清華大學
Tsinghua University

基于ABAQUS二次开发的模块化钢结构建筑节点抗震性能分析

土木与建筑工程CAE——期末汇报

汇报人：聂郁葱

2024年6月14日

目录

1 研究背景

1.1 研究背景及意义

1.2 国内外研究现状

1.3 技术路线图

2 研究内容

2.1 新型节点构造的提出

2.2 有限元建模思路及思路验证

2.3 节点抗震性能的有限元分析

2.4 基于python语言的ABAQUS二次开发

3 结论与展望

1 研究背景

传统建筑行业存在的问题

建筑质量不稳定

劳动力需求大

施工对环境影响严重

建造周期长

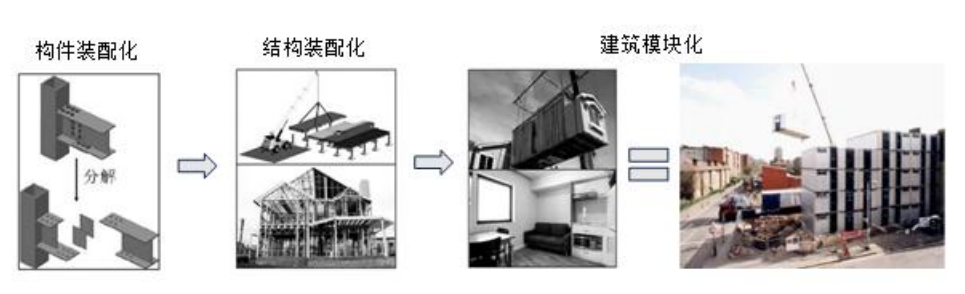
问题导向

“绿色建筑+建筑工业化” 发展战略

年份	部门	政策文件
2012	住建部	《关于加强推动我国绿色建筑发展的实施意见》
2013	国务院	《关于转发发展改革委住房城乡建设部绿色建筑行动方案的通知》
2016	国务院	《关于深入推进新型城镇化建设的若干意见》
2019	住建部	“着力推进建筑业供给侧结构性改革”
2022	住建部	《“十四五”建筑业发展规划》
2024	住建部	**“加快‘三大工程’建设”**

低碳环保、工业化、集成化、模块化

推动建筑业转型升级

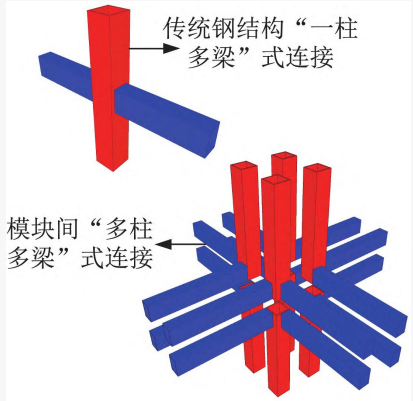


模块建筑优势

（1）缩短工期，改善施工环境。工厂车间加工。
（2）并行作业，提高建造效率，保证施工质量。
（3）绿色环保，响应双碳政策，减少建筑垃圾。
（4）节约人力物力，优化资源配置，采用机械化生产。

1 研究背景

实际应用



工厂先预制现场再施工

↓

模块=基本单元

↓

结构离散化、隔断化

- 模块化钢结构建筑已经在西方国家取得了蓬勃发展，也适合我国正处于关键转型期的建筑业。在政策指导意见的引领下**发展势头良好**。
- 模块化结构与传统建筑形式存在很大差别，最直观的体现就是单元离散化、**多梁多柱**。

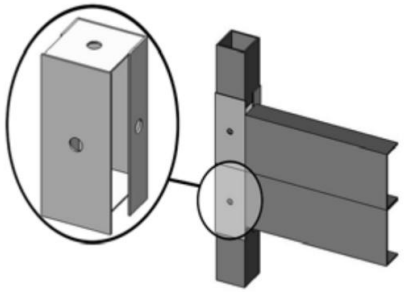
模块间的可靠连接是保证模块化建筑结构整体性的关键。
模块间节点会显著影响整体结构的抗侧性能，节点抗震性能是关键因素。

- 模块化建筑离散化、多梁多柱的特点直接导致了整体建筑的**抗侧性能降低**。
- 同时模块之间的堆叠也导致施工空间小，焊接、灌浆等施工工艺难以操作，**不利于形成全刚性节点**。

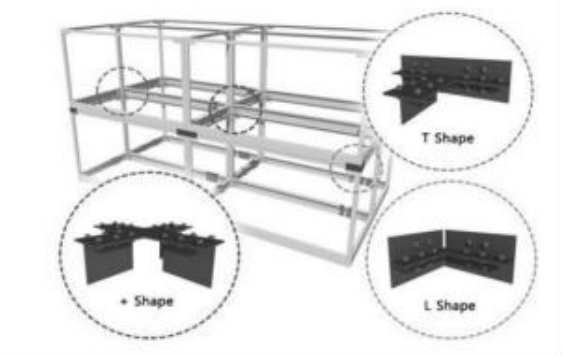
1 研究背景

国外研究现状

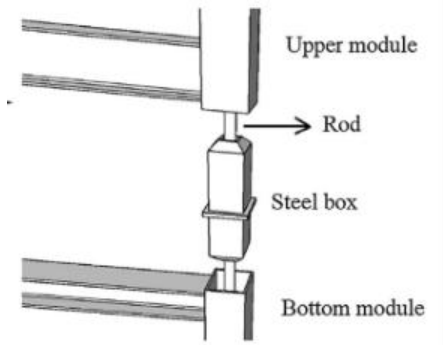
- Lee等[5]提出了一种**外套筒连接节点**，外套筒套住上下模块的模块柱，套筒上有开孔供螺栓插入完成连接；并通过试验研究梁柱节点的破坏，结果表明厚度为6.0T的节点能满足强度和抗震对塑性转角的要求，而且能够加固应力集中的局部位置。
- Lee等[6]提出一种**全螺栓的节点连接**，为补偿螺栓开孔对构件截面的削弱考虑在梁端设置加劲肋来提高强度和抗震性能；并通过试验对节点的抗震性能进行研究，对比试验和有限元模拟得到的试件滞回曲线，结果表明，节点具有足够的刚度且抗震性能良好有助于结构形成抗弯框架，能够满足抗震要求。
- Sanches等[7]提出了一种新的**垂直后张拉连接**，通过对T形组件进行了8次准静态循环加载试验,试件中都没有观察到局部屈曲，并且在达到3%层间位移角要求时没有发生焊接断裂。结果表明，与焊接连接方式相比，该连接方式具有相似的横向刚度和应变分布，且具有更高的累积耗能能力。
- Sendanayake等[8]提出了创新的模块化连接，用ABAQUS建立节点模型，获得节点在横向荷载下的响应和破坏机理。该节点连接额外设置的**钢板和弹性层**，提供了更高的延性和更好的耗能能力，并具有理想的延性破坏模式。



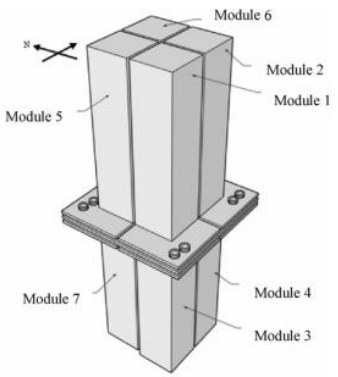
Lee等[5]提出的外套筒连接



Lee等[6]提出的全螺栓节点



Sanches等[7]提出的垂直后张连接

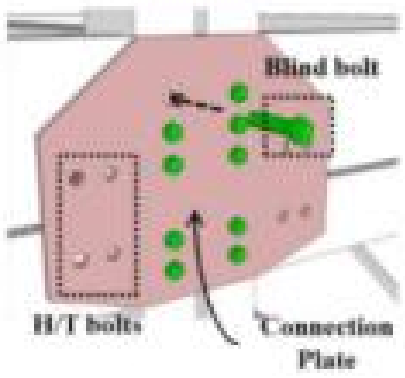


Sendanayake等[8]提出的节点连接

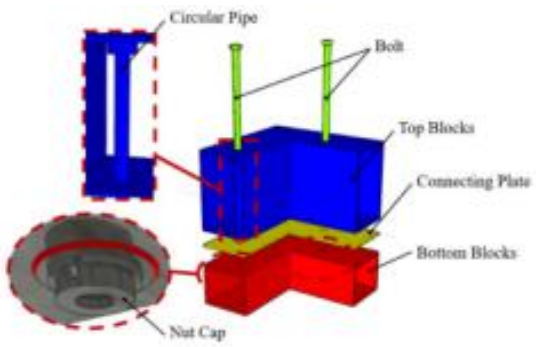
1 研究背景

国外研究现状

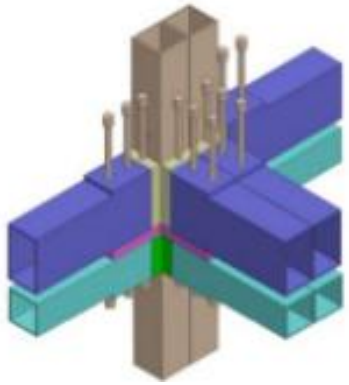
- Bong-Ho Cho等[9]提出了一种利用**盲孔螺栓**的钢框架模块化体系，并通过试验和数值分析对其梁柱连接的结构性能进行了评价。新的模块化系统的设计使其梁的强度远低于其柱的强度，以实现强柱弱梁的设计要求。试验结果表明，所提出的盲孔螺栓梁柱连接节点强度高，符合抗震设计要求。
- Jun-Seop Lee等[12]提出了一种新型节点连接，将梁和柱焊接在铸钢件上，能够充分利用材料的性能。其对节点连接的强度进行了分析，相比于其他模块间节点连接，该节点**在减小构件尺寸的同时还提高了强度**；施工便捷，绿色经济；采用此节点的结构体系能够达到特殊抗弯框架的结构性能。
- Kashan Khan等[10]提出了一种新型节点，该节点的水平连接依靠榫卯连接板完成，竖向连接依靠梁间对穿螺栓完成。对节点进行了静力、拟静力作用下的有限元分析，榫头长度对节点的强度和刚度影响显著，模块间间隙对节点的强度和刚度影响较小。
- Dan-Adrian Corfar等[13]提出了一种新型节点，该节点包含了**高阻尼橡胶芯HDR和记忆合金螺栓SMA**。材性试验的结果证明了HDR-SMA组合的两种材料能够有效实现联合响应，二者的性能均能得到充分的发挥。



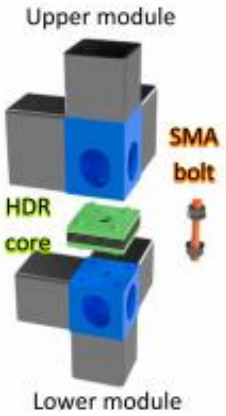
Bong-Ho Cho等[9]提出的连接



Jun-Seop Lee等[12]提出的连接节点



Kashan等[10]提出的节点

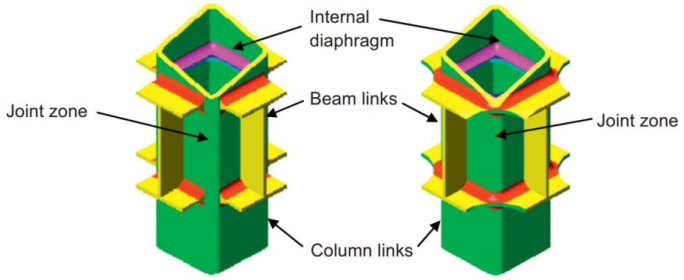


Dan-Adrian Corfar等[13]提出的节点

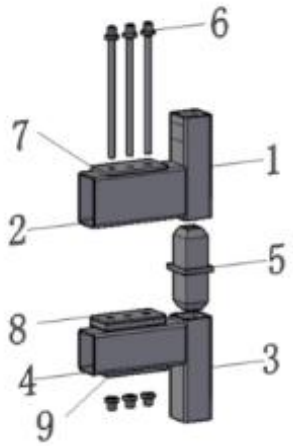
1 研究背景

国内研究现状

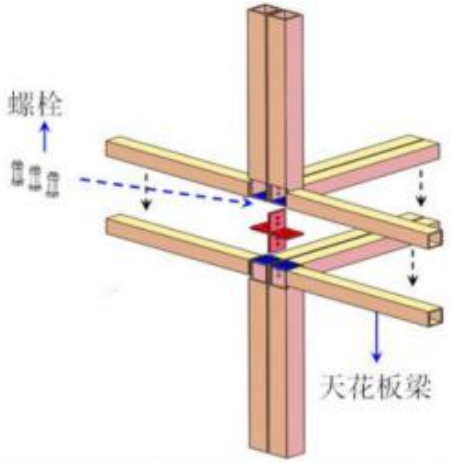
- Wang等[15]提出了一种铸钢件节点，铸钢件因其整体浇筑成型的特性能够避免传统钢结构连接中的**焊缝断裂**的问题。结果表明，节点的延性和耗能能力良好，具有明显的硬化现象，断裂时的响应具有滞后性。
- 刘佳迪[16]提出了一种节点连接，对角部节点和边部节点进行静力和拟静力加载试验，结果表明，节点具有良好的抗震性能，斜撑式的**加劲措施**能够有效提高节点强度和刚度。
- 邓恩峰[20]提出了一种新型**螺栓-封板**连接节点，通过单调和循环加载试验，研究了节点的传力机理、滞回曲线、强度与刚度特性、延性和耗能能力，并且通过构造设计加强节点区域满足“强柱弱梁”抗震设防要求。
- 李豫明[21]提出单边螺栓的节点连接，采用单向盲孔螺栓能够解决模块节点施工空间小不容易安装的问题，通过循环加载试验研究了节点的抗震性能，结果表明，该节点连接属于半刚性连接，能够满足抗震规范中的相关要求。



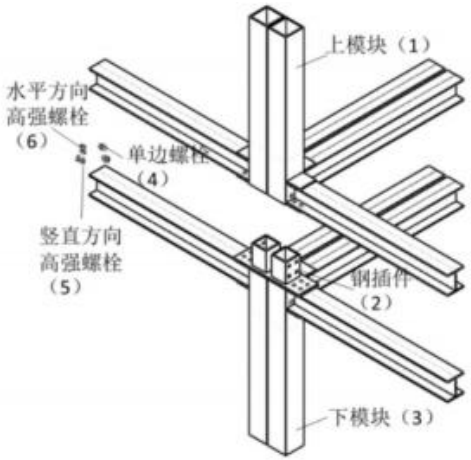
Wang[15]等提出的螺栓连接节点



刘佳迪[16]提出的梁-梁连接节点



邓恩峰[20]提出的螺栓-封板连接节点

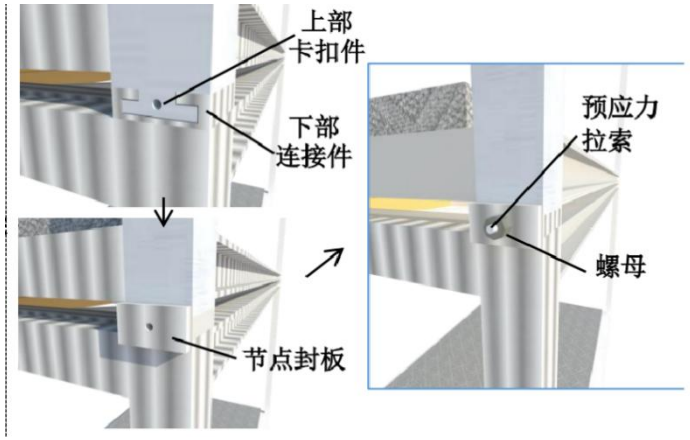


李豫明[21]提出的单边螺栓连接节点

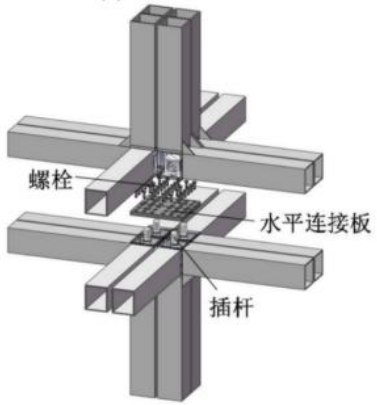
1 研究背景

国内研究现状

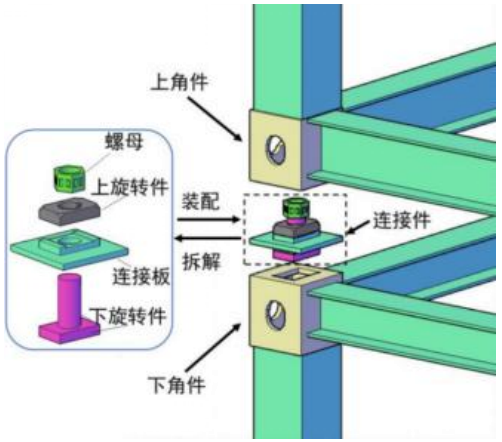
- 冯超[23]提出了一种**卡扣加拉索**连接节点，通过有限元模拟节点在单向加载和循环加载下的力学表现，结果表明，节点具有良好的刚度和强度，但抗震性能不满足要求，不适用与高层钢结构模块化建筑。
- 戴骁蒙[26]设计了一款**插入自锁式**节点，该节点现场安装简单，解决了中柱节点因空间小而施工繁琐的难题，对该节点进行了循环加载试验和有限元模拟，结果表明该节点是半刚性全强连接，抗震性能满足要求。
- 刘洋[27]在研究中以**角件旋转式**模块连接节点为主要研究对象，进行了角件旋转式模块连接节点在单元-基础连接中的抗震性能研究，开展了单元-基础连接节点和单元间连接节点装配的两层足尺柱承重式钢框架式模块平面结构拟静力试验，



冯超[23]提出的连接节点



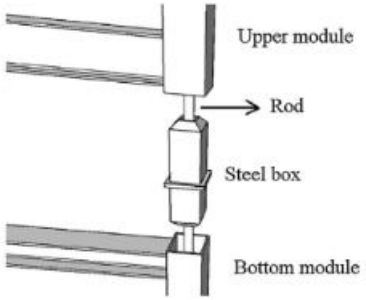
戴骁蒙[26]提出的插入自锁式节点

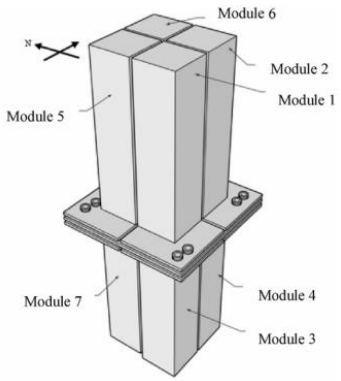


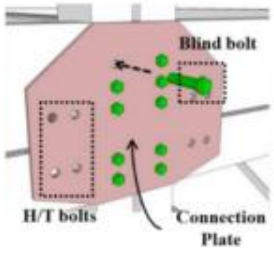
刘洋[27]提出的角件旋转式节点

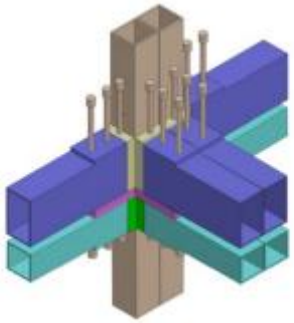
1 研究背景

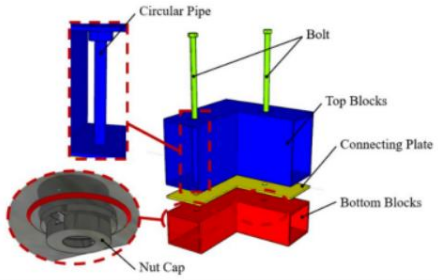
国外研究

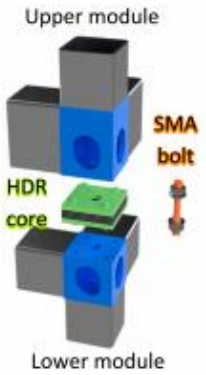








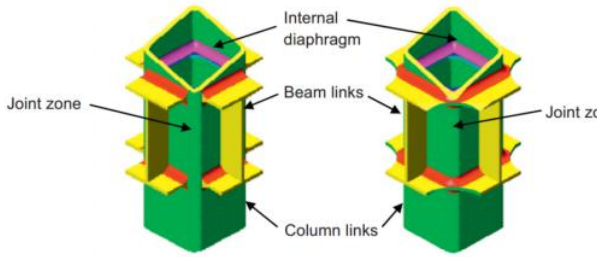


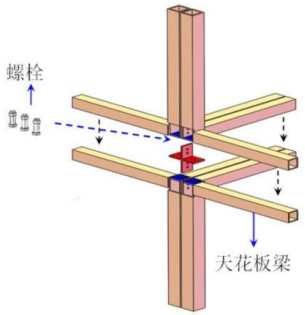


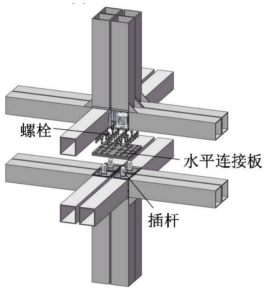
背景问题：（1）**施工现场难以快速拼接、多模块间连接操作困难、模块拼接与墙板冲突**，部分节点构造忽视了建筑使用要求和多模块组合的便利性。（2）节点有限元参数化分析往往需要建立数十个模型，**建模工作重复化，消耗大量时间**。

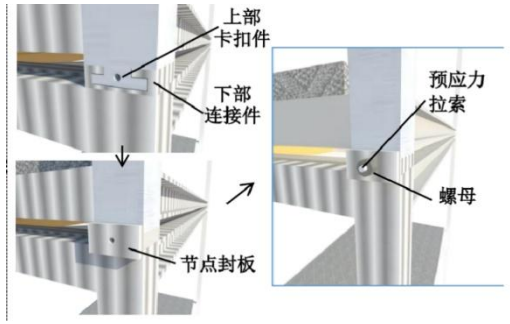
本研究意义：（1）提出新型节点传力路径清晰、施工便捷。通过有限元分析，**节点抗震性能表现良好**。（2）对新型节点建模过程进行了二次开发，简化建模流程，成功将手动建模方法下的**小时级**建模速度节省到了**分钟级**。

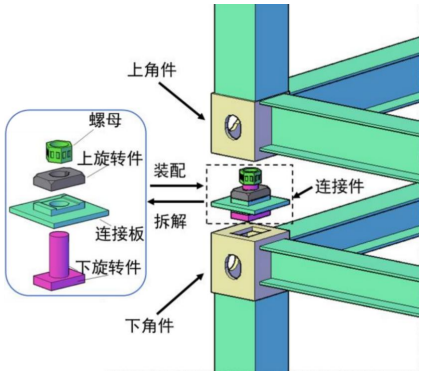
国内研究











技术路线图

文献调研：国内外研究现状

政策文件

市场需求

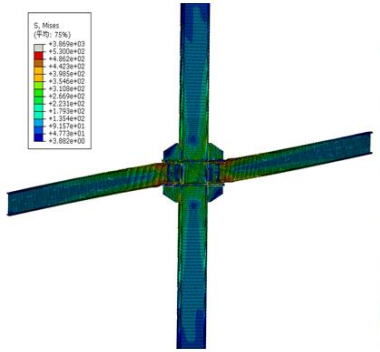
→ 模块建筑崛起

工业化、标准化优势

→ 结构特点：
模块单元搭积木、
离散化多梁多柱

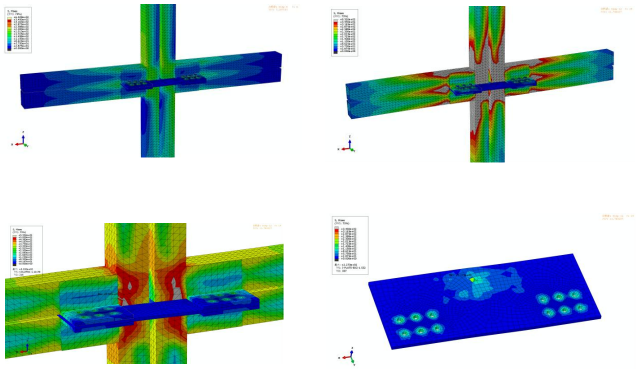
→ **关键：模块间节点连接受力性能**

建模思路验证

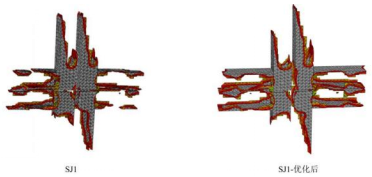


建立有限元模型，**与文献试验数据进行对比**，验证建模合理性。

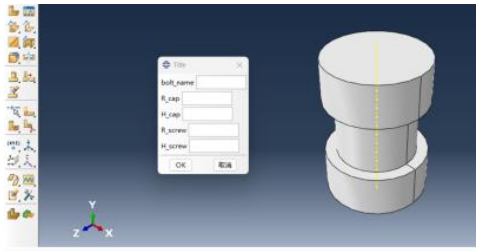
数值模拟分析

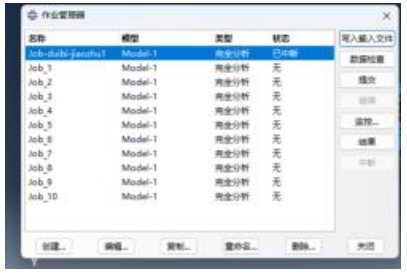


应力云图变化
内部传力机理
损失发展历程
失效模式



基于python语言的ABAQUS二次开发





前处理

部件插件：快速建立部件单元

材料插件：通用本构关系库

后处理

计算数据的项目文件自动获取

滞回曲线、骨架曲线的分析代码

一键式建模，节省时间

多本构关系，对比分析

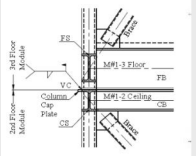
大量数据自动循环处理
解放劳动力，简化建模流程

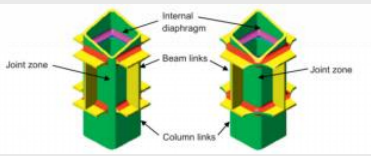
2 研究内容

2.1 新型模块化钢结构连接节点构造的提出

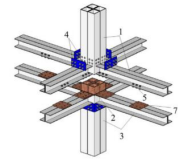
已有节点

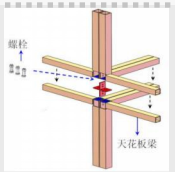
焊接节点

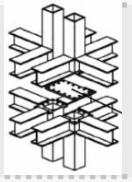




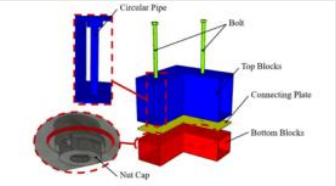
螺栓节点

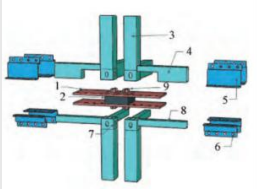


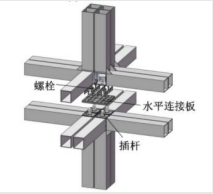


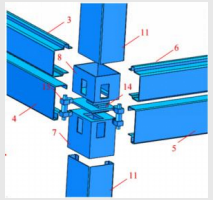


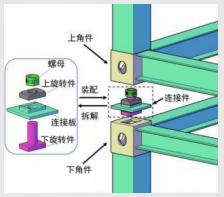
机械构造节点





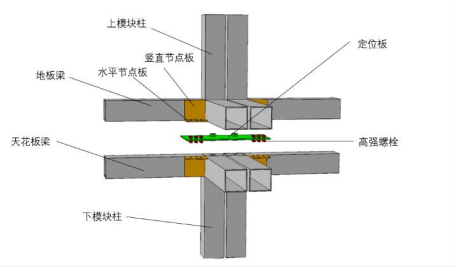




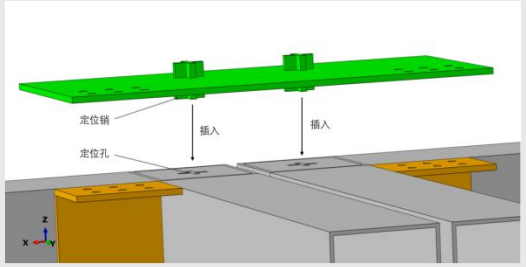


新型节点

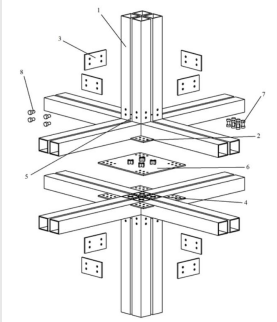
全螺栓连接

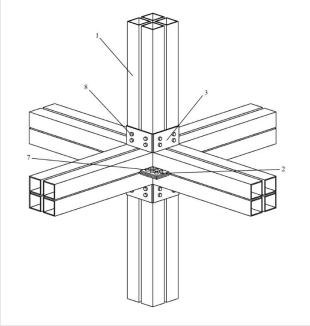


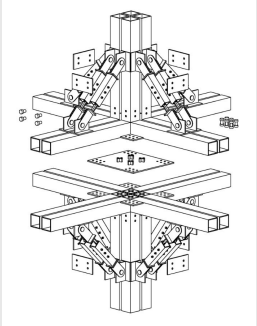
全螺栓连接
榫卯定位

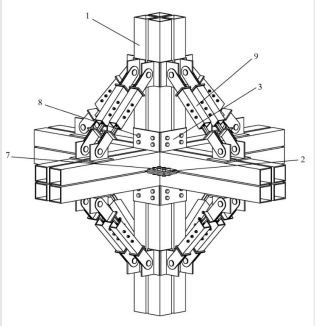


螺栓 - 齿槽联锁









一种应用于模块化钢结构建筑的可拆卸连接节点及施工方法，申请号：202311645221.X，发明专利已公布

已有节点构造

焊接节点：现场施工工序复杂，焊接质量难以保证。

螺栓节点：螺栓施拧需要一定施工空间，且容易与墙板和楼板的安装发生冲突。

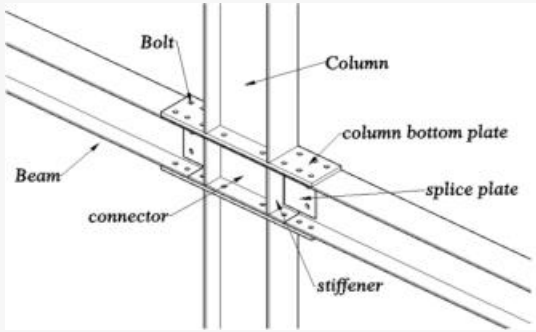
机械构造节点：工厂加工对精度要求高，造价高；节点需要专门定制，不利于工业化生产。

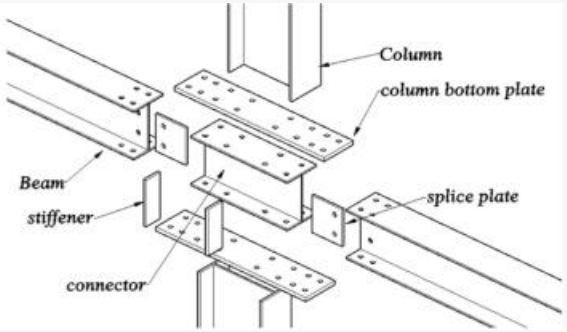
适用于中低层建筑结构，如医院、小学等。构造简洁，连接简单，可满足现场快速施工。

适用于抗震设防区的高层模块化钢结构建筑。可根据不同抗震区的要求进行构造参数的调整。现场无需焊接，采用盲孔螺栓满足施工空间要求，齿槽联络避免意外拆卸。

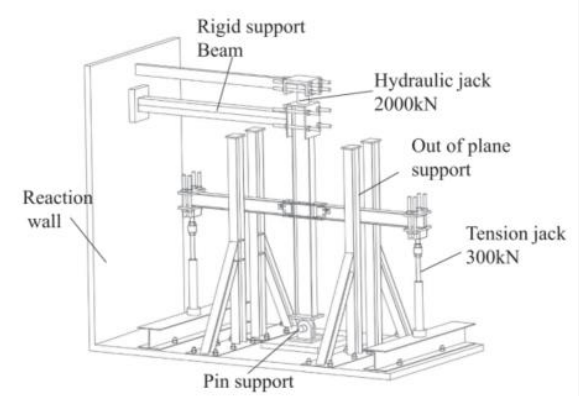
2.2 有限元建模方法的验证

Chen等[30]提出了一种适用于装配式钢结构建筑的新型螺栓连接节点节点由钢梁、钢柱、连接件、连接板和螺栓组成。（领域顶刊）

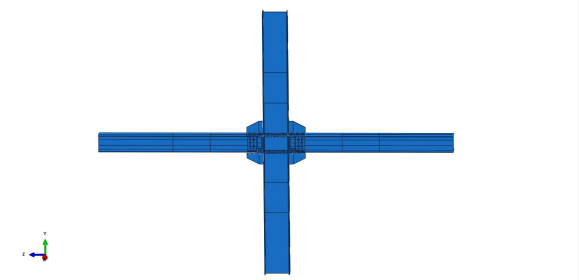


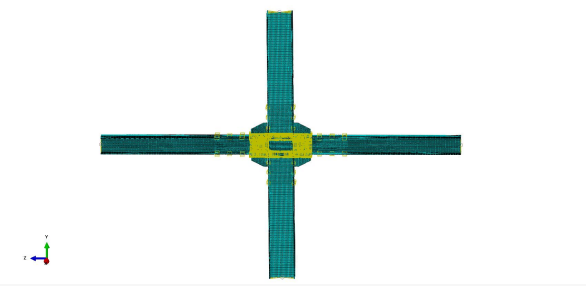


Chen等[30]对该节点的抗震性能进行了拟静力加载试验分析。试验试件按足尺比进行设计，试验设置如图所示。



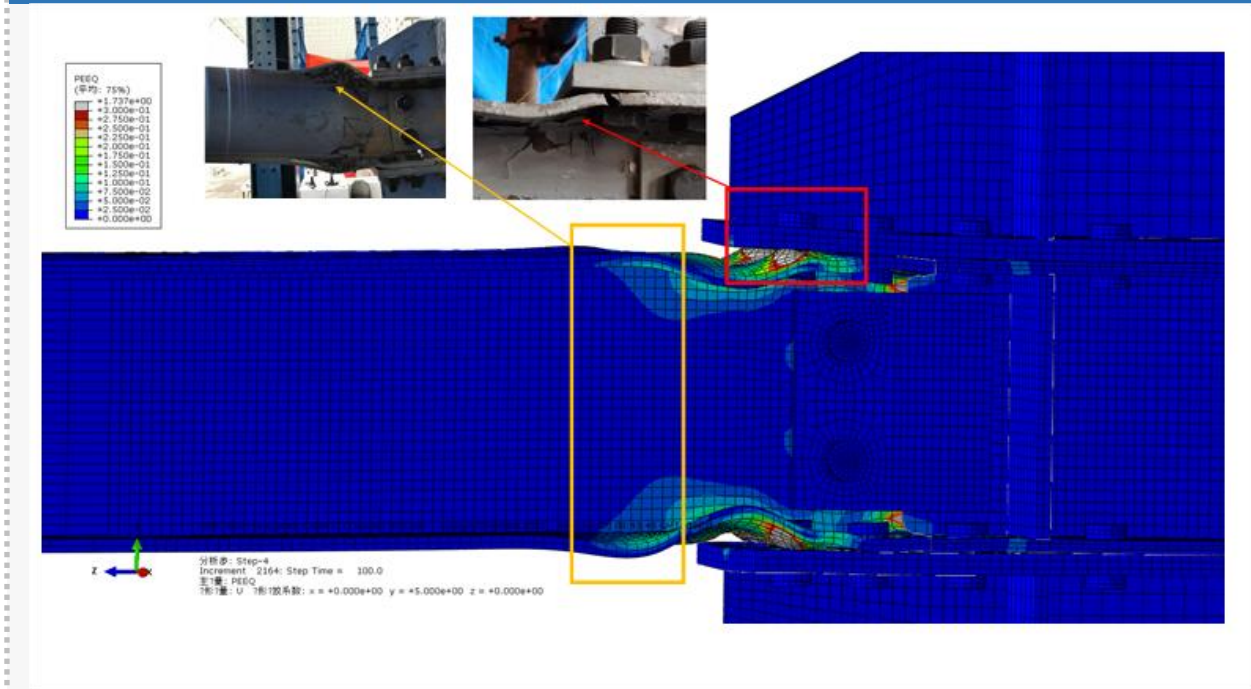
依据文献[30]中提供的构件尺寸、材性试验结果、加载制度等，按照本研究的有限元建模方法，对文献[30]中新型模块节点建立了JD3试件有限元模型。

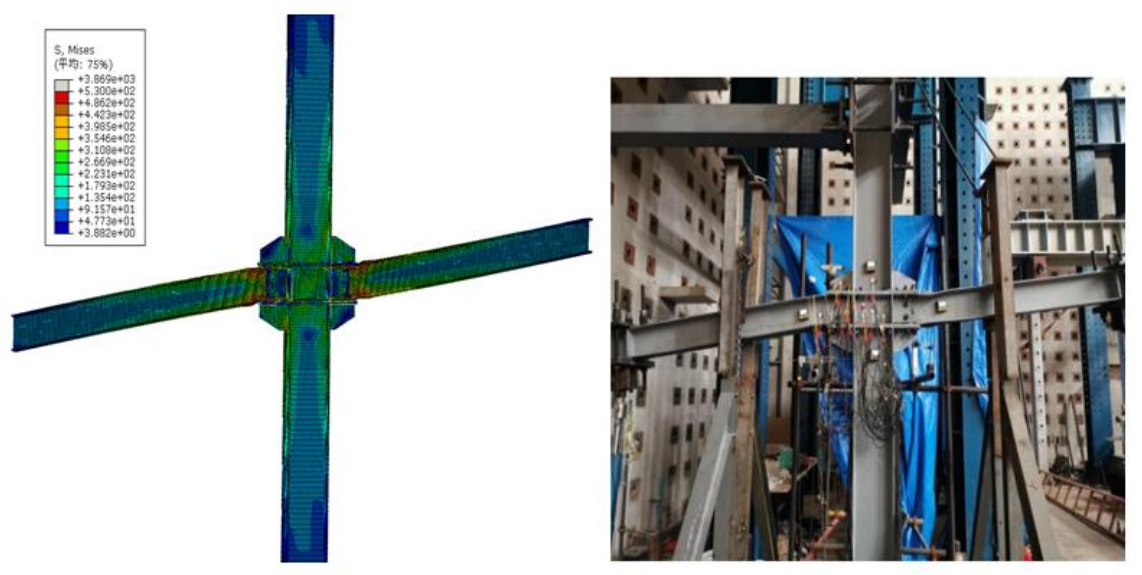




2 研究内容

2.2 有限元建模方法的验证

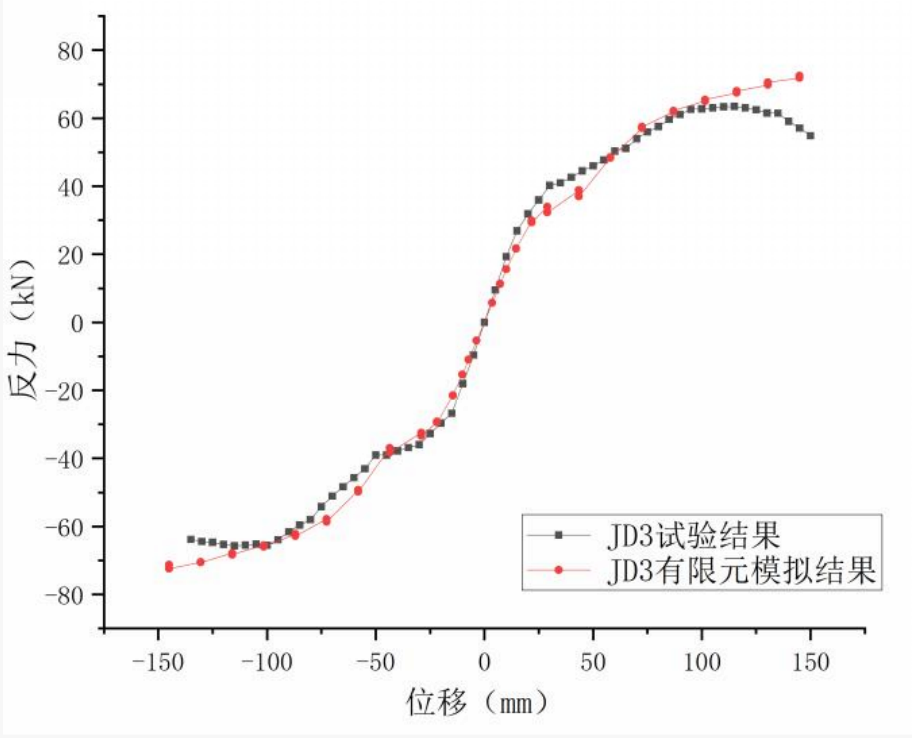




从破坏模式可以看出，本研究的建模思路下建立出的有限元模型在出现截面屈服破坏的情况时与试验中试件出现屈服破坏的现象表现较为一致，如图2所示能够较好地模拟出节点**梁端出现的塑性铰**和**螺栓处发生的断裂**屈服破坏（因考虑到计算收敛性和计算速率的问题，本模型未加入钢材的损伤积累）；

同时在加载结束时，模型最终**整体破坏形态的吻合结果良好**。

2.2 有限元建模方法的验证



受力阶段	位移施加值（mm）	试验反力值（kN）	有限元反力值（kN）	误差
弹性阶段	20	29.6	27.2	8.11%
	40	37.7	35.2	6.63%
屈服阶段	60	50.3	48.3	4.05%
	65	48.3	46.2	4.55%
破坏阶段	130	64.4	69.8	8.27%
	145	57.1	71.8	25.74%

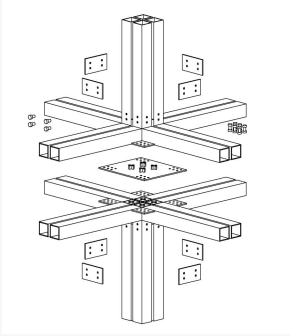
有限元模型的骨架曲线和试验结果的**骨架曲线一致性表现良好**，骨架曲线的整体趋势一致，**正确模拟出了屈服平台段**，在弹性阶段和屈服平台段有限元的模拟结果良好，说明该有限元模型的设置能够反映出钢材在低周往复荷载下反力与位移关系的真实表现。

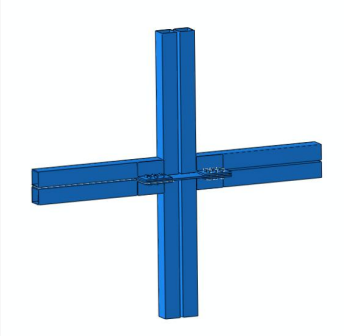
骨架曲线的弹性阶段，有限元模拟的误差能够控制在**10%以内**；骨架曲线的屈服阶段，有限元模拟的误差能够控制在**5%以内**。

综上，本研究有限元建模方法经过试验结果的**验证效果理想**，有限元模型的建立和网格划分合理，能够得到可信度高的计算结果。

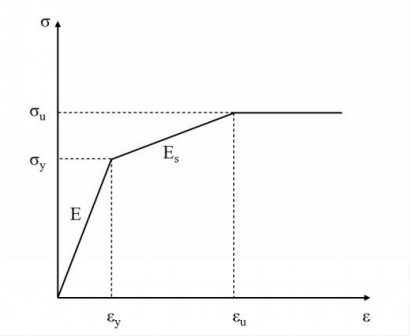
2.3 模块化钢结构建筑连接节点抗震性能有限元分析

建模流程

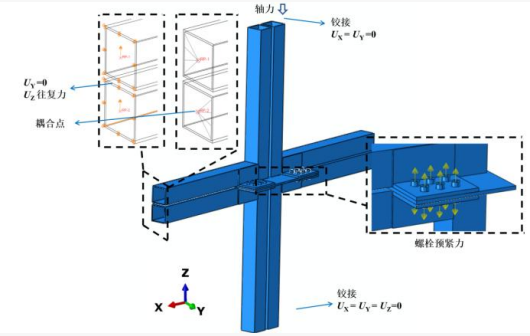




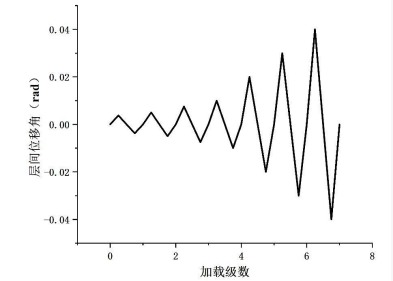
按专利图纸，部件建模装配完成

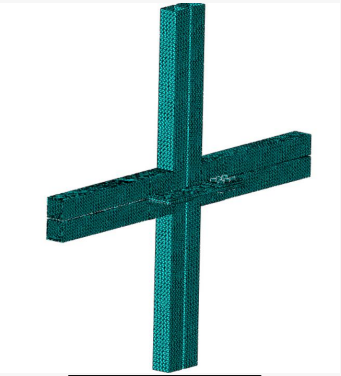


材料三折线本构模型

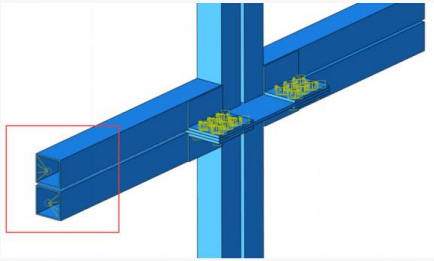


加载制度与边界条件





网格划分



接触关系设置

模型的建模流程为：**部件→材料→网格→装配→分析步→加载→作业→处理。**

（1）部件按照专利图纸建模即可；

（2）材料选择三折线本构关系，塑性关系中选择“组合”能正确反应试验条件；

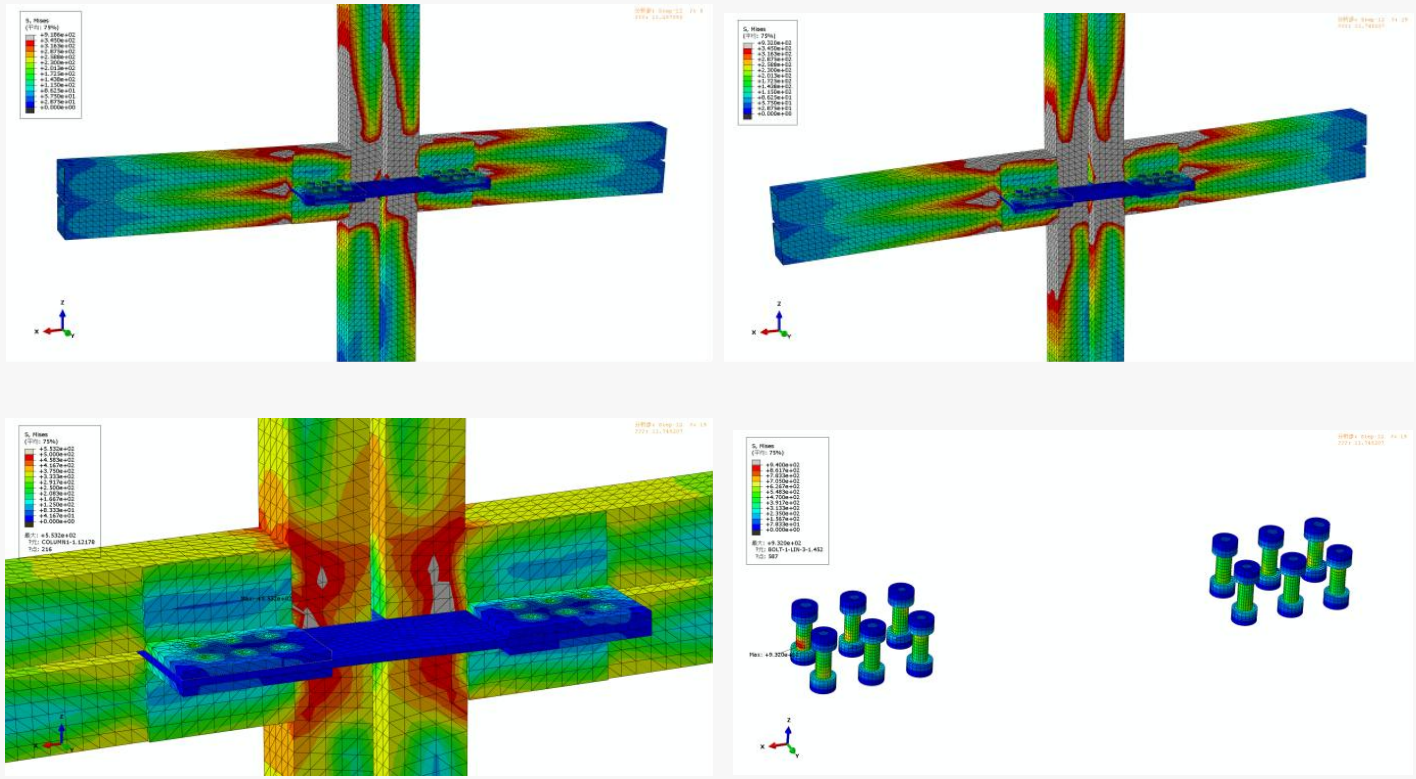
（3）加载制度参考抗震试验加载规范标准，施加低周往复荷载；

（4）网格划分前，应对部件先进行合理剖分，**网格将显著影响模型收敛**；

（5）接触关系、边界条件也是收敛问题中的**关键非线性因素**。

2.3 模块化钢结构建筑连接节点抗震性能有限元分析

节点应力云图变化



最大加载级数：0.04rad

结果分析：

（1）梁柱连接处因截面形状的突变而产生了应力集中现象，成为节点发生破坏的薄弱部位，易发生**焊缝断裂破坏**。

（2）塑性区扩散速度在层间位移角加载到0.03rad**陡增**。

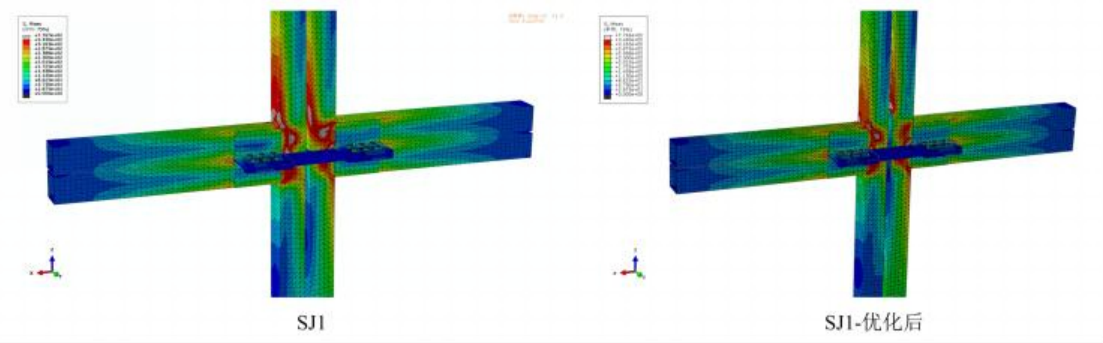
（3）节点域内需要通过增设新构造措施，使塑性铰外延距离扩大，避免在节点处发生破坏。

（4）关键受力部件节点板和螺栓，在整个加载过程中未出现明显的屈服区域，**保持弹性状态**。

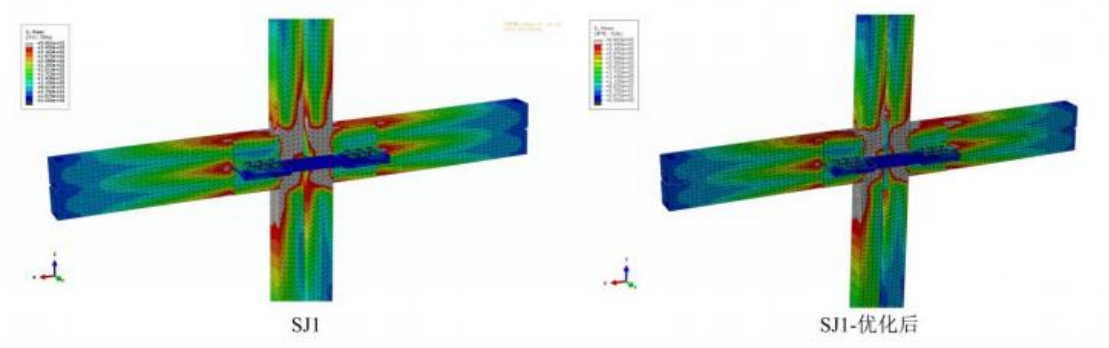
2.3 模块化钢结构建筑连接节点抗震性能有限元分析

节点优化前后应力云图对比

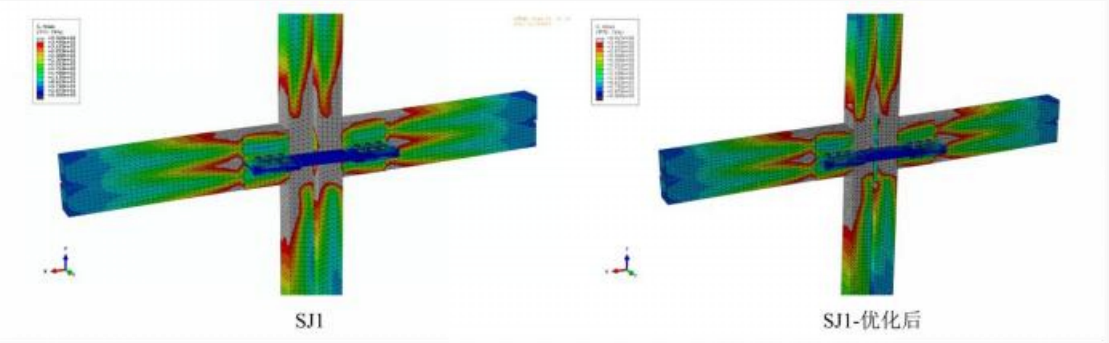
0.02rad



0.03rad

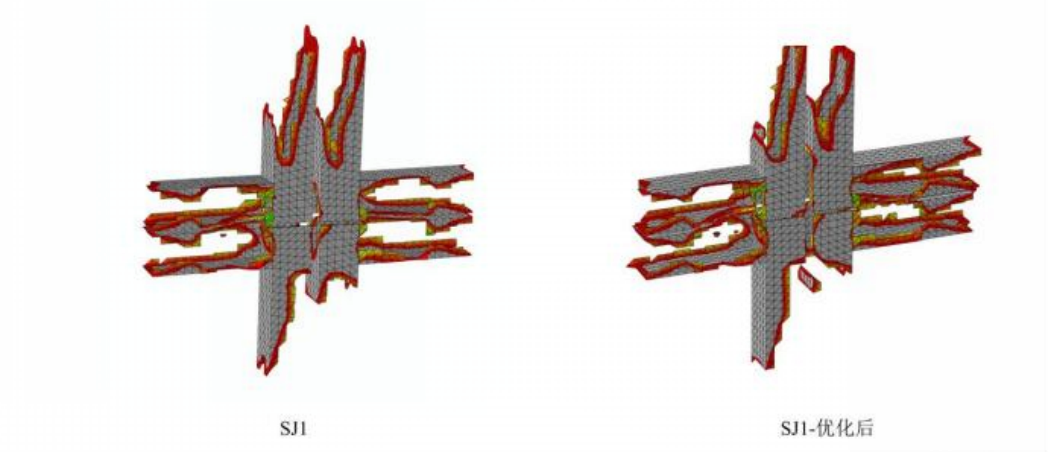


0.04rad



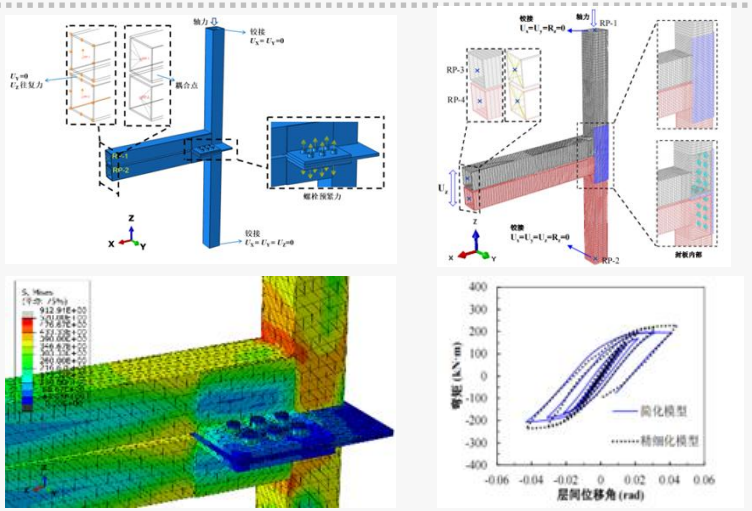
结果分析:

模型整体应力云图的**变化规律一致**，仍然是先在梁柱连接处出现塑性区域，后塑性区域逐渐扩展到节点域。可明显观察到，齿槽构造措施的增加能够**有效缩小节点域的塑性区域大小**，能有助于塑性铰外移保护节点域，同时**改善应力集中现象**，满足“强节点弱构件”的抗震要求。



2 研究内容

2.4 基于pyhon语言的ABAQUS二次开发



固定的前处理流程

- 部件，装配，材料
- 约束，接触，网格

固定的后处理流程

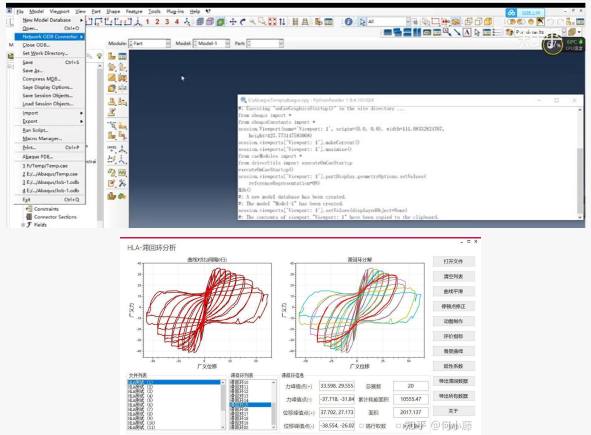
- 滞回曲线，骨架曲线
- 延性，耗能，刚度下降

建筑工业化离不开标准化、工厂化的构件模型。试验方案离不开模范化、公式化限定条件。

绝大多数论文的数据分析的研究对象相同，分析手段相似。分析得到的结论通过确定数值范围、大小对比。

建模机械化、重复化、时间长

ABAQUS 二次开发（Python） → 节点参数化分析



前处理

- 部件插件：快速建立部件单元
- 材料插件：通用本构关系库

后处理

- 计算数据的项目文件自动获取
- 滞回曲线、骨架曲线的分析代码

一键式建模，节省时间

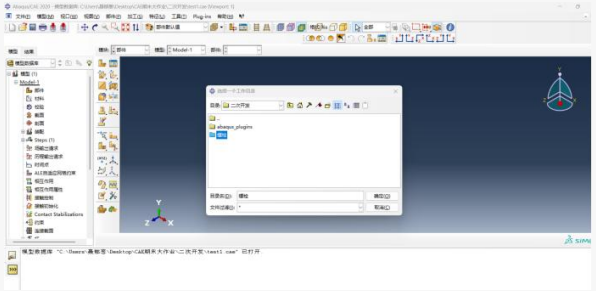
多本构关系，对比分析

大量数据自动循环处理
解放劳动力，简化建模流程

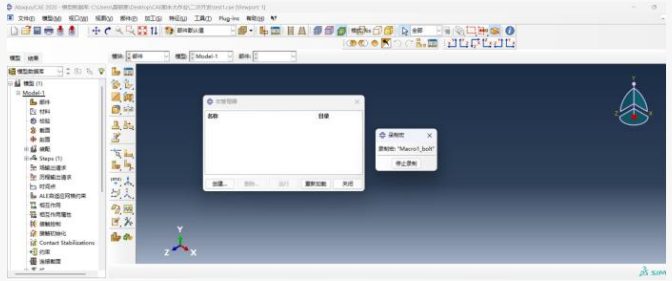
2 研究内容

2.4 基于pyhon语言的ABAQUS二次开发

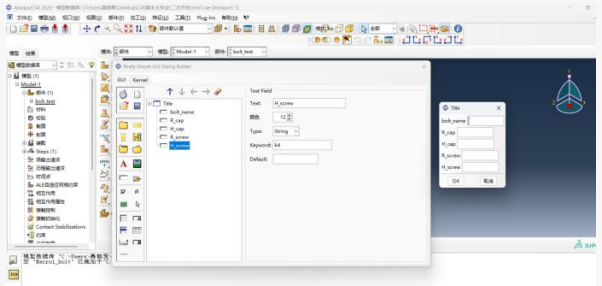
建立部件GUI界面



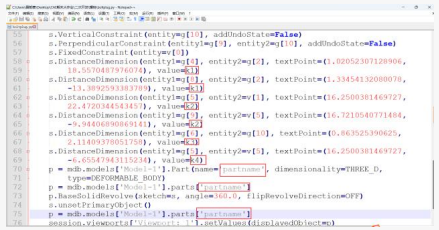
设置工作目录



创建宏的录制

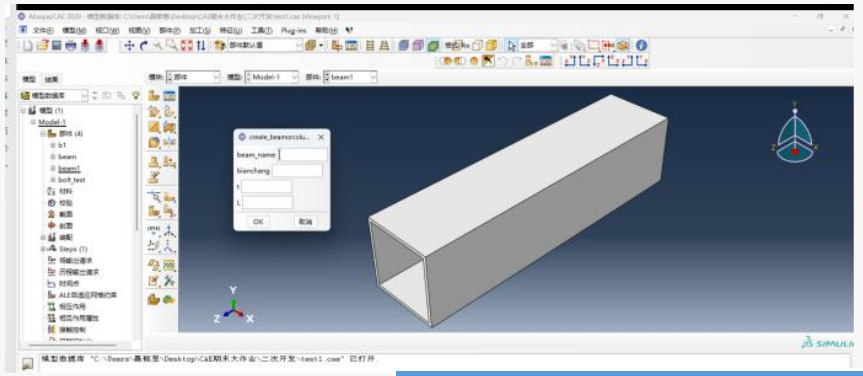


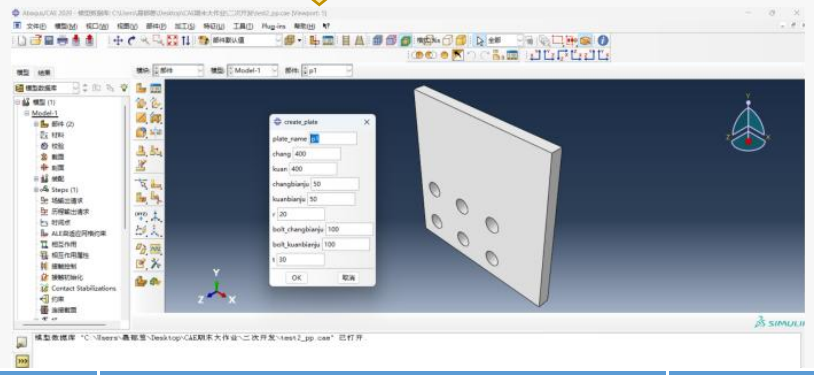
创建GUI显示界面

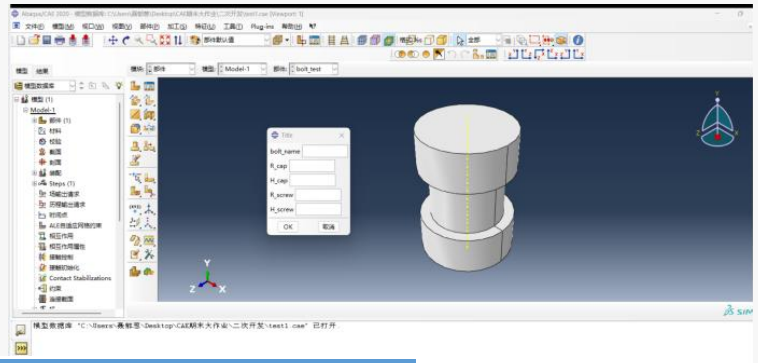


建立python脚本文件

开发成果 Part-GUI界面





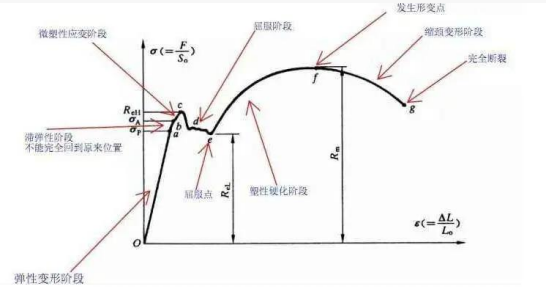


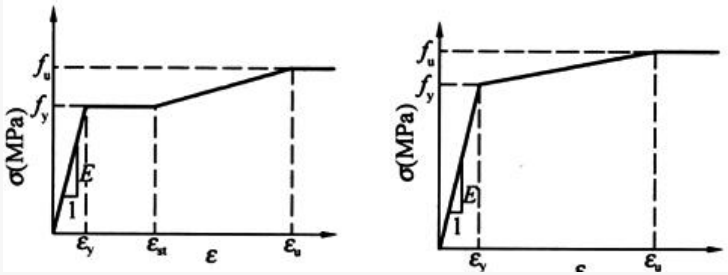
	手动建立部件	GUI界面建立
消耗时间	30min-90min	2min

2 研究内容

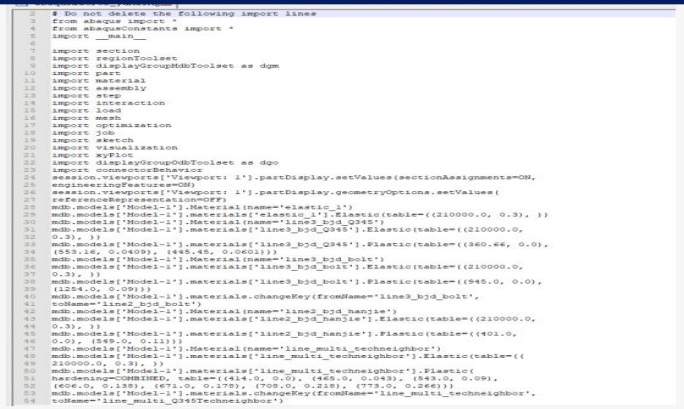
2.4 基于pyhon语言的ABAQUS二次开发

本构关系库



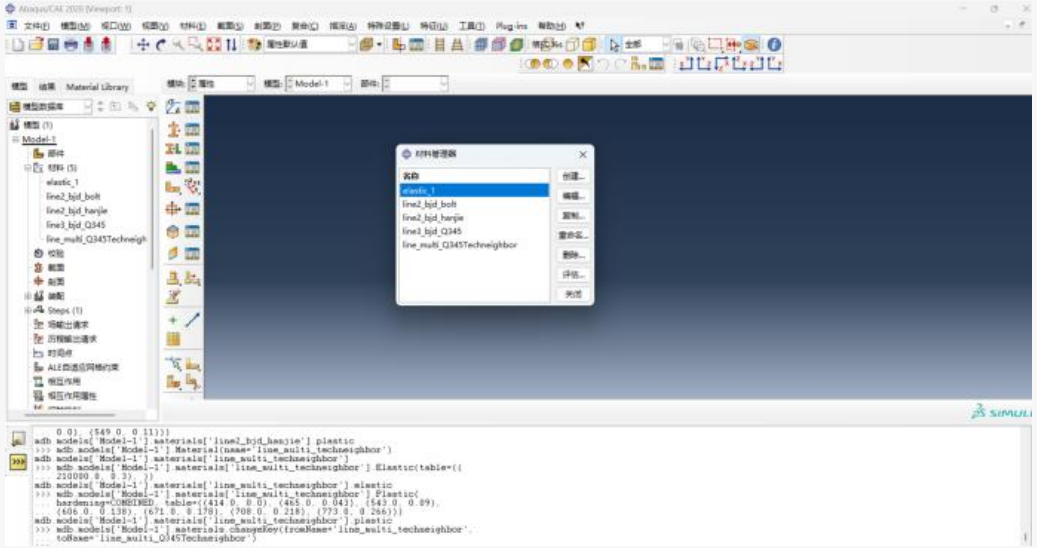


钢材的多种本构关系设置



建立本构关系脚本文件

开发成果 内置本构关系库

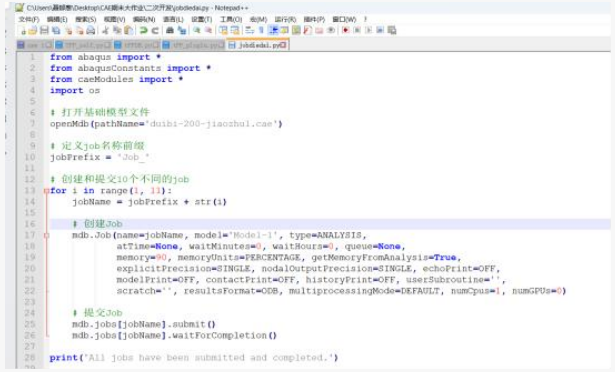


	手动建立本构	库内调用本构
消耗时间	10min-60min	**10s**

2 研究内容

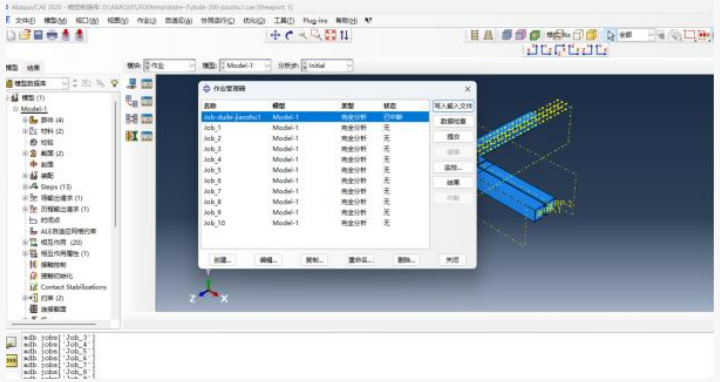
2.4 基于pyhon语言的ABAQUS二次开发

多项目一键迭代



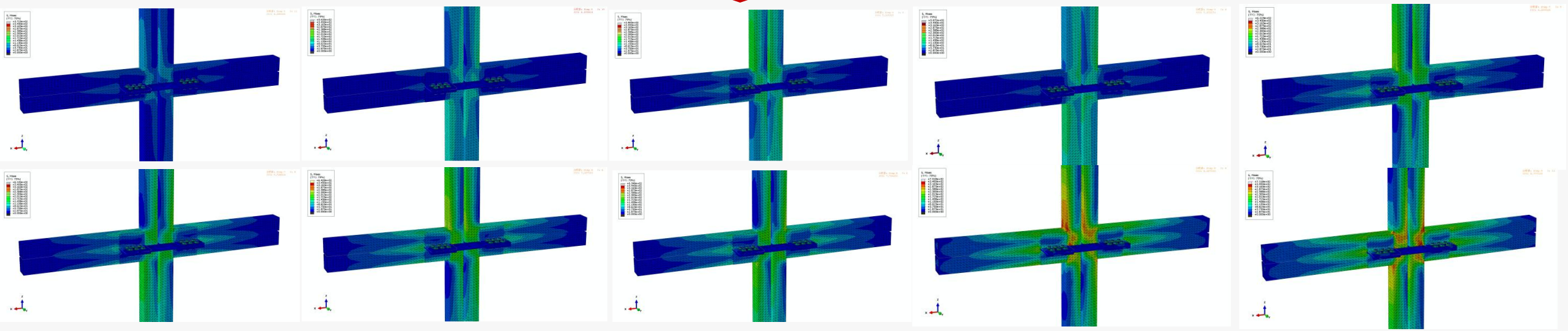
```python
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
from caeModules import *
import os

# 打开基础模型文件
openMdb(pathName='duibi-200-jiaozhu1.cae')

# 定义job名称前缀
jobPrefix = 'Job_'

# 创建和提交10个不同的job
for i in range(1, 11):
    jobName = jobPrefix + str(i)

    # 创建Job
    mdb.Job(name=jobName, model='Model-1', type=ANALYSIS,
            atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None,
            memory=90, memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,
            explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
            modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='',
            scratch='', resultsFormat=ODB, multiprocessingMode=DEFAULT, numCpus=1, numGPUs=0)

    # 提交Job
    mdb.jobs[jobName].submit()
    mdb.jobs[jobName].waitForCompletion()

print('All jobs have been submitted and completed.')
```

建立项目迭代脚本



迭代生成文件展示

开发成果 多项目一键迭代



3 结论与展望

3.1 结论

（1）新型节点在最大加载级数时，层间位移角达到了-0.04rad时，节点域处有区域达到了材料的极限强度，材料发生破坏，不过此时破坏面积不大，可通过合理的构造措施避免。说明**节点连接合理，强度表现良好**。

（2）齿槽的构造措施能够在**增添较小用钢量的情况下缩小节点域的塑性区域大小**，能有助于塑性铰外移保护节点域，同时改善应力集中现象，满足“强节点弱构件”的抗震要求。

（3）有限元验证模型与试验结果的节点破坏模式总体趋势一致，且分析其骨架曲线在极限破坏之前有限元模拟均能控制在10%以内，**证明了有限元建模的合理性**。

（4）对新型节点建模过程中涉及的部件建模、装配、本构关系库等功能进行了二次开发，**简化了建模流程，节省了建模时间**。

3.2 展望

（1）考虑新型材料、新型阻尼器对模块间节点连接抗震性能的影响。

（2）将二次开发功能进一步完善，简化建模流程，优化用户界面。建立抗震区节点选择库。

（3）对模块化钢结构建筑整体结构进行抗震性能分析，得到更真实受力条件下的节点力学性能表征。

参考文献

1. Lawson R M, Ogden R G, Bergin R. Application of Modular Construction in High-Rise Buildings[J]. Journal of Architectural Engineering, 2012, 18(2): 148-154.
2. 宗亮,王海鹏,丁阳,等.模块化钢结构体系与整体计算方法研究进展[C]. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第16届(ISSF-2018)学术交流会暨教学研讨会论文集. 2018:475-487.
3. ANNAN C D, YOUSSEF M A, EL NAGGAR M H. Experimental evaluation of the seismic performance of modular steel-braced frames[J]. Engineering Structures, 2009, 31(7): 1435-1446.
4. LAWSON R M, RAY O, CHRIS G, et al. Design in modular construction[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014: 163-178.
5. LEE Sang Sup, BAE Kyu Woong, PARK Keum Sung, HONG Sung Yub. An experimental evaluation of structural performance for the beam to column joints in unit modular system[J]. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2013, 25(3) : 255-265.
6. LEE Seungjae, PARK Jaeseong, KWAK Euishin, et al. Verification of the seismic performance of a rigidly connected modular system depending on the shape and size of the ceiling bracket[J]. Materials, 2017, 10 (3): 263.
7. Rafaela Sanches, Oya Mercan, Brent Roberts, Experimental investigations of vertical post-tensioned connection for modular steel structures[J], Engineering Structures, 2018, 175: 776-789.
8. Sendanayake S V, Thambiratnam D P, Perera N, et al. Seismic mitigation of steel modular building structures through innovative inter-modular connections[J].Heliyon, 2019, 5(11).
9. Cho B H, Lee J S, Kim H, et al. Structural performance of a new blind-bolted frame modular beam-column connection under lateral loading[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1929.
10. Khan K, Yan J B. Finite element analysis on seismic behaviour of novel joint in prefabricated modular steel building[J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20: 752-765.

参考文献

11. Khan K, Chen Z H, Liu J D, et al. Simplified modelling of novel non-welded joints for modular steel buildings[J]. ADVANCED STEEL CONSTRUCTION, 2021, 17(4): 412-424.
12. Lee J S, Lee H D, Shin K J, et al. Structural performance evaluation of modular connections using developed blocks[J]. International Journal of Steel Structures, 2021, 21(4): 1250-1259.
13. Dan-Adrian Corfar, Konstantinos Daniel Tsavdaridis, A hybrid inter-module connection for steel modular building systems with SMA and high-damping rubber components[J], Engineering Structures, 2023, 289: 116281.
14. Nadeem G, Safiee N A, Bakar N A, et al. Experimental and numerical study of self-locking adaptable inter connection for modular steel structures[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 65: 105723.
15. Wei Wang, Cheng Fang, Yiyi Chen, Mingxing Wang, et al. Seismic performance of steel H-beam to SHS-column cast modular panel zone joints[J], Engineering Structures, 2016, 117:145-160.
16. 刘佳迪.钢结构模块节点和构件耐火试验研究[D].天津大学,2019.
17. 向沛国.装配式模块化建筑节点试验研究[D].哈尔滨工业大学,2019.
18. 刘学春,任旭,詹欣欣等.一种盒子式模块化装配式钢结构房屋梁柱节点受力性能分析[J].工业建筑,2018,48(05):62-69.
19. 曾武凤.基于模块化低层住宅的内套筒对拉螺栓连接构造研究[D].西华大学,2019.
20. 邓恩峰.集成模块钢结构波纹钢板剪力墙与新型节点抗震性能研究[D].天津大学,2018.
21. 李豫明.模块化钢结构单边螺栓连接节点力学性能研究[D].天津大学,2018.
22. 周锦昌.模块化拟框架结构拼接节点力学性能研究[D].华南理工大学,2018.
23. 冯超. 新型盒式模块化建筑钢结构体系开发、力学性能及设计研究[D]. 江苏:东南大学, 2019.
24. 叶景荣.钢结构模块建筑梁柱节点抗震性能研究[D].广州大学,2019.
25. 吴从晓,杨渊,吴从永等.集装箱装配建筑减震结构及连接节点抗震性能分析研究[J].钢结构,2019,34(04):1-8+73.
26. 戴骁蒙.模块化钢结构插入自锁式节点抗震性能与设计方法研究[D].天津大学,2019.

参考文献

27. 刘洋.角件旋转式节点连接的柱承重式钢模块结构抗震性能研究[D].天津大学,2021.
28. 清华大学深圳国际研究生院. 一种应用于模块化钢结构建筑的可拆卸连接节点及施工方法:CN202311645221.X[P]. 2024-01-23.
29. 韩弘烨. 低多层模块化钢结构全螺栓连接节点力学性能研究[D].天津大学,2022.
30. Chen Z, Niu X, Liu J, et al. Seismic study on an innovative fully-bolted beam-column joint in prefabricated modular steel buildings[J]. Engineering Structures, 2021, 234: 111875.

请各位老师同学批评指正

汇报人：聂郁葱　　汇报时间：2024年6月14日