

# Experimental Investigation and Finite Element Analysis on the Behavior of New Light Steel-Concrete Composite Structure Joints

Fei Meng, Jianxiong Li, Zhenfang Lu, Dan Gao

Civil Engineering Institute, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia  
Email: alian93club@163.com

Received: Apr. 4<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2020; published: May 7<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Based on the experiments of new composite joint of thin-walled square concrete-filled steel tube column and c-steel beam under cycle loading, nonlinear finite element models were used to analyze the mechanical properties and deformation of new type of connections using ABAQUS. Based on appropriate material stress-strain relations, finite element analyses were conducted under cycle loading. A new type of joint stress-strain vector diagram by finite element analysis accurate shows failure mechanism and failure process of nodes. The comparison between the load-displacement curve and the test results shows that the new type of joint has high bearing capacity, good ductility and excellent energy dissipation capacity.

## Keywords

Composite Structure Node, Thin-Walled C Steel, Stress Strain Vector, Finite Element Analysis

---

# 新型轻钢 - 混凝土组合结构节点试验研究及有限元分析

孟 斐, 李建雄, 卢振方, 高 丹

内蒙古工业大学土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特  
Email: alian93club@163.com

收稿日期: 2020年4月4日; 录用日期: 2020年4月30日; 发布日期: 2020年5月7日

## 摘要

基于薄壁方钢管混凝土柱与C型钢混凝土梁新型组合节点的低周反复荷载试验,选择适用合理的材料本构关系,通过有限元分析软件ABAQUS对新型节点进行循环往复荷载作用下的受力变形特性进行分析。有限元分析得出的新型节点应力应变矢量图较精确的反映出节点的破坏机理及过程,其荷载-位移曲线与试验结果对比分析表明该新型节点承载力较高,延性好,具有优越的耗能能力。

## 关键词

组合结构节点,薄壁C型钢,应力应变矢量,有限元分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自上世纪八十年代起步至今,以钢管混凝土为基础的钢-混凝土组合结构节点研究有了长足发展,包括隔板式节点、螺栓连接节点、焊接节点等常规连接构造的节点抗震性能研究比较成熟[1] [2] [3]。而冷弯薄壁钢与混凝土组合结构的研究还较少,且主要集中于梁、板、柱等构件的研究[4] [5] [6] [7],关于冷弯薄壁钢管混凝土梁与方钢管柱组合节点受力性能的研究还不多见。本文以薄壁方钢管混凝土柱-C型钢混凝土梁组合节点为研究对象进行试验研究,并建立有限元模型对比分析节点的破坏形式及传力机制,得出新型组合结构节点的相关性能。

## 2. 试验研究

### 2.1. 试件概况

本文以图1所示薄壁方钢管柱、C型钢混凝土梁构成新型组合节点,其中C型钢梁插入柱身,混凝土贯通并设置负弯矩筋。构件型号 $\square 200 \times 200 \times 6$ 、C型钢 $160 \times 50 \times 20 \times 3$ ,详见表1;混凝土在实验室现浇并养护,其配合比为水泥:水:砂:石子 = 1:0.65:2.35:3.68。制作试件时留设100 mm立方体混凝土试块3组共计9块,标准养护条件下实测强度为30.5 MPa。

### 2.2. 加载装置与加载制度

本次试验加载装置见图2。此次试验采用拟静力方式加载,柱顶部通过与反力架相连固定装置进行约束,柱下部混凝土支座采用地锚螺栓及千斤顶进行可靠约束,确保柱两端不产生位移;梁加载端通过行程 $\pm 150$  mm的1000 KN电液伺服作动器施加竖向往复荷载,作动器上部与加载架连接,下部通过传力装置与试件梁右端相连。

试验采用荷载控制加载,每级荷载循环往复一次,每级增量5 kN,持荷3分钟。试验采用PLU200三通道疲劳试验机采集分析系统记录作动器工作过程中的荷载及位移。加载开始前通过预加载确定试件安装、加载装置及仪表均正常后正式加载,直至试件破坏。

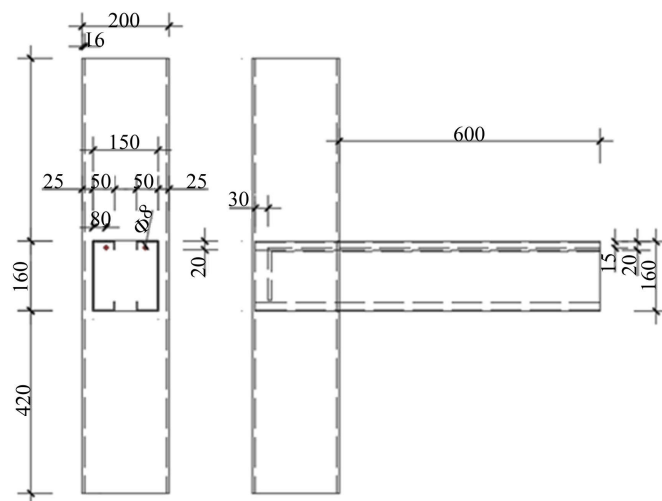


Figure 1. Design size of specimen  
图 1. 试件设计尺寸

Table 1. Material properties of steel  
表 1. 钢材材料性能

名称	型号	直径(mm)	屈服强度(MPa)	极限强度(MPa)	弹性模量(MPa)
□200 × 200 × 6	Q235B	/	308	445.7	$2.10 \times 10^5$
C 型钢 160 × 50 × 20 × 3	HRB400	8	438	642	$2.09 \times 10^5$
钢筋					

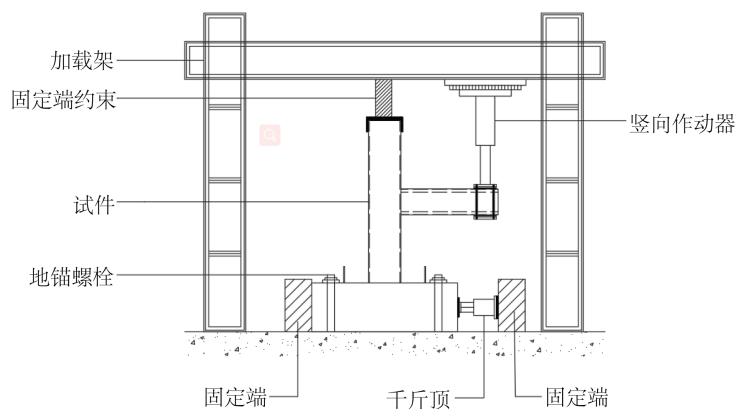


Figure 2. Device for low cyclically loading  
图 2. 低周反复加载装置示意图

### 2.3. 试验结果

试验现象如图 3 所示。最初破坏现象表现为图 3(a)中 C 型钢梁腹板“鼓起”，产生局部屈曲变形，随荷载增大孔洞下边缘柱壁产生局部屈曲变形，如图 3(b)所示，最终组合梁柱于节点相接处粘结锚固失效，C 型钢混凝土梁相对薄壁方钢管柱滑移，如图 3(c)所示。

### 3. 有限元计算模型

本文对新型组合节点进行有限元模拟，模型几何特征、边界约束条件及加载制度等与试验试件完全

相同。

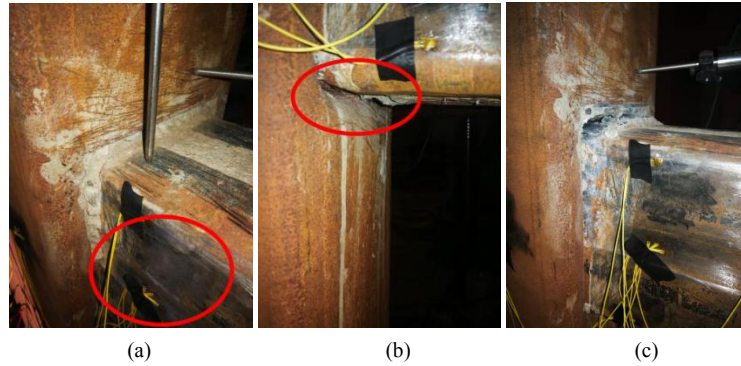


Figure 3. The test phenomenon  
图 3. 试验现象

### 3.1. 材料本构

材料的本构关系是张量  $\sigma$  和  $\varepsilon$  之间的关系，是关于变形性能和承载力求解过程中的重要材料性能依据。本次模拟中，混凝土本构模型采用通用的 Concrete Damaged Plasticity Model，如图 4 所示，其弹性模量  $E_c$  根据参考文献[8]由下式求得：

$$E_c = 4730\sqrt{f_c}$$

式中： $f_c$  为混凝土圆柱体抗压强度。

由参考文献[9]知约束混凝土处于单轴受压时，其应力 - 应变关系由下述关系式确定：

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}; \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$\sigma_0 = f_c$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f_c) \times 10^{-6}$$

$$\eta = 1.6 + 1.5/x$$

$$\beta_0 = \frac{f_c^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}$$

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}}$$

其中： $A_s$  是钢管横截面积； $A_c$  是钢管中核心混凝土横截面积； $f_y$  是钢材屈服强度； $f_{ck}$  是混凝土轴心抗压强度标准值； $f_c$  是混凝土圆柱体抗压强度。

本次模拟忽略混凝土受拉性能，即认为混凝土材料受拉开裂后即不能在承受拉应力，退出工作。

钢筋的本构关系采用双折线模型，见图 5，包括弹性阶段和强化阶段。其材性参数见表 1，泊松

比 0.3。

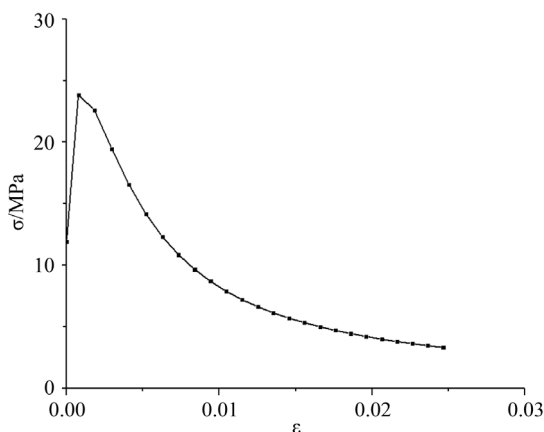


Figure 4. Stress-strain curve of concrete

图 4. 混凝土本构关系

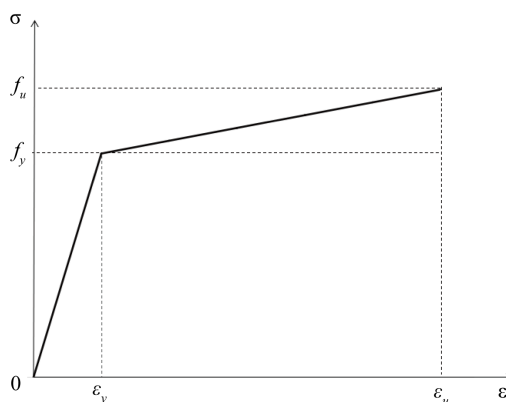


Figure 5. Stress-strain curve of steel

图 5. 钢材本构关系

### 3.2. 模型建立

节点模型网格划分如图 6 所示。混凝土、薄壁方钢管及 C 型钢采用 C3D8R Solid 单元, 钢筋采用 T3D2 Truss 单元。为节省模拟计算时间成本, 网格划分时结合新型节点的特点分区段进行, C 型钢混凝土梁的网格划分密于方钢管混凝土柱, 且在柱节点区域适当加密网格, 又考虑到 C 型钢混凝土梁在靠近柱的一端会产生变形, 故此区段内网格划分最密。本模型建立过程中不考虑混凝土与方钢管及 C 型钢之间的滑移, 认为其完全粘结, 协同工作。

## 4. 模型分析

### 4.1. 节点模拟应力云图

新型节点试件模拟 Mises 应力云图如图 7(a)所示, 图 7(b)~(e)分别为钢筋、方钢管、C 型钢、混凝土部分的应力云图。由图可知, 该节点试件在外部荷载作用下, 节点区域梁柱交接部分所产生应力和屈曲变形最大, 故组合梁与柱交接部分截面是该节点构件的最危险截面。同时可知, 组合构件应力值梁 C 型钢部分最大, 其次是支座处负弯矩钢筋的应力值较大, 组合柱仅薄壁方钢管洞口附近存在应力, 节点构

件混凝土部分除部分局部应力外，绝大部分内部应力极小，这与试验研究结论相符，也与定性判断分析相符。

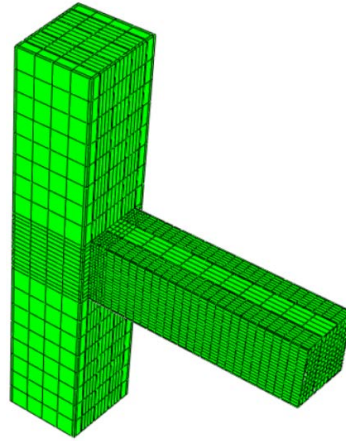
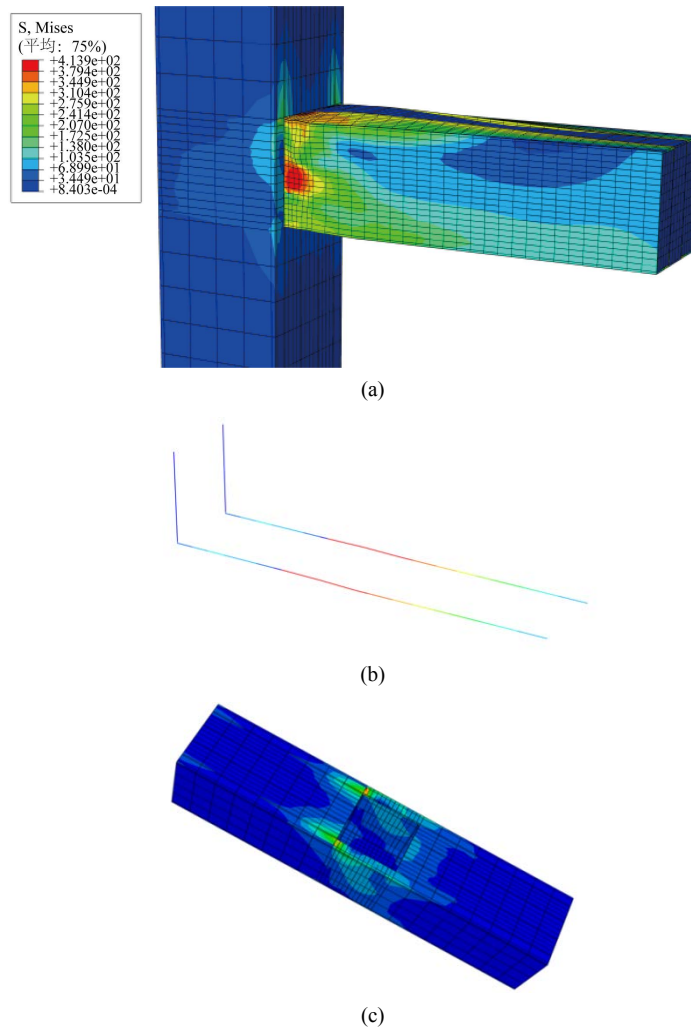


Figure 6. Node model meshing  
图 6. 节点模型网格划分



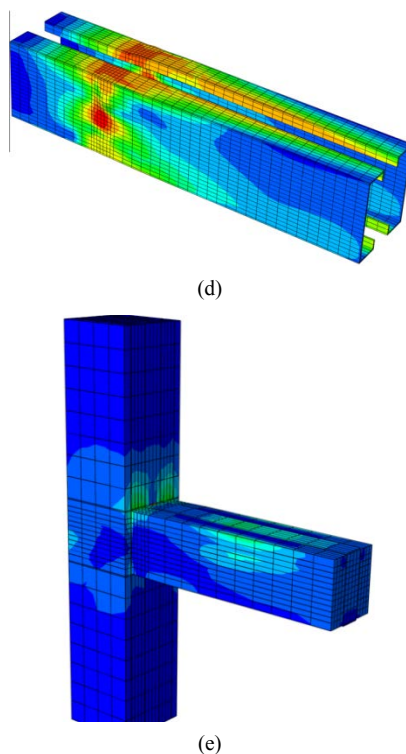


Figure 7. Finite element analysis results  
图 7. 有限元分析结果

梁最危险截面与中性轴交汇区域部分，组合梁外包 C 型钢是试件应力最大区域，最危险截面是主要屈曲变形区域，C 型钢产生了明显的畸变屈曲变形，C 型钢侧壁局部“鼓起”，且同截面角部是内力最大处，如图 8 所示，这与试验研究中该节点同样于最危险截面角部首先产生破坏现象相一致，即节点域角部 C 型钢混凝土梁与柱构件产生裂缝、角部少许混凝土挤碎压出。

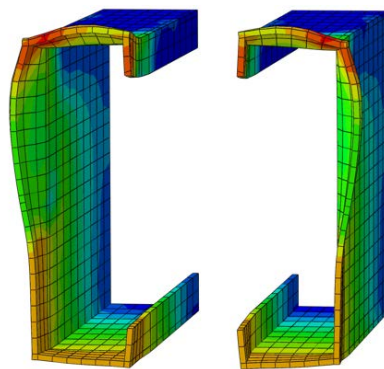
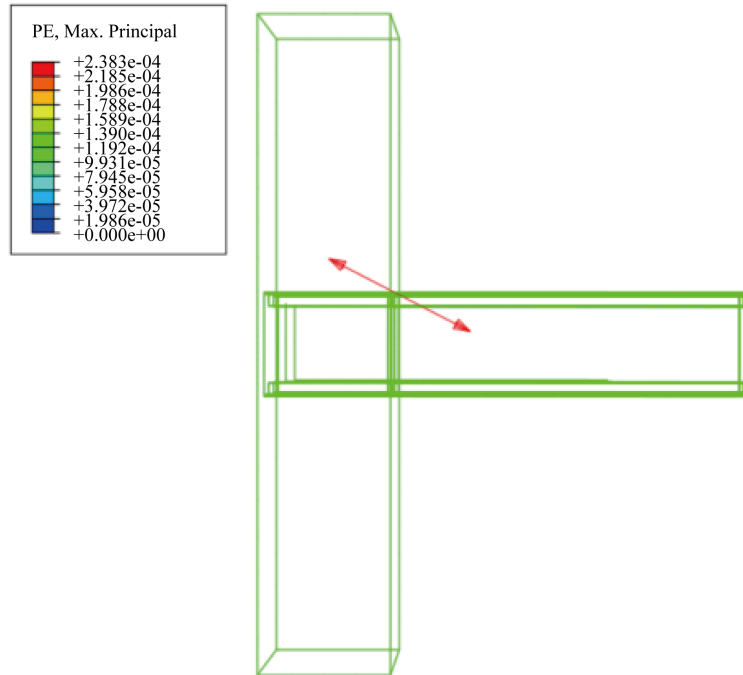


Figure 8. Finite element analysis of the most dangerous section  
图 8. 最危险截面有限元分析

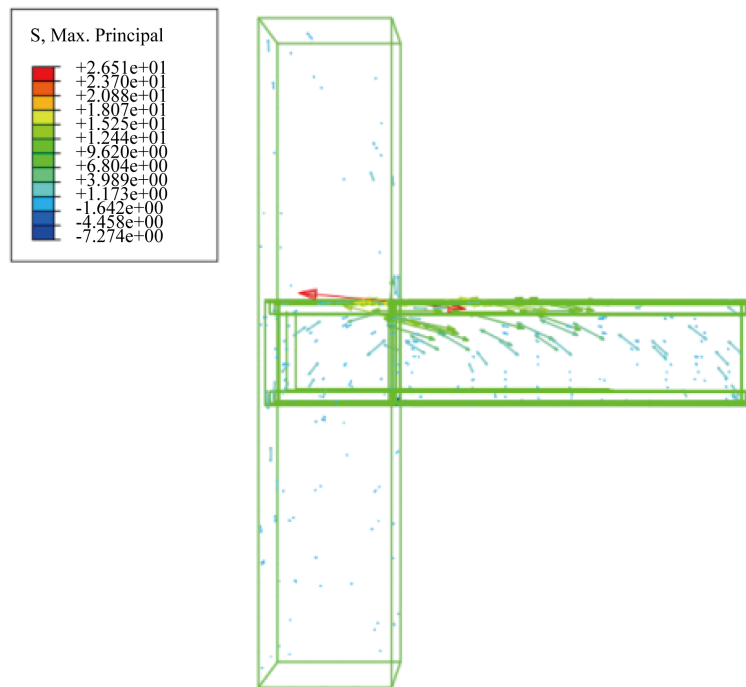
#### 4.2. 应力应变矢量图

应变矢量图可以反应试件的开裂状态及裂缝宽度，节点试件在受拉侧的应变矢量可表示裂缝的开始及发展，其方向与最大主应变方向垂直，而应变矢量的箭头长短可表征开裂宽度，由此可知节点试件的

裂缝分布状态。应力矢量表明内力的大小和方向。由图 9(a)可知,在负弯矩作用下节点试件初始裂缝发生在节点梁最危险截面上侧受拉边缘,由图 9(b)可知最危险截面受拉侧 C 型钢的外边缘应力最大,与其紧临的混凝土表面首先开裂破坏。



(a) 初始状态应变矢量

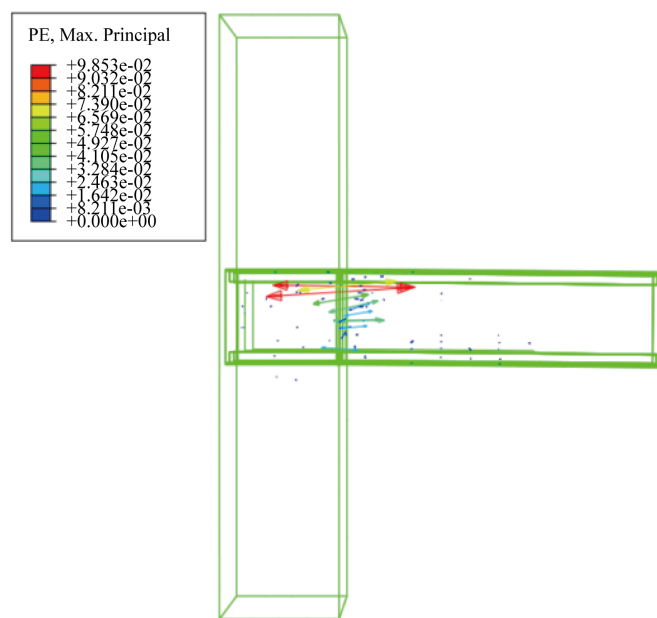


(b) 初始状态应力矢量

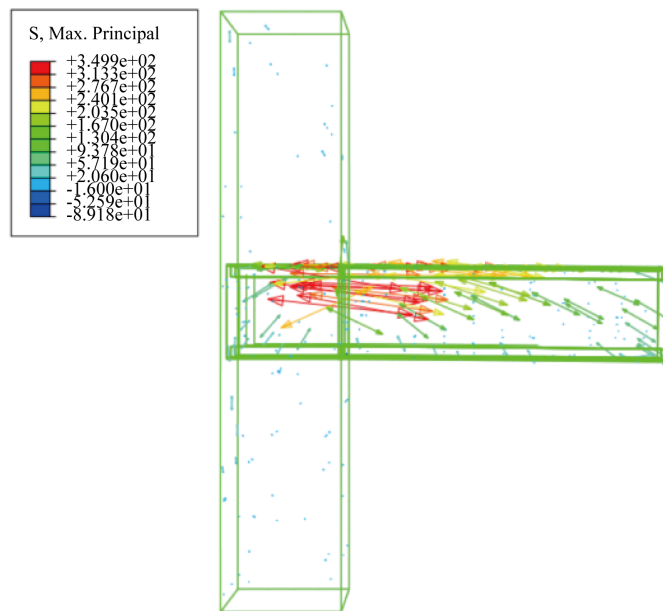
Figure 9. Initial state stress strain vector diagram  
图 9. 初始状态应力应变矢量图



节点试件屈服状态的判断是依据梁加载端荷载 - 位移曲线, 曲线出现拐点时的应力应变矢量分布见图 10 所示, 在负弯矩作用下, 最危险截面受拉侧的主应变已由表面向梁中性轴方向移动, 其应力也有了较大涨幅, 且分布区域由受拉侧边缘转变为几乎布满中性轴以上受拉区。由图 8(a)中红色箭头相比初始状态增多、增长, 反映出新裂缝的发展及既有开裂缝隙的延伸, 在最危险截面形成一条方向明确的主裂缝, 此时最危险截面受拉区域的混凝土高度减小, 大部分 C 型钢进入塑性状态, 但其他截面 C 型钢仍处于弹性状态。



(a) 屈服状态应变矢量



(b) 屈服状态应力矢量

Figure 10. Yield state stress strain vector diagram  
图 10. 屈服状态应力应变矢量图

节点峰值状态的应变矢量见图 11(a)，在负弯矩作用下，最危险截面的应变矢量已越过梁中性轴在全截面分布。由图 11(b)可知，节点试件峰值状态应力矢量与屈服状态时的应力矢量分布及大小相差不大。与屈服状态相比，峰值状态下节点试件的刚度退化较大，最危险截面的混凝土裂缝有了较大的发展，C 型钢大部分进入塑性状态，故整个梁表现出在应力有较小增长的前提下产生较大变形，此时组合梁构件中的混凝土大部分退出工作，此时主要由混凝土中配置的节点负弯矩钢筋承担外部荷载。

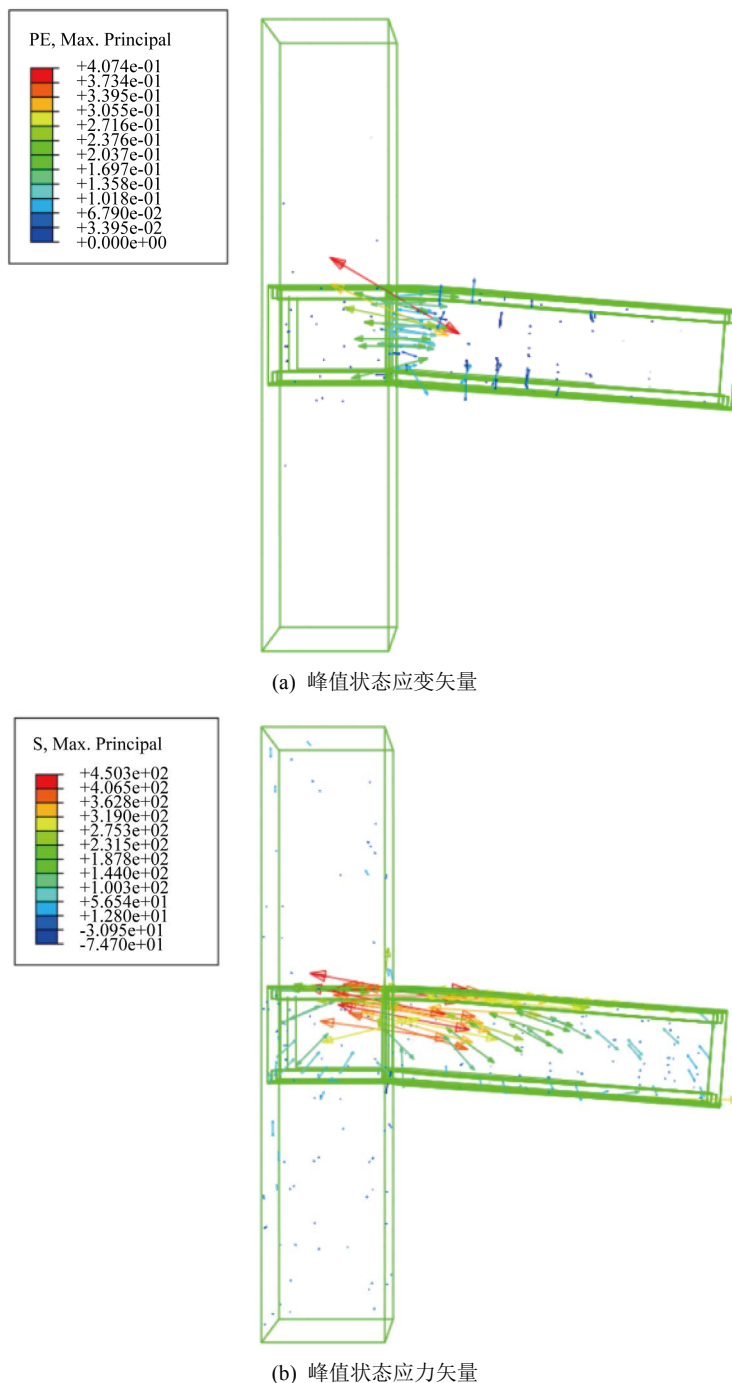


Figure 11. Peak state stress strain vector diagram  
图 11. 峰值状态应力应变矢量图

### 4.3. 梁端荷载 - 位移曲线

新型节点有限元模拟梁端荷载 - 位移曲线与试验曲线如图 12 所示。分析可知试验时节点试件存在初始缺陷, 例如节点区钢管柱内混凝土材料填充不密实, 而有限元模型无初始缺陷且无滑移, 所以模拟得到的节点 P- $\Delta$  曲线饱满, 试验所得曲线存在一定程度的捏缩, 且试验时极限承载能力较模拟承载限值降低约 43%, 产生原因分析如下:

滑移。试验研究中由于节点域组合梁与组合柱之间的粘结锚固失效破坏导致随着荷载增大及往复, 组合梁柱之间产生相对滑移错动, 即在试验加载过程中观察到的“节点松动”现象(图 3(c)), 而在模拟试验中并无此相对滑移产生, 故承载力较试验研究中较高。

节点区域柱壁屈曲。试验过程中随着荷载增大, 柱壁孔洞边缘发生局部屈曲变形, 产生一个“较光滑的滑动面”致使梁相对柱向外侧滑移, 即在试验加载过程中观察到的图 3(b)所示柱壁局部屈曲。

材料缺陷。试验节点试件是在结构实验室现场拼装、浇筑, 混凝土没有百分百密实, 尤其是贯通节点区域附近, 因内部结构构件交错使得混凝土由于浇筑不饱满降低对外包钢构件的支撑钢化作用, 使试验研究值低于模拟值。

其他。本次试验所使用的 PLU200 三通道疲劳试验机采集分析系统及 1000 kN 电液伺服作动器设备自身存在误差; 设计加载位置与实际承载点的偏差, 可能会导致节点区域受到额外的扭矩作用, 降低竖向作用面内的承载作用。

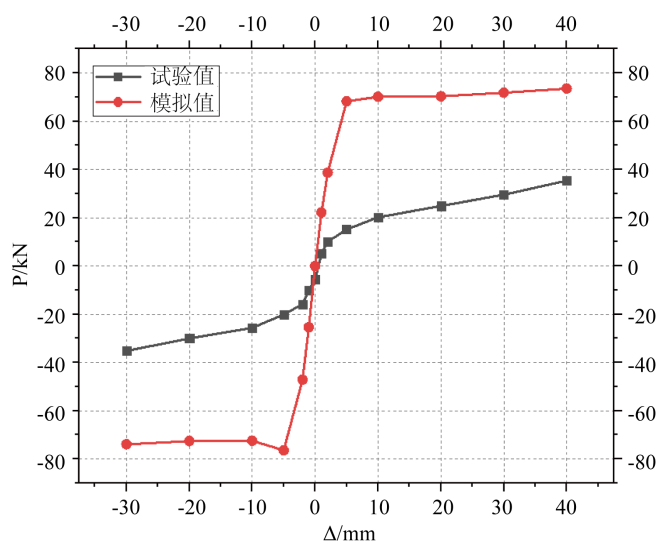


Figure 12. P- $\Delta$  curve contrast

图 12. P- $\Delta$  曲线对比

### 4.4. 节点荷载传递机制

节点试件在受力伊始经由 C 型钢部分传递应力至柱, 梁混凝土部分基本无内力, 随着加载到极大值后混凝土由边缘开始受力, 但 C 型钢仍是主要承力部件。循环递增外载使得梁最危险截面边缘 C 型钢屈服、混凝土开裂, 拉应力合力不断下移, 直至拉区应力主要由混凝土内的钢筋承担, 此时节点最危险截面刚度退化严重, 变形过大不适于继续承载; 对于柱, 初始 C 型钢传递的内力由核心混凝土承担, 即 C 型钢以薄壁方钢管侧壁孔洞边缘为支点形成传力杠杆, 随着荷载循环递增, 方钢管腹板也产生内力并递增; 对于梁, 应力在最危险截面循环递增的同时, 也在同步向节点外侧不断增大, 故若在节点区域采取

一定构造措施, 便可将最危险截面形成的塑性铰外移, 使得组合梁先于组合节点到达屈服状态。

## 5. 结语

(1) 通过试验研究可知新型组合节点滞回曲线呈现捏拢形, 包围面积较大、耗能能力较强, 呈现延性破坏状态, 因构造特点, 随着外载周期性增大, 其承载力与变形也随之增大, 且因 C 型钢延性优于混凝土, 二者于节点核心区不能完全协调变形, 故滞回曲线呈递增式“S”形曲线。

(2) 通过试验研究及有限元模拟对比分析可知, 新型组合节点承载力较高, 耗能能力优越, 但在实际应用时应采取柱壁孔洞边缘补强措施及节点防粘结锚固失效措施, 防止局部屈曲及节点混凝土与 C 型钢粘结锚固失效导致的承载力下降。

(3) 有限元分析中没有反应出柱壁孔洞边缘的屈曲变形及刚度退化, 致使与试验结果有所差异, 在今后的研究分析中应作深化。

## 参考文献

- [1] 黄炳生, 杜培源, 黄顾忠. 方钢管混凝土柱 - 钢梁外隔板节点拟静力试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 49-57+92.
- [2] 邓芑, 王来, 李申琰, 刘艳. 方钢管混凝土柱与钢梁全螺栓节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(7): 19-28.
- [3] 陈以一, 王伟, 周锋. 钢管结构——新需求驱动的形式拓展和性能提升[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 1-20.
- [4] 伍云天, 唐欢, 林雪斌, 李立仁. 内置冷弯薄壁型钢桁架高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 44-52.
- [5] 贾子文. 冷弯薄壁型钢 - 混凝土组合楼盖受力性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [6] 郭喜. 新型冷弯薄壁 U 型钢 - 混凝土组合梁抗弯性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [7] 马晓飞. 双肢冷弯薄壁 C 型钢框架抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- [8] ACI Committee 318 (2011) Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. American Concrete Institute, Detroit.
- [9] 王先铁, 马尤苏夫. 方钢管混凝土框架内置开洞钢板剪力墙的性能与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 67-71.