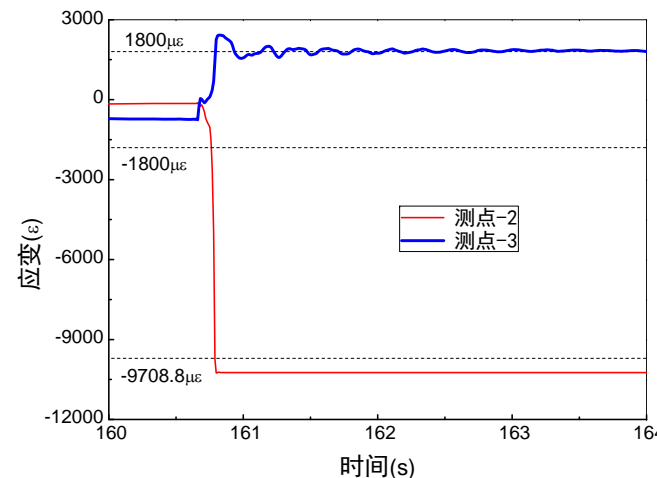
桁梁形式：三榀相互约束桁梁

初始破坏位置：中间榀端开间斜腹杆断裂

初始结构弦杆应力比： $\gamma = 0.274$



中间榀桁梁最终状态



屈曲杆件测点应变时程曲线

端斜杆破断后反应：中间榀桁梁上弦杆屈曲，整个结构可接续承载。

宏观表现：结构连续性倒塌过程被中止。

# 桁梁模型试验：三组模型试验比较

模型I、II的对比试验表明：

构件承载力富余水平的高低是结构抗倒塌重要的冗余度。

模型II、III的对比试验表明：

多榀桁梁通过空间联系可以有效重建新的荷载路径，空间作用是又一种重要的冗余效应。

# 数值分析和机理探讨

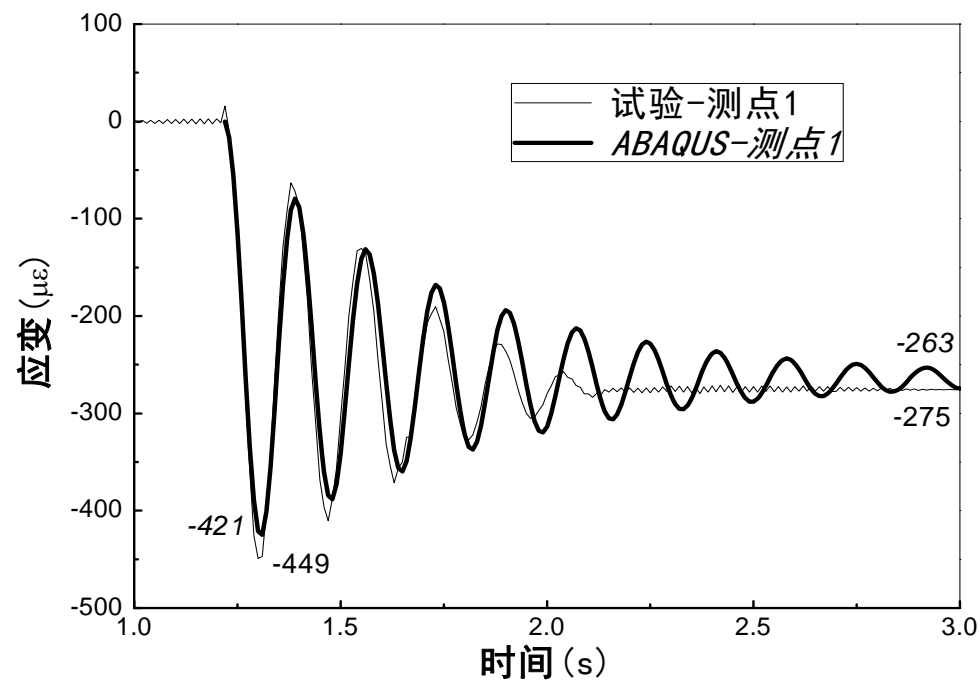
- 动力过程分析的必要性
- 试验过程模拟和分析方法、模型的检验
- 对实际工程桁梁结构的数值分析

# 数值分析和机理探讨：分析方法比较

	静力方法	动力方法
共同约定	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 结构仅承受重力荷载</li><li>➤ 构件可以发生塑性（屈服、塑性铰及材料强化）、断裂（以应变达到15%为临界值）和失稳</li><li>➤ 不仅结构构成发生变化，分步分析中也考虑剩余结构的大位移引起的形态（位置坐标）变化</li><li>➤ 不考虑引起局部构件破坏的具体原因</li><li>➤ 动力分析仍然采用了不变阻尼的假定</li><li>➤ 未考虑对构件断裂破坏时内力释放产生的冲击作用</li><li>➤ 不考虑构件破断后引发的相互碰撞</li></ul>	
分析过程	对初始结构系统在给定重力荷载下进行计算，获取该状态下的内力和变形，此后即删除假设的初始破坏构件，将其内力作为外力施加到结构上。静力分析将得到新的平衡位置，或由于其它剩余构件产生后续破坏，引起相似计算过程的重复；此后要么达到新的平衡位置，要么反复持续此过程直到计算结果发散	与静力方法相仿，剩余结构持续演变的形态位置通过逐步迭代计算自动获得。

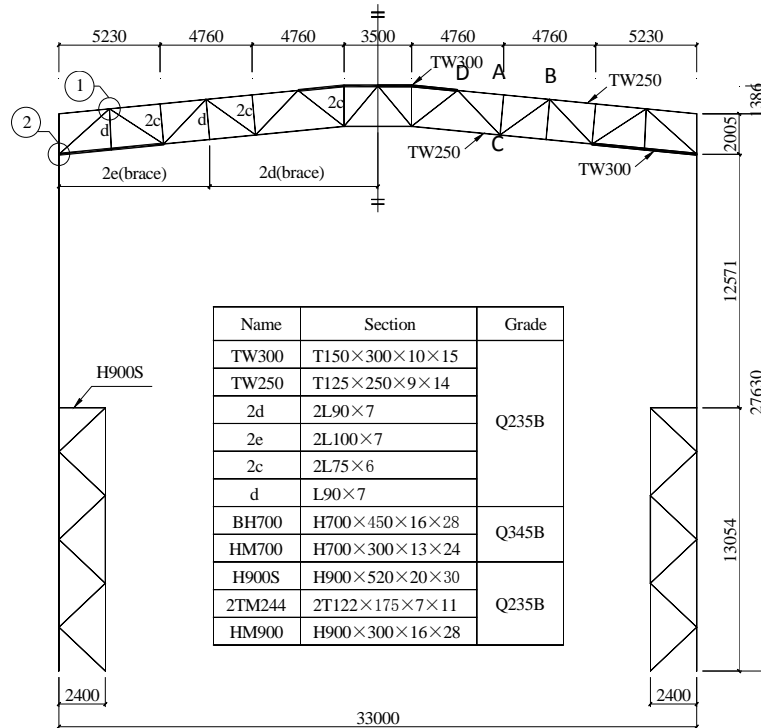


# 数值分析和机理探讨：试验模拟



# 数值分析和机理探讨：平面桁梁体系

大跨厂房钢屋架平面体系的分析模型



结论1：初始破坏后的结构机制与初始破坏构件所在位置相关

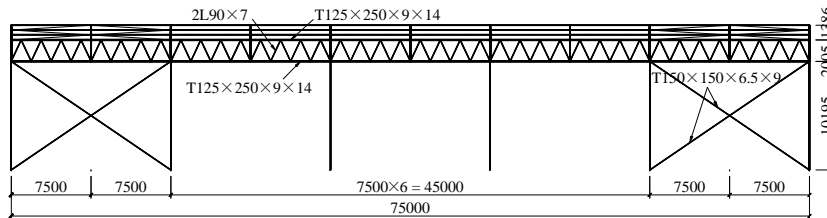
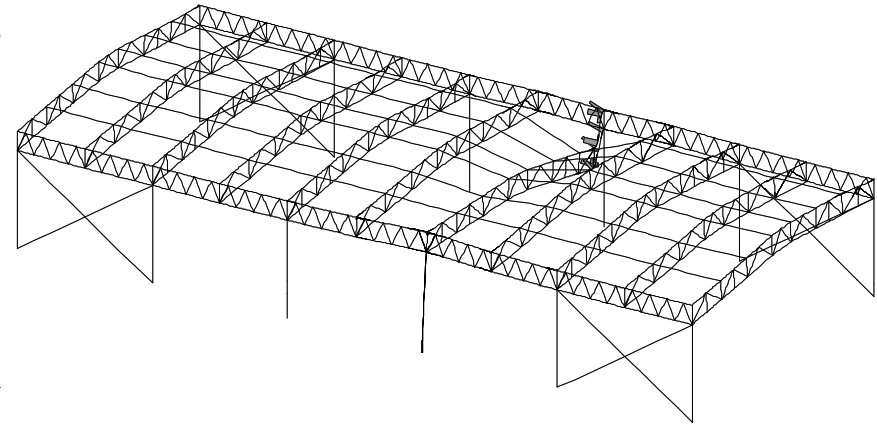
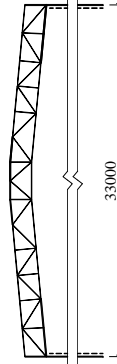
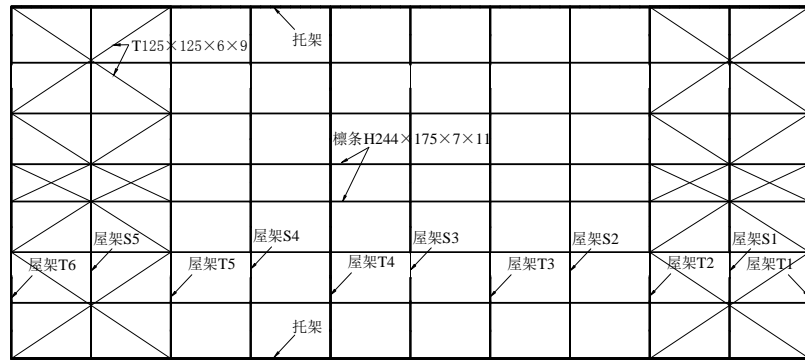
结构机制	初始破坏位置
转动铰机制	上弦杆AB
滑移面机制	斜腹杆BC
长杆失稳机制	竖腹杆AC

结论2：仅按照静力分析结果判断结构是否倒塌，可能会使得因动力作用而造成连续性破坏扩展的一部分情况得不到反映

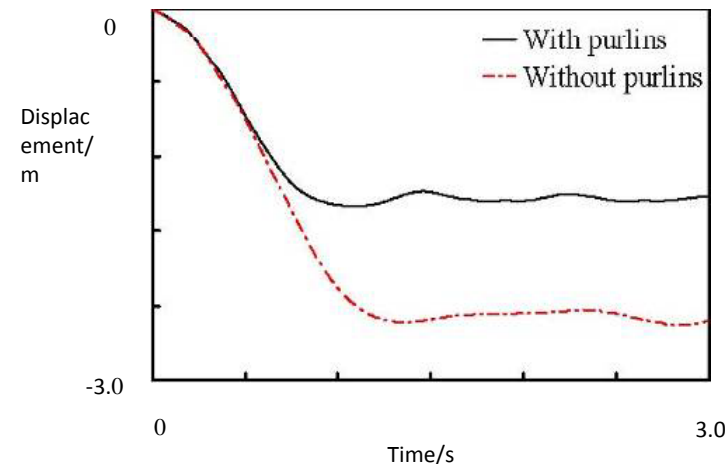
结论3：如果基于静力分析得到的平衡后内力判断，动力放大系数基本达不到 2

# 数值分析和机理探讨：空间桁梁体系

## 大跨厂房钢屋架空间体系的分析模型



## 中间榀屋架端斜腹杆初始破坏后的结构整体变形



平面系统与三维系统的比较

- 结论4：三维系统能否阻止连续性倒塌的影响因素
  - 桁梁间平面外支撑系统的拉结作用
  - 相邻结构(桁梁与柱)内力增幅大小
  - 三维构件连接承受拉力的能力

# 防倒塌设计策略研究：重要构件分类与保护

**敏感构件：**该构件的初始破坏可能引发后续破坏，但在一定条件下这种破坏有可能被中止。

**关键构件：**该构件一旦破坏，几乎无法防止结构垮塌。  
关键构件也是敏感构件的一种，比一般敏感构件重要。

**防止连续性倒塌的策略：**

设置备用荷载路径，加强构件系统的整体性，  
保留必要的承载力富余  
应保护敏感构件，更应尽力加强关键构件

# 防倒塌设计策略研究：构件静力识别(1)

(1) 计算构件承载系数，表达重力条件下的构件设计承载力的富余程度

$$R_{bc} = \varphi \cdot \frac{A \cdot f_k}{N_0} \quad R_{bc} = \frac{W_p \cdot f_k}{M_0} \quad (1)$$

$N_0$ 、 $M_0$  —— 局部破坏发生前构件在重力荷载作用下的初始内力（轴力或弯矩）

$A$ 、 $W_p$  —— 构件截面面积和截面塑性抵抗矩

$\varphi$  —— 轴压整体稳定系数，构件受拉时取1

$f_k$  —— 材料强度标准值。

(2) 计算初始破坏影响系数。即剩余构件在某一特定构件破坏后的内力与  $N(M)$  初始内力的比值

$$R_{eff} = N / N_0 \quad R_{eff} = M / M_0 \quad (2)$$

用静力法直接估计剩余构件的新内力  $N$ 、 $M$  可能低估动力放大系数影响，可近似采用  $N_d$ 、 $M_d$  代替。

$$N_d = N + \eta(N - N_0) = \left(1 + \eta - \frac{\eta}{N/N_0}\right) \cdot N \quad (3)$$
$$M_d = M + \eta(M - M_0) = \left(1 + \eta - \frac{\eta}{M/M_0}\right) \cdot M$$

根据桁梁结构的动力分析结果， $\eta$  值可取1.05~1.1。

# 防倒塌设计策略研究：构件静力识别(2)

- (3) 计算构件*i*的敏感性系数，定义为该构件初始破坏后，剩余结构中最不利构件的内力与其承载力的比值，采用如下式子表达

$$R_{\text{sen}}^i = \text{Max}_{j \neq i} \left( \frac{N}{\varphi \cdot A \cdot f_k} \right)^j \quad \text{或} \quad R_{\text{sen}}^i = \text{Max}_{j \neq i} \left( \frac{M}{W_p \cdot f_k} \right)^j \quad (4)$$

按式(1)、(2)的定义，敏感性系数可表达为：

$$R_{\text{sen}}^i = \text{Max}_{j \neq i} \left( \frac{R_{\text{eff}}^{i \rightarrow j}}{R_{\text{bc}}^j} \right) \quad (5)$$

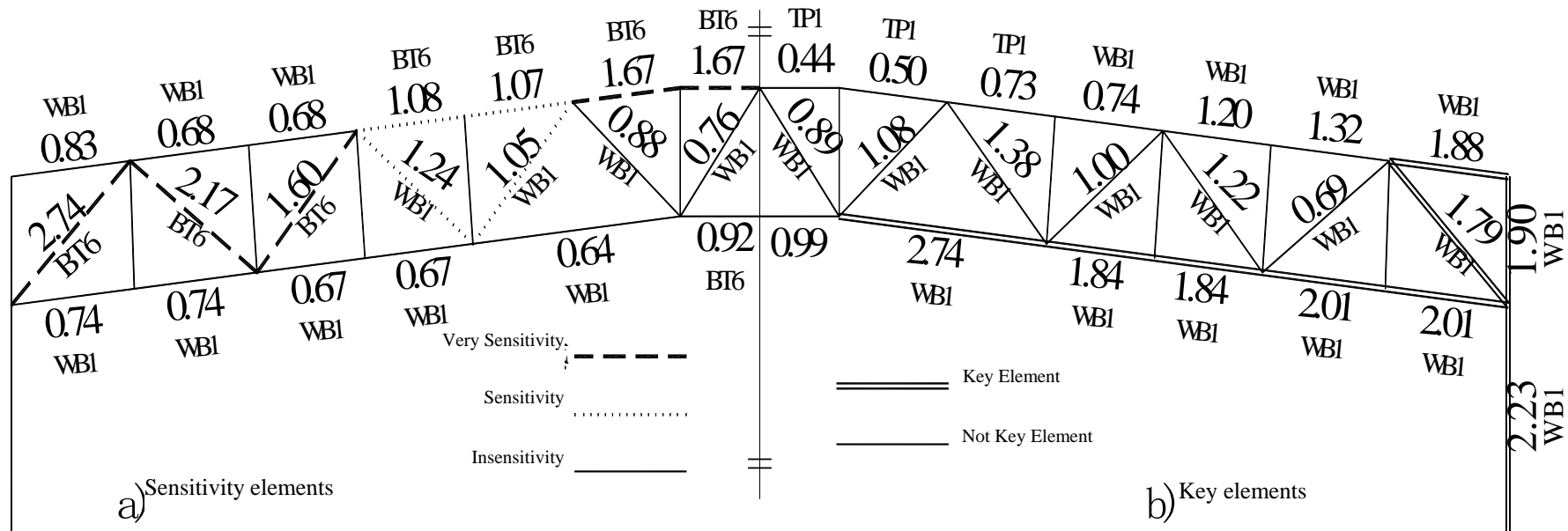
- (4) 构件*j*的关键性系数，定义为其余构件*i*发生初始破坏后，构件*j*在荷载传递新路径上的内力需求与承载能力的比值，即体现其对遏制连续性破坏的作用。

$$R_{\text{key}}^j = \text{Max}_{i \neq j} \left( \frac{N}{\varphi \cdot A \cdot f_d} \right)^j \quad \text{or} \quad R_{\text{key}}^j = \text{Max}_{i \neq j} \left( \frac{M}{W_p \cdot f_d} \right)^j \quad (6)$$

## ■ 门槛值：

$R_{\text{sen}}$  小于1.0设为不敏感，介于1.0~1.5为较敏感，大于1.5为非常敏感；  
 $R_{\text{key}}$  大于1.5设为关键。

# 防倒塌设计策略研究：算例



计算判断结果与实验观察和数值分析均能良好吻合，表明这一静力判别方法是简单、有效的。

# 结论

- 建立了一套模型试验系统，其对象模型、构件初始破坏触发装置、位移和应变测量技术都能适合结构模型短时动力破坏的试验要求。
- 进行了数值分析，所揭示的桁梁结构连续性倒塌的破坏机制，有助于预测初始破坏后桁梁结构会否发生进一步破坏，并验证了数值计算模型和方法的适用性。
- 提出了保护敏感构件，加强关键构件的防止连续性倒塌的设计策略，提出了一种基于静力方法又考虑动力效应的构件敏感性系数、关键性系数的计算方法。



谢谢！