



## 震损混合连接框架节点减震修复研究

许伟志 博士后

E-mail: [xuwz@njtech.edu.cn](mailto:xuwz@njtech.edu.cn)

2022年12月29日

**一** 研究背景

**二** 震损机理

**三** 减震修复

**四** 试验验证

一

研究背景

二

震损机理

三

减震修复

四

研究展望

# 一. 研究背景

## □ PC建筑快速发展

### 规范标准

《装配式混凝土结构技术规程》、《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》等相关规范标准，为PC建筑设计、施工等提供技术支撑。但是针对新结构类型出现，规范还不完善。

### 政策导向

鉴于装配式建筑绿色节能，工业化生产模式，各级政府出台了大量政策鼓励和要求发展装配式建筑。国家从方针政策引出台促进装配式发展。



### 绿色发展

传统建筑业“高耗能，高排放”等问题，不利于碳中和和碳达峰目标的实现，与绿色发展的需求相矛盾。

### 抗震性能

安全性是建筑结构立身之本，装配式建筑面临最大安全挑战即为地震灾害。加之，近年地震多发，抗震性能成为关注焦点。与传统现浇结构相比，可能存在缺陷在于连接。

➤ 技术发展及政策推进使得采用装配式混凝土结构工程项目遍地开花。

# 一. 研究背景

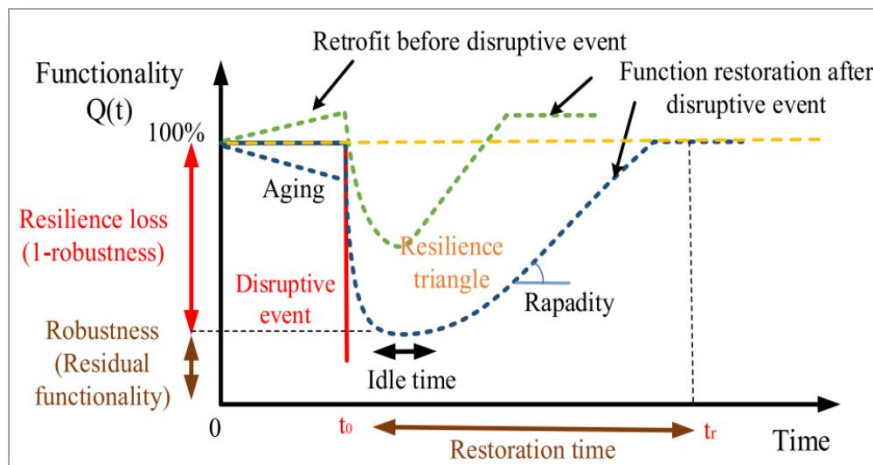
## 工程抗震理念

强度设计

延性设计

性能化设计

韧性设计



韧性又称可恢复性，用以描述系统在受到干扰后维持或恢复功能的能力。本研究关注的是结构的抗震韧性，通常用**修复时间**、**人员伤亡**及**经济损失**等指标进行抗震韧性定量评价。

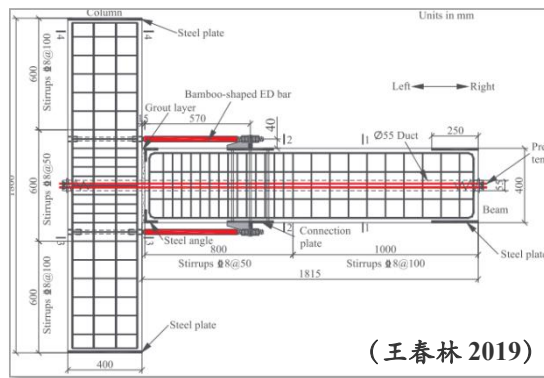
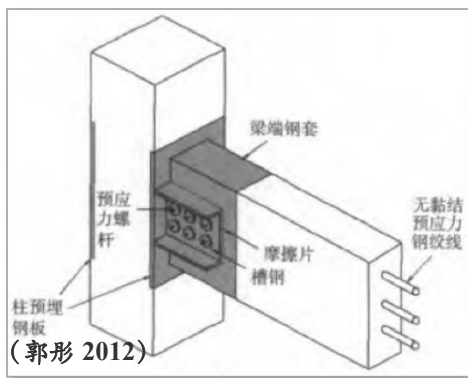
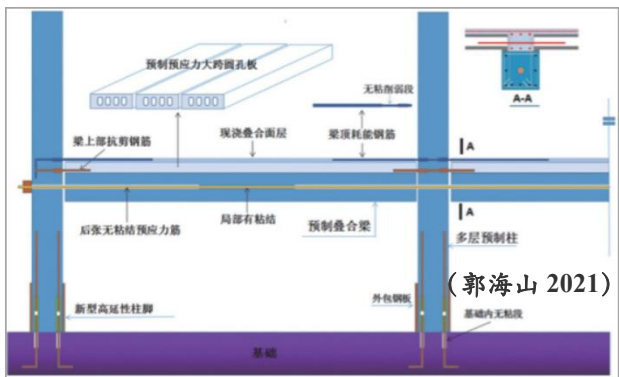
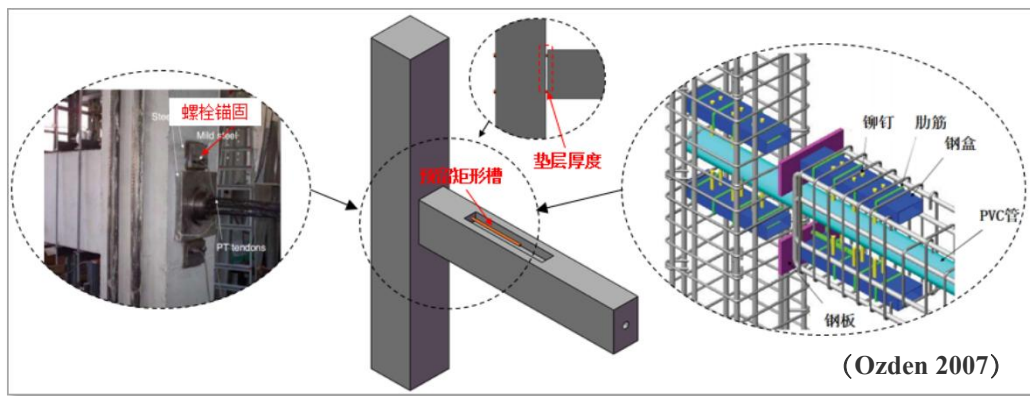
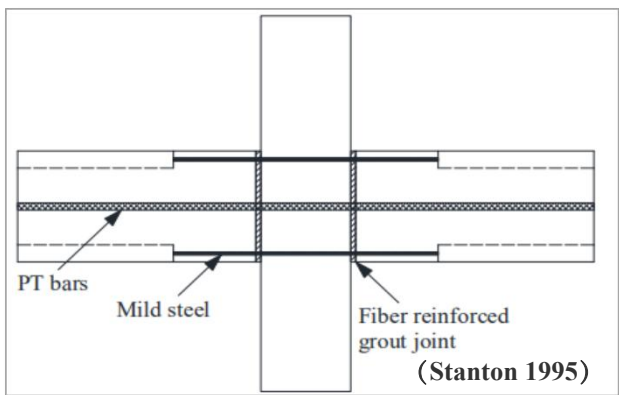
《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出建设宜居、创新、智慧、**绿色**、人文、**韧性**城市的目标。

- 具有抗震韧性的单体建筑结构是构成抗震韧性城市的基本单元。
- 发展绿色的抗震韧性结构体系是实现新型城市的重要技术途径。

# 一. 研究背景

## □ 研究现状：混合连接 (Hybrid Connection)

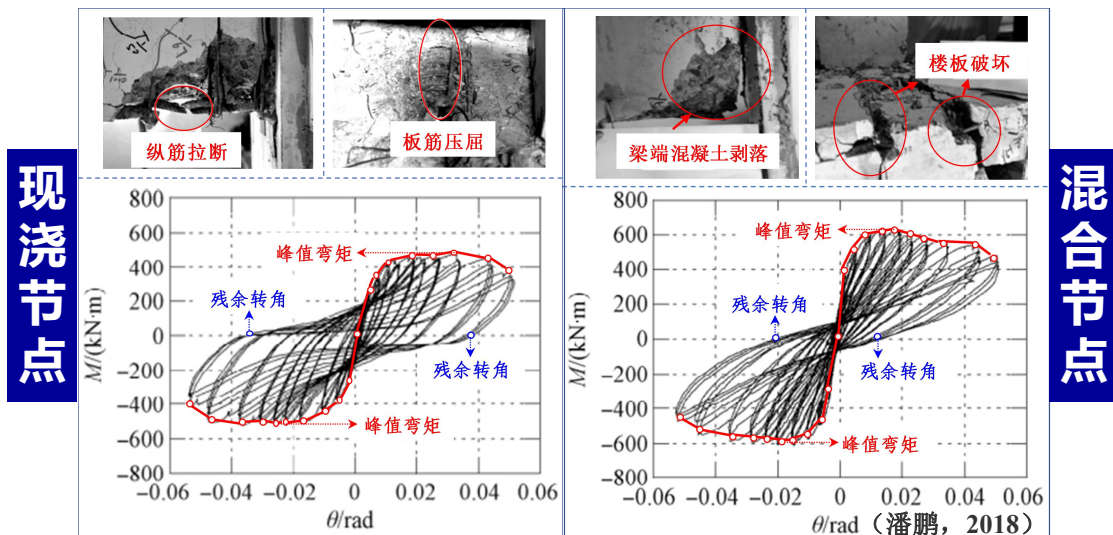
采用后张无黏结预应力实现有效连接，属于干式连接。上世纪90年代，美日联合项目PRESSS计划发展出不同干式连接节点，其中后张预应力混合节点抗震性能表现优越，并在美日本得到工程应用。在此激励下，国内外学者发展出不同形式的节点构造，尤其在节点中引入可更换的外置消能装置，成为近年的研究热点。



# 一. 研究背景

## □ 研究现状：震损加固

震损结构加固的前提是评估其经济可行和技术可行。地震损伤结构若残余变形过大，往往会成为站立的废墟。设计合理的混合连接框架即使经历强震，由于其自复位和低损伤特点，具有修复价值；其次，相关试验研究表明混合节点在大位移幅值下所表现出的刚度和强度退化不可忽视，震后修复具有必要性。



主流的修复加固方法，如加大截面法、外包钢法、外部粘贴加固法等，研究较为成熟，但是多种很对抗震性能不足的现浇结构或者震损现浇结构。针对混合连接装配式混凝土框架结构地震损伤后进行性能修复及提升研究鲜有报道。

**一** 研究背景

**二** 震损机理

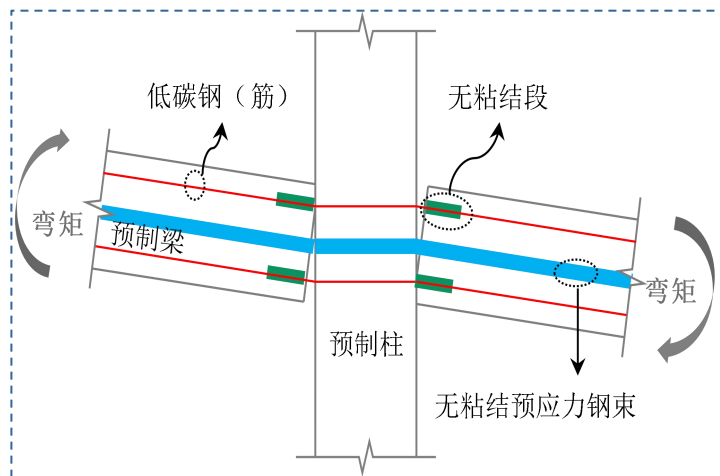
**三** 减震修复

**四** 研究展望



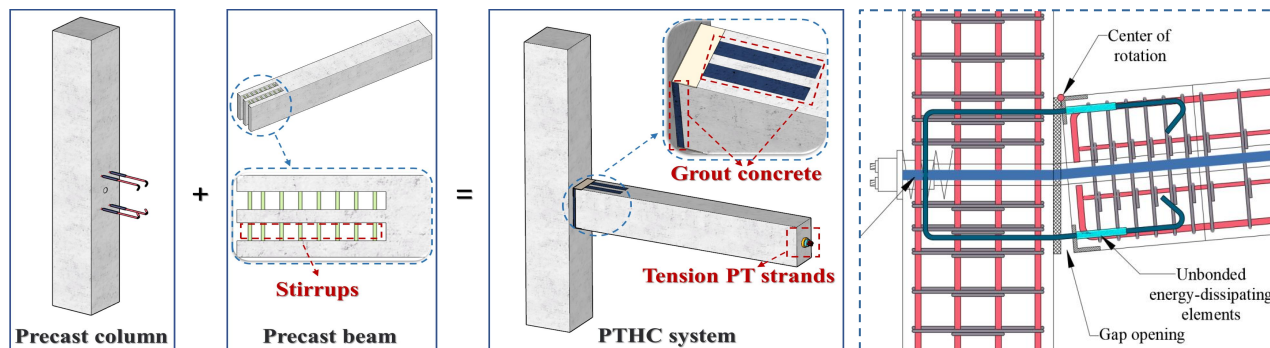
## 二. 震损机理

### 混合节点：工作原理



- ◆ PRESSS研究计划所提出的后张预应力压接技术的混合连接装配式框架结构体系兼备功能可恢复属性和装配属性。
- ◆ 预制梁柱通过后张无粘结预应力筋压接在一起，预制梁内置耗能钢筋的无粘结段通过拉压屈服机制发挥耗能作用，依靠预应力挤压作用在梁柱接触面产生的摩擦力进行抗剪。

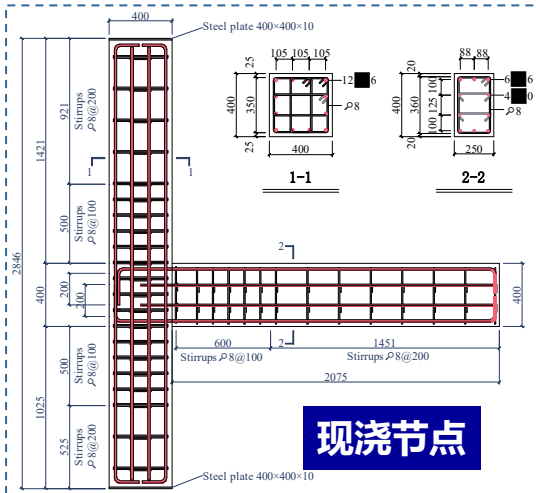
### 混合节点：连接构造



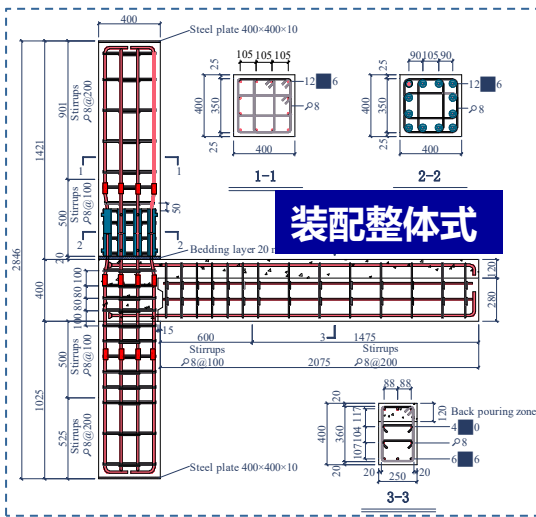
- ◆ 柱中预埋耗能钢筋；
- ◆ 垫层和槽孔一次灌浆；
- ◆ 构造简单，传力机制明确。

# 二. 震损机理

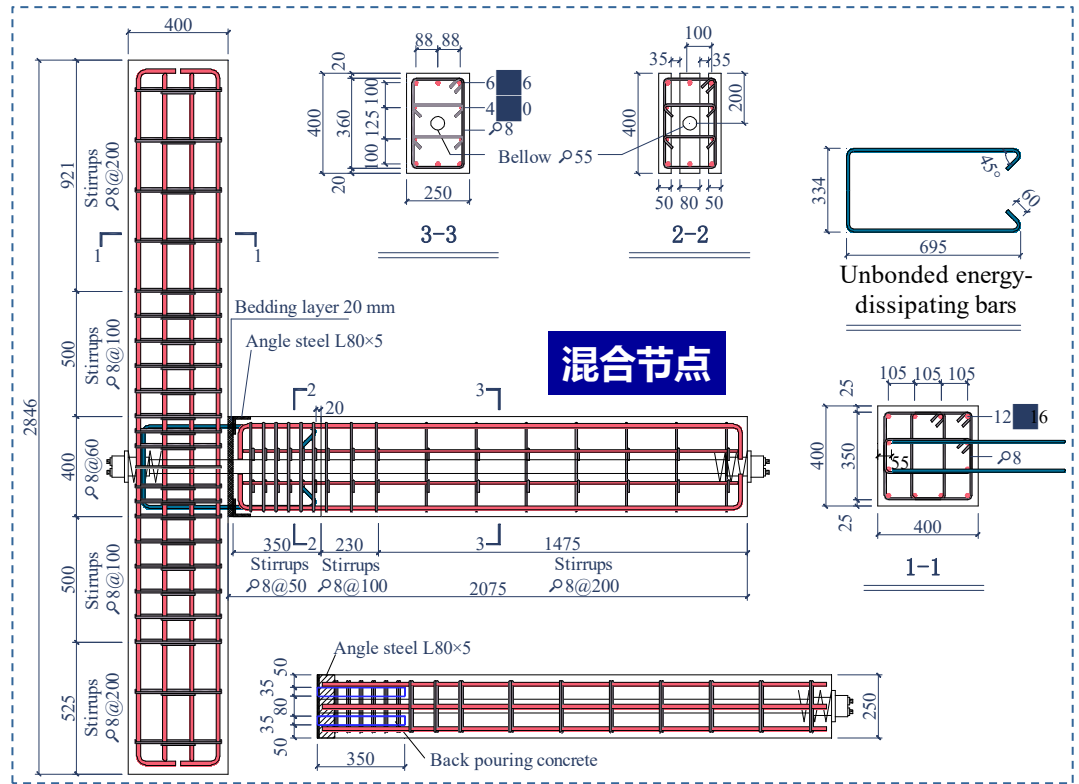
## 节点试验：试件设计



现浇节点



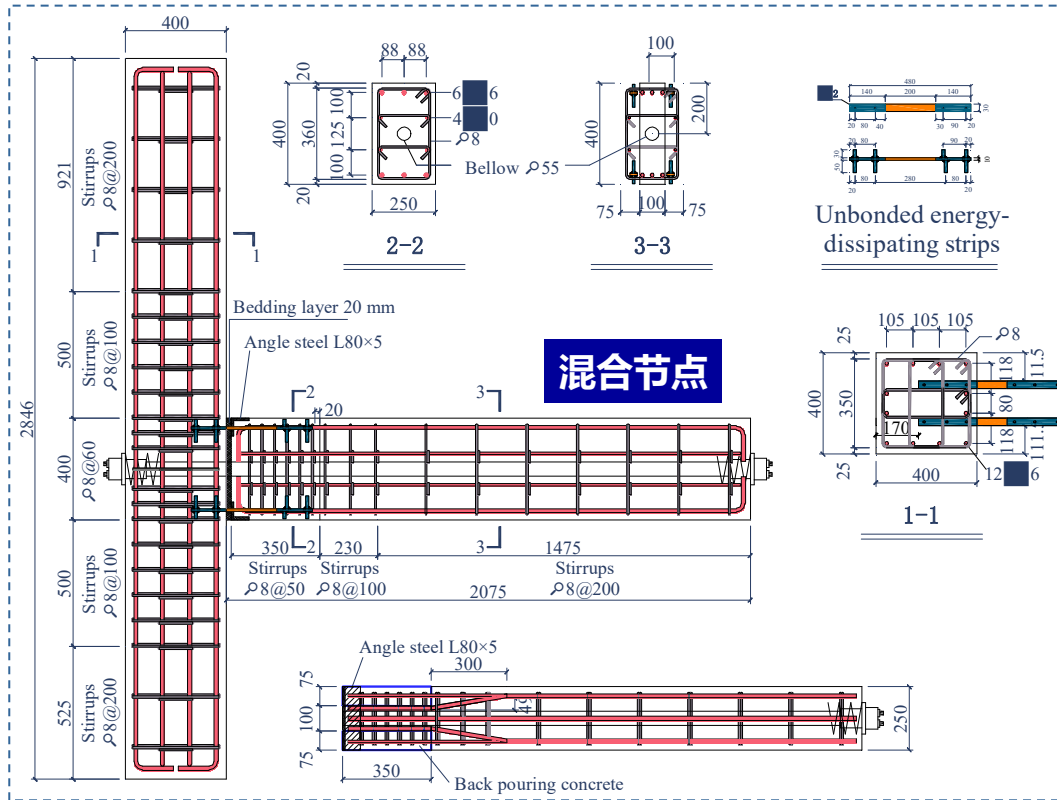
装配整体式



混合节点

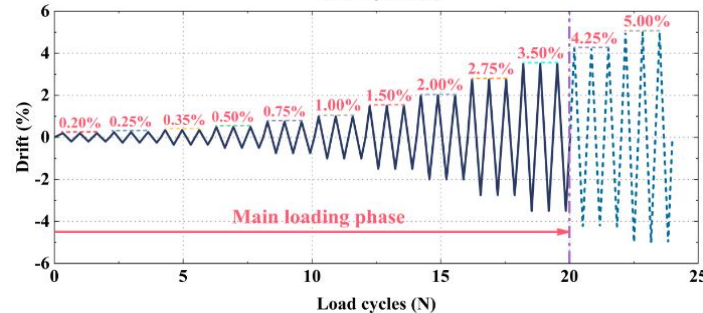
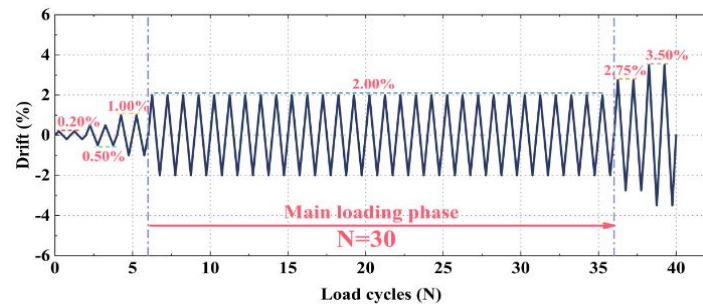
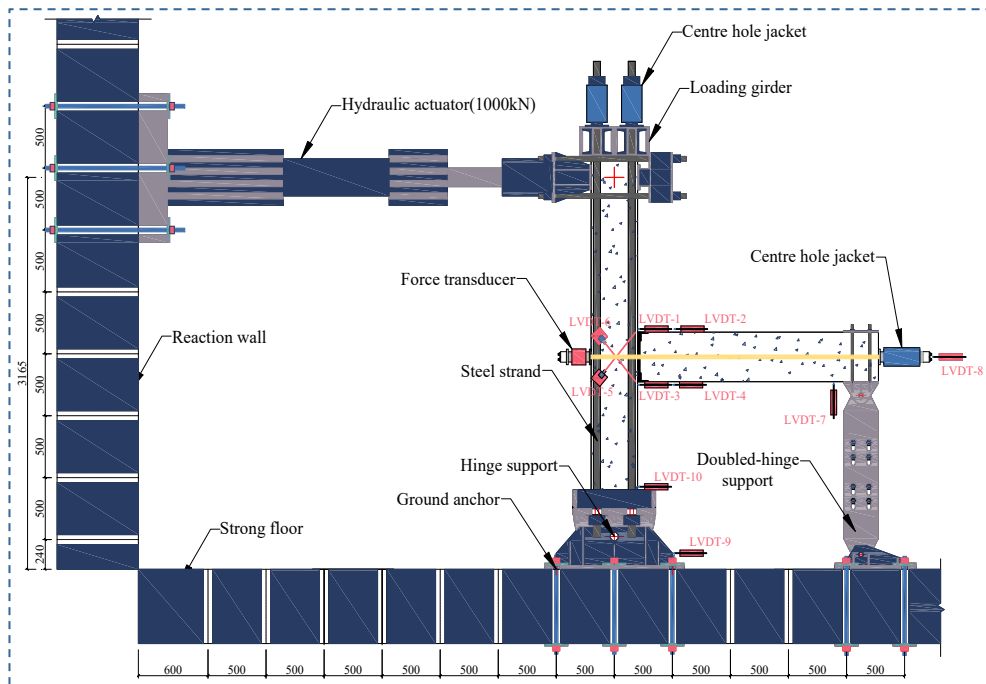
# 二. 震损机理

## 节点试验：试件设计



# 二. 震损机理

## 节点试验：试验方案

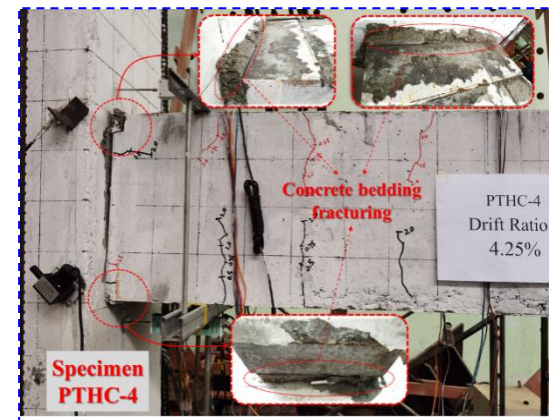
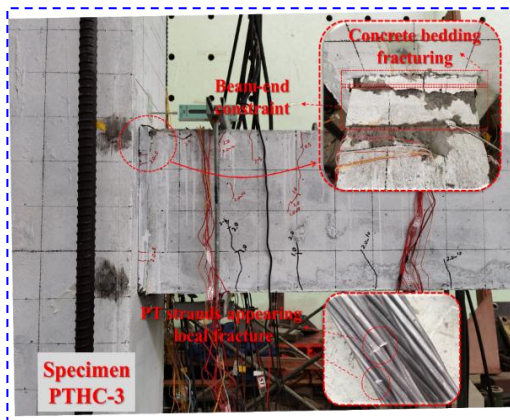
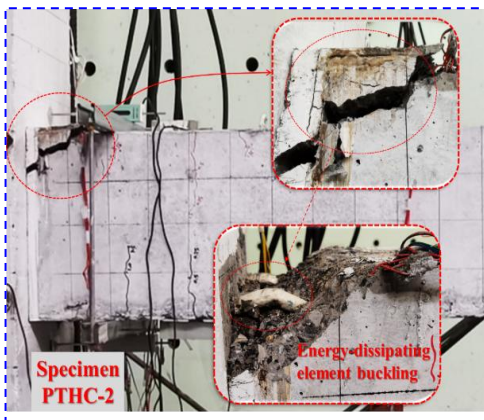
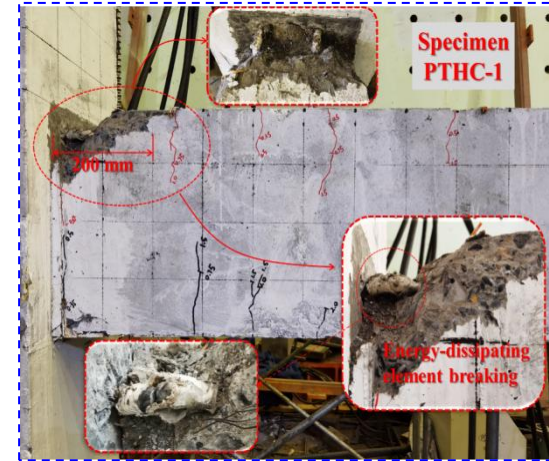
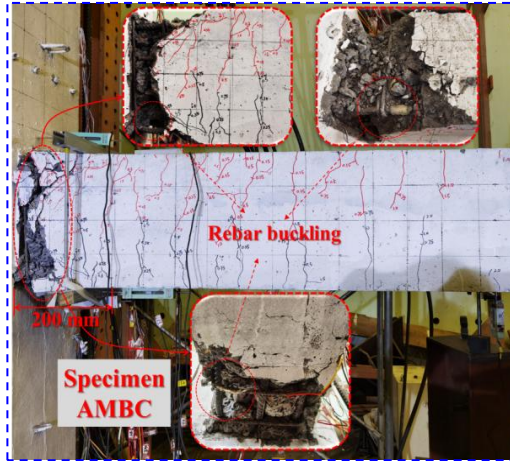
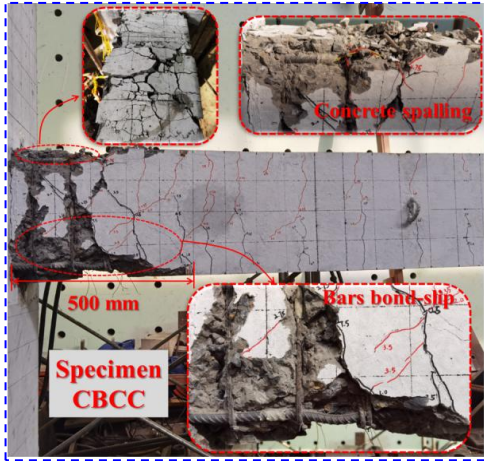


试件编号	加载制度	轴压比	$T_0$ (kN)	耗能材料	$L_{ED}$ (mm)
CBCC	VDA-1	0.3	/	/	/
AMBC	VDA-1	0.3	/	/	/
PTHC-1	VDA-1	0.3	281	Φ12	60
PTHC-2	VDA-1	0.3	281	Φ12	120
PTHC-3	VDA-2	0.3	468	Φ12	120
PTHC-4	VDA-1	0.3	281	LY160	120

- ◆ 节点类型
- ◆ 耗能钢筋无粘结长度
- ◆ 耗能材料
- ◆ 初始预应力
- ◆ 加载制度

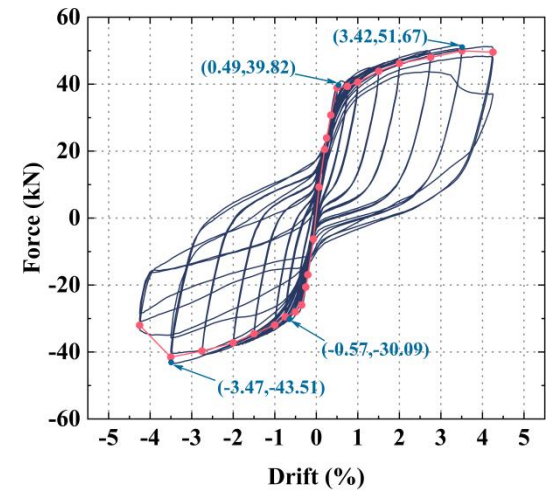
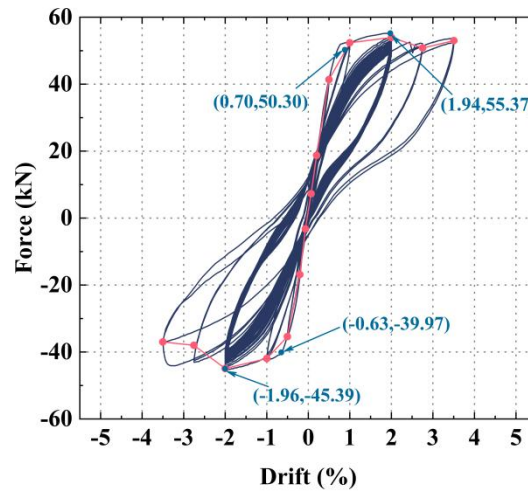
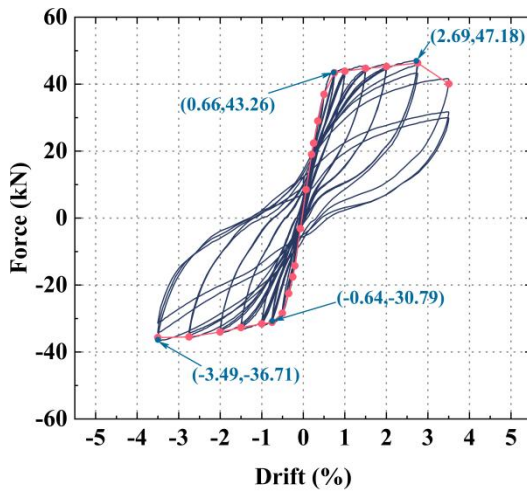
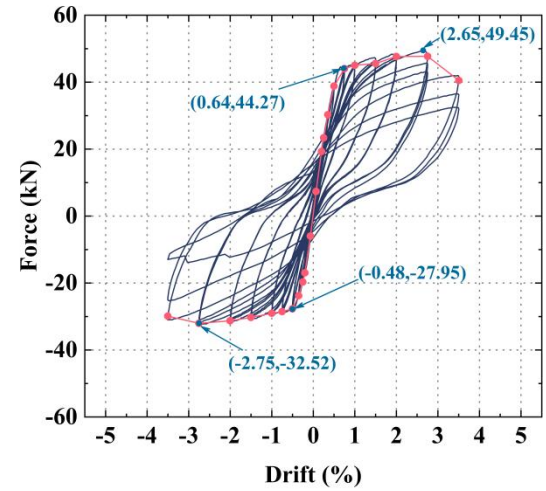
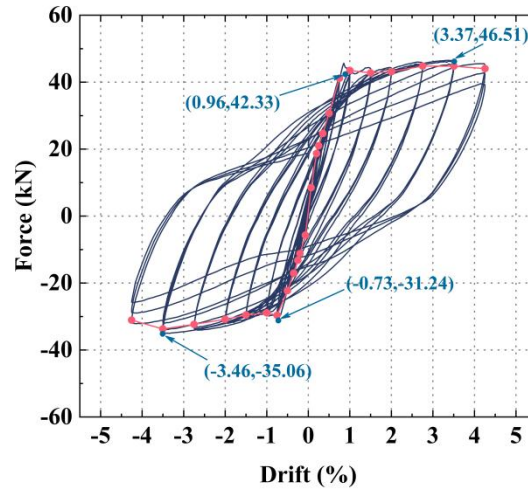
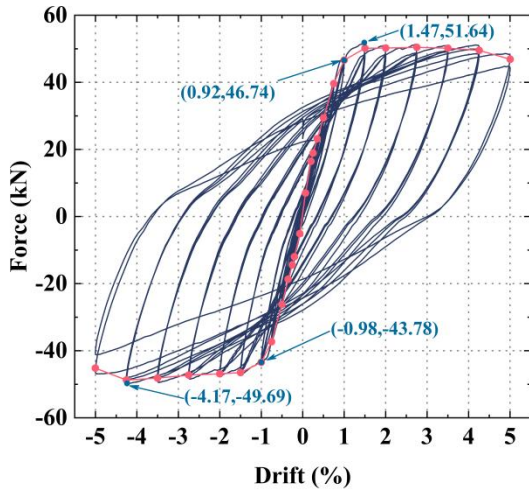
## 二. 震损机理

### □ 试验结果：损伤模式



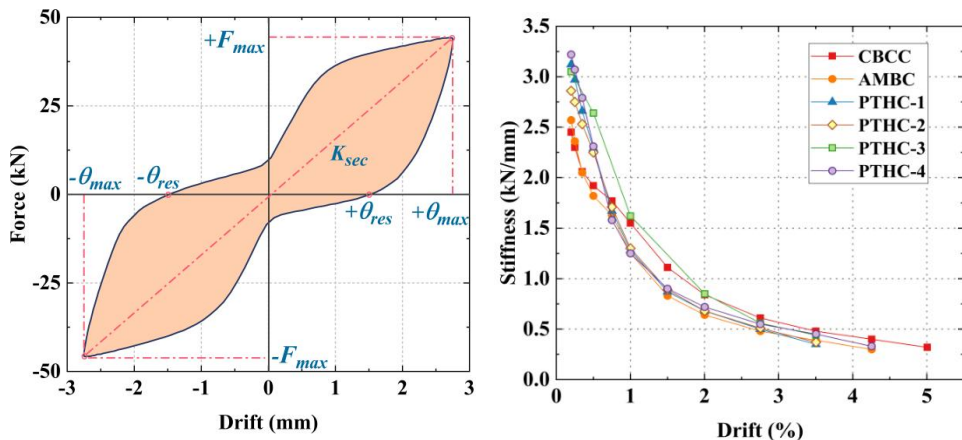
# 二. 震损机理

## □ 试验结果：滞回曲线



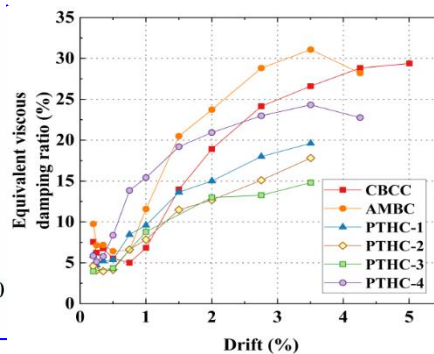
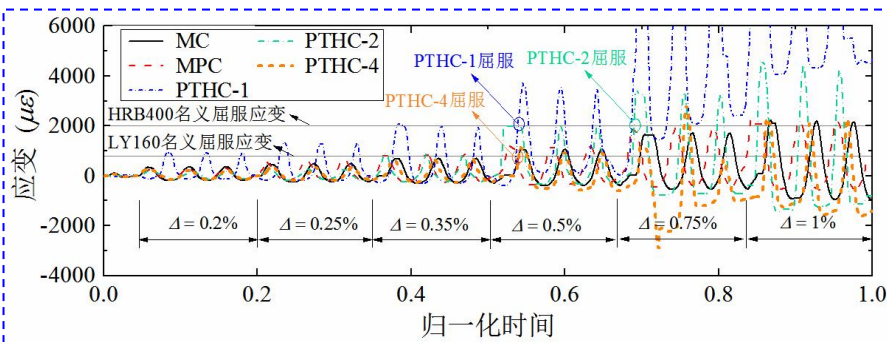
# 二. 震损机理

## □ 试验结果：刚度分析



- ◆ 现浇和装配整体式节点初始刚度相近，随着加载位移增大，装配式整体式刚度退化更显著。
- ◆ 混合节点初始刚度高于整体式节点，开缝后，刚度退化率高于现浇节点。
- ◆ PTHC-3具有较高的初始预应力，开缝后刚度高于其他混合节点。

## □ 试验结果：耗能分析

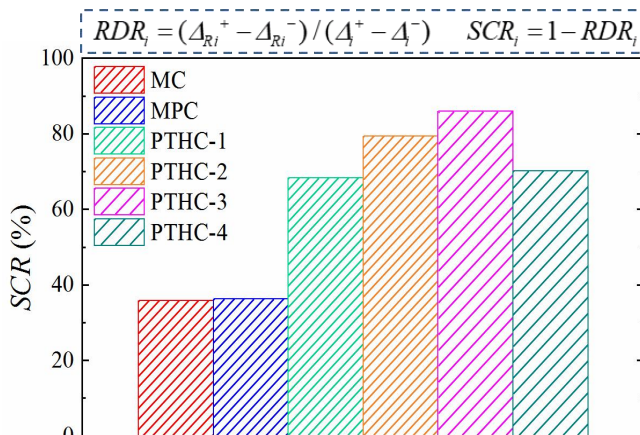
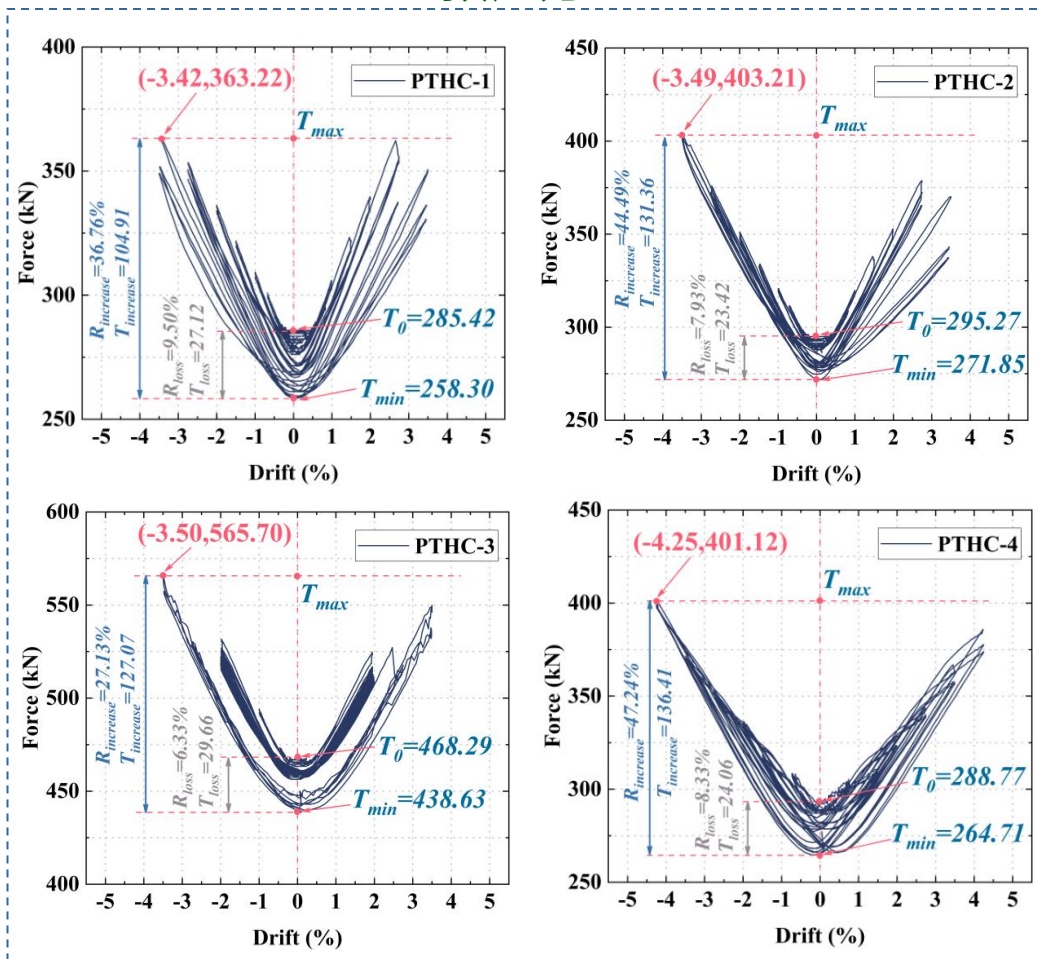


最大等效黏滞阻尼系数依次为：  
29.38%, 31.08%,  
19.61%, 17.82%,  
14.80%, 24.32%

# 二. 震损机理

## □ 试验结果：自复位性能

### 预应力

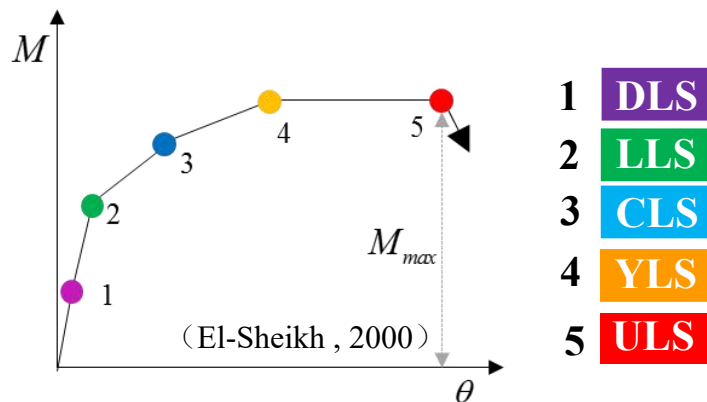


- ◆ 四个预应力节点预应力损失接近，在20-30kN：初始预应力最大的PTHC-3预应力损失率最小；
- ◆ 自复位率基本可以达到70%，具有较高初始预应力的PTHC-3自复位率最高。



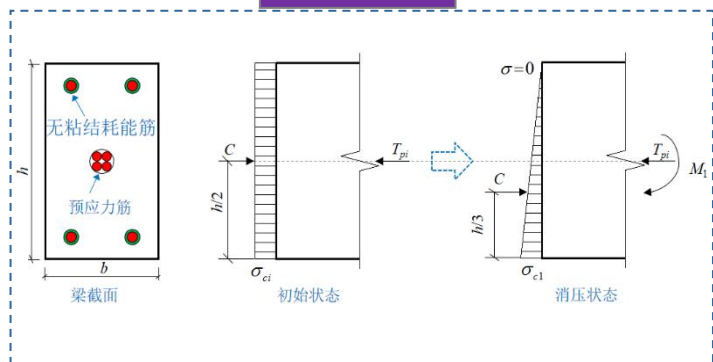
# 二. 震损机理

## □ 极限状态分析



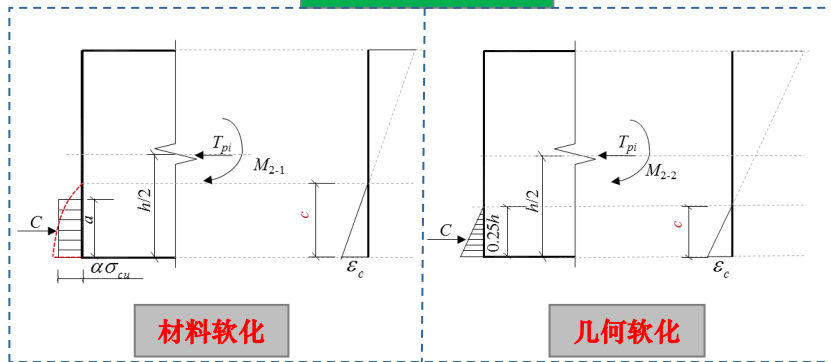
- ◆ 消压状态(S1)
- ◆ 线性极限状态(S2)
- ◆ 耗能元件屈服状态(S3)
- ◆ 梁端混凝土压碎状态(S4)

### 消压状态



$$M_1 = T_{pi} h / 2 - Ch / 3 = \sigma_{pi} A_p h / 6$$

### 线性极限状态

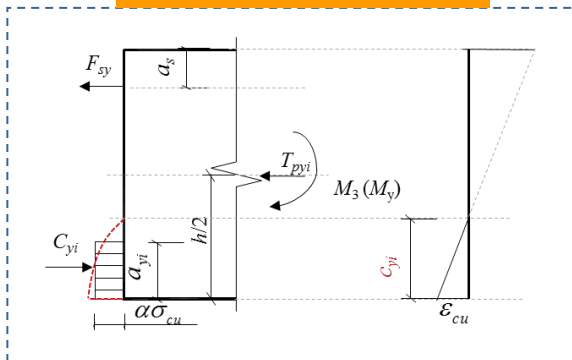


$$M_2 = \min\left(\sigma_{pi} A_p h \left(1 - \frac{\sigma_{ci}}{0.85\sigma_{cu}}\right), \frac{5\sigma_{pi} A_p h}{12}\right)$$

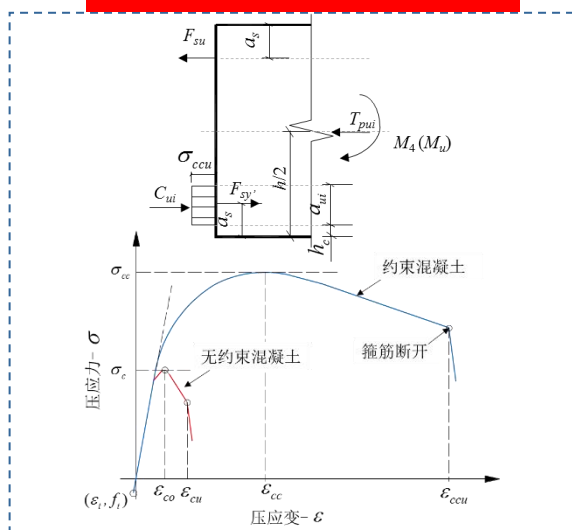
# 二. 震损机理

## □ 极限状态分析

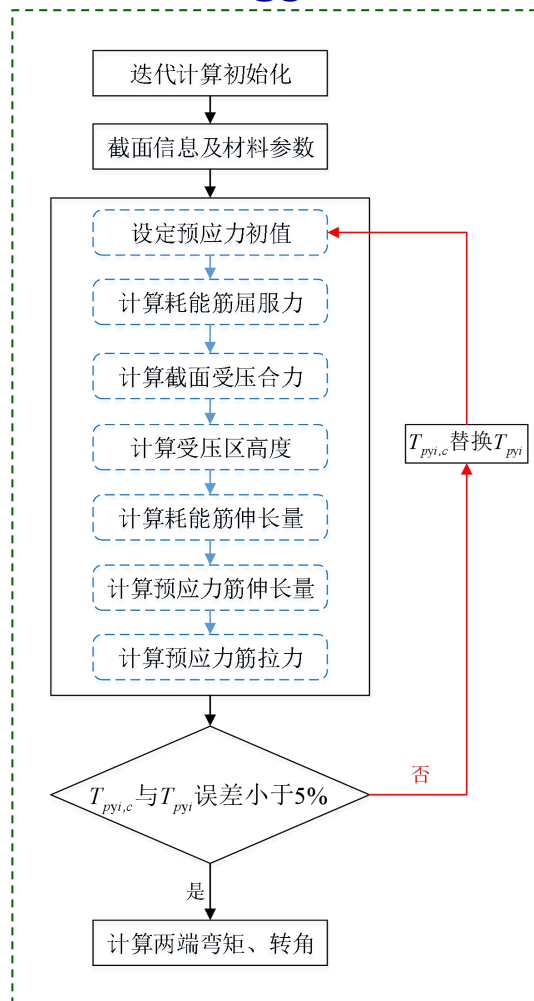
耗能元件屈服极限状态



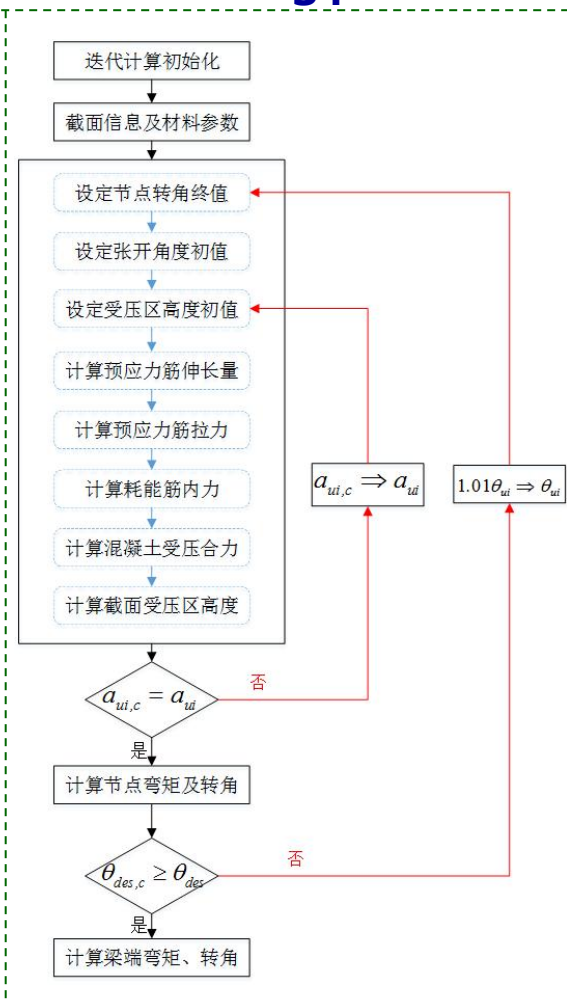
梁端约束区混凝土压碎状态



S3

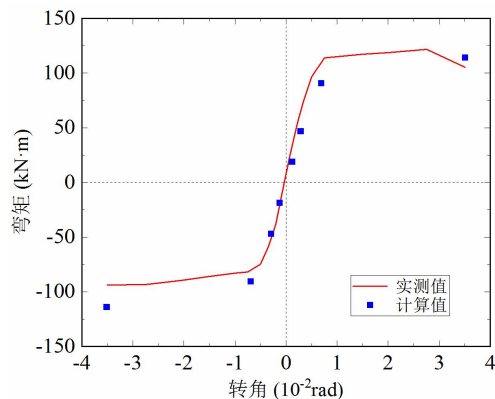


S4



## 二. 震损机理

### □ 极限状态分析: 试验对比



极限状态	实测结果		理论结果		弯矩误差
	转角 (rad)	弯矩 (kN·m)	转角 ( $10^{-2}\text{rad}$ )	弯矩 (kN·m)	
S <sub>1</sub>	/	/	0.12	18.75	/
S <sub>2</sub>	/	/	0.29	46.87	/
S <sub>3</sub>	0.65	97.26	0.69	90.72	6.72%
S <sub>4</sub>	3.50	110.19	3.51	113.98	3.44%

### □ 小结

- 新型节点构造能够有效约束耗能元件，保障其高效耗能；
- 梁端的有效环向约束构造是保证耗能元件有效工作的重要条件；
- 无黏结长度对节点屈服承载力和极限承载力基本没有影响，无黏长度短时，屈服位移小、初始刚度大和耗能效率高，但极限变形能力降低；
- 提高初始预应力可以有效提高混合节点最大承载力、自复位率；
- 低屈服点钢作为耗能元件可以提高节点的耗能效率。

**一** 研究背景

**二** 震损机理

**三** 减震修复

**四** 研究展望

# 三. 减震修复

## 修复思路

### 早强混凝土局部修复

- ◆ 修补局部剥落混凝土
- ◆ 置换局部压碎混凝土



### 节点区FRP局部增强

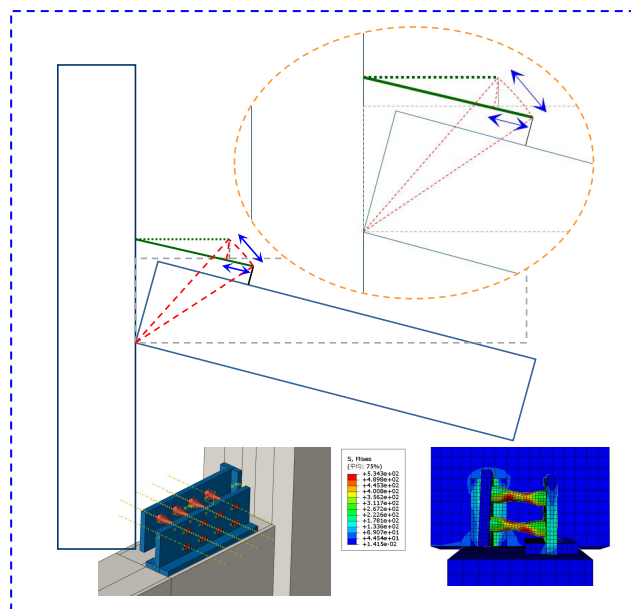
- ◆ 增强混凝土约束能力
- ◆ 改善混凝土受力性能



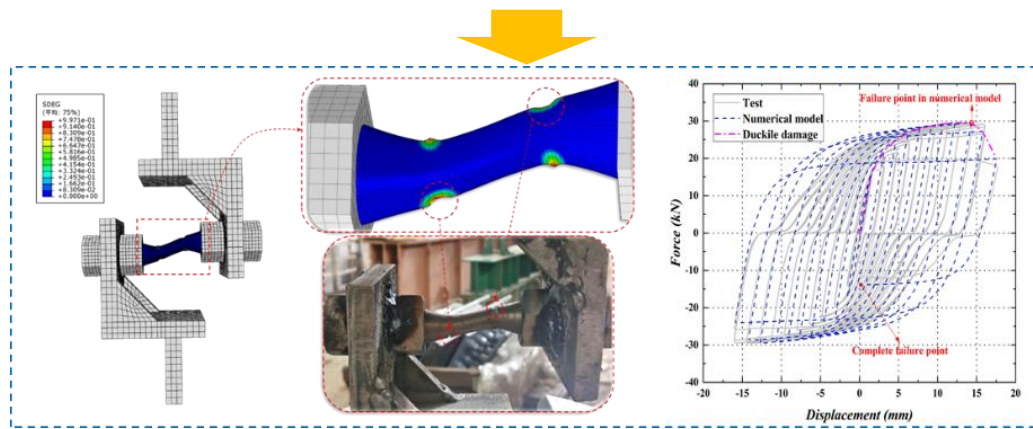
### 节点区增设消能装置

- ◆ 恢复损伤节点耗能能力
- ◆ 提升损伤节点初始刚度

## 耗能装置：钢棒单剪



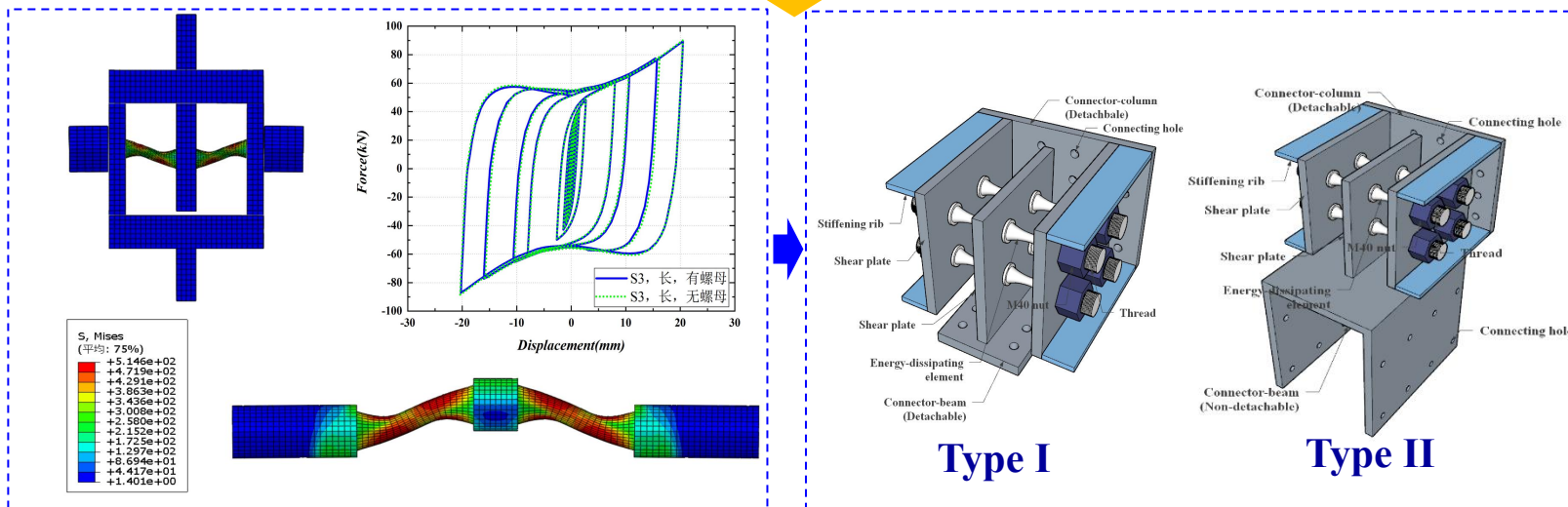
- ◆ 耗能装置围绕旋转中心剪切变形模式具有更高的耗能效率；
- ◆ 圆形截面棒材剪切变形下具有各向相同属性。



# 三. 减震修复

## 耗能装置：钢棒双剪

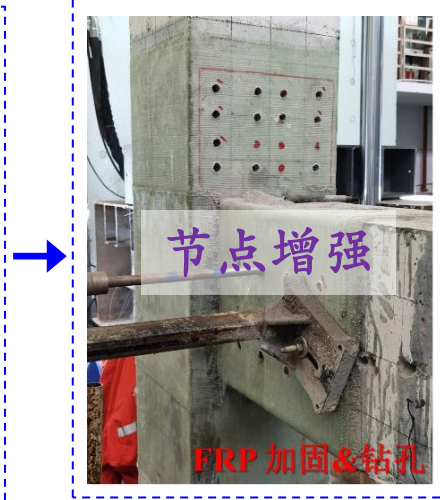
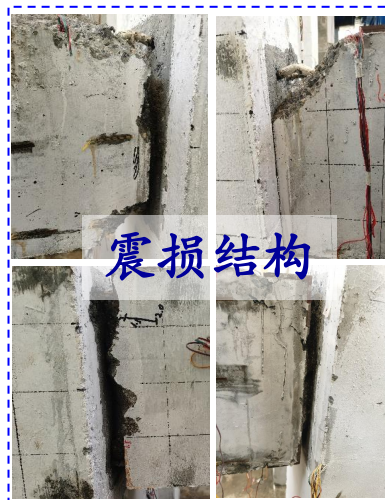
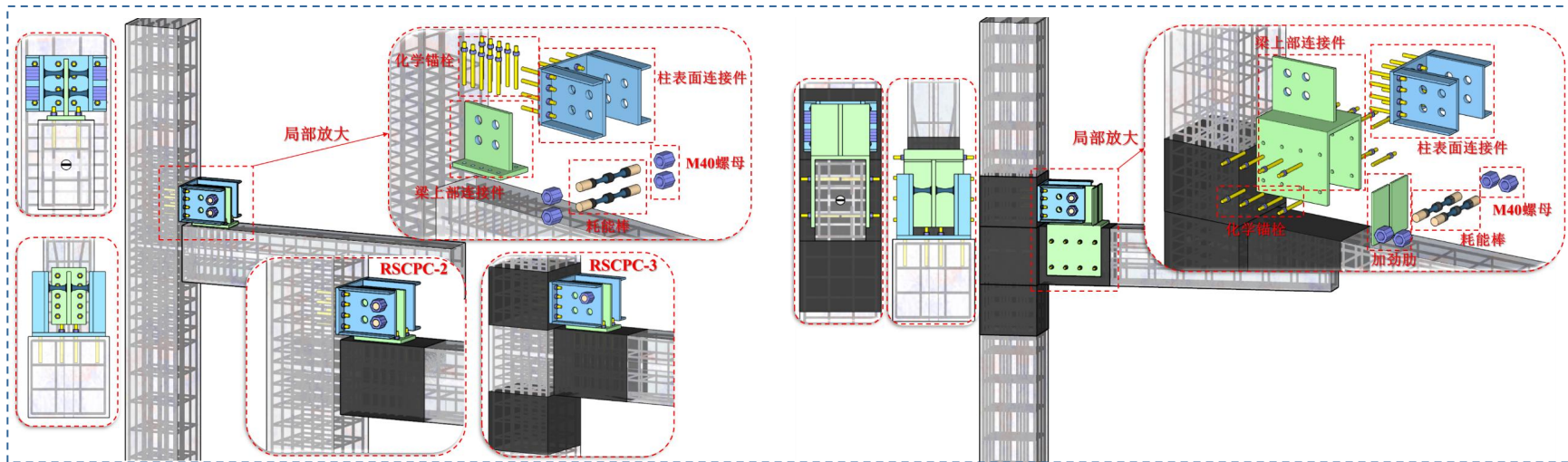
◆ 钢棒单剪受力模式下，端部约束要求，容产生滑移，降低耗能效率。



- ◆ 钢棒双剪切受力性能更加合理，中部剪切板与耗能棒中部只存在接触关系；
- ◆ 节点阻尼器具有耗能单元可更换、易于实现模块化和标准化。

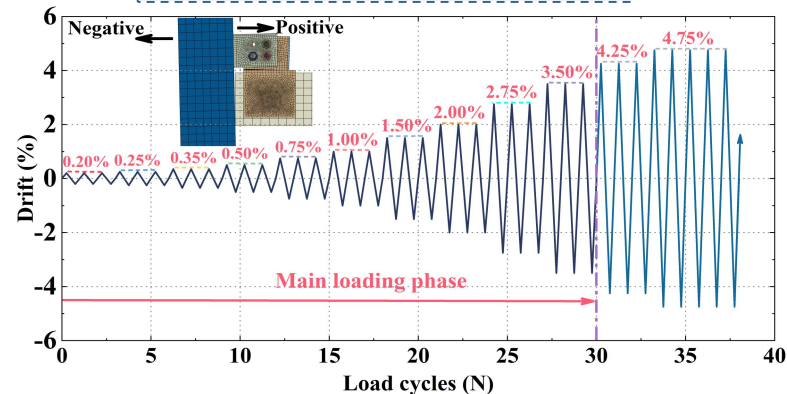
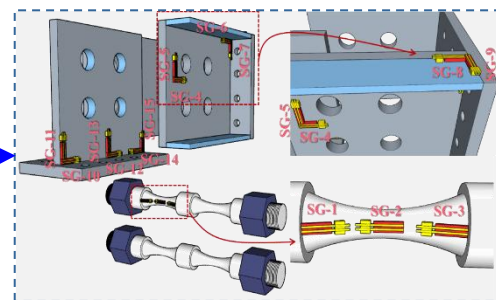
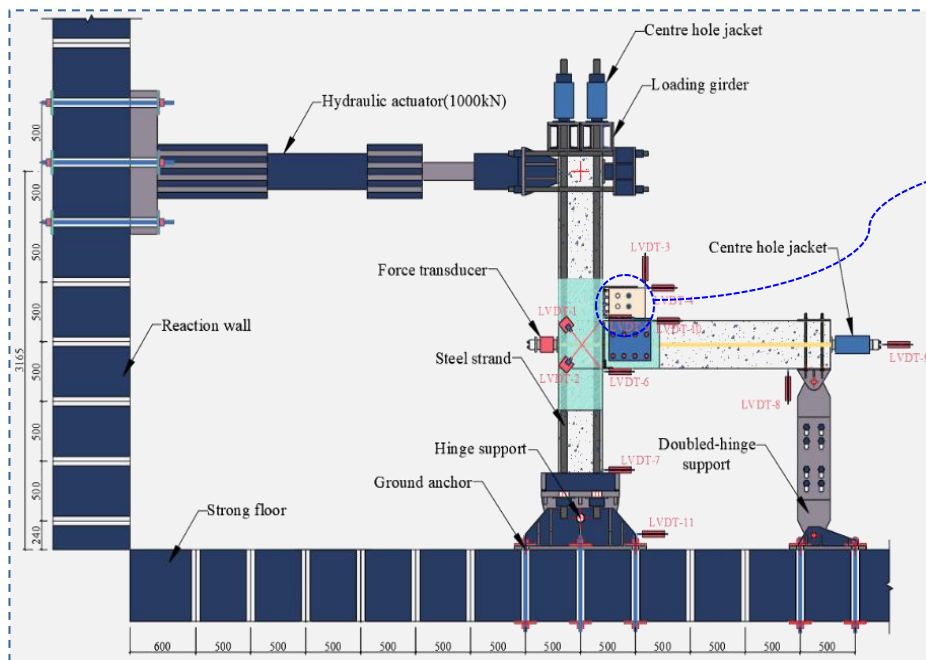
# 三. 减震修复

## 节点修复



# 三. 减震修复

## 低周试验：试验方案



Specimens	Location of the FRP arrangement	$F_{pi}$ (kN)	Type of damper	Number of REDEs
RSCPC-1	/	281	Type I	2
RSCPC-2	Beam end	281	Type I	2
RSCPC-3	Beam and column ends	281	Type I	1
RSCPC-3R		361		2
RSCPC-4	Beam, column ends and core area	281	Type II	2
RSCPC-4R		361		3

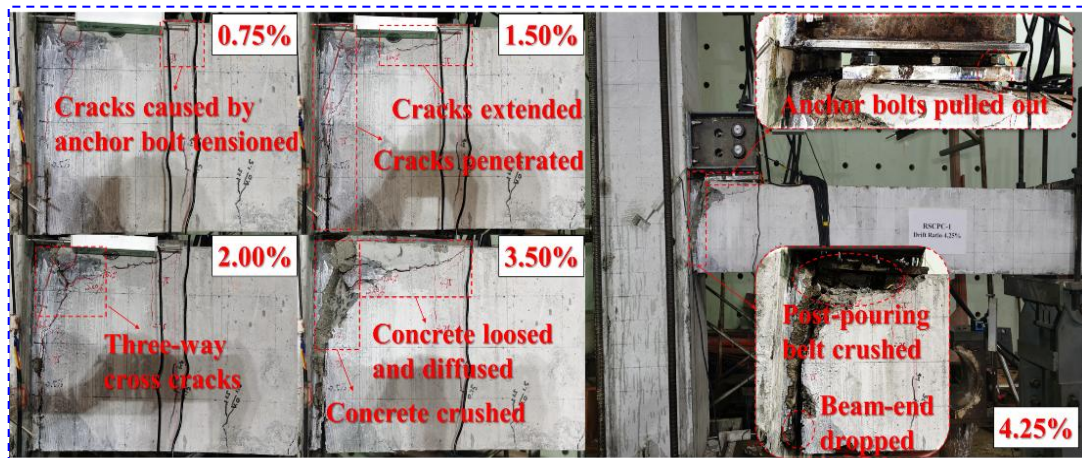
### 试验变量

- ◆ 地震损伤程度
- ◆ FRP约束形式
- ◆ 初始预应力
- ◆ 阻尼器与梁连接形式
- ◆ 耗能棒数量

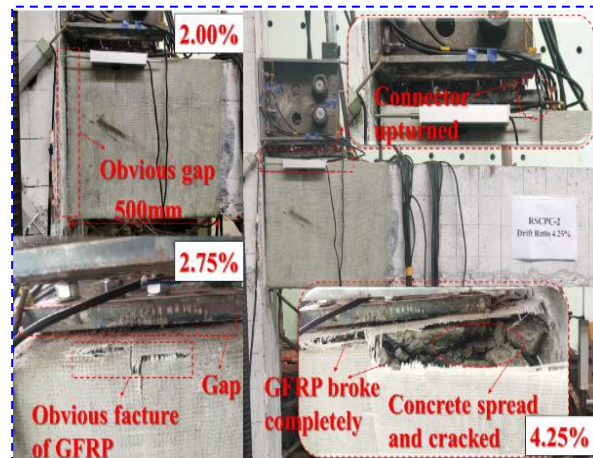


# 三. 减震修复

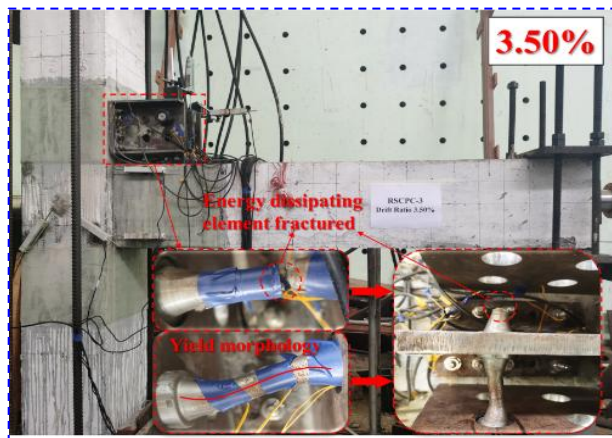
## □ 试验结果：损伤特征



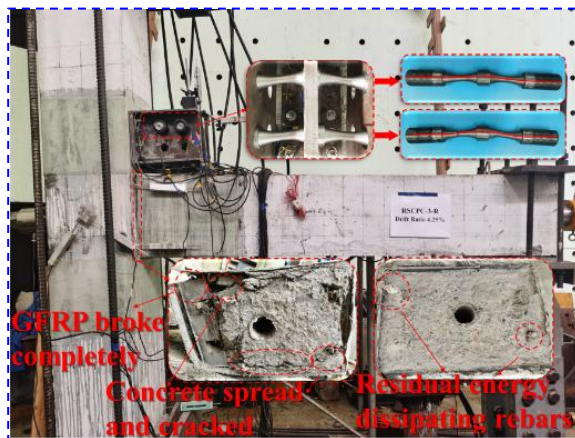
RSCPC-1



RSCPC-2



RSCPC-3



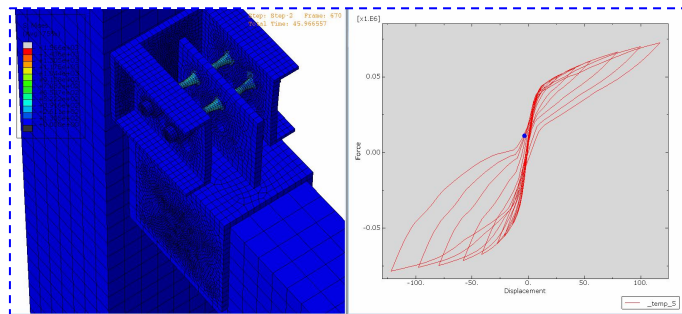
RSCPC-3R

### 试验现象

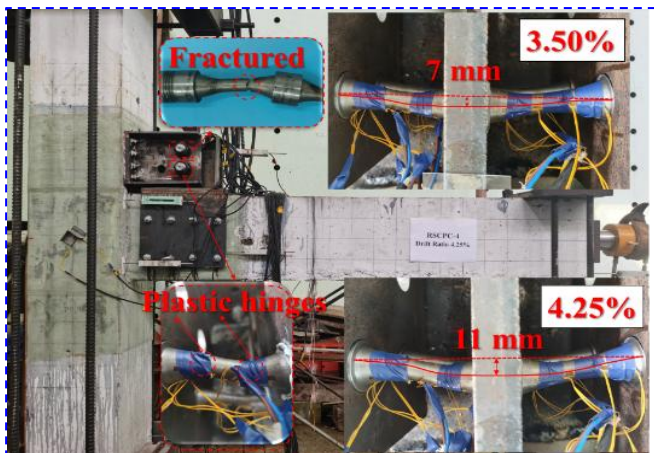
- ◆ RSCPC-1 梁端混凝土在1.50%位移角时大量弥散开裂，旋转中心下移。
- ◆ RSCPC-2和RSCPC-3R在大变形下梁端严重损失，阻尼器连接锚栓被拔出。

# 三. 减震修复

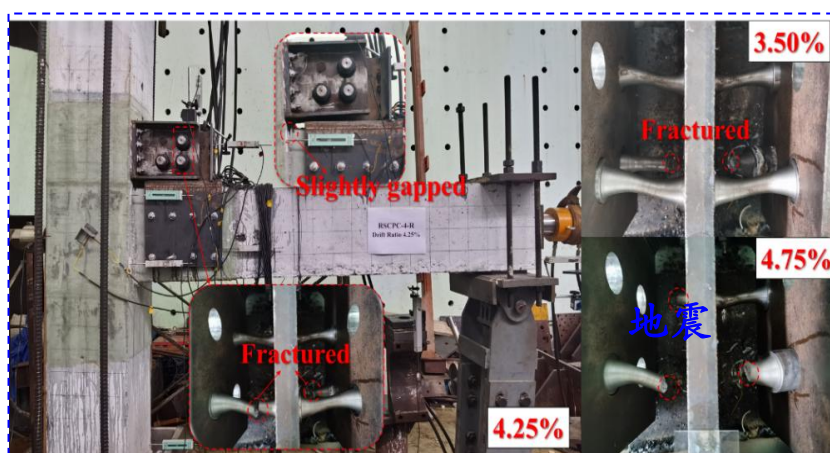
## □ 试验结果：损伤特征



采用梁端两侧锚固阻尼器的RSCPC-4耗能能力理想，梁端未见明显损伤



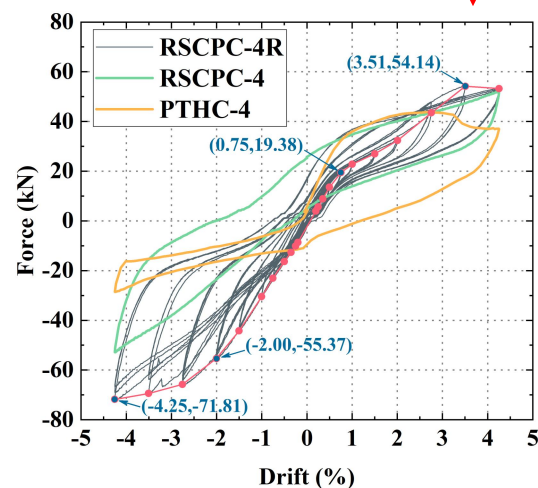
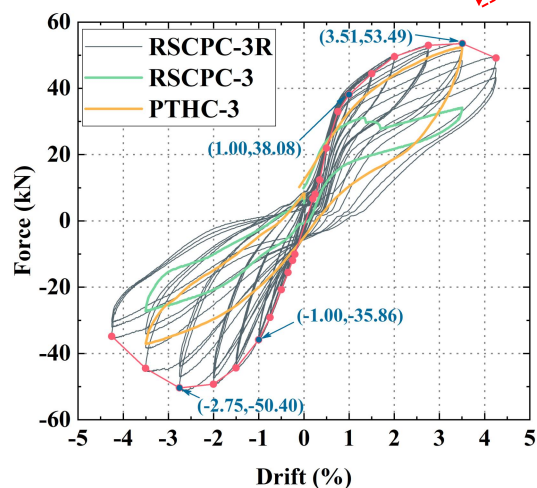
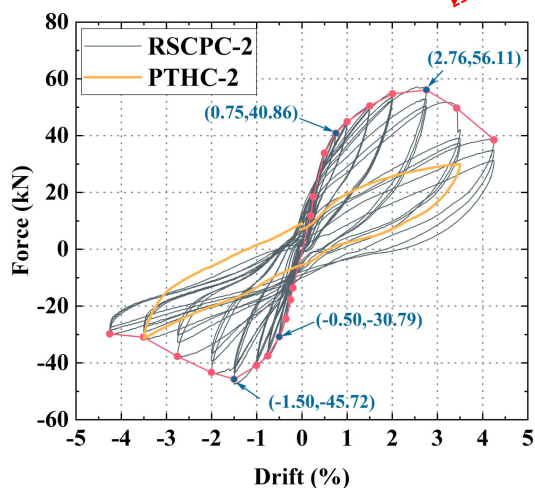
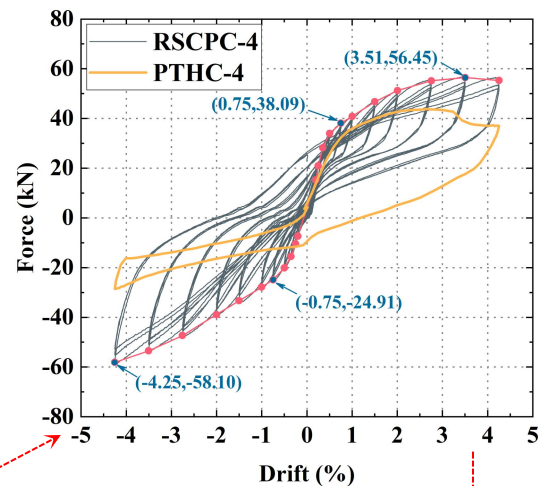
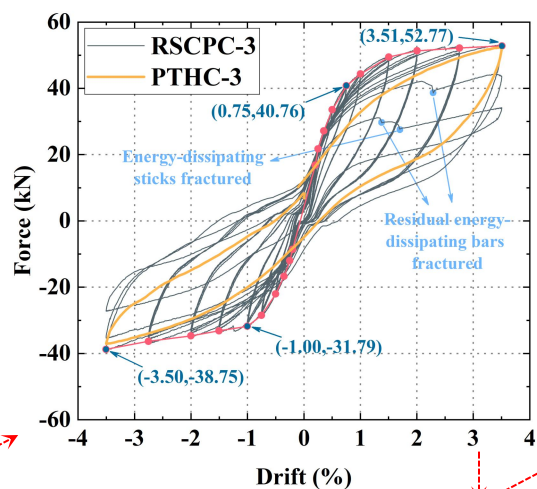
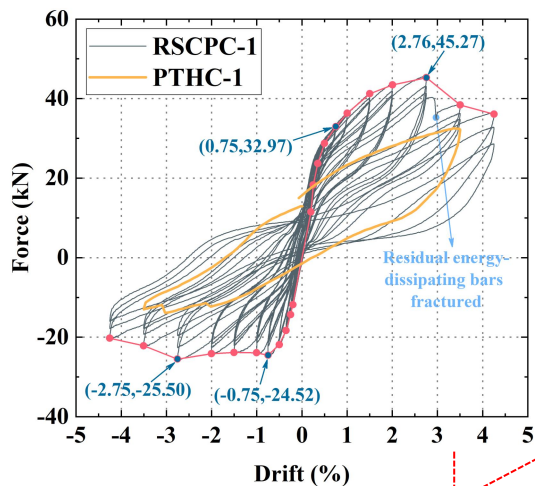
RSCPC-4



RSCPC-4R

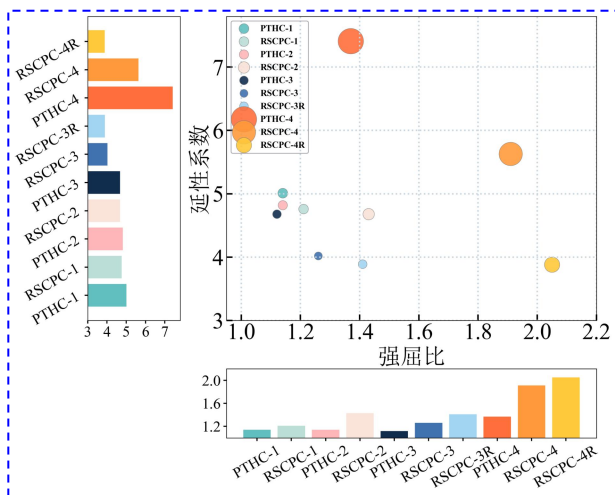
# 三. 减震修复

## □ 试验结果：滞回曲线



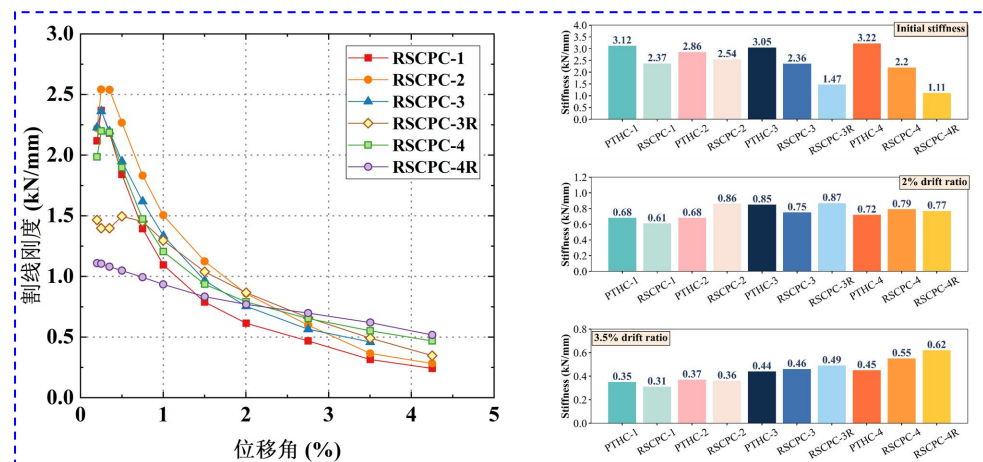
# 三. 减震修复

## 试验结果：延性和强屈比



- ◆ RSCPC试件屈服位移（采用最远点法计算）低于损伤前的PTHC，因而其计算所得延性系数低于PTHC；
- ◆ RSCPC试件强屈比高于PTHC，附加的节点阻尼器提高节点承载潜力；

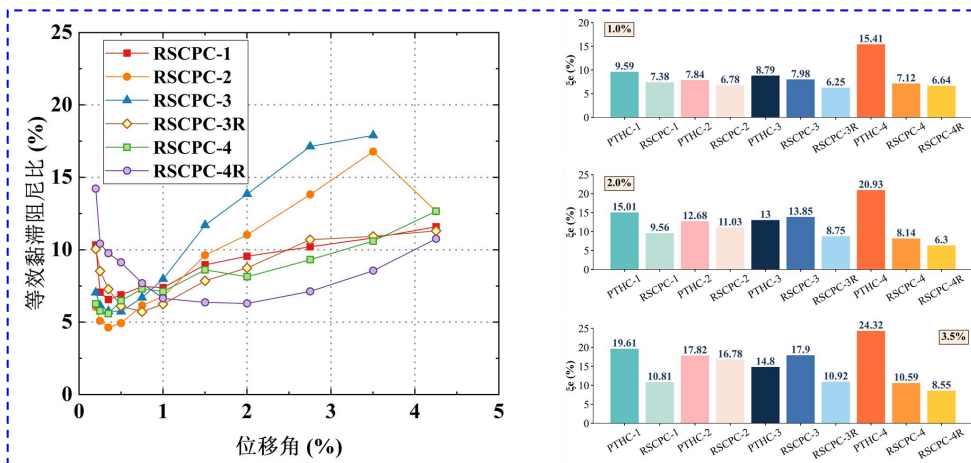
## 试验结果：刚度退化



- ◆ 减震修复后RSCPC初始刚度低于损伤前的PTHC试件。
- ◆ 随着位移角增大，RSCPC割线刚度与PTHC刚度差距缩小，甚至超过后者；
- ◆ 未采用FRP增强的RSCPC-1刚度最低。

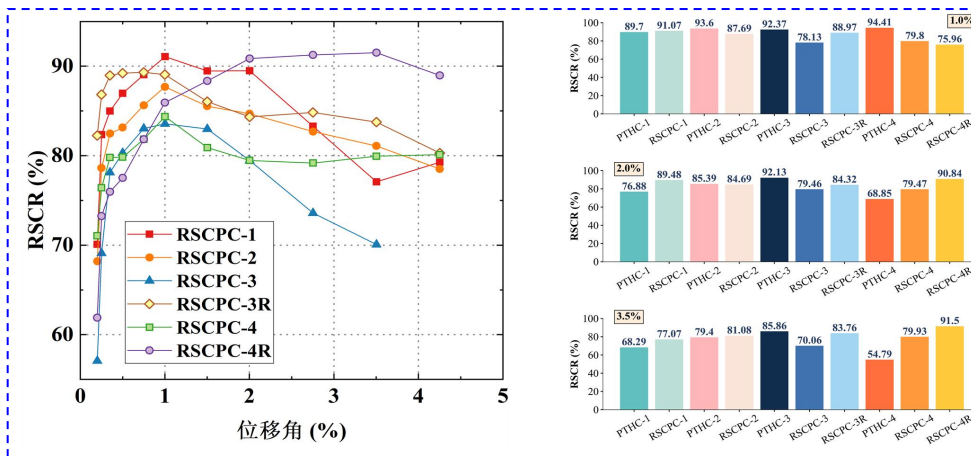
# 三. 减震修复

## 试验结果：耗能分析



- ◆ 部分减震修复后的RSCPC等效阻尼比接近损伤前的水平，甚至高于后者；
- ◆ 比较RSCPC-1和2，采用FRP增强后可改善阻尼器连接性能，显著提升等效阻尼比；
- ◆ 等效阻尼比最大为PTHC，若采用软钢作为耗能单元可提高修复节点耗能效率。

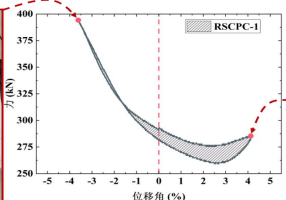
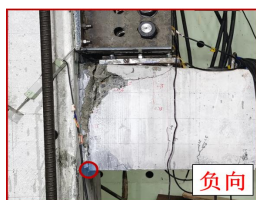
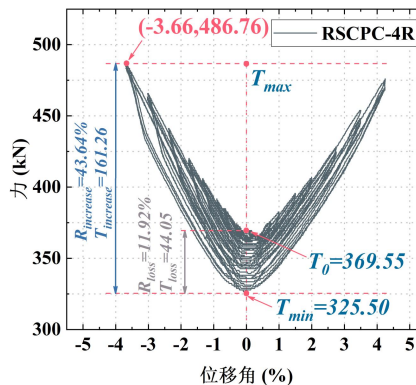
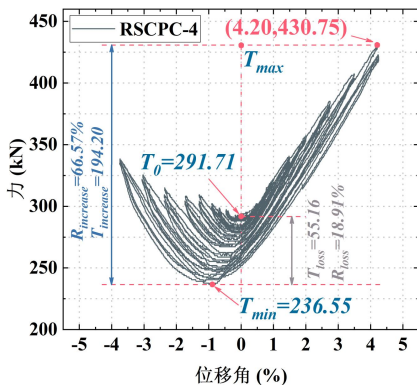
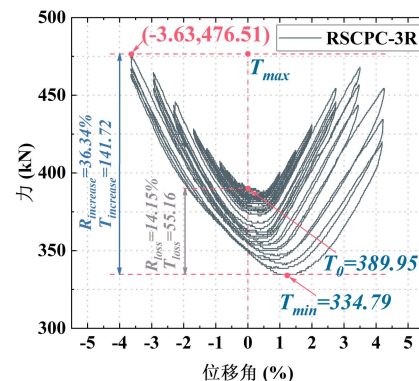
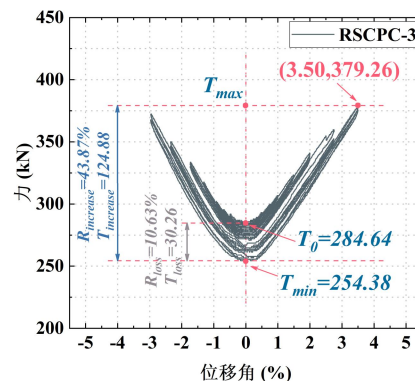
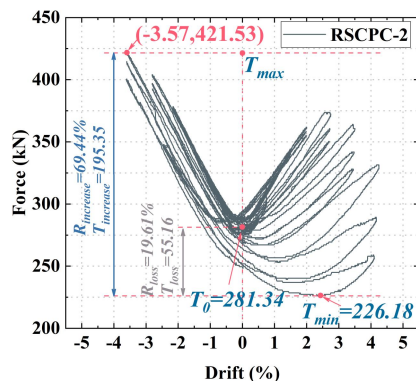
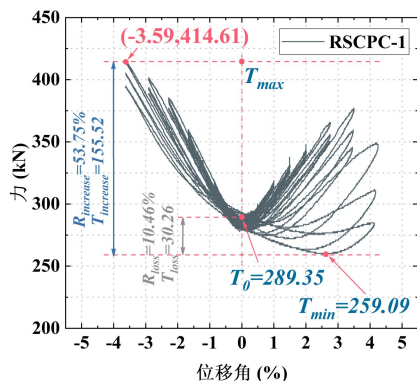
## 试验结果：自复位性能



- ◆ 随着位移的增加，PTHC试件的自复位能力退化更为严重，RSCPC试件普遍下降则更为平缓。
- ◆ 在2%位移角时，PTHC-4的自复位率相对于1%位移角时下降了27.07%，而RSCPC-4R仅下降了0.41%。

# 三. 减震修复

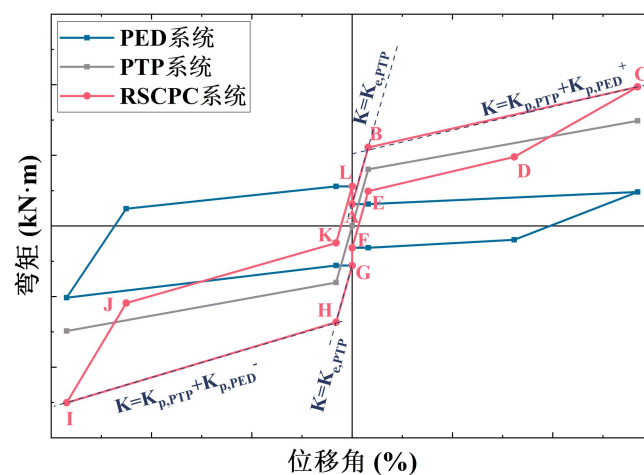
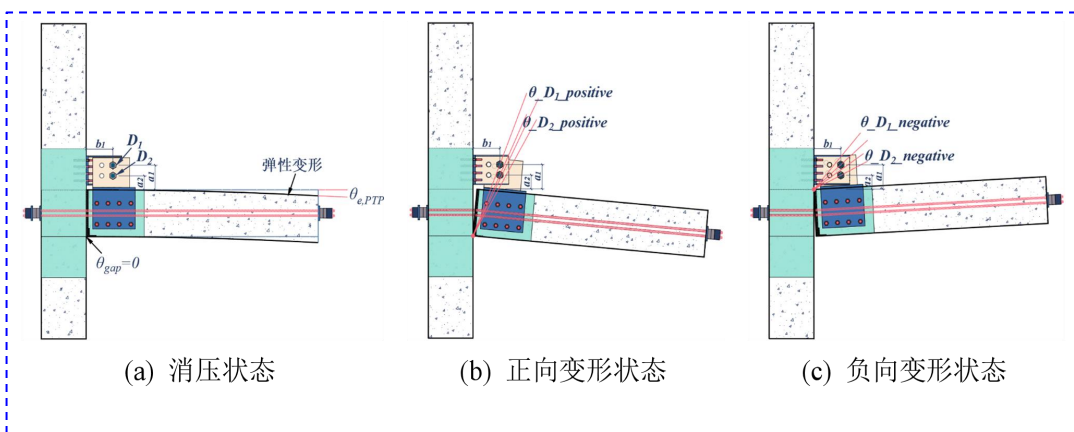
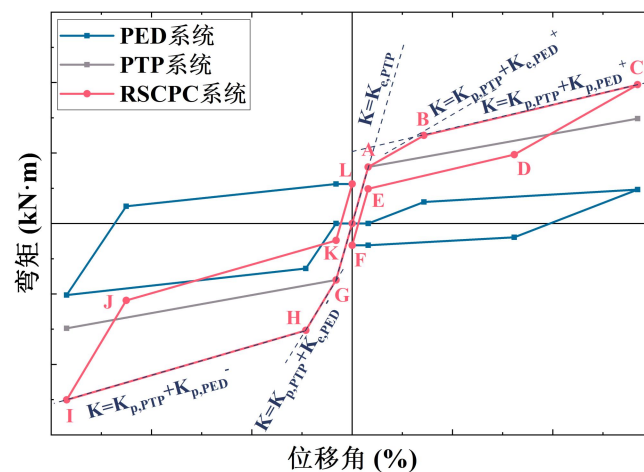
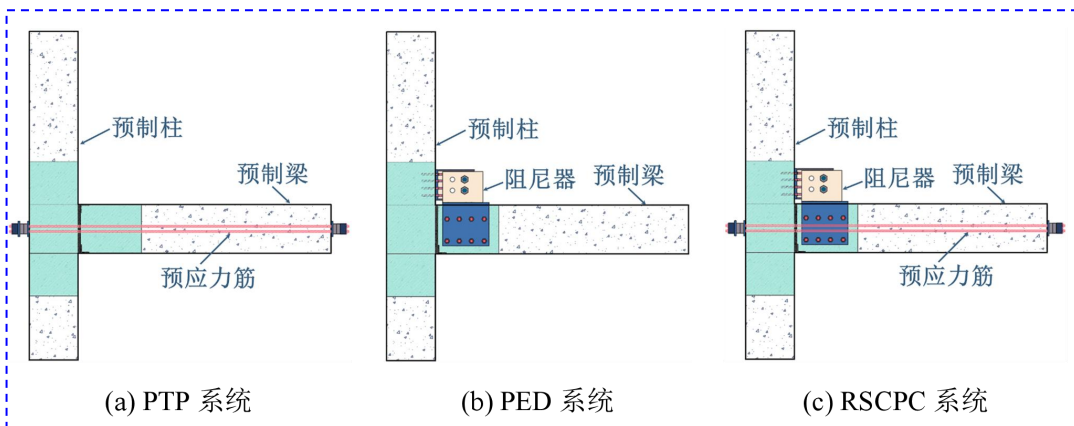
## □ 试验结果：预应力分析



- ◆ 随着节点损伤的发展，梁柱截面局部混凝土破碎，导致梁的旋转中心下移。
- ◆ 损伤节点内残存的耗能元件在节点变形时参与出力，导致预应力增长幅度降低。
- ◆ 受以上两个因素影比较小，RSCPC-3和RSCPC-4R的预应力曲线对称性较好，梁端破坏程度较低，预应力损失分别为10.63%和11.92%。

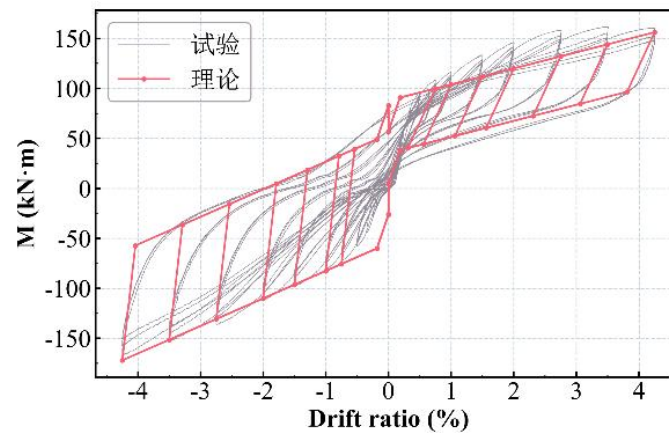
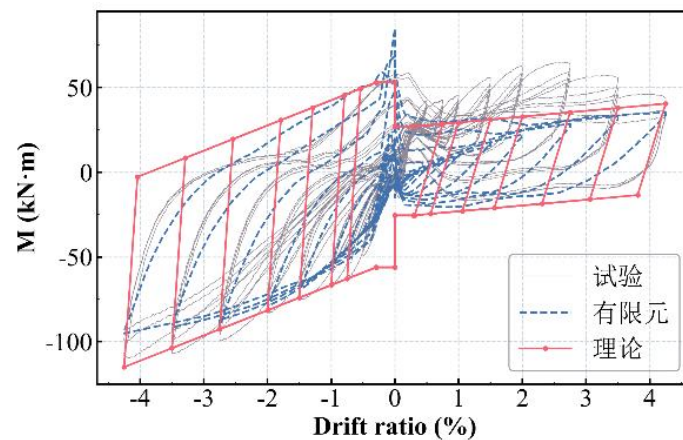
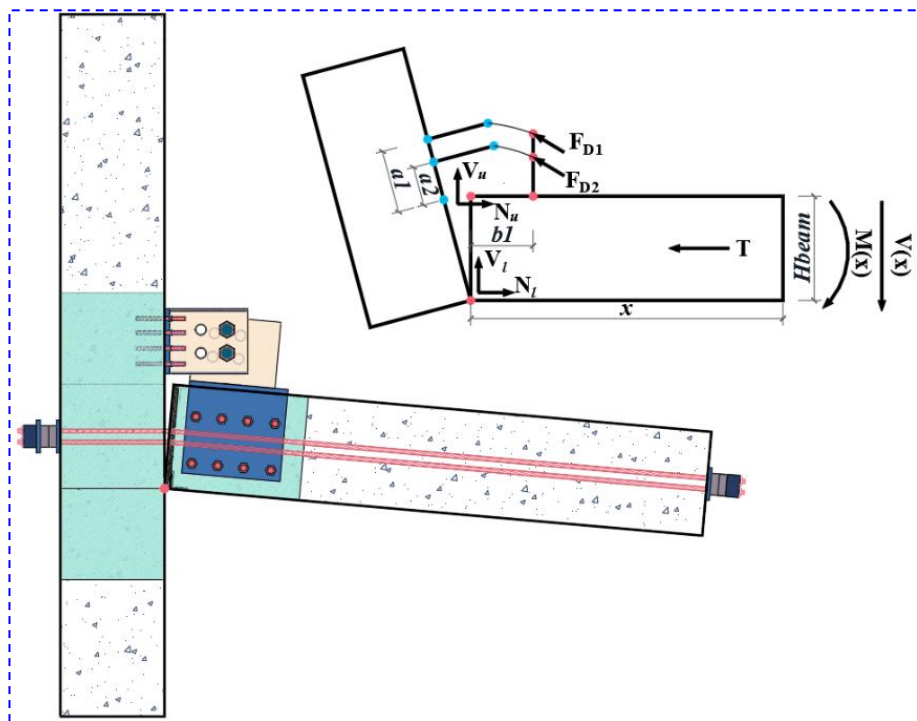
# 三. 减震修复

## 滞回模型：理论分析



# 三. 減震修復

## □ 滯回模型：試驗對比





## 三. 减震修复

### □ 结论

- ◆ 与PTHC的滞后环的最后阶段(损伤状态下)相比, 所有的RSCPC试件在能量耗散和承载力方面都有明显的改善;
- ◆ 阻尼器和梁之间的连接形式对RSCPCs的承载力和延性表现出显著影响, 类型-II可以充分利用REDE的能量耗散;
- ◆ 通过增设节点阻尼器可以实现地震破坏后的节点刚度恢复;
- ◆ 试验过程中实现了震损耗能棒的快速更换, 表明减震修复方法有效提升损伤节点的抗震韧性;
- ◆ 所建立的滞回本构模型与试验结果吻合良好。

**一** 研究背景

**二** 震损机理

**三** 减震修复

**四** 研究展望

# 四. 研究展望

## □ 考虑楼板作用震损机理

- ◆ 楼板与预制梁柱连接构造（强连接、弱连接）；
- ◆ 楼板对节点地震损伤特征影响。

## □ 修复策略的改善

- ◆ 采用UHPC或者ECC对损伤节点局部修复；
- ◆ 优化耗能装置设计构造及与节点连接形式。

## □ 设计方法精准化

- ◆ 建立针对后张预应力混合节点的损失定量评估方法；
- ◆ 基于性能提升需求的减震设计方法。

## □ 非结构构件协同

- ◆ 非结构构件如墙板与主体结构如何协同工作；
- ◆ 基于可更换耗能柔性连接墙板开发。

---

**感谢各位老师 and 同学聆听!**  
**请批评指正!**

---