

学校代号 10731

学 号 072081402037

分 类 号 TU398

密 级 公开



## 硕士学位论文

# 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点 力学性能研究

学位申请人姓名 郭智峰

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 王文达 副教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 钢与组合结构

论文提交日期 2010年4月21日

学校代号：10731

学 号：072081402037

密 级：公开

兰州理工大学硕士学位论文

# 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点 力学性能研究

学位申请人姓名：郭智峰

导师姓名及职称：王文达 副教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：结构工程

论文提交日期：2010年4月21日

论文答辩日期：2010年6月3日

答辩委员会主席：李德荣 教授级高工

Research on Mechanical Behavior of RC Beam to STCC Column

Joints

By

GUO Zhifeng

B.E. (LAN Zhou University of Technology) 2007

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Structural Engineering

in the

School of Civil Engineering

of

Lanzhou University of Technology

Supervisor

Professor Wang Wenda

April, 2010

# 兰州理工大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

## 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
第一章 绪 论 .....	1
1.1 钢管混凝土结构的特点及研究概况 .....	1
1.1.1 钢管混凝土的特点 .....	1
1.1.2 钢管混凝土的研究概况 .....	1
1.2 钢管约束混凝土的特点及研究现状 .....	2
1.2.1 钢管约束混凝土的特点 .....	2
1.2.2 钢管约束混凝土的研究概况 .....	2
1.3 钢管混凝土节点研究概况 .....	6
1.3.1 钢管混凝土梁柱连接节点类型 .....	6
1.3.2 钢管混凝土柱-钢梁连接节点的研究概述 .....	6
1.3.3 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点的研究概述 .....	7
1.3.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点的研究概述 .....	11
1.4 研究对象、方法和内容 .....	14
1.4.1 研究对象 .....	14
1.4.2 研究方法和内容 .....	14
第二章 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点数值分析 .....	16
2.1 概述 .....	16
2.2 有限元模型的建立 .....	16
2.2.1 材料的本构关系 .....	16
2.2.1.1 钢材的应力-应变关系模型 .....	16
2.2.1.2 混凝土本构关系模型 .....	16
2.2.2 单元类型及网格划分 .....	18
2.2.3 边界条件及荷载施加方式 .....	19
2.2.4 钢管与混凝土的界面模型 .....	20
2.2.5 非线性方程组求解 .....	20
2.3 算例分析 .....	20
2.3.1 钢管混凝土构件 .....	20
2.3.2 钢管约束混凝土构件 .....	24
2.3.3 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点 .....	26
2.3.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点 .....	28

2.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点单调加载全过程分析 .....	29
2.4.1 典型试件的确定 .....	29
2.4.2 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的破坏模态 .....	30
2.5 小结 .....	42
第三章 参数分析及承载力实用计算方法 .....	43
3.1 概述 .....	43
3.2 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点弯矩转角关系参数分析 .....	44
3.2.1 梁柱弯矩比 .....	45
3.2.2 梁柱线刚度比柱 .....	46
3.2.3 柱长细比 .....	46
3.3 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗弯承载力计算方法 .....	49
3.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗剪性能分析 .....	50
3.4.1 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁柱节点的受力性能分析 .....	50
3.4.2 节点抗剪承载力参数分析 .....	51
3.4.3 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗剪承载力简化计算 .....	55
3.5 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点构造建议 .....	76
3.5.1 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的连接构造特点 .....	77
3.5.2 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的构造要求 .....	77
3.6 小结 .....	78
结论与展望 .....	79
参 考 文 献 .....	81
致 谢 .....	86
附录A 攻读学位期间所发表的学术论文目录 .....	87

## 摘 要

节点作为连接梁柱的关键部位，及其重要。钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点是一种新型的节点形式，深入研究此类节点的力学性能和设计方法具有重要的理论意义和实用价值。

本文主要对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的力学性能进行了研究，具体进行了以下方面的工作：

(1) 基于非线性有限元软件ABAQUS，建立了实体模型对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行数值分析。利用已有的试验结果对有限元模型进行了校核，在经过大量算例验证后，对其进行了单调荷载作用下的全过程分析，以进一步了解此类节点的工作机理，明晰了受力过程中，组成节点的各构件截面上的应力分布和受力机理。

(2) 对影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点梁端弯矩-转角关系的主要参数进行了分析，如：梁柱弯矩比、梁柱线刚度比、柱长细比等，得到各参数对此类节点抗弯承载力的影响规律，并在此基础上提出此类节点的抗弯承载力简化计算公式，理论计算结果与简化公式计算结果总体上吻合良好。

(3) 对影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的剪力-变形关系的主要参数进行了分析，如：节点区混凝土强度、节点区型钢屈服强度、型钢腹板厚度、含箍率、轴压比等，并提出了此类节点的抗剪承载力计算公式，且理论计算结果与简化公式计算结果总体上吻合良好。

(4) 最后，给出了一些钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的构造建议。

关键词：钢管约束混凝土柱，钢筋混凝土梁，数值模拟，抗剪承载力，抗弯承载力

## Abstract

The joint is very important as the key part to connect the beam and column. Reinforced concrete (RC) beam to steel tube confined concrete (STCC) column connections is a new form of the joint. It has important theoretical and practical value to study the mechanical performance and design method of this joint.

The mechanical performance of reinforced concrete (RC) beam to (STCC) column connection is investigated in this paper. The main achievements can be summarized as follows:

(1) A solid model is carried out to simulate the reinforced concrete (RC) beam to (STCC) column connection using the nonlinear finite element program ABAQUS. The model was verified valid by comparing with a large number of experimental results. The whole process analysis of the joint under monotonic loading was carried out to further investigate the working mechanism of the joint and the stress distribution and mechanism of joint parts.

(2) Parametric analysis was performed to investigate the moment-rotation relationship of the reinforced concrete (RC) beam to (STCC) column connection. The concrete compressive strength and the steel ratio of the joint area, the yield strength (yield point) of the rebar and steel of the joint area, the axial compression ratio, the yield bending moment of steel beam to column, the beam to columns line stiffness ratio, and the slenderness ratio were considered as parameters. The influence of parameters to the flexural capacity of the joint was received. A simplified formula of flexural capacity of the joint was proposed based on the parameter analysis.

(3) Parametric analysis was performed to investigate the shear-deformation relationship of the reinforced concrete (RC) beam to (STCC) column connection. The concrete strength and steel yield strength of the joint region, the thickness of steel web, stirrup ratio, and the axial compression ratio were considered as parameters. The yielded shear strength formula was proposed.

(4) Some constructional suggestions of reinforced concrete (RC) beam to (STCC) column connection are supplied.

**Key words:** steel tube confined concrete (STCC) column; reinforced concrete beam; numerical simulation; shear load-carrying capacity; flexural load-carrying capacity



# 第一章 绪论

## 1.1 钢管混凝土结构的特点及研究概况

### 1.1.1 钢管混凝土的特点

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成、且钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的结构构件，按截面型式不同，可分为圆钢管混凝土，方、矩形钢管混凝土等。目前工程中用最多的几种钢管混凝土构件横截面形式如图 1.1（韩林海等，2007）<sup>[1]</sup>。

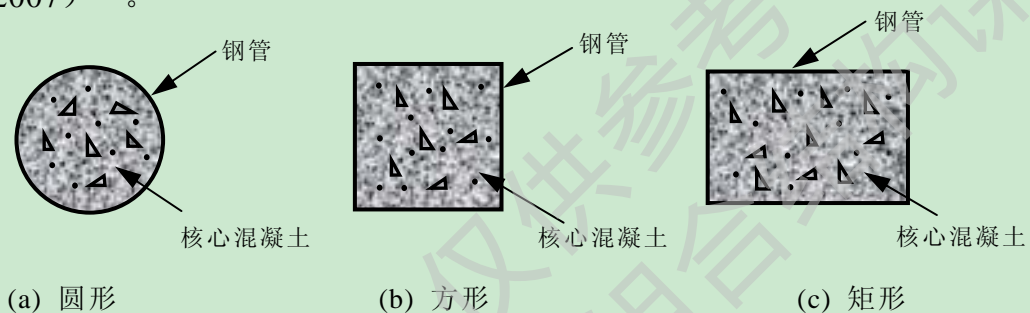


图 1.1 钢管混凝土构件横截面形式

钢管混凝土具有承载力高，塑性和韧性好，施工方便，耐火性能较好，经济效果好，另外抗震性能也很良好。所以钢管混凝土结构正被越来越广泛地应用于单层和多层工业厂房柱、设备构架柱、各种支架、栈桥柱、地铁站台柱、送变电杆塔、桁架压杆、桩、大跨度和空间结构、高层和超高层建筑、住宅以及桥梁结构等，并取得了良好的经济效果和建筑效果。

### 1.1.2 钢管混凝土的研究概况

钢管混凝土是在劲性钢筋混凝土及螺旋配筋混凝土的基础上演变和发展起来的。钢管混凝土主要用于桥墩和工业厂房柱等结构中，但早期的应用中一般不考虑由于组成钢管混凝土的钢管及其核心混凝土间的相互作用对承载力的提高。

对钢管混凝土力学性能进行较为深入的研究始于 20 世纪 60-70 年代。早期钢管混凝土中采用的钢管大多是热轧钢管，钢管的壁厚一般较大，因而钢管混凝土的经济效果不明显，从而使钢管混凝土的推广应用受到一定影响。20 世纪 80 年代，国外学者研究了钢管混凝土构件的抗震性能、耐火极限及钢管与混凝土之间粘结性能。20 世纪 90 年代，国外学者对长期荷载作用下钢管混凝土力学性能、动力性能的进行了研究、对钢管混凝土耐火性能和抗火设计方面的研究也有很多。此外对采用高强钢材和高强混凝土的钢管混凝土构件力学性能的研究也有不少报道。研究者们还就钢管局部屈曲对钢管混凝土构件力学性能的影响进行了不少研究。

我国对钢管混凝土的研究始于 20 世纪 60 年代，主要研究钢管中填充素混凝土的钢管混凝土结构。20 世纪 60 年代中，钢管混凝土在一些厂房柱和地铁工程

中采用。进入 70 年代后，在很多冶金、造船和电力行业的单、多层厂房中应用。1978 年，钢管混凝土结构被列入国家科学发展规划，使得钢管混凝土结构在我国的发展进入一个新的阶段。

近些年来，我国学者对一些新型的钢管混凝土构件的作了很多研究，如采用自密实混凝土的钢管混凝土、薄壁钢管混凝土、中空夹层钢管混凝土、钢管约束混凝土、FRP 约束钢管混凝土、钢管再生混凝土、钢管混凝土叠合柱、FRP-混凝土-钢管组合柱、采用高强钢的钢管混凝土和不锈钢管混凝土(韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)。

## 1.2 钢管约束混凝土的特点及研究现状

### 1.2.1 钢管约束混凝土的特点

根据钢管作用的差异，钢管混凝土构件又可以分为两种：一是组成钢管混凝土的钢管和混凝土在受荷初期就共同受力；二是荷载仅作用在核心混凝土上，钢管只起对其核心混凝土的约束作用，即所谓的钢管约束混凝土柱，如图 1.2。

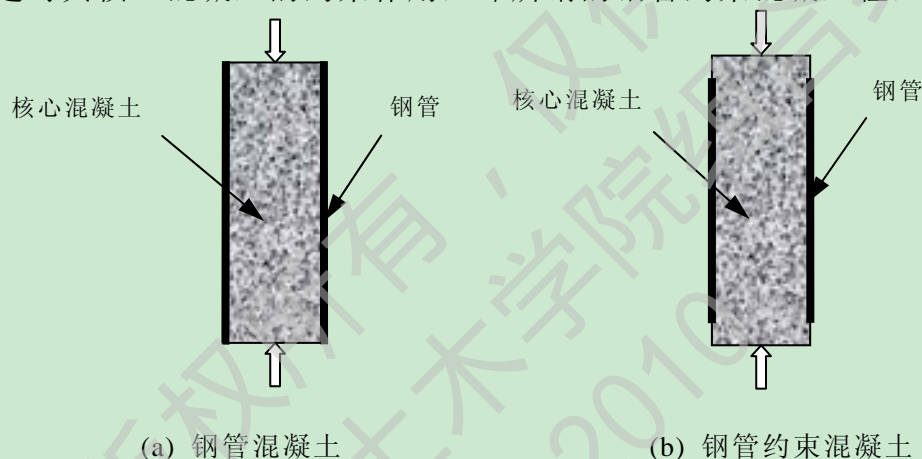


图 1.2 钢管混凝土和钢管约束混凝土示意图

钢管混凝土虽然具有的承载力高、塑性和韧性好、施工方便、耐火性能好与经济效益好等优点，但是钢管混凝土结构也有其自身的不足。例如，在钢管混凝土柱中，钢管既承受轴向应力还要对核心混凝土起横向约束作用，因为钢是各向同性材料，而当钢管在轴向应力作用下屈服后，其横向约束效应就会大为降低。钢管约束混凝土不仅具有钢管混凝土在力学性能上的许多优点，而且钢管约束混凝土柱的外加荷载仅作用在核心混凝土上，钢管不直接承受纵向荷载，钢管只起对核心混凝土的约束作用，可充分的发挥钢材抗拉强度高的优点。此外钢管约束混凝土柱管内不需要配置钢筋且钢管本身可以作模板，施工方便。

### 1.2.2 钢管约束混凝土的研究概况

最初学者们研究钢管和核心混凝土之间的粘结滑移和加载方式对钢管混凝土的影响，从而引出了钢管约束混凝土。学者们对钢管混凝土在不同加载方式下进行了研究。加载方式主要包括三种：即荷载施加同时在钢管与核心混凝土；荷载只施加在核心混凝土上；荷载仅作用在核心混凝土上，且浇灌混凝土之前在钢管

内表面涂油脂，以使钢管和核心混凝土之间没有粘结。其中，第二种加载方式中的钢管混凝土我们就称之为钢管约束混凝土。

以下对以往国内外对钢管约束混凝土的有关研究成果进行综述。

蔡绍怀和焦占拴(1984)<sup>[3]</sup>进行了 57 个圆钢管混凝土短柱的轴心受压实验研究，实验的主要参数为套箍指标、加载方式和试件高度，加载方式分为三种：1、荷载同时作用在钢管和核心混凝土；2、荷载仅作用在核心混凝土上；3、钢管高出混凝土，荷载加载钢管上。实验结果表明，加载方式和试件高度对圆钢管混凝土短柱极限承载力的影响并不明显。

Sakino 等(1985)<sup>[4]</sup>进行了 12 个圆钢管混凝土轴心受压短试件的实验研究。进行了三种加载方式的实验：荷载同时作用在钢管和核心混凝土上，即钢管混凝土；荷载只作用在核心混凝土上，即钢管约束混凝土；荷载仅作用在核心混凝土上，且浇灌混凝土之前在钢管内表面涂油脂，以使钢管和核心混凝土之间没有粘结，即无粘结钢管混凝土。实验结果表明：在加荷初期，钢管混凝土的轴压刚度最大，钢管约束混凝土的居中，而无粘结钢管混凝土最小。但在加载后期，钢管混凝土的承载力随变形增长较慢，而无粘结钢管混凝土的则增长较快，钢管约束混凝土居中。钢管混凝土构件的极限承载力最小，无粘结钢管混凝土构件的极限承载力最大。

Orito 等(1987)<sup>[5]</sup>进行了 3 个钢管混凝土短柱的轴压实验和 8 个圆钢管混凝土压弯构件试验研究，其中分别采用了以下三种的加载方式：钢管和核心混凝土同时承受轴向力作用；荷载仅作用在核心混凝土上；钢管内壁涂油，钢管和混凝土之间无粘结，荷载仅作用在核心混凝土上。研究结果表明，无粘结钢管混凝土抗压承载力最高，钢管混凝土最低；初始刚度钢管混凝土的最高，无粘结钢管混凝土最低；而钢管约束混凝土的抗压承载力和初始钢管居中。

O' Shea 和 Bridge(1997a)<sup>[6]</sup>进行了 22 个圆钢管混凝土轴压和 17 个偏压构件力学性能的实验研究，主要参数混凝土强度，构件截面径厚比。研究结果表明，对于轴压构件，当混凝土强度较低时钢管对其核心混凝土有约束作用；当为高强混凝土时，只有在径厚比较小时才对其核心混凝土有约束作用。对于偏压构件，只有当荷载偏心率较小时，钢管才对其核心混凝土有约束作用。

O' Shea 和 Bridge(1997b)<sup>[7]</sup>进行了 18 个圆钢管混凝土轴压和 7 个偏压构件力学性能的实验研究，内填圆柱体强度为 100MPa 的混凝土。主要影响参数为构件截面的径厚比(D/t)。研究结果表明，对于采用超高强混凝土的圆钢管混凝土构件，只有在径厚比较小时，钢管才对其核心混凝土有约束作用。

Johansson(2000)<sup>[8]</sup>进行了 13 个圆钢管混凝土短柱和 11 个长柱的实验研究，采用了四种不同加载方式：荷载同时作用在钢管和核心混凝土上；荷载仅作用在核心混凝土上；荷载仅作用钢管上，且在钢管内充填混凝土；荷载作用在空钢管上。实验结果表明：对于短柱，第二种加载方式的极限承载力最大，第一种加载方式的次之，第三种加载方式的较低，第四种加载方式的最低；对于长柱，第一

种和第二种加载方式的极限承载力相差不大且最高，第三种加载方式的次之，第四种加载方式的最低。同时，该文用 ABAQUS 软件对圆钢管混凝土力学性能进行了非线性有限元分析，主要考察了钢管和混凝土之间粘结强度，混凝土强度和不同的加荷方式等因素对钢管混凝土力学性能的影响。

Johansson (2002)<sup>[9]</sup>进行了 15 个圆钢管混凝土短柱的实验研究，采用了三种不同加载方式：荷载同时作用在钢管和核心混凝土上；荷载仅作用在核心混凝土上；荷载作用在空钢管上。同时提出一个基于钢管和核心混凝土相互作用的力学模型，模型的计算结果与实验结果吻合良好。

Fam 等 (2004)<sup>[10]</sup>进行了 5 个圆形截面的钢管混凝土轴压短柱和 5 个圆形截面钢管混凝土压弯构件的实验研究。其中轴压短柱采用单调加载，压弯构件在轴力不变的情况下反复施加加横向推力，影响参数包括钢管和混凝土之间的粘结、加载方式和压弯构件的轴压比。实验表明，粘结情况和加载方式对钢管混凝土压弯构件的强度影响不大，由于在钢管局部屈曲后抗弯强度迅速下降，无粘结钢管混凝土表现出的延性不如有粘结钢管混凝土，但是无粘结试件比有粘结试件具有更高的屈服强度。同时该文也进行了 5 个圆钢管约束混凝土压弯构件的滞回性能试验研究，研究结果表明，圆钢管约束混凝土压弯构件具有良好的抗震性能。

Peter McAteer 等 (2004)<sup>[11]</sup>进行了 4 个钢管约束混凝土试件的实验研究，荷载仅作用在核心混凝土上，且浇灌混凝土之前在钢管内表面涂油脂，以期使钢管和核心混凝土之间没有粘结。由于当前对这类钢管约束混凝土还没有形成相关明确的条文规定和设计规程，该文对此进行了两方面的研究工作：一、系统总结和整理了以往的相关研究和数据，利用现有钢管混凝土的一些规程进行了相应的计算和比较。二、进行了钢管约束混凝土钢管和核心混凝土的相互作用性能的实验研究，基于标准化约束应力系数和混凝土强度提高系数，提出了极限承载力和残余承载力的计算公式。

尧国皇和韩林海 (2004)<sup>[12]</sup>进行了 12 个钢管约束混凝土压弯构件在往复荷载下的滞回性能实验研究，截面形式分为方形和圆形两种，轴压比  $n=0\sim 0.74$ 。其研究表明，钢管约束混凝土构件滞回曲线饱满，没有明显的捏缩现象，抗震性能较好。文献同时利用钢管混凝土的相关规范计算了实验试件的承载力与刚度，其结果表明，实验的钢管约束混凝土极限承载力高于钢管混凝土相关规范的计算值，其中，圆形截面高 20% 以上，方形截面高 10% 左右；而对于钢管约束混凝土刚度的计算结果比较表明，无论是初始阶段抗弯刚度还是使用阶段抗弯刚度，的计算结果都与实验结果比较接近。

陈志波 (2006)<sup>[13]</sup>对于钢管约束混凝土的轴压、纯弯和压弯性能进行了实验研究，其中轴压短柱实验包括 12 个圆钢管约束混凝土和 8 个方钢管约束混凝土试件及 8 个钢管混凝土对比试件，纯弯实验包括 2 个圆钢管约束混凝土和 2 个方钢管约束混凝土试件，压弯实验包括 8 个圆钢管约束混凝土和 8 个方钢管约束混凝土试件及 4 个钢管混凝土对比试件。利用 ABAQUS 对圆钢管约束混凝土和方钢

管约束混凝土轴压、纯弯和压弯试件进行了系统的分析。最后在基于参数分析的基础上回归了用于计算钢管约束混凝土的轴压强度指标。

Zhang and Liu (2006)<sup>[14]</sup>对 23 个方钢管约束混凝土短柱进行了循环和单调加载的轴压试验研究。提出了方钢管约束混凝土轴压承载力的计算公式。另外还对 5 个柱进行了试验研究,表明方钢管约束混凝土柱显示出了更高的挠曲强度,位移延性和良好的耗能能力。

张素梅等(2007)<sup>[15]</sup>进行了 4 组 12 个圆钢管约束高强混凝土短柱在单调轴压荷载作用下和 2 组 6 个圆钢管约束高强混凝土短柱在循环荷载作用下的试验研究。试验结果表明,圆钢管约束高强混凝土短柱的轴压承载力比同条件下的普通钢管混凝土构件高,但两种构件的延性相差不大;并且随钢管中纵向应力的降低构件的轴压承载力会提高。在应力分析结果的基础上建立圆钢管约束混凝土的轴压承载力公式,公式结果与试验结果吻合较好。基于试验结果对 Mander 约束混凝土模型进行修正,使模型适合于约束高强混凝土。

刘界鹏等(2008)<sup>[16]</sup>进行了 12 个方钢管约束高强混凝土短柱试件在循环轴压荷载作用下的试验研究。试验结果表明,当  $D/t=70$  时,方钢管约束高强混凝土短柱的轴压承载力比同条件下的普通方钢管混凝土构件高;而当  $D/t=47$  时,方钢管约束高强混凝土短柱的轴压承载力比同条件下的普通方钢管混凝土构件低;但两者延性无显著差异。对构件的应力分析结果表明,方钢管约束高强混凝土轴压短柱中,钢管在峰值荷载点后屈服;而钢管混凝土构件中,钢管在峰值荷载点前屈服。方钢管约束混凝土构件中钢管对核心混凝土的约束效果高于普通钢管混凝土构件。

于清等(2008)<sup>[17]</sup>对 2 个圆形和 2 个方形钢管约束混凝土纯弯构件的荷载-变形关系进行了有限元软件计算,计算结果良好。在此基础上,利用有限元方法对钢管约束混凝土纯弯构件受力过程中钢管及核心混凝土之间的相互作用以及构件的荷载-变形关系进行了分析,最后探讨了钢管约束混凝土纯弯构件抗弯承载力的实用计算方法。

刘界鹏等(2008)<sup>[18]</sup>进行 6 个短柱试件在循环轴压荷载作用下的试验研究。试验结果表明,圆钢管约束高强混凝土短柱的轴压承载力较高,延性无显著差异。圆钢管约束高强混凝土轴压短柱中钢管对核心混凝土的约束效果比普通钢管混凝土构件高。

郭兰慧等(2008)<sup>[19]</sup>对钢管和混凝土同时受力和核心混凝土受力的构件进行了试验研究,考虑了钢管和混凝土之间的粘结力对构件力学性能的影响。同时采用有限元法对钢管和混凝土同时受力、核心混凝土受力和钢管存在初应力的构件进行了理论分析。

Liu 等(2009)<sup>[20]</sup>对 18 个圆钢管约束混凝土的力学性能进行了循环和单调加载的试验研究。分析了圆钢管约束混凝土柱在轴压极限承载力轴压荷载下钢管的屈服情况。还做了钢管约束混凝土柱在竖向荷载作用下,水平循环加载的试验研

究, 研究结果显示钢管约束混凝土柱具有良好的挠曲强度, 和位移延性和更好的耗能能力。

Yu 等 (2009) [21]对钢管约束混凝土轴压构件建立了有限元模型, 并详细分析了钢管和混凝土之间的接触关系, 最后根据参数分析回归出钢管约束混凝土短柱轴压承载力简化计算公式。

以上研究者对于钢管约束混凝土的短柱、长柱的轴压和压弯力学性能及滞回性能进行了实验研究, 其研究表明, 钢管约束混凝土轴压短柱承载力要稍高于钢管混凝土, 其初始刚度则稍低于钢管混凝土; 钢管约束混凝土长柱的极限承载力则与钢管混凝土相差不大。钢管约束混凝土的滞回曲线饱满, 没有明显的捏缩现象, 构件具有良好的延性和耗能能力。

### 1.3 钢管混凝土节点研究概况

#### 1.3.1 钢管混凝土梁柱连接节点类型

本文根据组成钢管混凝土框架结构中梁、柱形式的不同, 将钢管混凝土梁柱节点分为钢管混凝土柱-钢梁节点、钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点和钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点三大类。以下就对三种不同类型的节点就其受力特点进行分析归纳。

#### 1.3.2 钢管混凝土柱-钢梁连接节点的研究概述

钢管混凝土柱-钢梁节点在国内外的多高层建筑中广泛应用, 本小节将对此类节点进行简单的论述, 在此只介绍几种典型的钢管混凝土柱-钢梁节点形式。参考钟善桐 (1999<sup>[22]</sup>、2003<sup>[23]</sup>), 韩林海和杨有福 (2007) <sup>[24]</sup>, 韩林海等 (2009) <sup>[21]</sup>、钟善桐和白国良 (2005) <sup>[25]</sup>等。

##### (1) 外加强环式节点

外加强环式刚接节点是目前研究最成熟、应用最广泛的一种刚接节点类型。这类节点的工作原理是在钢梁的上、下翼缘位置设置上、下加强环, 与钢梁的上、下翼缘采用等强对接焊缝或高强螺栓连接, 传递梁端弯矩; 利用与钢梁腹板相连的垂直肋板传递梁端剪力。

##### (2) 内加强环式节点

内加强环式节点是在钢管内梁上下翼缘位置设置内隔板, 与梁相连用来传递弯矩。内加强环多用于钢管直径大于或等于 1m 的情况, 直径较小时, 加工制作困难, 且不利于管内混凝土的浇筑。

##### (3) 锚定式

钢管混凝土柱和钢梁连接时, 在正对钢梁的上、下翼缘位置, 在管柱内焊接一个 T 形锚板, 埋于管内的混凝土中, 以承受钢梁翼缘传来的拉力。

##### (4) 穿心式

这种节点形式是将钢梁的腹板在钢管混凝土柱身内贯通设置, 形成穿心构件。

穿心构件与钢管壁采用对接焊缝，焊缝强度不低于管材的强度。钢梁翼缘及环板与钢管壁必须采用坡口焊。

#### (5) 十字板刚接节点

这种节点形式是在钢管内加设十字加劲板，承担梁端传来的内力，而且提高了节点区的整体刚度和承载力。特点是刚度大，承载力高，但是用钢量比较大，并且管内施焊困难，给混凝土的浇筑带来障碍，并且还会存在因钢管壁的局部破坏而降低整体承载力的危险。

#### (6) T形外加劲板式

此类节点是在钢梁的上下翼缘处，焊接T形加劲板，T形加劲板有水平加劲肋和竖向加劲肋构成。

#### (7) 承重销式

这种节点与穿心式节点类似，是用承重销来传递弯矩和剪力。此类节点的优点是：传力明确、受力安全可靠、塑性性能好；缺点是：用钢量相对较大，且当管径较小时，承重销在钢管内的焊接较为困难。

#### (8) 螺栓连接式

此种连接方式可分为穿芯螺栓连接和单边螺栓连接，节点构造为方钢管混凝土柱和圆钢管混凝土柱分别采用平端板和弧形端板，然后用螺栓连接。优点：构造简单，施工方便。

### 1.3.3 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点的研究概述

钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁节点主要在国内高层、超高层建筑上应用较多。本文从实际工程中普遍应用和研究者提出的节点型式，选取几种典型的节点型式进行归纳分析。

常见的钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点有：

#### (1) 加强环节点

与钢管混凝土柱与钢梁不同的是：与钢筋混凝土梁连接时环板之间的距离为钢筋混凝土梁的梁高，混凝土梁的纵筋焊接在上下环板上，且梁的上下端面都设有预埋钢板，以便和上下加强环板相连。此类节点的优点是：传力明确、节点区应力分布较均匀、刚度大、塑性性能好、承载力高；缺点是：外加强环的尺寸较大，尤其在钢管混凝土住宅中，由于钢管混凝土柱截面较小，但外加强环式节点环板尺寸较大，往往给建筑上的处理带来不便。

李至钧和阎善章(1994)<sup>[26]</sup>进行了5个典型的钢管混凝土柱-梁加强环式刚性抗震节点的实验研究，其中，2个试件采用钢梁，3个试件采用钢筋混凝土梁。实验结果表明，节点具有很好的抗震性能，能够保证钢管混凝土框架在震区推广应用。同时，提出了加强环节点抗震设计要点和合理的设计建议。

吴发红等(2001)<sup>[27]</sup>进行了钢筋混凝土梁钢筋穿心式和不穿心式两种外加强环中柱节点、以及穿心式内加强环边柱节点实验研究。实验结果表明，梁中纵筋部分穿过钢管对节点的受剪承载力影响不大；梁内钢筋全部焊接在加强环上与钢

筋穿过钢管相比，屈服承载力有所降低，但节点耗能能力却会有所提高。根据研究结果，提出如下建议：节点区加载到屈服位移后，沿钢加强环下口处开始出现水平裂缝，主要原因是混凝土和加强环板间的粘接强度不够，故在施工允许的情况下，可在钢加强环下设置适量的栓钉；为了使节点区混凝土的密实度得到保证，上加强环板上混凝土排气孔大小宜适当。

## (2) 埋置牛腿或板件式节点

这类节点是指通过在核心区的钢管，或者在钢筋混凝土梁中埋置工字钢承重销或者贯通钢板来承担梁端传来的弯矩和大部分剪力。此类节点的优点是：传力明确、受力安全可靠、塑性性能好；缺点是：用钢量相对较大，且当管径较小时，承重销或钢板在钢管内的焊接较困难。

韩小雷等（1999<sup>[28]</sup>，2002<sup>[29]</sup>）进行了十字穿心暗牛腿式钢管混凝土柱节点足尺静载实验研究。结果表明试件的破坏始于钢筋混凝土梁的弯剪破坏，钢管混凝土柱和节点核心区未遭破坏，满足了“强柱弱梁”的抗震设计要求；对于梁下部纵筋焊在牛腿的内侧还是外侧对于节点的受力性能基本没有影响了；对于节点区的环梁，并没有起到实质性的作用，可以考虑取消。

韩小雷等（2005）<sup>[30]</sup>提出了一种带环板穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点，该节点的最大优点是梁柱节点处不需要设加强环，同穿心暗牛腿式节点一样分别利用穿心的翼缘和腹板来承受梁端弯矩和剪力，而在牛腿的上翼缘焊接环形钢板，用于承受焊接在上面的楼板放射筋传来的拉力，同时使钢管与混凝土楼板之间不产生影响正常使用的裂缝。通过试验研究，证明这种节点具有可靠的受力性能，并提出该节点的设计方法。

王秀丽等（2006）<sup>[31]</sup>对埋置牛腿的十字形方钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点，采用 X 形加载方式，进行低周反复荷载下的试验研究。研究了钢筋和钢牛腿的应力应变发展规律和相应的滞回曲线，在对节点破坏机理分析的基础上，提出了进一步的改进措施，与常规的连接方式相比，该种节点是一种相对简捷可靠的连接方式。

季静等（2008）<sup>[32]</sup>提出了一种取消环梁仅带环筋的穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点型式，该类节点外形与普通钢筋混凝土梁柱节点类似，且能很好地满足建筑及装饰设计要求。文中首先通过对中节点与边节点的试验研究，验证了板放射筋和环筋具有较理想的控制裂缝的能力以及螺纹套筒连接主筋在往复荷载作用下的实际工作性能满足抗震设计要求，并分析了该节点型式的变形、应变、裂缝开展、破坏形态及最终承载能力。然后基于试验结果，应用有限元程序对试件进行非线性模拟，进一步分析了此节点的受力机理。

王清湘等（2008）<sup>[33]</sup>提出了一种新型的圆钢管混凝土穿心节点，这种节点是用穿心短钢筋焊接暗牛腿上，适合在工厂加工预制牛腿节点段，现场连接，施工方便。进行了 4 个该种节点在低周反复荷载作用下的试验结果，用 ANSYS 软件建模进行有限元分析。试验结果与有限元计算相对比，二者吻合良好。



### (3) 钢筋混凝土环梁节点

这类节点是钢管混凝土柱保持贯通,在柱的外侧设置环梁用来传递梁端弯矩,钢筋混凝土框架纵向钢筋锚固在环梁内。有的节点在环梁中部和底部的钢管外表面贴焊一环形钢筋,称为抗剪环,用来传递剪力。此类节点的特点是:传力明确、受力较好,基本满足强柱弱梁、强剪弱弯及强节点等抗震设计原则,但该类节点施工较为不便。

方小丹等(1999)<sup>[34]</sup>对钢管混凝土柱-钢筋混凝土抗环梁节点的性能进行了实验研究。研究表明,适当的截面设计可使框架梁在环梁范围以外屈服,即使在环梁内屈服,节点仍表现出良好的延性和耗能能力,可达到抗震设计要求。

吕西林和李学平(2003)<sup>[35]</sup>进行了三个纵筋配筋量和形式各不相同的用于方钢管混凝土结构的新型外置式环梁节点在楼面恒载和侧向低周反复荷载共同作用下的实验。考察了梁柱组合体的宏观受力性能,以及不同配筋形式对环梁节点性能的影响,分析了试验现象及试件中钢筋应变发展规律。

周栋梁等(2005)<sup>[36]</sup>RC 环梁连接的钢管混凝土柱-RC 梁框架在竖向荷载和水平荷载作用下,在环梁一定高度范围内,环梁与柱之间会有很窄的缝隙。通过有限元分析研究了环梁连接的转角刚度和环梁区域框架梁等效宽度以及它们的影响因素,结果表明环梁宽度和框架梁宽度对转角刚度和等效宽度影响较大。框架内力、位移计算以及两层两跨框架结构的静力试验和拟动力试验表明,环梁连接的钢管混凝土柱-RC 梁框架可以采用梁柱直接刚性连接的模型进行弹性分析。

傅剑平等(2008)<sup>[37]</sup>进行了3个带抗剪环的钢管混凝土柱环梁节点单调直剪试验,对设置抗剪环环梁的极限直剪承载能力、环梁的宏观受力表现、受力过程中环梁相对钢管的滑移以及环梁的最终破坏形态等进行了分析研究。

方小丹等(2008)<sup>[38]</sup>根据以往对环梁节点的研究提出了基于试件破坏面极限平衡的节点环梁承载力设计方法。该方法综合考虑了环梁环筋和箍筋的相互作用及框架梁、环梁截面尺寸的影响。利用三维有限元分析了在框架梁端弯矩作用下环梁的应力分布,比较了楼板的存在对环梁环向、径向以及竖向应力的影响,从而考虑楼板对环梁承载力的有利作用。在此基础上进一步提出了节点环梁实用的承载力计算公式,由框架梁梁端的配筋可直接求得环梁的配筋,极大地简化了设计计算工作。

代红军和季韬(2008)<sup>[39]</sup>进行了两个钢管混凝土柱-钢筋混凝土环梁节点的静载和低周反复荷载试验研究。分析了节点的破坏形态、延性和耗能能力等性能。

季韬等(2008)<sup>[40]</sup>介绍了钢管混凝土柱-环扁梁中节点和钢管混凝土柱-环梁中节点的制作和试验过程,并给出了这2个节点在低周反复荷载作用下破坏形态和耗能能力方面的试验数据。试验结果显示,钢管混凝土柱-环扁梁中节点在环扁梁上形成塑性铰,其材料强度得到更充分的利用,能够耗散更多的地震能量。最后还给出了计算简图以及试验值与计算值的比较。

代红军和季韬(2008)<sup>[41]</sup>进行了钢管混凝土柱-钢筋混凝土环扁梁节点的静

载和低周反复荷载试验，分析了节点的破坏形态、延性、耗能能力等性能。试验结果表明，钢管混凝土核心区未发生屈服破坏情况；对于静载，塑性铰产生于扁梁和环扁梁交界处，对于低周反复荷载，塑性铰产生于环扁梁上；环扁梁与钢管混凝土柱间未发现明显滑移现象。

#### (4) 钢筋贯通式节点

此类节点在钢管混凝土结构中，框架梁为现浇钢筋混凝土梁时，采用把梁内纵向主筋贯通钢管柱，以传递梁端弯矩，同时可以在钢管的周边均匀布设牛腿以传递剪力。它的优点是，传力明确、施工方便快捷、刚度大、塑性性能好、承载力高；缺点是：节点构造比较复杂，且可能给混凝土浇灌带来困难。

陈洪涛等（1999）<sup>[42]</sup>进行了局部开孔的钢筋贯通式节点实验研究。研究结果表明，节点开孔后通过加肋补强，不会影响柱子承载力。试件破坏形态主要为上、下加强环局部鼓曲破坏。

蔡健等（2000）<sup>[43]</sup>进行了穿心钢筋暗牛腿式钢管混凝土柱节点实验研究。结果表明，试件的破坏为钢筋混凝土梁端弯曲屈服后的剪切破坏，表明该节点具有良好的传力性能，梁端弯矩通过贯通钢筋可以较好地传递给柱。

李帼昌等（2009）<sup>[44]</sup>对钢筋贯通式钢管煤矸石混凝土节点在低周往复荷载作用下的试验测试，得出梁端的力和位移的滞回曲线、钢筋的变形曲线以及节点区管壁的变形，分析试件的延性和耗能能力。研究结果表明，梁端的力和位移滞回曲线比较饱满，钢筋贯通式钢管煤矸石混凝土节点的位移延性、耗能能力比较理想，抗震性能良好，符合抗震设计的要求。

#### (5) 钢筋环绕变宽度梁节点

DBJ13-51-2003（2003）<sup>[45]</sup>推荐的节点型式这类节点可用于钢筋混凝土梁的宽度与钢管混凝土柱的直径相近的情况，是在钢管混凝土柱上焊接明牛腿，将梁端局部加宽，使纵向钢筋连续绕过钢管。梁端加宽斜度不小于 1/6。在开始加宽处须增设附加箍筋将纵向箍筋包住。明牛腿分担大部分的梁端弯矩和剪力。此类节点的特点是：钢筋混凝土梁属于连续梁，梁柱属铰接，梁的支座反力依靠下面的牛腿传递，传力明确，但施工较为复杂。

曲慧等（2006）<sup>[46]</sup>对 8 个钢筋环绕式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的力学性能进行了实验研究，主要参数柱轴压比和柱截面形式，对该类节点的破坏模态、滞回特性、核心区剪切变形、钢筋变形、钢牛腿变形、延性和耗能性能等作了主要研究。

曲慧和王文达（2010）<sup>[47]</sup>对钢管混凝土柱-外环板式钢梁和钢筋环绕式钢筋混凝土梁连接节点建立了有限元模型，并对其进行了数值模拟，理论计算与试验结果吻合良好。基于理论模型，分别对影响此两类节点力学性能的主要因素进行了系统参数分析，明晰了各主要参数对节点弯矩-梁柱相对转角关系的影响规律，在此基础上，提出了此两类节点的节点弯矩-转角关系的实用计算模型。

#### (6) 劲性环梁节点

这种节点型式主要依靠环梁传递大部分弯矩，依靠预埋的钢牛腿传递剪力和一部分弯矩，使牛腿称为剪弯钢牛腿。

顾伯禄等（1998）<sup>[48]</sup>进行了环梁锚固式钢管混凝土节点实验研究。结果表明，这种节点可实现梁端先出现塑性铰，有效的实现强柱弱梁的要求，可避免梁端钢筋锚固时对钢管局部的撕裂破坏，并对节点核心区的钢管及混凝土起到保护作用。

蔡健等（2002）<sup>[49]</sup>对钢管混凝土中柱劲性环梁式节点的设计方法进行了研究，探讨了该节点的传力机理和内力分配方法，并建议了其节点区各构件的设计方法。

苏恒强等（2006）<sup>[50]</sup>进行了钢梁不穿心的劲性梁-钢管混凝土柱节点的轴压性能试验，并对其节点区的轴压承载力、破坏现象进行了讨论。分析结果表明：我国规程中规定公式的值与本次实验值基本吻合。

#### （7）单双梁式节点

黄襄云等（2001）<sup>[51]</sup>对单梁节点，双梁节点以及单双梁节点进行了实验研究。试验表明：单梁的受力最为明确，传力最为可靠，而双梁节点和单双梁节点的受力较为复杂。双梁节点的延性很好，但刚性性能较差。

欧谨等（2001）<sup>[52]</sup>通过钢管混凝土双梁节点的竖向静力加载试验研究，揭示了该节点的受力机理和破坏形态，并通过实际工程的现场试验研究，验证了模型试验的可靠性。证明了双梁节点具有构造简单、受力明确、施工方便、安全可靠的良好性能。

刘志斌和钟善桐（2001）<sup>[53]</sup>对某工程的双梁节点进行了试验研究。实验结果表明双梁节点的刚性较差。并针对这一问题，对双梁节点的刚性进行了理论分析。指出目前工程中采用的双梁节点构造不能作为刚性节点使用。

杨春等（2002）<sup>[54]</sup>针对广州某超高层建筑中采用的双梁、单梁、单-双梁钢管混凝土节点，对受力性能及试件破坏过程和形态作了节点试验研究，分析结果表明：该种节点的受力性能可靠性，并提出了一些实验结论以供参考。

程国亮等（2002）<sup>[55]</sup>采用通用有限元软件 ANSYS 对钢管混凝土单梁连接节点进行了非线性有限元分析。分析结果表明，单梁连接节点方案有效的实现了强柱弱梁、强节点弱杆件的要求。从钢牛腿的受力情况可以看出，节点区的钢牛腿将梁端弯矩的一部分稳定可靠的传给了钢管混凝土柱，节点区外的钢牛腿受力较小，可考虑适当减小牛腿的长度，并加强水平环筋，以增强整个节点区的强度、整体性和刚性。

梅力彪等（2003）<sup>[56]</sup>采用有限元软件 ANSYS 对不同构造的典型钢管混凝土柱与现浇钢筋混凝土梁的单梁穿心节点进行了空间非线性有限元分析，分析了垂直对称荷载下采用不同构造的穿心节点内的应力分布情况和内力传递机理，根据分析结果提出了该类节点的构造设计建议。

### 1.3.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁连接节点的研究概述

钢管约束混凝土柱一般用于与钢筋混凝土梁连接的结构中，由于钢管在节点核心区断开，钢管并不直接承受竖向荷载，而钢筋混凝土梁中的纵筋也可以直接

通过节点而不必断开，该节点传力明确，适用于加固、受力较大的构件等，其构造形式如图 1.3 所示。

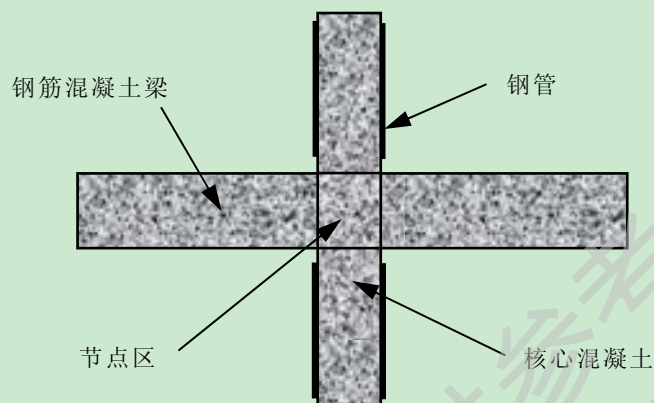


图 1.3 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点

陈庆军等（2002a<sup>[57]</sup>、2002b<sup>[58]</sup>）进行了柱钢管不直通的钢管混凝土柱梁节点进的实验研究。该节点的主要特点是：柱钢管在梁柱节点区不直通，钢管嵌入节点一定距离，剩余空间可使梁钢筋在节点区直通，节点区混凝土采用梁板的强度等级，由此产生的轴向承载力下降通过采用环梁加大节点区截面并配置水平钢筋网或环形钢筋来加强和提高。此节点的连接构造形式简单，施工方便。但是由于此次实验构件不包括混凝土梁部分，只承受轴向压力，与实际情况有很大区别，因此结果只实用于一般高层建筑的下部楼层的中柱。

梁剑等（2002）<sup>[59]</sup>对柱钢管非连通式节点进行了实验研究，其目的为考察该节点形式的轴压承载力和破坏模式，因此试件只保留节点区部分，不带上下钢管混凝土柱。实验结果表明，试件的破坏形态为仅出现贯通纵向裂缝，出现贯通纵向裂缝与非贯通环向裂缝，以及纵向与环向裂缝均贯通的破坏形态；该节点具有足够的强度及延性，环向钢筋能够有效的提高核心区混凝土的局部承压强度，且由于楼层间钢管不连通，梁钢筋可以直接穿过，传力明确，施工简便。

刘付钧等（2003）<sup>[60]</sup>进行了两组共 15 个试件的轴压试验，对节点区柱钢管不连通式钢管混凝土柱-平板节点的轴压性能进行了较为详尽的研究。介绍了试验的概况及主要的试验结果，并对影响该节点轴压承载力的因素进行了探讨，为该节点轴压承载力计算公式的建立提供了基础数据。

张学文等（2003）<sup>[61]</sup>对节点区柱钢管不连通式钢管混凝土柱-平板节点在轴压下节点核心区的受力特点进行了分析，提出了一条适合于工程应用的节点轴压承载力计算公式，该公式偏于安全地评价了试验结果。文中还对该节点在工程上应用时的构造措施和施工要点进行了探讨，为工程实践提供了参考。

聂建国等（2004）<sup>[62]</sup>进行了 6 个分层钢管混凝土节点的轴压试验。分层钢管混凝土是钢管在楼层梁上、下两表面处断开，节点核心区受多重套箍约束作用，

故节点处截面和柱截面的轴压性能发生了变化。通过实验，获得了这种节点的受力情况，探讨了中多重套箍下节点在轴压下的力学性能。

王毅红等（2004）<sup>[63]</sup>提出了一种钢管混凝土新型节点，这种节点在节点去断开，在节点区用环形钢箍，纵筋，芯钢管来保证节点区的连续性。因为梁与柱混凝土现浇在一起，受力性能良好。进行了三个中柱节点模型试验的研究，分析了实验现象、破坏机理。

王毅红等（2006<sup>[64]</sup>、2008<sup>[65]</sup>）又进行了芯钢管连接的钢管混凝土半连通的边节点和角节点的试验研究。其节点在有梁的地方外钢管断开，无梁一侧外钢管断开，梁中纵筋在节点直通，梁、柱、节点的混凝土一次整浇。使用 ANSYS 程序对模型试件进行分析，试验结果和数值计算结果吻合良好，均证实了新型节点具有良好的强度和刚度，节点承载力大于所连接梁、柱的承载力。试件破坏时，节点芯钢管还具有较大的承载潜力。局部连通的钢管对节点混凝土有一定保护作用且有利于施工中上下钢管的对中。

王再峰（2006）<sup>[66]</sup>对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的滞回性能进行了研究。以截面形式（圆形和方形）和轴压比为参数，进行了 8 个钢管约束混凝土节点和 2 个钢管混凝土柱钢筋环绕式节点对比构件的滞回性能试验研究。分析了轴压比、节点连接形式和截面形式对于构件承载力、延性、刚度以及耗能性能的影响规律及对钢管约束混凝土节点  $P-\Delta$  骨架曲线进行了影响因素的参数分析，变化的参数有：钢管混凝土柱含钢率、柱长细比、梁柱线刚度比、梁柱极限弯矩比和柱轴压比。确定了各个参数对节点  $P-\Delta$  骨架曲线的影响规律。在参数分析的基础上，对钢管约束混凝土梁柱节点水平承载力的简化算法和简化骨架曲线模型进行了探讨。

陈庆军等（2008）<sup>[67]</sup>对节点区柱钢管不全贯通式钢管混凝土柱-梁节点进行了 7 个试件轴压试验及 2 个试件的偏压试验，研究了梁通过处钢管开孔及各层间钢管柱分离两种型式的柱钢管不全贯通式节点的力学性能。结果表明：不全贯通式节点在环梁和环向钢筋约束下具有较高的承载力和较好的延性；钢管在梁位开孔与钢管在节点区完全分离的两种试件具有相同的节点区破坏形态及相近的力学性能。

陈庆军等（2008）<sup>[68]</sup>对节点区柱钢管不连通式钢管混凝土柱-梁节点在轴压下节点核心区的受力特点进行了分析，指出主要的影响因素为混凝土强度、节点横截面面积与钢管面积的比值、节点环筋的数量、节点高度。在局部承压理论的基础上，根据约束混凝土理论，提出多重箍筋对内核混凝土的约束力逐重叠加的思想，并引入节点高度影响系数，建立该种节点轴压承载力计算公式。计算结果与试验结果比较，两者吻合良好。

## 1.4 研究对象、方法和内容

### 1.4.1 研究对象

本文主要是对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行力学性能的研究，故就其构造形式进行简要的说明，该节点在节点核心区钢管不贯通，其节点承载力下降，采用配钢筋或型钢的方式进行节点加强。本节点选取两种截面形式圆形和方形进行分析，节点的主要形式如图 1.4、1.5。

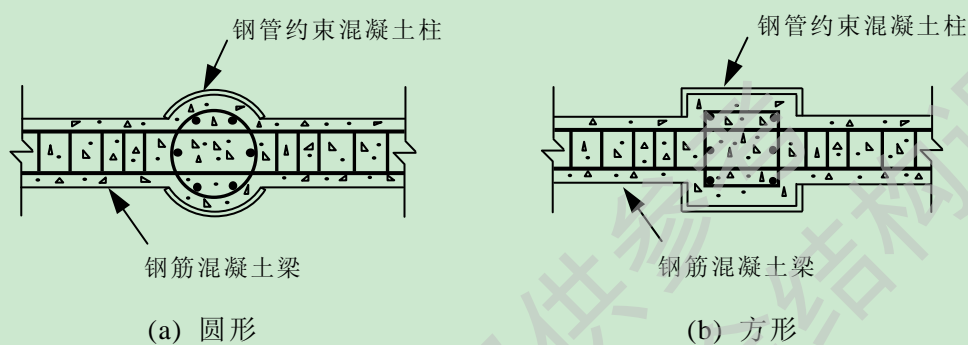


图 1.4 钢管约束混凝土节点横截面

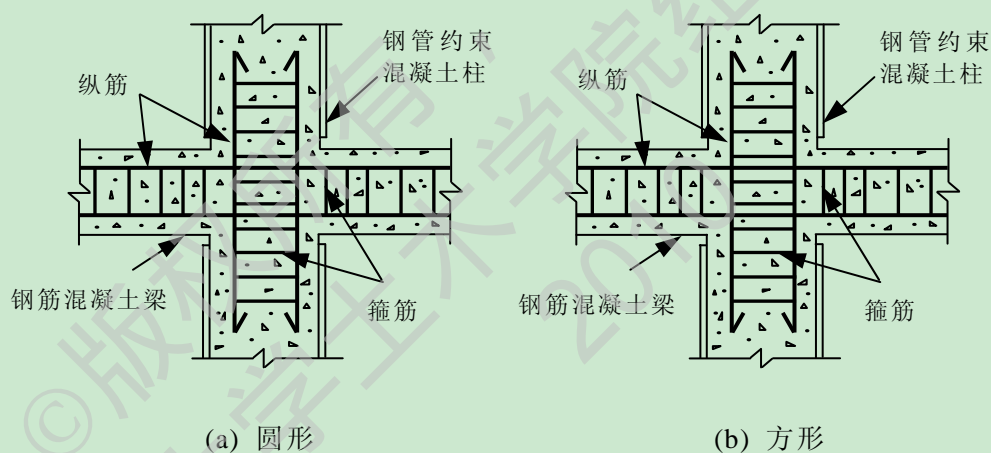


图 1.5 钢管约束混凝土节点

### 1.4.2 研究方法和内容

本文拟采用数值分析的方法对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行力学性能分析。

(1) 本文将用 ABAQUS 通用有限元软件建立钢管混凝土构件、钢管约束混凝土构件、钢筋环绕式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点和钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的模型，通过大量算例分析，验证 ABAQUS 建模的正确性。

(2) 在此基础上，建立钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的典型构件；并对其非线性全过程分析，确定节点的破坏模态，明晰了钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点各组成构件在受力过程中的微观机理。

(3) 对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的模型进行了参数分析。明晰

了各参数对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的影响，在此基础上提出了对于钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗弯、抗剪承载力简化计算方法。

©版权所有，仅供参考  
兰州理工大学土木学院组合结构课题组  
2010

## 第二章 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点数值分析

### 2.1 概述

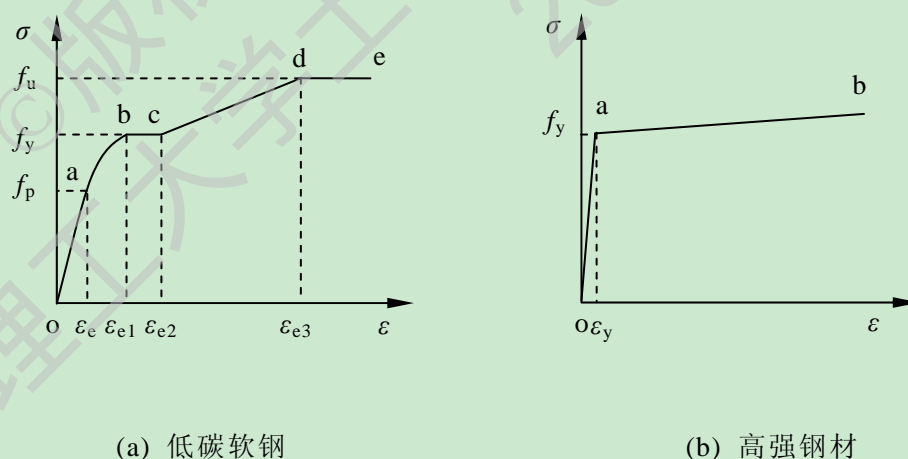
本章采用有限元软件 ABAQUS (Hibbitt 等, 2005) [69] 进行数值分析。首先进行算例分析, 验证 ABAQUS 通用有限元软件的建模模型的正确性。建立钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的模型并对其分析, 通过有限元计算数据与试验数据对比, 验证所建立模型的正确性。在此基础上, 建立钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的典型试件并对其进行受力性能及破坏机理分析。

### 2.2 有限元模型的建立

#### 2.2.1 材料的本构关系

##### 2.2.1.1 钢材的应力-应变关系模型

本文中低碳钢选用韩林海 (2007) [11] 中的二次塑性模型, 由图 2.1 (a) 应力-应变关系曲线所示, 二次塑性模型分为弹性段 (oa)、弹塑性段 (ab)、塑性段 (bc)、强化段 (cd) 和二次塑性 (de) 等五个阶段。对于高强钢材, 一般选用图 2.1 (b) 所示的双线性强化模型, 即弹性段 (oa)、强化段 (ab), 其中, 强化段的模量取值为  $0.01E_s$ ,  $E_s$  为钢材的弹性模量。



(a) 低碳软钢

(b) 高强钢材

图 2.1 钢材应力-应变关系

##### 2.2.1.2 混凝土本构关系模型

###### 1、核心混凝土等效单轴的受压应力-应变关系模型

在钢管混凝土中, 由于受到外包钢管的约束, 钢管和混凝土存在着相互作用, 这种相互作用使核心混凝土的工作性能与普通钢筋混凝土相比, 进一步复杂化。由于受到钢管的被动约束, 核心混凝土的塑性会有所增加, 主要表现在两个方面:



一是对应峰值应力的应变有所增加；二是应力-应变关系曲线上的下降段趋于平缓。这种塑性性能增加与约束效应系数  $\xi$  有关（韩林海，2007<sup>[1]</sup>）。

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha \times \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (2.1)$$

式中， $A_s$ 、 $A_c$  为钢材和混凝土的截面积； $\alpha$  为钢管混凝土截面含钢率； $f_y$  为钢材屈服强度； $f_{ck}$  为混凝土轴心抗压强度标准值。

本文中核心混凝土采用韩林海（2007）<sup>[1]</sup>提出的钢管混凝土构件中核心混凝土受压的应力-应变关系模型，计算公式如下：

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0 \cdot (x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2.2)$$

式中：

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad \sigma_0 = f_c'$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800 \cdot \xi^{0.2} \quad (\mu\varepsilon)$$

$$\varepsilon_c = 1300 + 12.5 f_c' \quad (\mu\varepsilon)$$

$$\eta = \begin{cases} 2 & (\text{圆钢管混凝土}) \\ 1.6 + 1.5/x & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\varepsilon - 0.5)^7]} \cdot (f_c')^{0.5} \cdot 0.5 \geq 0.12 & (\text{圆钢管混凝土}) \\ \frac{(f_c')^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}} & (\text{方钢管混凝土}) \end{cases}$$

以上各式中  $f_c'$  为混凝土圆柱体轴心抗压强度，单位为  $\text{N/mm}^2$ 。

## 2、普通混凝土单轴受压应力-应变关系模型

对核心混凝土以外的混凝土，暂忽略箍筋对混凝土的约束作用。采用 Attard 和 Setunge 等（1996）<sup>[70]</sup>模型（韩林海等，2009<sup>[2]</sup>）。其单轴应力（ $\sigma_c$ ）-应变（ $\varepsilon_c$ ）关系如下：

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (2.3)$$

式中， $Y = \sigma_c / f_c'$ ， $X = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}$ ， $\sigma_c$  和  $\varepsilon_c$  分别为混凝土的应力和应变， $f_c'$  和  $\varepsilon_{c0}$  分别为混凝土圆柱体轴心抗压强度及其对应的应变。 $\varepsilon_{c0}$  按式（2.4）计算；A、B、C、D 为方程需满足应力-应变曲线上相关特征点的条件而给出的系数。

$$\varepsilon_{c0} = \frac{4.26 f_c'}{E_c \sqrt[4]{f_c'}} \quad (2.4)$$

当  $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0}$  时，

$$A = \frac{E_c \varepsilon_{co}}{f_c'} \quad (2.5a)$$

$$B = \frac{(A-1)^2}{0.55} - 1 \quad (2.5b)$$

$$C = A - 2 \quad (2.5c)$$

$$D = B + 1 \quad (2.5d)$$

当  $\varepsilon_c > \varepsilon_{co}$  时,

$$A = \frac{f_{ic}}{\varepsilon_c \varepsilon_{ic}} \frac{(\varepsilon_{ic} - \varepsilon_{co})^2}{f_c' - f_{ic}} \quad (2.6a)$$

$$B = 0 \quad (2.6b)$$

$$C = A - 2 \quad (2.6c)$$

$$D = 1 \quad (2.6d)$$

式(2.4)中,  $E_c$  为混凝土的弹性模量,  $f_{ic}$  和  $\varepsilon_{ic}$  为混凝土应力-应变曲线下降段的反弯点对应的应力值和应变值, 按下式确定:

$$f_{ic} / f_c' = 1.41 - 0.17 \ln(f_c') \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{ic} / \varepsilon_{co} = 1.41 - 0.17 \ln(f_c') \quad (2.8)$$

### 3、受拉的应力与断裂能关系

ABAQUS 软件中提供了三种定义混凝土受拉软化性能的方法: 第一种是混凝土受拉的应力-应变关系, 第二种是采用混凝土开裂应力-开裂位移关系, 第三种是采用混凝土破坏能量准则来考虑混凝土受拉软化性能即应力-断裂能关系。由于应力-断裂能这种模型的收敛性较好, 故本文采用能量破坏准则定义混凝土受拉软化性能(韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)。断裂能  $G_f$  参考欧洲的模式规范(CEB-FIP MC90, 1991<sup>[71]</sup>)的建议, 混凝土断裂能  $G_f$  可按公式(2.9)计算。

$$G_f = \alpha \cdot \left( \frac{f_c'}{10} \right)^{0.7} \times 10^{-3} \quad (\text{N/mm}) \quad (2.9)$$

其中,  $\alpha = 1.25d_{\max} + 10$ ,  $d_{\max}$  为粗骨料的粒径,  $f_{ck}$  为混凝土抗压强度。混凝土峰值拉应力  $\sigma_{t0}$  参考沈聚敏等(1993)<sup>[72]</sup>中提供的混凝土抗拉强度计算公式计算, 混凝土峰值拉应力按公式计算:

$$\sigma_{t0} = 0.26 \times (1.5 f_{ck})^{2/3} \quad (2.10)$$

#### 2.2.2 单元类型及网格划分

在建立的 ABAQUS 有限元模型中, 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点是由钢管、钢管内核心混凝土、钢筋混凝土梁、钢筋及加载板组成。钢管内核心混凝土、钢筋混凝土梁、和加载板采用 8 节点缩减积分格式的三维实体单元 C3D8R。经过计算比较, 满足网格精度要求的线性单元与二次单元在本文分析中的差别不

大，因此从精度要求和计算效率考虑，选用线性单元。钢管采用 4 节点完全积分格式的壳单元 S4，为满足一定的计算精度，在壳单元厚度方向采用 9 个积分点的 Simpson 积分。S4 属于一种通用的壳单元，即允许沿厚度方向的剪切变形，随着壳厚度的变化，求解方法会自动服从厚壳理论或薄壳理论，当壳厚度很小时，剪切变形变得很小。此外，S4 考虑了有限薄膜应变和大转动，属于有限应变壳单元，因此它适于包含大应变的分析。钢筋采用 Truss 单元。

节点模型的网格划分，钢管、钢管内核心混凝土、钢筋混凝土梁、刚性加载板采用映射网格。为兼顾计算精度与计算成本，也可以采用不同的网格密度。例如，可在节点核心区范围内将混凝土网格细画，单元尺寸在 50mm 左右，靠近约束端附近可以视情况适当增大尺寸。钢管与核心混凝土的网格划分密度相同，以便于计算结果收敛。

### 2.2.3 边界条件及荷载施加方式

本文的边界条件可简化为，柱底部及梁端均为铰接。加载方式是，先在柱顶施加轴向荷载，之后再施加水平荷载。在分析研究节点受力性能时，由于选取的模型较小，采用全模型建模。

在 ABAQUS 中 Step 选项中设置两个或三个荷载步，第一个荷载步是以集中力形式施加于柱顶端的加载板，根据轴压比的大小，调整初始分析步的步长，尽可能在较少的分析步内，将轴向荷载施加完毕。第二个荷载步是在柱顶端施加水平荷载，以位移形式加载。在对典型试件分析时，为了便于收敛，可在第二个荷载步施加较小的水平位移荷载，最后在第三个荷载步施加分析所需水平荷载。

网格划分与边界条件如图 2.2 所示。在钢管混凝土柱底部的钢垫块底面中线上，施加 1、2、3 方向的位移约束，以模拟柱底部的铰支座。在左右梁端仅施加 2、3 方向的位移约束，放松 1 方向的位移。在柱顶端施加 2 方向的位移约束，以防止柱发生侧移。

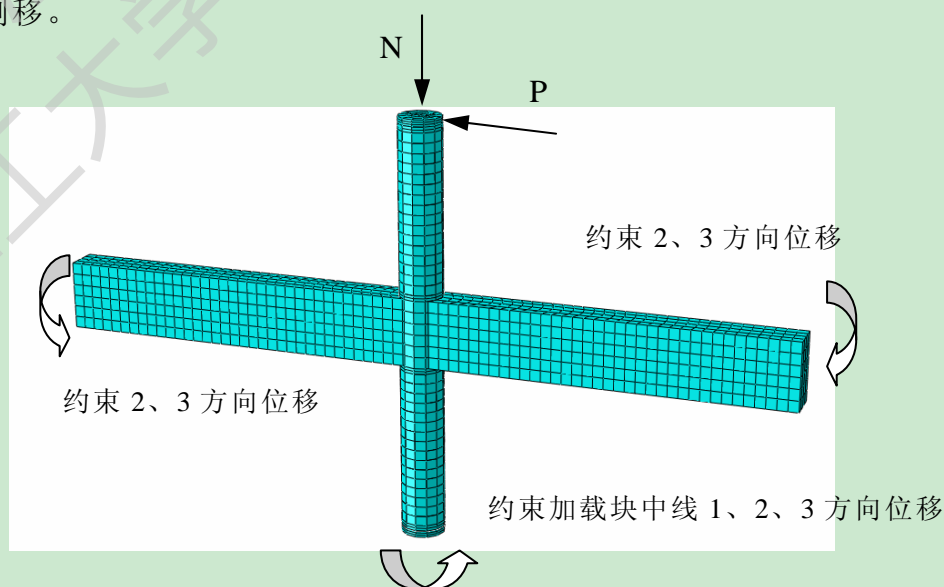


图 2.2 节点网格划分与边界条件示意图

## 2.2.4 钢管与混凝土的界面模型

钢管和混凝土的界面模型处理是合理模拟钢管混凝土力学性能的关键。钢管与混凝土的界面模型由界面法线方向的接触和切线方向的粘结滑移构成。法线方向的接触采用硬接触，垂直于接触面的界面压力可以完全在界面间传递。本文钢管与混凝土界面切向力模拟采用库仑摩擦模型。

本文钢管混凝土节点有限元模型中，除了主要的钢管与混凝土的接触外，还应该考虑节点区钢筋混凝土梁和钢筋混凝土节点的接触，以及加载板与柱端混凝土接触等。主要考查节点的极限承载力和初始刚度，以上均采用采用绑定约束（TIE）来模拟。在利用 ABAQUS 分析中，以上各处接触均采用自由度耦合的办法处理，即认为这些连接处具有相同连续的自由度，加载板与柱端混凝土也采用约束命令 TIE。

## 2.2.5 非线性方程组求解

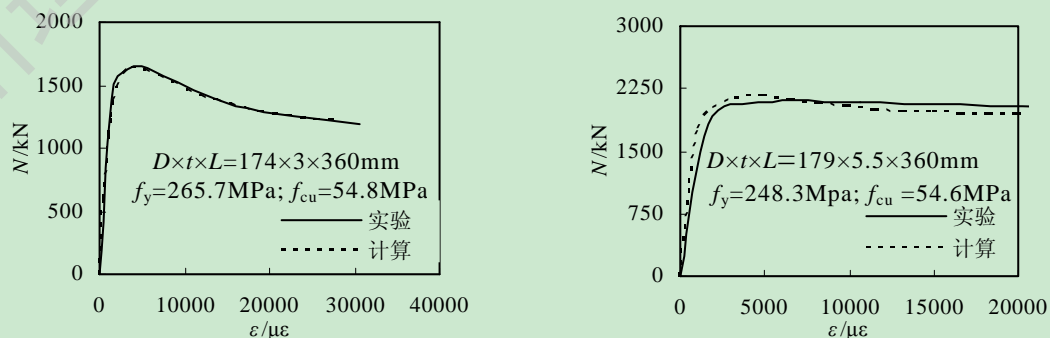
本文的计算是非线性问题。ABAQUS/Standard 中有三种计算方法。本文采用牛顿法（Newton-Raphson）进行迭代计算。

## 2.3 算例分析

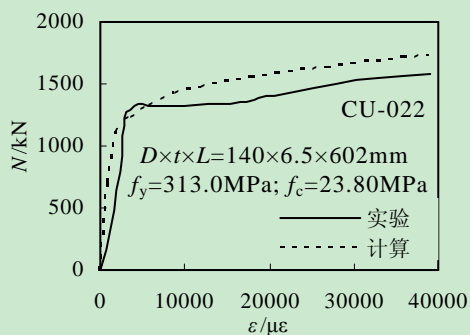
为了验证本文所取的材料模型、界面接触模型和单元类型对分析钢筋混凝土、型钢和钢管约束混凝土的实适用性，分别计算了钢管混凝土柱、钢管约束混凝土柱轴压及压弯构件算例。因为本文分析的是节点，故对钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点和钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的进行了算例分析。并对 ABAQUS 的计算结果和实验结果进行了对比，可见用 ABAQUS 有限元软件分析是适用的，而且通过软件得到的结果和实验结果吻合良好。

### 2.3.1 钢管混凝土构件

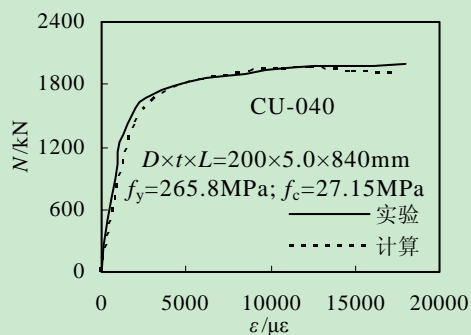
图 2.3 给出了用 ABAQUS 有限元计算得到的 Sakino 和 Hayashi（1991）<sup>[73]</sup>，韩林海等（2009）<sup>[1]</sup>，Hu 等（2003）<sup>[74]</sup>中钢管混凝土轴压构件计算结构和实验结果的对比包括圆形和方形两种截面形式。可以看出，本文计算结果无论在刚度和承载力方面与实验结果均吻合较好，验证了模型对钢管混凝土构件的适用性。



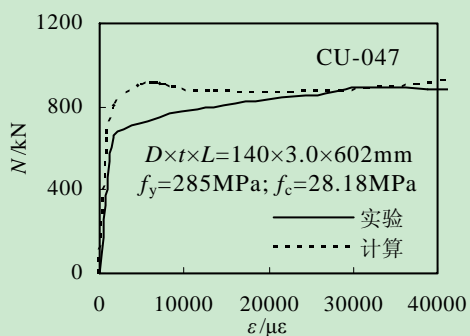
(a) 圆钢管混凝土(Sakino 和 Hayashi, 1991<sup>[73]</sup>) (b) 圆钢管混凝土(Sakino 和 Hayashi, 1991<sup>[73]</sup>)



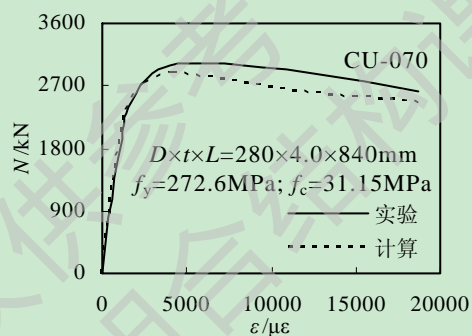
(c) CU-022 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



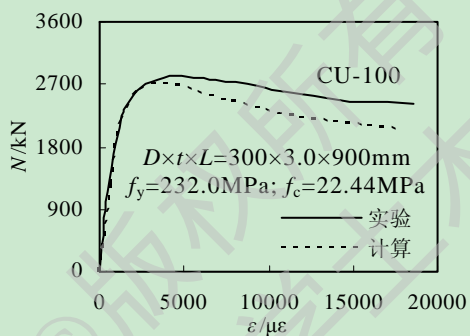
(d) CU-040 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



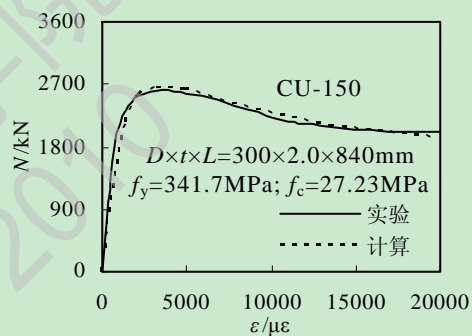
(e) CU-047 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



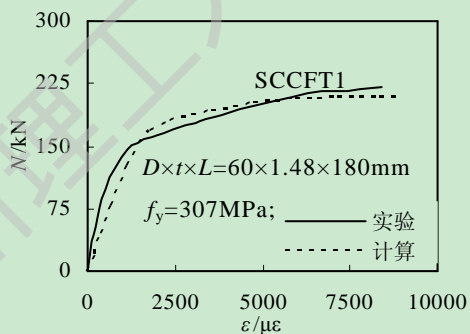
(f) CU-070 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



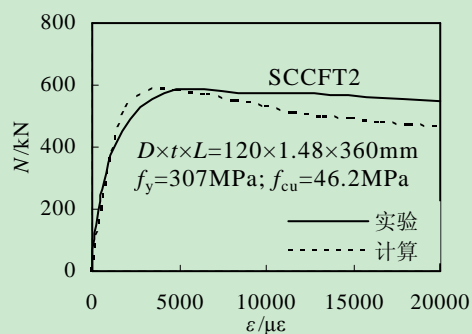
(g) CU-100 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



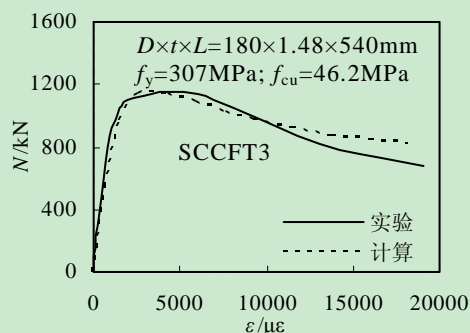
(h) CU-150 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



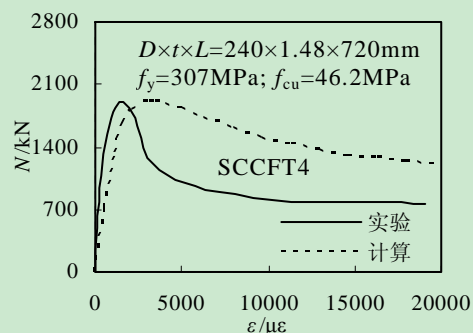
(i) SCCFT1 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)



(j) SCCFT2 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

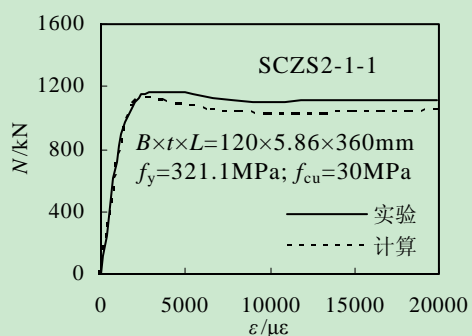


(k) SCCFT3 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

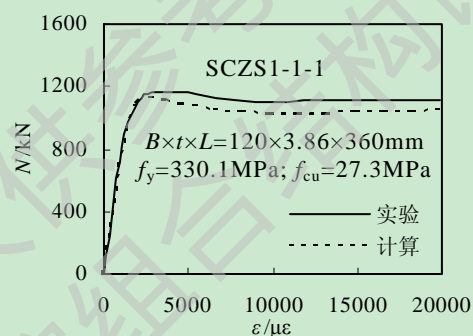


(l) SCCFT4 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

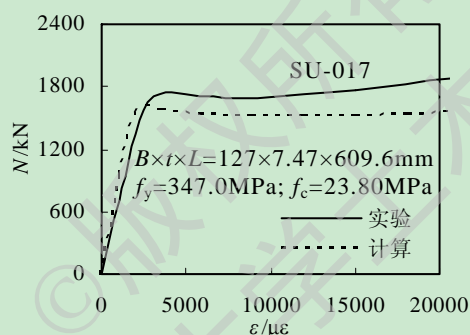
(1) 圆钢管混凝土轴压构件



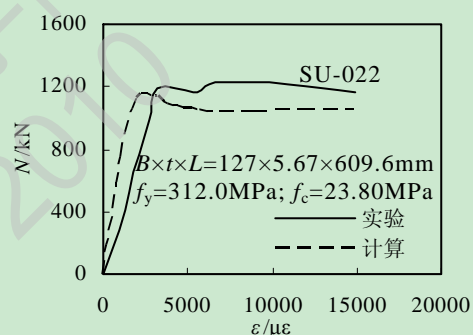
(a) SCZS2-1-1 (韩林海, 2007<sup>[1]</sup>)



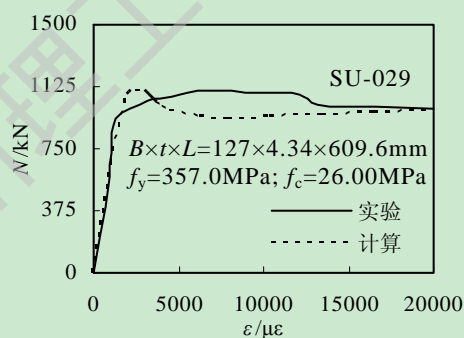
(b) SCZS1-1-1 (韩林海, 2007<sup>[1]</sup>)



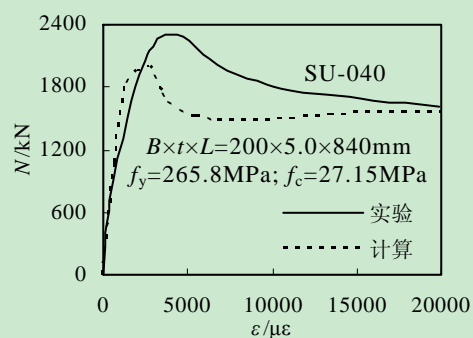
(c) SU-017 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



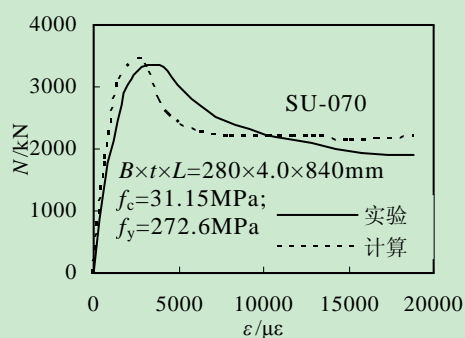
(d) SU-022 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



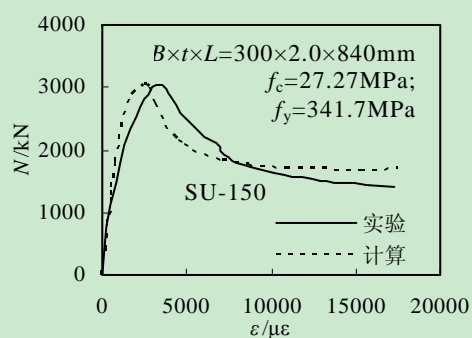
(e) SU-029 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



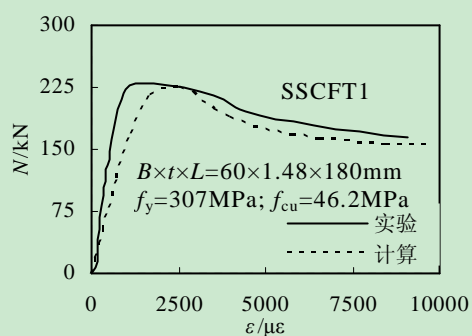
(f) SU-040 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



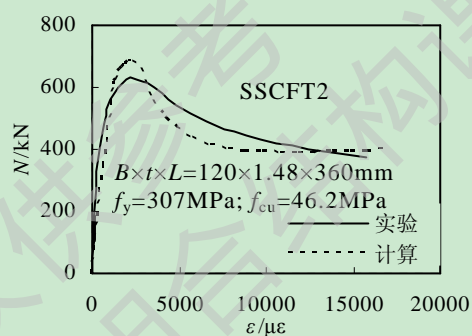
(g) SU-070 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



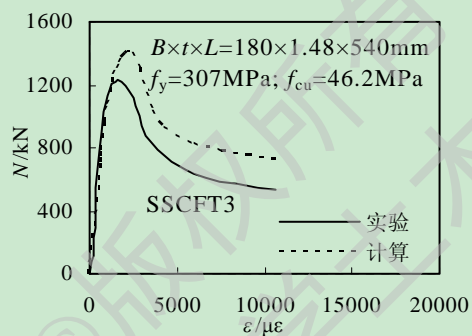
(h) SU-150 (Hu 等, 2003<sup>[74]</sup>)



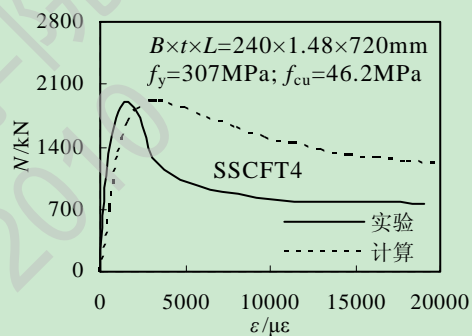
(i) SSCFT1 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)



(j) SSCFT2 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)



(k) SSCFT3 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)



(l) SSCFT4 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

(2) 方钢管混凝土轴压构件

图 2.3 钢管混凝土轴压构件算例比较

图 2.4 给出了利用 ABAQUS 软件对韩林海 (2007)<sup>[1]</sup>, 韩林海等 (2009)<sup>[2]</sup> 中的钢管混凝土压弯构件有限元计算值与实验结果进行了比较。计算结果表明, 本文的计算结果与试验结果, 刚度和承载力都吻合良好。

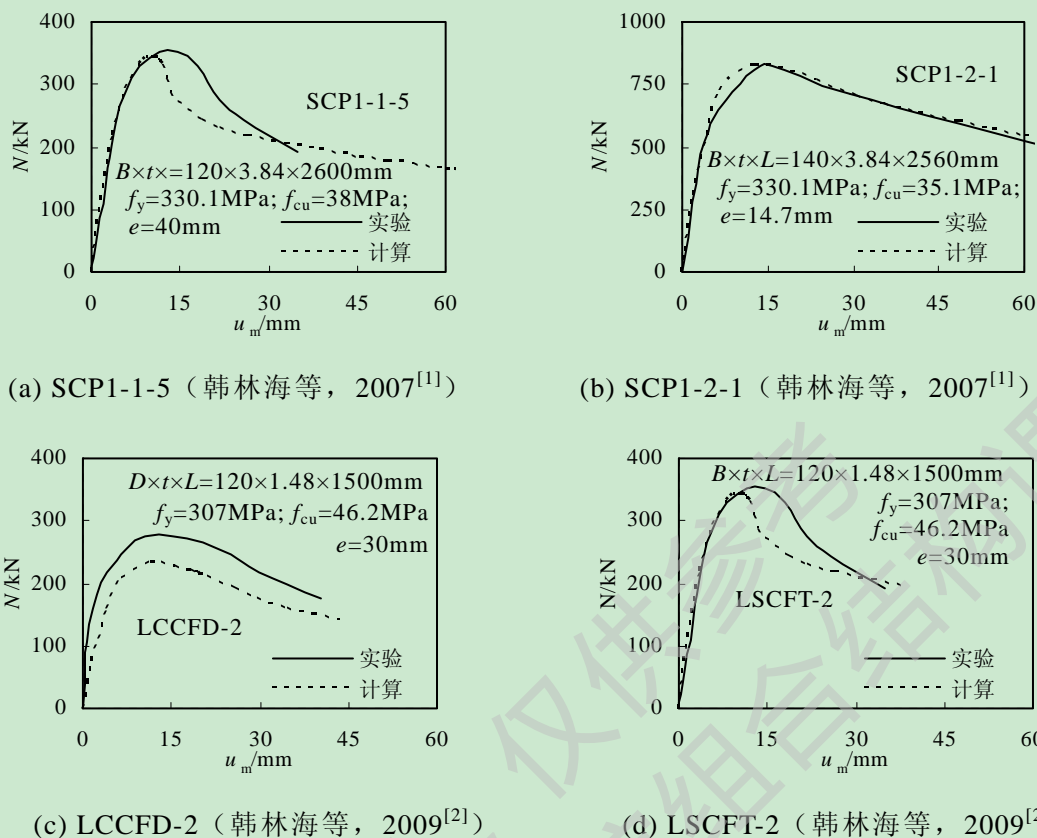
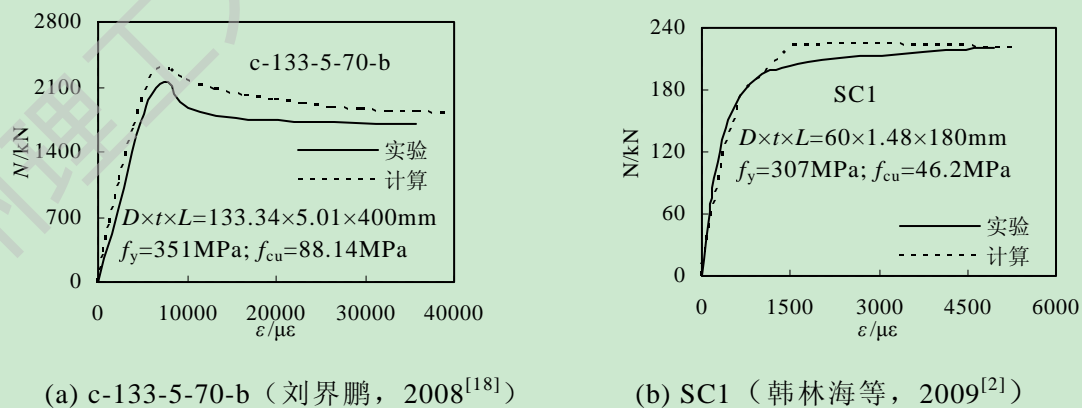


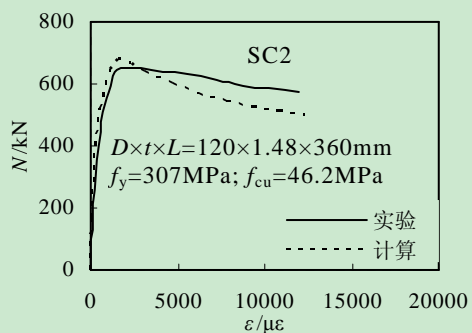
图 2.4 钢管混凝土压弯构件算例比较

### 2.3.2 钢管约束混凝土构件

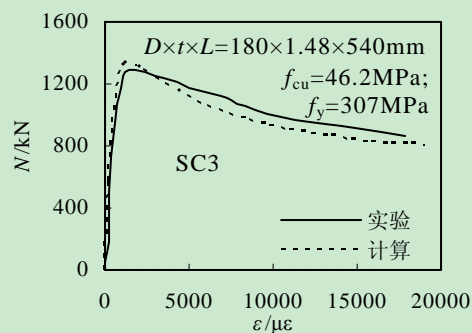
由于本文研究的是钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点,所以有必要对钢管约束混凝土的柱进行数值模拟。本文利用有限元软件对刘界鹏等(2008)<sup>[18]</sup>、郭兰慧(2008)<sup>[19]</sup>及韩林海等(2009)<sup>[2]</sup>中的钢管约束混凝土轴压、压弯构件进行了有限元的计算。图 2.5、2.6 给出了利用 ABAQUS 有限元软件的计算结果和实验结果的对比,可见,计算结果与实验结果吻合良好。说明了模型对钢管约束混凝土构件的适用性。



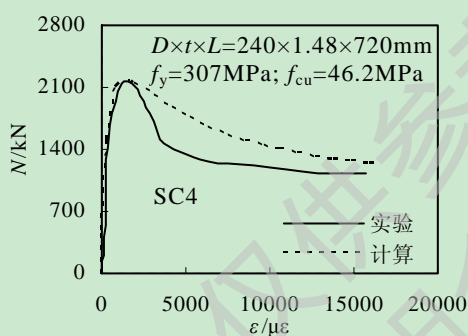




(c) SC2 (韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)

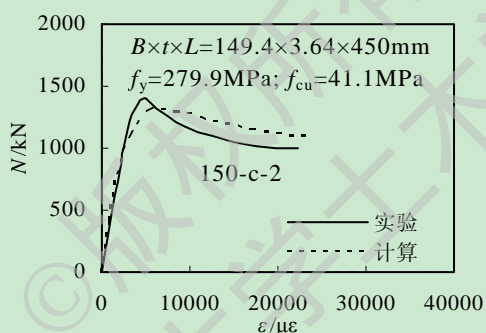


(d) SC3 (韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)

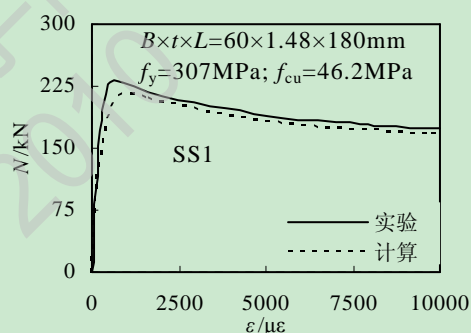


(e) SC4 (韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)

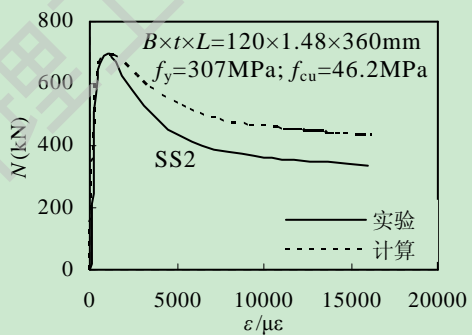
(1) 圆钢管约束混凝土轴压构件



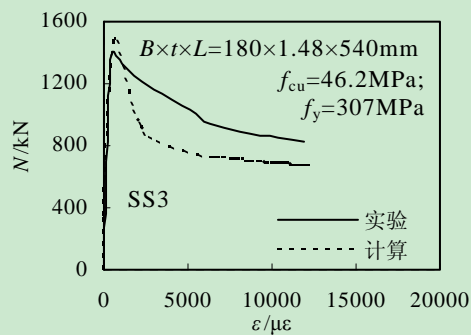
(a) 150-c-2 (郭兰慧, 2008<sup>[19]</sup>)



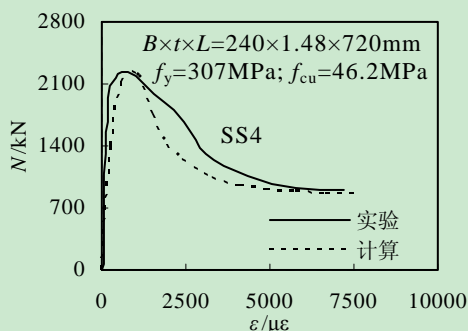
(b) SS1 (韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)



(c) SS2 (韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)



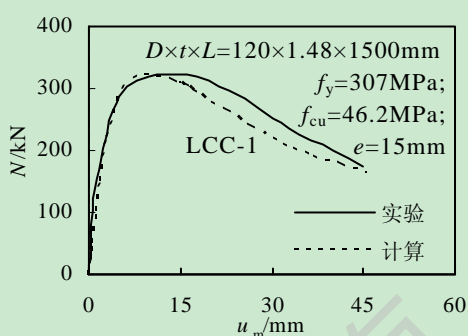
(d) SS3 (韩林海等, 2009<sup>[21]</sup>)



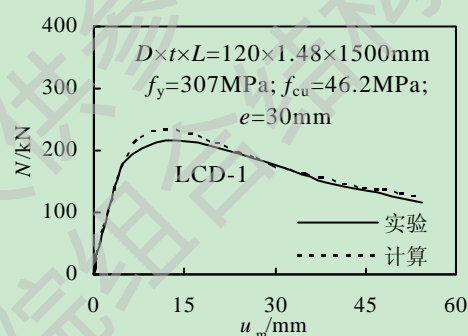
(f) SS4 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

(2) 方钢管约束混凝土轴压构件

图 2.5 钢管约束混凝土轴压构件算例比较

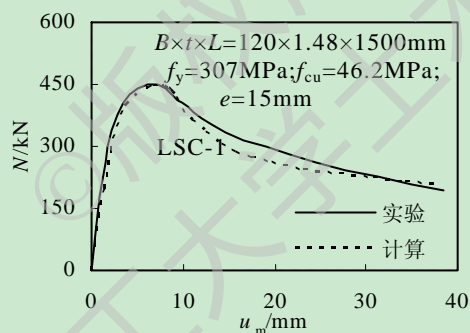


(a) LCC-1 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

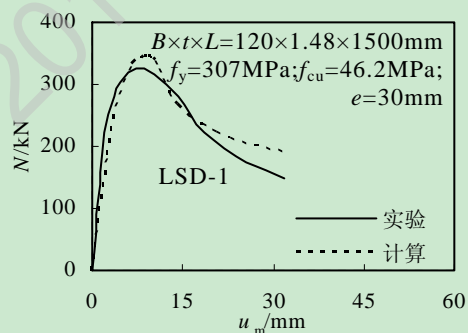


(b) LCD-1 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

(1) 圆钢管约束混凝土压弯构件



(c) LSC-1 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)



(d) LSD-1 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>)

(2) 方钢管约束混凝土压弯构件

图 2.6 钢管约束混凝土压弯构件算例比较

### 2.3.3 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点

利用 ABAQUS 有限元软件对钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了数值模拟分析。图 2.7 为对 (韩林海等, 2009<sup>[2]</sup>) 中钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点在不同轴压比下有限元软件计算结果和实验结果的对比, 可见, 本文计算结果与试验实验结果相比, 刚度和承载力均吻合良好。

节点的具体参数如下：

圆形柱节点的柱截面尺寸为  $D \times t = 150\text{mm} \times 1.38\text{mm}$ ，钢筋混凝土梁尺寸（宽 $\times$ 高）为  $b \times h = 100\text{mm} \times 160\text{mm}$ ，梁截面配筋上部及下部均为  $2\phi 10$ ，梁柱线刚度比为 0.328。

方形柱节点的柱截面尺寸为  $B \times t = 150\text{mm} \times 1.38\text{mm}$ ，钢筋混凝土梁尺寸（宽 $\times$ 高）为  $b \times h = 100\text{mm} \times 170\text{mm}$ ，梁截面配筋上部及下部均为  $2\phi 12$ ，梁柱线刚度比为 0.274。

试件中钢管混凝土柱高度  $H = 1.155\text{m}$ ，钢筋混凝土梁的跨度  $L = 1.5\text{m}$ 。CJ 和 SJ 分别为圆形和方形截面钢管混凝土柱节点，RC 表示采用了钢筋混凝土梁，数字 0、3、6 分别表示轴压比为 0.05、0.3、0.6 是的情况。试件最后一位数字 1 或 2 是用来当同一轴压比下有两个试件时加以区分。

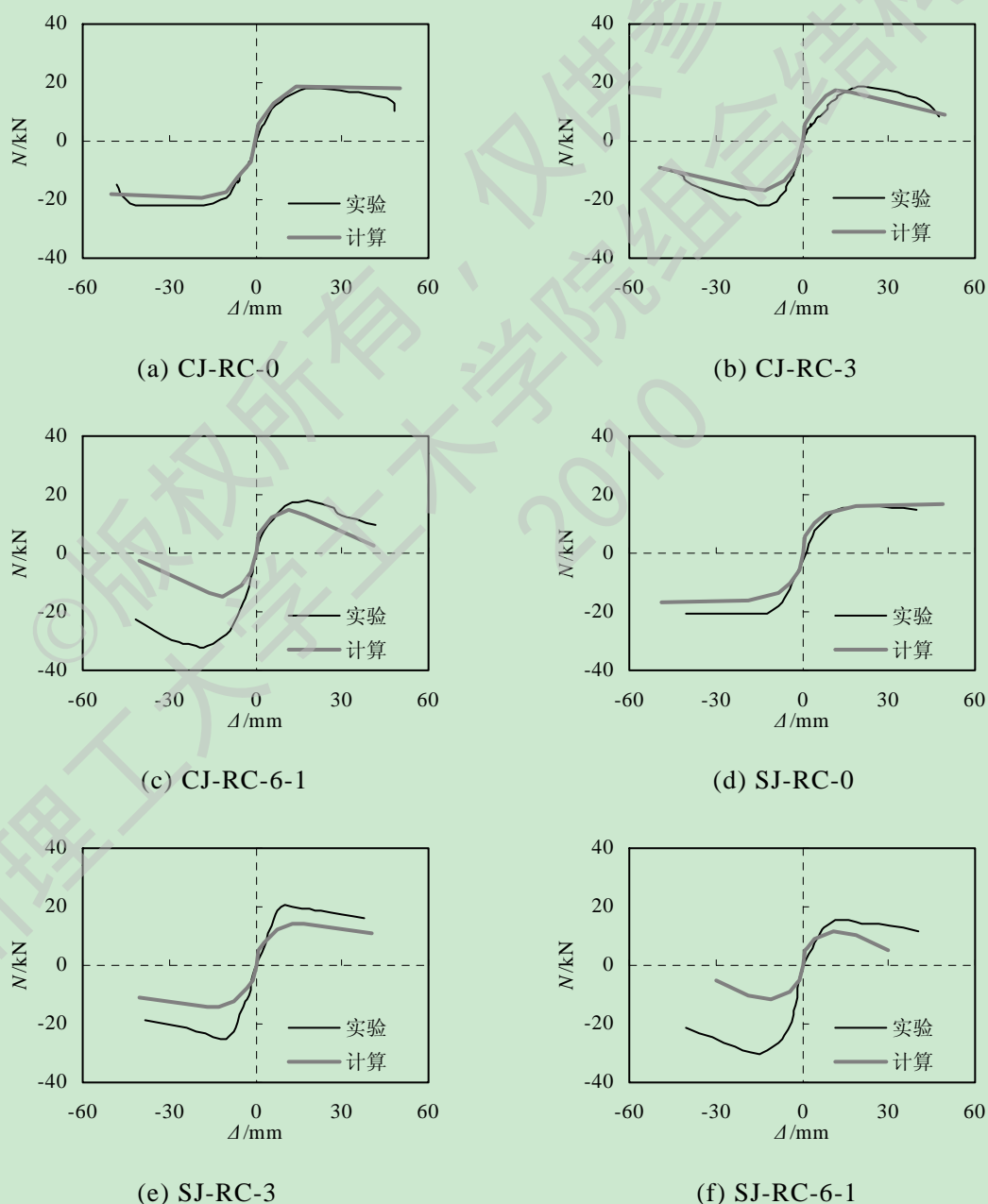


图 2.7 钢筋环绕式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点数值模拟

### 2.3.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点

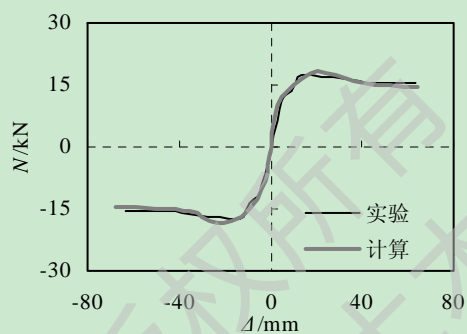
利用 ABAQUS 有限元软件对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了数值模拟分析。图 2.8 为韩林海等 (2009) [2] 中对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点计算结果与试验结果的相比曲线, 可见, 节点刚度和承载力总体上吻合良好。

节点的具体参数如下:

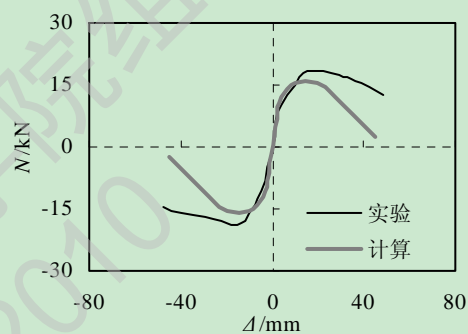
圆形柱节点的柱截面尺寸为  $D \times t = 150\text{mm} \times 1.38\text{mm}$ , 钢筋混凝土梁尺寸 (宽  $\times$  高) 为  $b \times h = 100\text{mm} \times 160\text{mm}$ , 梁截面配筋上部及下部均为  $2\phi 10$ , 梁柱线刚度比为 0.328。

方形柱节点的柱截面尺寸为  $B \times t = 150\text{mm} \times 1.38\text{mm}$ , 钢筋混凝土梁尺寸 (宽  $\times$  高) 为  $b \times h = 100\text{mm} \times 170\text{mm}$ , 梁截面配筋上部及下部均为  $2\phi 12$ , 梁柱线刚度比为 0.274。

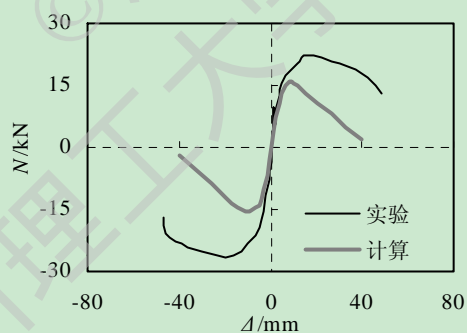
试件中钢管混凝土柱高度  $H = 1.155\text{m}$ , 钢筋混凝土梁的跨度  $L = 1.5\text{m}$ 。STCCJ 代表钢管约束混凝土柱节点, 横线后面的字母表示柱截面形状, S 和 C 分别代表方形和圆形, 数字 0、3、6 分别表示轴压比为 0.05、0.3、0.6 是的情况。参数相同的两个试件分别用 1 或 2 加以区分。



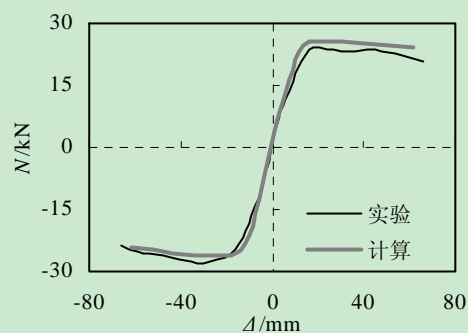
(a) STCCJ-C0



(b) STCCJ-C3



(c) STCCJ-C62



(d) STCCJ-S02

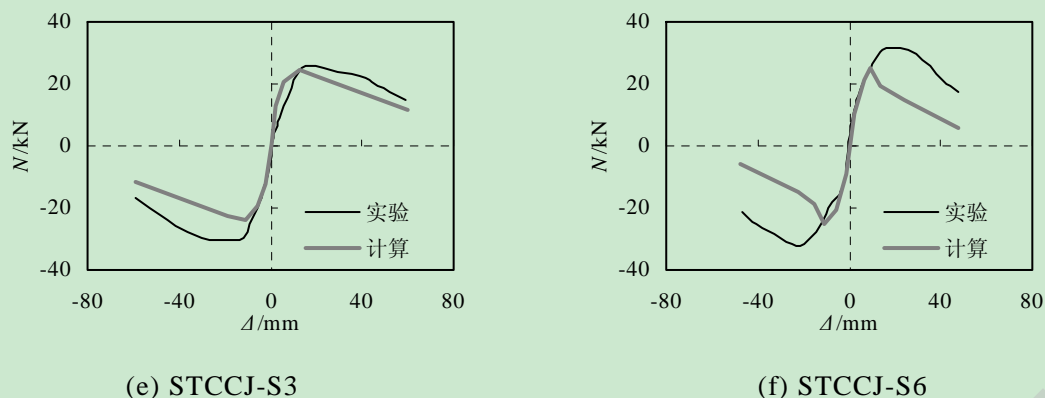


图 2.8 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点数值模拟

## 2.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点单调加载全过程分析

### 2.4.1 典型试件的确定

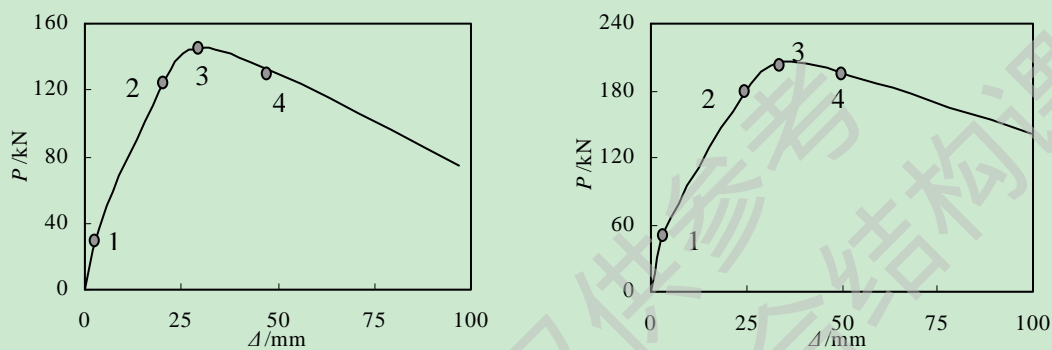
本节将对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的典型算例，采用 ABAQUS 软件对其的工作机理进行分析，并归纳出其传力途径和破坏模态的发展过程，及其各组成构件的微观反应。为了能够更好的反映符合实际节点的受力特性，需要选择合适的典型试件分析。

钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的形式与钢管混凝土节点-钢筋混凝土梁节点不同，其节点区钢管不直通，需要在节点区配置钢筋等对其加强，本文设计了三种不同的形式，即内配 H 型钢、十字型钢和箱形型钢三种。由于三种节点的受力原理基本相同，这里只对内配 H 型钢的钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点作典型试件分析。

按照《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>确定典型试件信息如下：钢管约束混凝土柱采用  $D(B) \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱截面含钢率  $\alpha = 0.1$  ( $\alpha = A_s/A_c$ ，其中  $A_s$  和  $A_c$  分别为钢管和核心混凝土的截面面积)，钢管采用 Q345 钢材，柱混凝土 C60 混凝土；节点区型钢采用 Q345 钢材，型钢截面尺寸为  $280 \times 200 \times 20 \times 20$ （方截面）， $200 \times 200 \times 20 \times 20$ （圆截面）；钢筋混凝土梁截面（宽  $\times$  高）为  $b \times h = 300\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，梁截面配筋上部及下部均为  $4\phi 28$ （方截面）、 $4\phi 25$ （圆截面）；钢筋混凝土梁配置箍筋  $\phi 8 @ 200$ ，节点区和梁端加密区配置箍筋  $\phi 8 @ 100$ ，柱高  $H = 3.6\text{m}$ ，跨度  $L = 6.6\text{m}$ 。（其中的方截面、圆截面为节点的截面形式）。轴压比取 0.4（定义  $n = N_0/N_u$ ，其中  $N_0$  为施加在柱顶的竖向荷载， $N_u$  为钢管混凝土柱极限承载力）。梁柱线刚度比取为  $k = 0.25$  ( $k = (E_b I_b) H / (E_{sc} I_{sc}) L$ )，其中  $E_b I_b$  和  $E_{sc} I_{sc}$  分别为梁和柱的弹性抗弯刚度， $H$  为柱高， $L$  为梁跨度。其抗弯刚度  $E_{sc} I_{sc}$  按照《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>确定， $E_{sc} I_{sc} = E_s I_s + \alpha E_c I_c$ ，其中， $E_s$ 、 $E_c$  分别为钢材和混凝土的弹性模量； $I_s$ 、 $I_c$  分别为钢管和混凝土的截面惯性矩（圆形截面， $\alpha = 0.8$ ，方形截面， $\alpha = 0.6$ ）。

## 2.4.2 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的破坏模式

为比较不同受力阶段节点的应力状态，分析节点的工作机理，在图 2.9 的节点  $P-\Delta$  关系全过程曲线上，试件破坏的历程和形态经历了初裂、通裂、极限和破坏四个阶段，分别选取四个典型时刻对应的特征点进行比较，四个特征点分别取：1 点为节点中钢筋混凝土梁端出现第一道弯曲直裂缝；2 点为节点进入屈服的点（梁纵向钢筋屈服）；3 点为节点水平极限承载力  $P_{max}$  对应点；4 点为对应 85% 的极限荷载，及破坏荷载  $P_u$  对应时刻。



(a)圆形截面柱节点

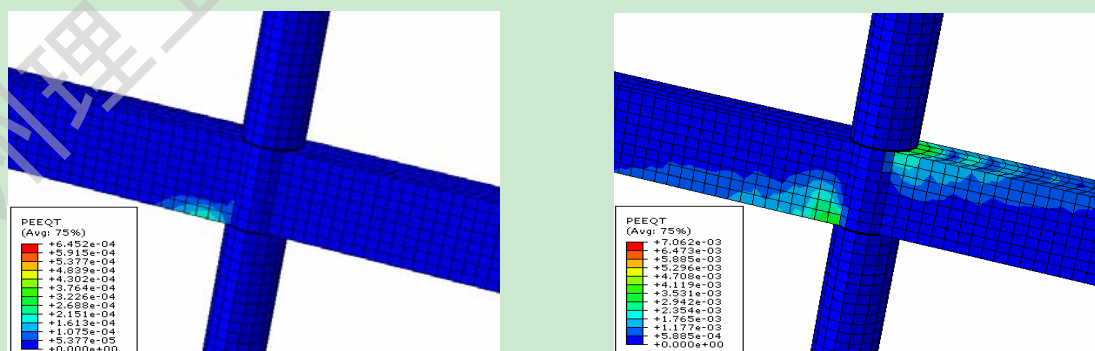
(b)方形截面柱节点

图 2.9 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点典型  $P-\Delta$  关系曲线

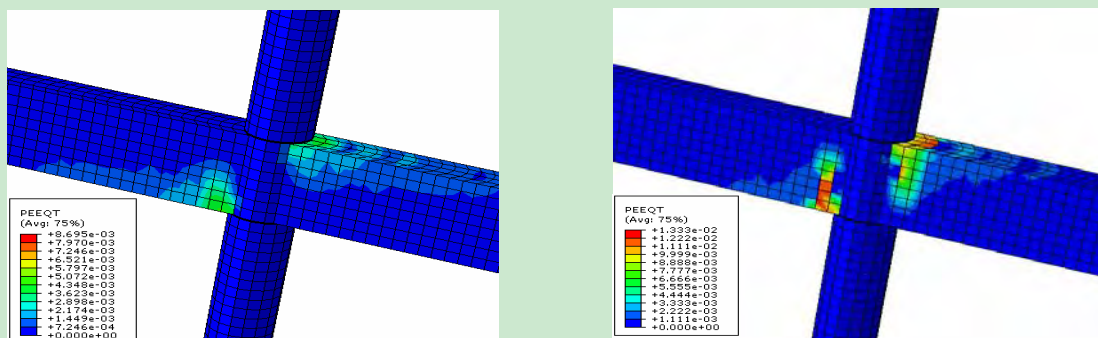
### 2、圆截面节点各组成部分应力发展

#### (1) 圆形截面节点的裂缝发展

在 ABAQUS 中混凝土塑性损伤模型不存在材料积分点上发展裂缝的概念，但通过等效塑性应变反应出来。根据 Lubliner 等（1989）<sup>[75]</sup> 建议，假定裂缝最初发生在等效塑性拉应变大于零。由图 2.10 可以看出初始裂缝发生在钢筋混凝土左梁下表面靠近柱子的地方，由于节点同时受到轴压力和水平向左的推力，所以等效塑性拉应变增大，出现初始裂缝，如图（a）。随着水平荷载的增加，节点受到的推力增加，钢筋混凝土右梁上表面也开始出现裂缝，如图（b），随着荷载的继续增大，节点区等效塑性拉应变继续发展，如图（c），随着  $P$  的增大节点承载力最终达到极限，节点破坏，如图（d）。



(a) 初始裂缝时等效塑性拉应变分布图(1点) (b) 裂缝贯通阶段等效塑性拉应变分布图(2点)

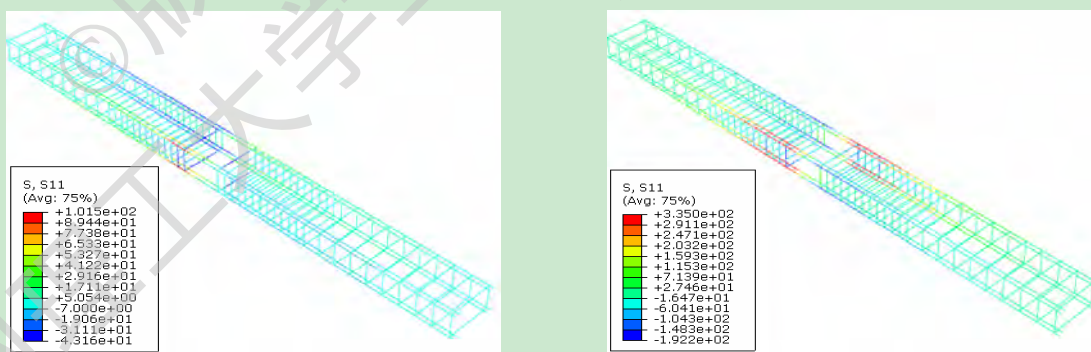


(c) 极限阶段等效塑性拉应变分布图(3点) (d) 破坏时等效塑性拉应变分布图(4点)

图2.10 圆形截面节点混凝土等效塑性应变发展分布图

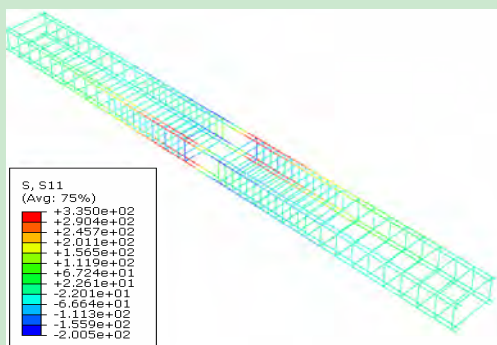
(2) 圆形截面节点梁、柱钢筋及钢管应力发展

图 2.11 的 (1) 中给出了为圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点中钢筋混凝土梁中钢筋的变形发展，如图可以看出钢筋随着梁端混凝土的开裂钢筋逐渐开始受力，并逐渐增大，到达 2 点时，钢筋开始屈服，随着荷载的增加，钢筋受力逐渐增大（3 点），最终进入强化阶段（4 点）。图 2.10 的 (2) 中给出了圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点中节点和柱中钢筋的应力发展，从节点区钢筋的 Mises 应力云图中可以看出，随着梁中纵向受力钢筋在 2 点已经开始屈服，3、4 点梁中纵筋进一步受力，但节点区钢筋却并未屈服。说明柱和节点并未破坏，符合强柱弱梁，节点更强的设计原则。图 2.10 的 (3) 中显示了钢管约束混凝土柱上钢管的应力分布发展，靠近梁附近的钢管初始阶段受力较大，随着荷载的增加，钢管中部受力增加，到达破坏时，钢管应力有所减小，这是由于节点已经破坏，梁端形成了塑性铰。由于节点受到轴压力和弯矩的共同作用，钢管的受压区的应力大于受压区应力，且钢管并未屈服。

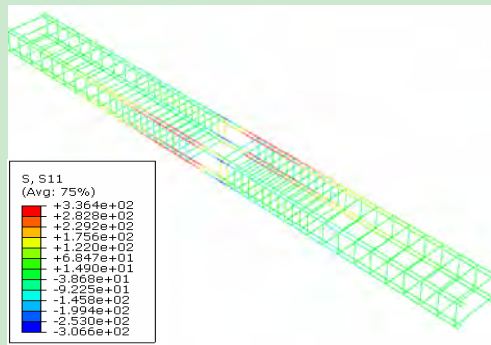


(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)

(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)

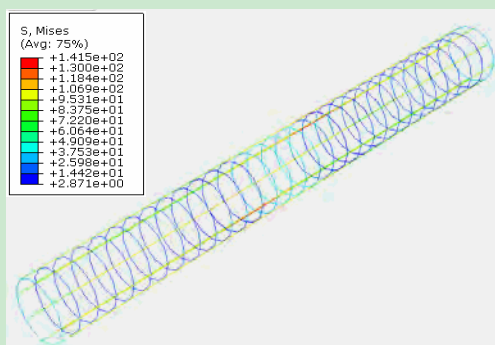


(c) 极限阶段应力分布图(3点)

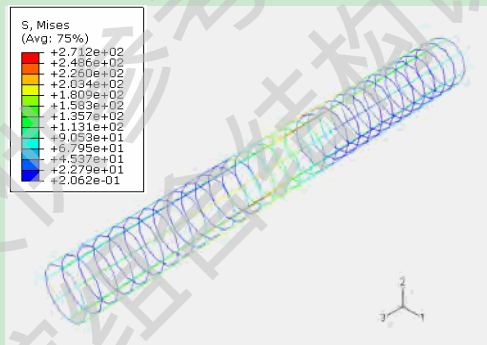


(d) 破坏时应力分布图(4点)

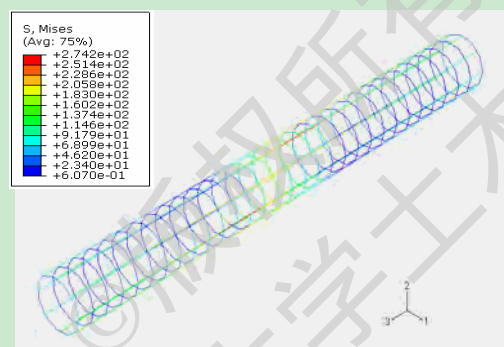
(1) 圆形截面节点钢筋混凝土梁中钢筋应力分布图



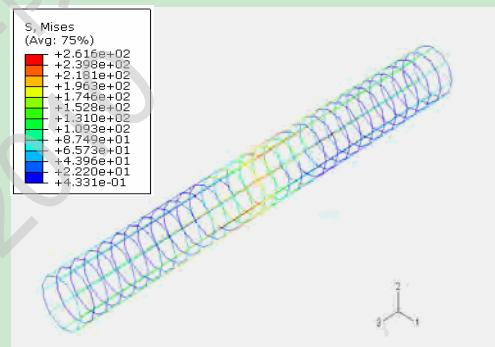
(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)

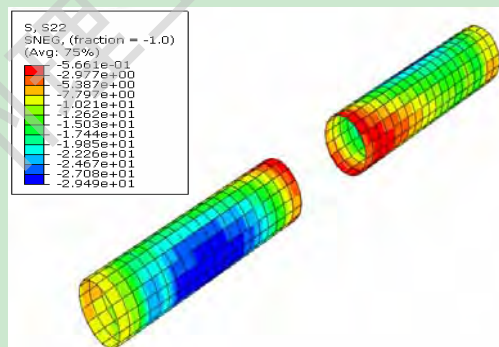


(c) 极限阶段应力分布图(3点)

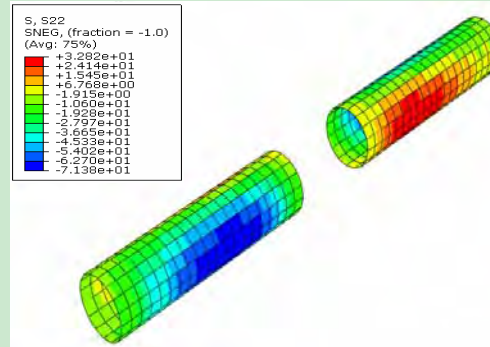


(d) 破坏时应力分布图(4点)

(2) 圆形截面节点钢筋应力分布图

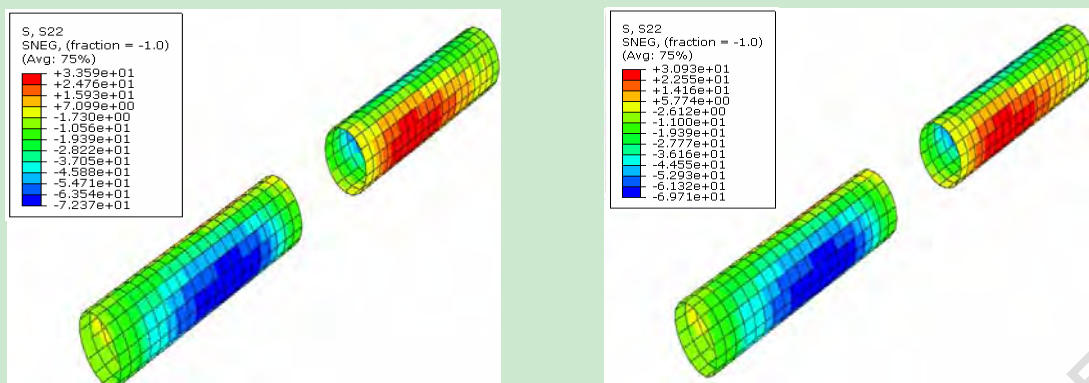


(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)





(c) 极限阶段应力分布图(3点)

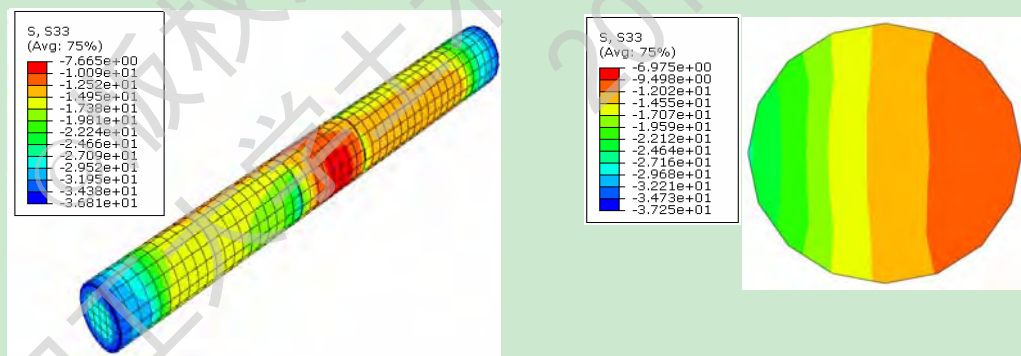
(d) 破坏时应力分布图(4点)

(3) 圆形截面节点钢管应力分布图

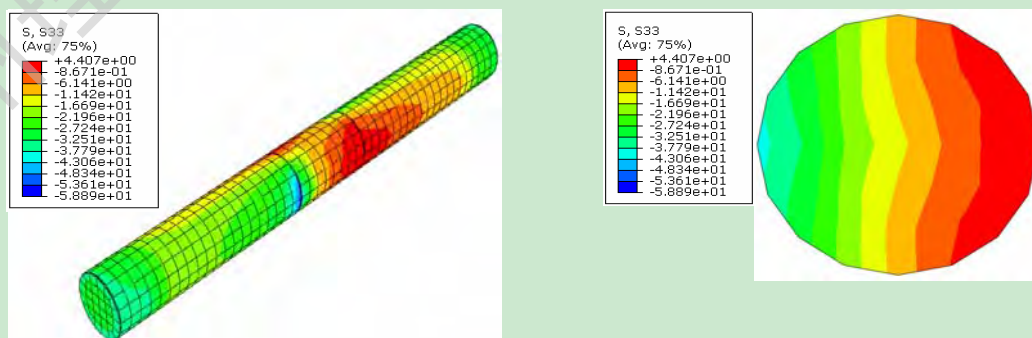
图 2.11 圆形截面节点各部分应力分布图

### (3) 混凝土的纵向变形

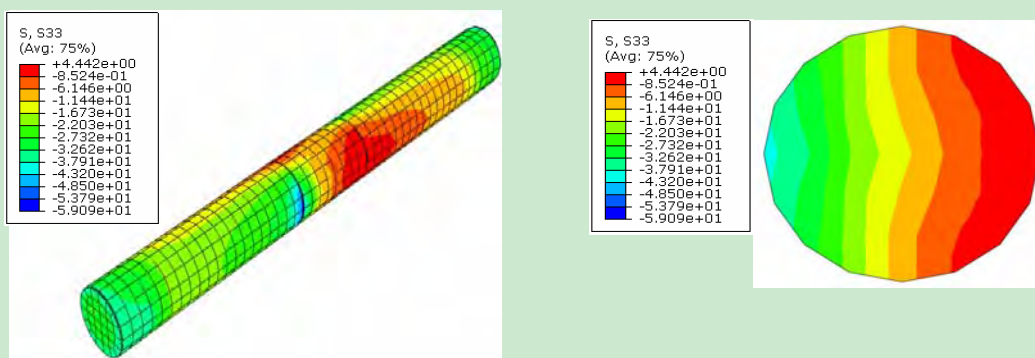
从图 2.12 的混凝土柱及柱沿梁上表面的截面的应力分布发展可知,在 1 点时,混凝土柱全截面受压,截面由没有水平荷载作用时的全截面受压逐渐变为左半部分受压,右半部分受拉。在 2 点时,随着水平荷载的逐渐增加,混凝土柱在钢管断开之处逐渐开始受拉,这主要是因为,随着水平推力的增大,节点域受剪变形,且受压区逐渐增大,形成斜压杆,此时截面的受压区面积逐渐减小而受拉区逐渐增大。在 3 点时,荷载进一步增加,此时达到极限荷载,应力沿着此趋势继续发展,混凝土受拉区应力继续增大,到达 4 点时,节点破坏,外荷载达到破坏荷载  $P_u$ ,由于出现卸载,截面应力有所减小。



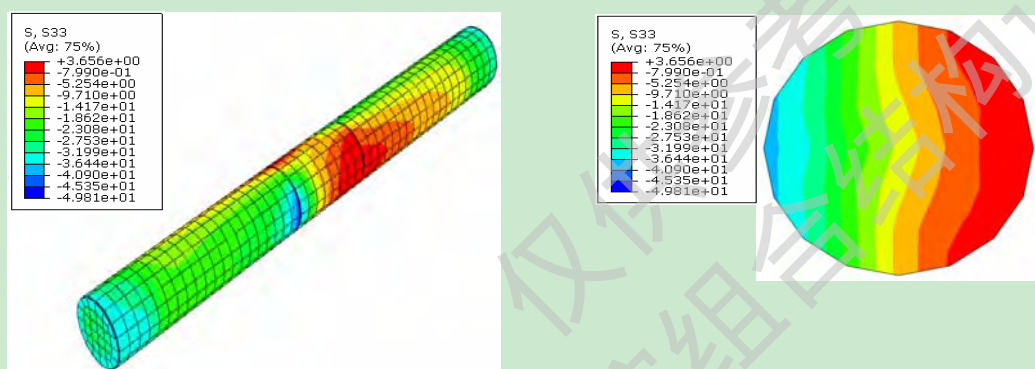
(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)



(c) 极限阶段应力分布图(3点)

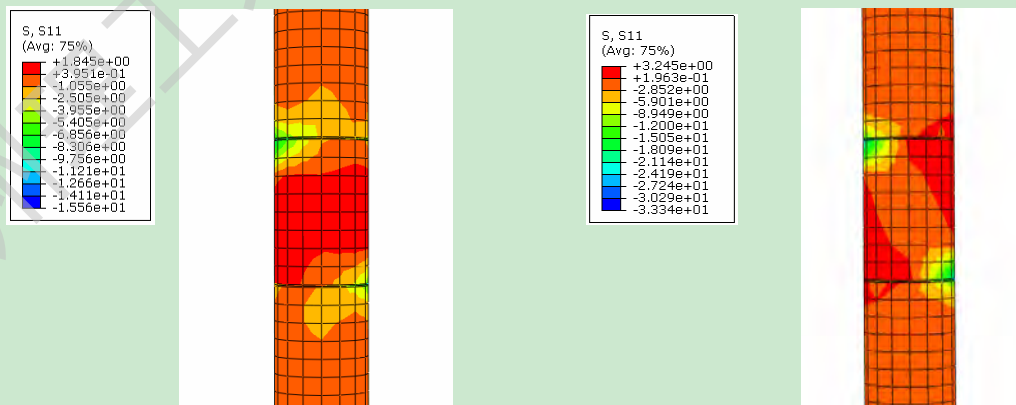


(d) 破坏时应力分布图(4点)

图2.12 圆形截面节点混凝土的纵向变形

#### (4) 节点区剪切应力

图 2.13 给出了节点各主要受力构件的剪切应力的应力云图, 从节点区混凝土和箍筋的应力发展可以看出, 圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点在弯矩作用下, 节点核心区的混凝土在(1点)在钢管断开处沿着对角线方向产生压应力, 随着荷载的增加, 节点区混凝土沿着对角线方向形成斜压杆(2点), 随着水平荷载的不断增加, 混凝土斜压杆范围扩大(3点)。最后节点区混凝土几乎全部受压(4点)。



(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)

(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)

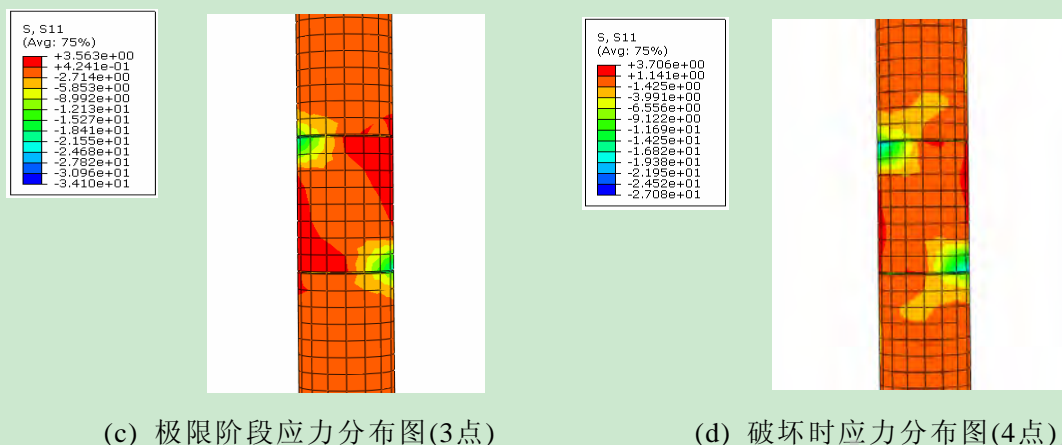
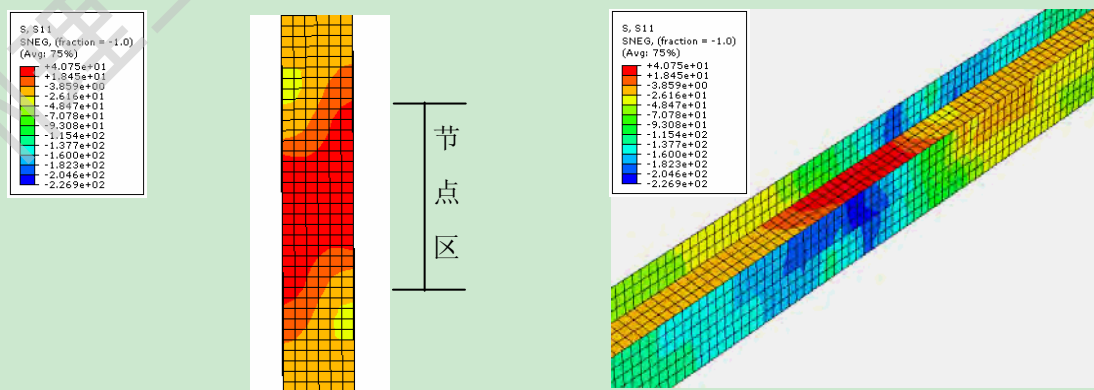
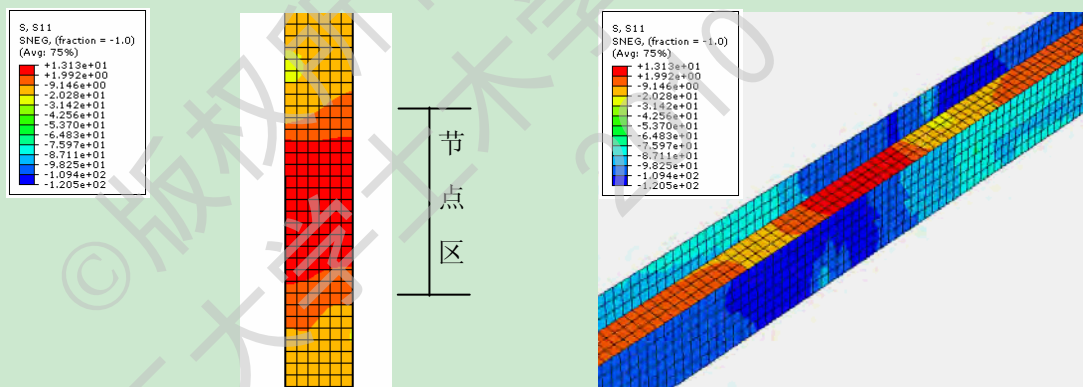
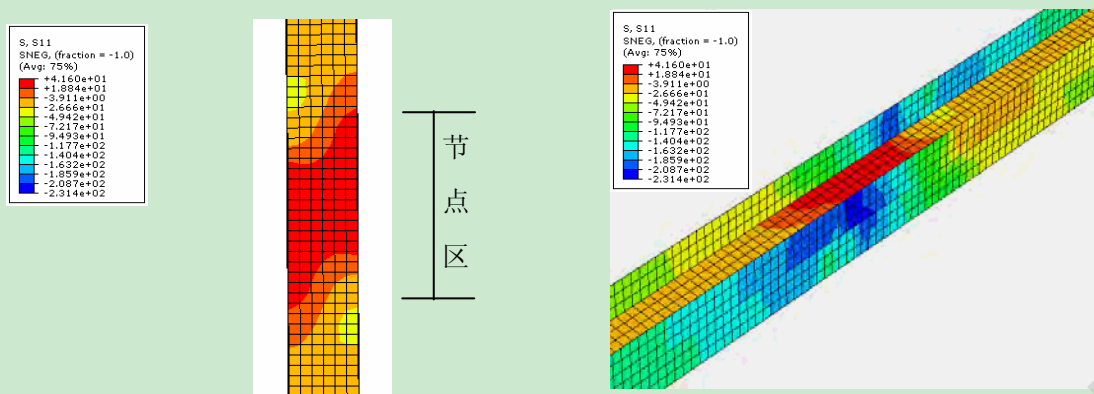


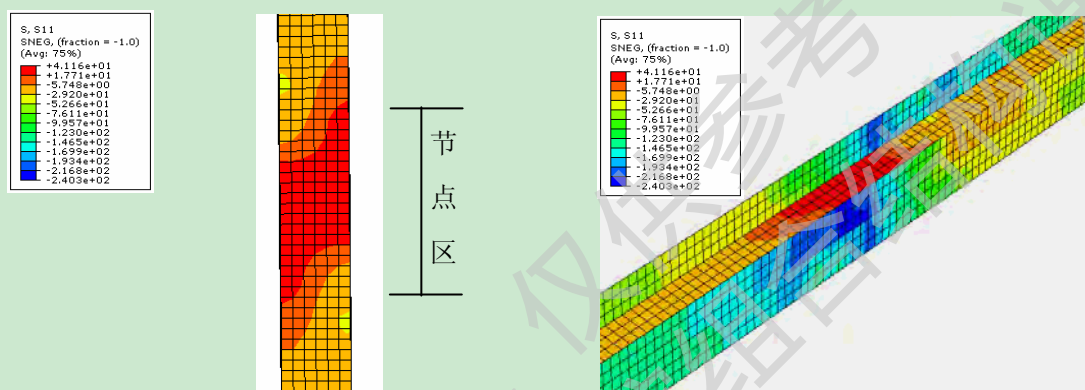
图2.13 圆形截面节点区混凝土及箍筋应力分布发展图

图 2.14 给出了的节点区型钢剪切应力的分布及发展，由节点型钢应力云图可知，圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点，在弯矩和剪力的作用下，由型钢腹板主要承担剪力，翼缘也受力，但承担剪力作用较小。在受荷初期，型钢腹板受剪，受剪区域近似于正方形此时翼缘受拉（1 点）。随着水平荷载增大，节点核心区型钢腹板剪力开始发展，受剪区域增大，逐渐由节点区向柱内发展，柱内翼缘一侧受拉，一侧受压（2 点）。随着荷载继续增大，型钢腹板抗剪承载力达到最大（3 点）。最后随着节点的破坏，型钢受剪继续增大（4 点）。





(c) 极限阶段剪力分布图(3点)



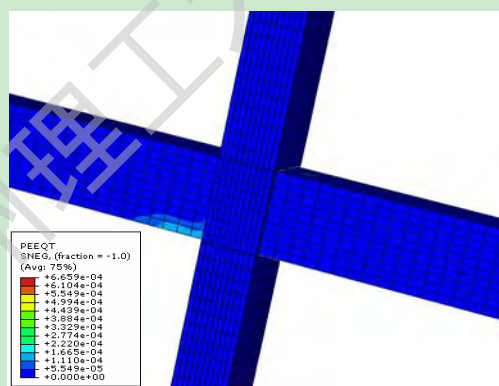
(d) 破坏时剪力分布图(4点)

图2.14 圆形截面节点区型钢、腹板应力分布发展图

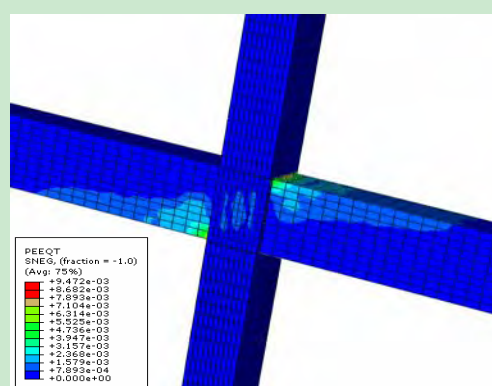
## 2、方形截面节点各组成部分应力发展

### (1) 方形截面节点的裂缝发展

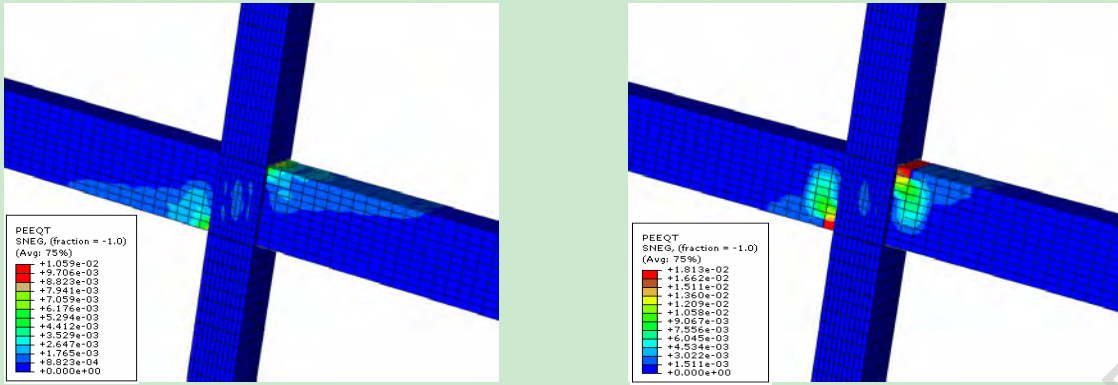
由图2.15可知，方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的应力发展与圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点相似；在1点时，梁端混凝土形成初裂，随着水平荷载的增加，钢筋逐渐受拉，在2点时，钢筋开始屈服，梁端等效塑性拉应变增大，在3点时，混凝土等效塑性拉应变继续增加，此时节点达到极限荷载，在4点时，裂缝增大，节点已然破坏。



(a) 初始裂缝时裂缝分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段裂缝分布图(2点)



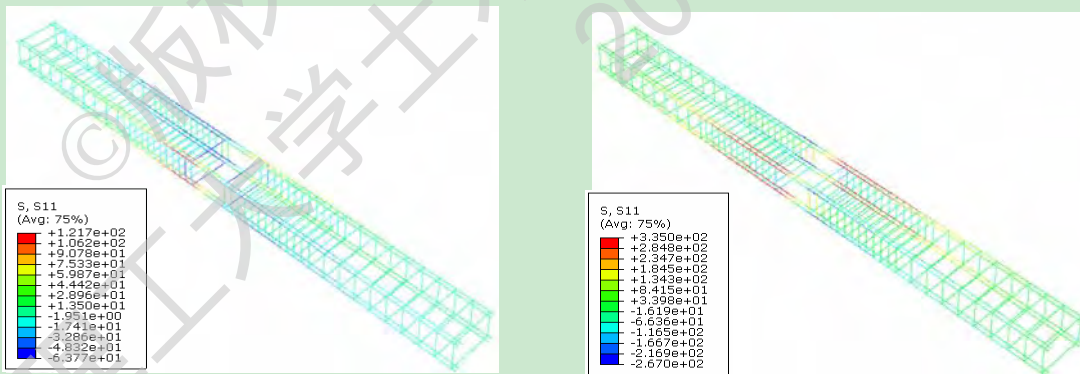
(c) 极限阶段裂缝分布图(3点)

(d) 破坏时裂缝分布图(4点)

图2.15 方形截面节点混凝土裂缝(等效塑性应变)发展分布图

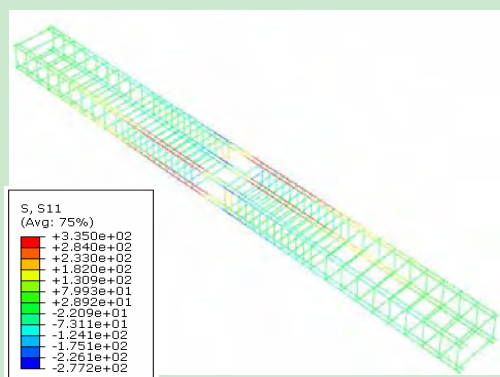
(2) 方形截面节点梁、柱钢筋及钢管应力发展

图 2.16 的 (1) 给出了方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点中钢筋混凝土梁中钢筋的变形发展, 与圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点类似, 钢筋随着梁端混凝土的开裂钢筋受拉逐渐开始受力, 并逐渐增大, 钢筋开始屈服 (2 点), 随着荷载的增加, 钢筋受力逐渐增大 (3 点), 最终进入强化阶段 (4 点)。图 2.16 的 (2) 给出了方圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点梁中钢筋的变形发展, 随着梁中纵向受力钢筋在 2 点已经开始屈服, 3、4 点梁中纵筋继续受拉, 但节点区钢筋却并未屈服, 节点并未受压、弯破坏。图 2.16 的 (3) 给出了给出了钢管约束混凝土柱上钢管的应力分布发展, 随着荷载的增加, 钢管中部受力增加。由于节点受到轴压力和弯矩的共同作用, 钢管的受压区的应力大于受压区应力。在受力过程中, 钢管并未达到屈服。

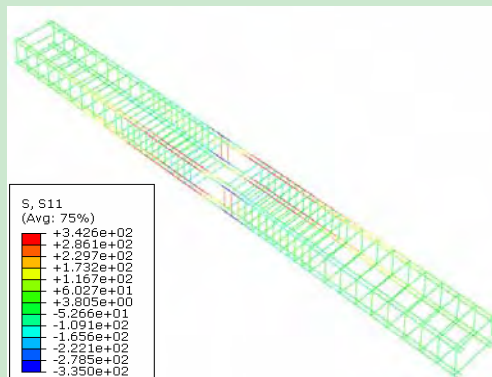


(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)

(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)

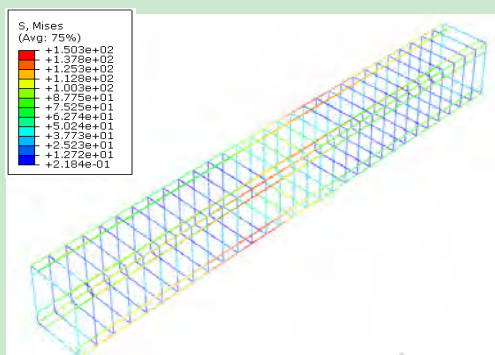


(c) 极限阶段应力分布图(3点)

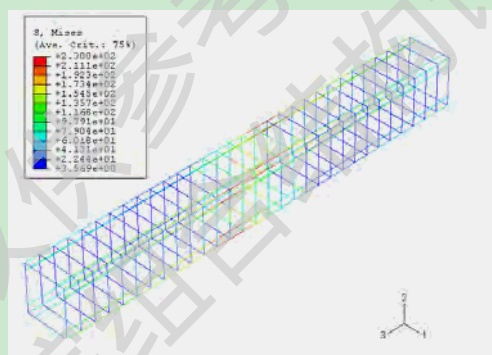


(d) 破坏时应力分布图(4点)

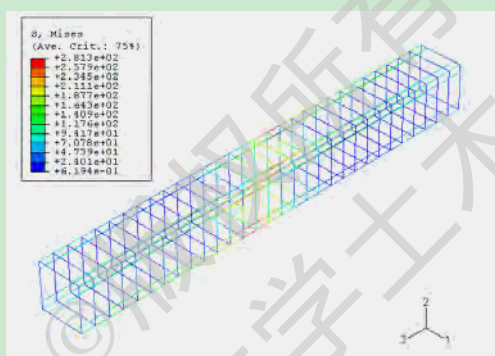
(1) 方形截面节点钢筋混凝土梁中钢筋应力分布图



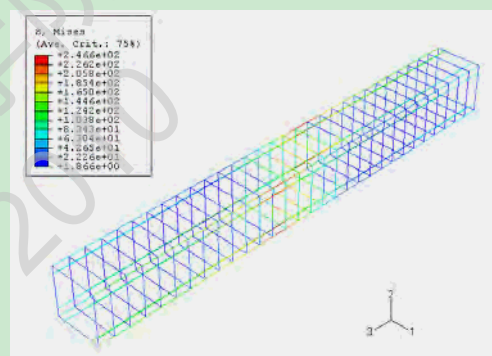
(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)

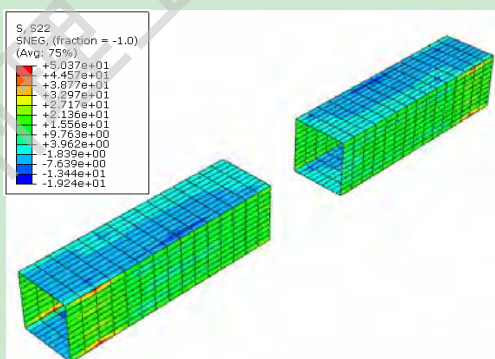


(c) 极限阶段应力分布图(3点)

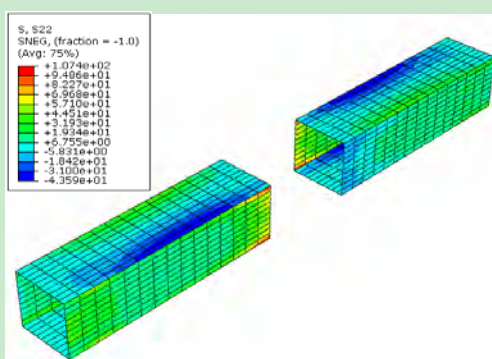


(d) 破坏时应力分布图(4点)

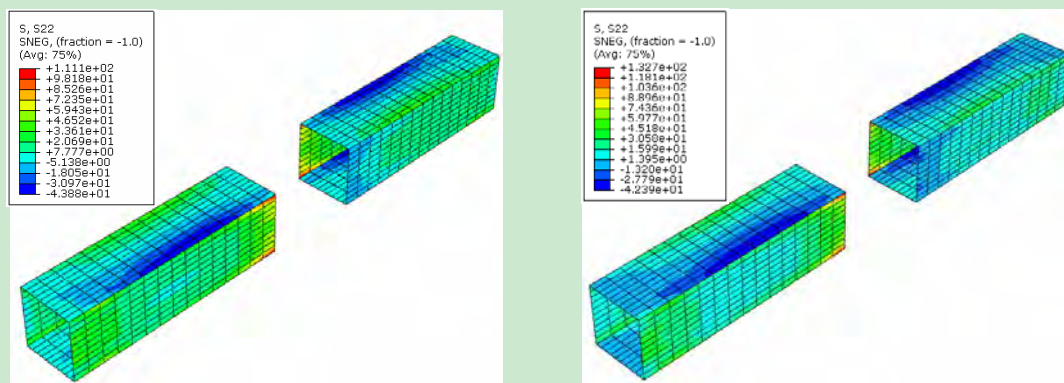
(2) 方形截面节点区钢筋应力分布图



(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)



(c) 极限阶段应力分布图(3点)

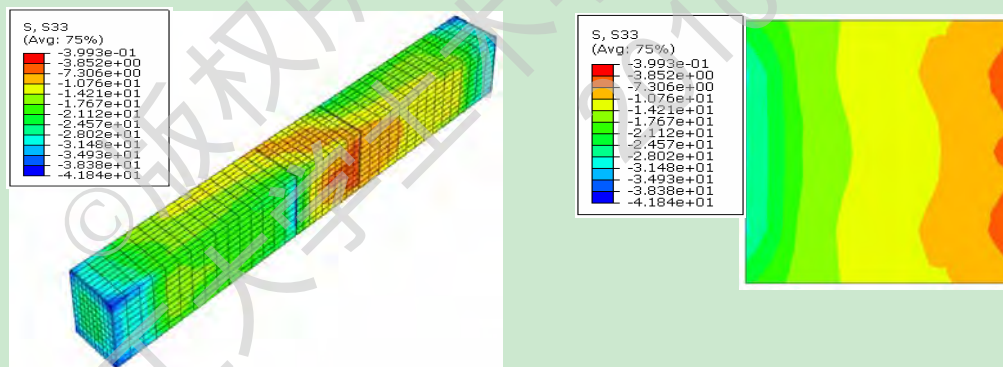
(d) 破坏时应力分布图(4点)

(3) 方形截面节点钢管应力分布图

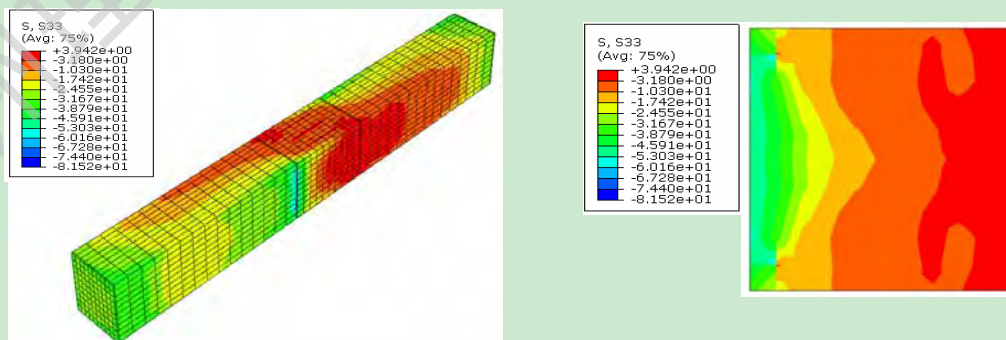
图2.16 方形截面节点各部分应力分布图

### (3) 节点区混凝土变形

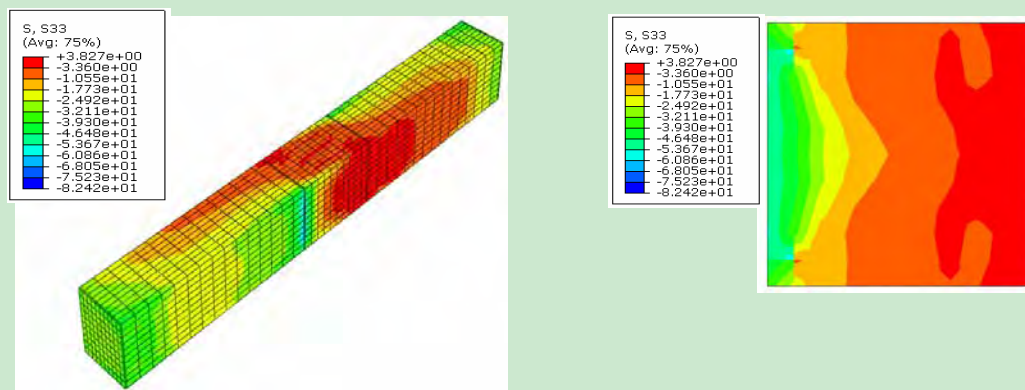
由图 2.17 核心区混凝土截面应力分布可知，方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点受力与圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点类似，其节点区混凝土，随着柱顶水平荷载的增加，由全截面受压发展到一侧受拉，一侧受压。由柱子的应力分布图可以看出，节点区角点逐渐开始受拉，但柱子里的混凝土还处于受压阶段（1点）。方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点沿梁上表面随着水平加载的增加，梁钢筋屈服时，应力变化则有些不规则主要原因是应为节点区型钢尺寸大，对其受力有影响。由于施加的水平荷载，使节点核心区的混凝土沿对角线形成斜压杆，随着水平荷载的增加，混凝土斜压杆承担的剪力越来越大。



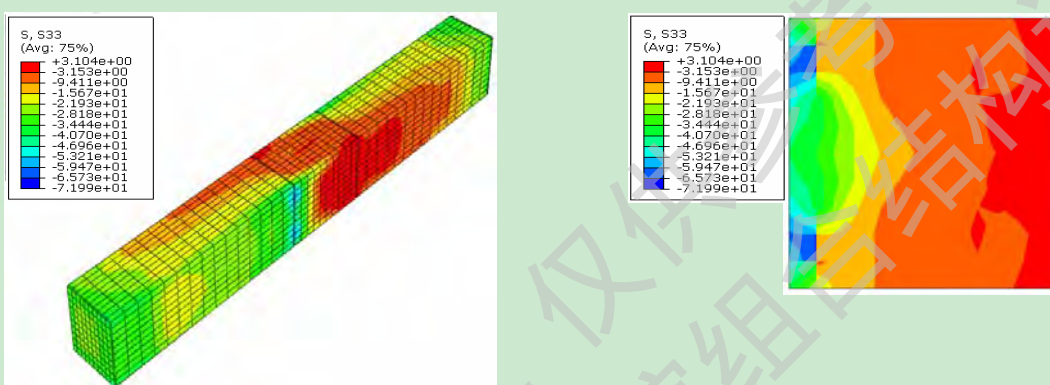
(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)



(c) 极限阶段应力分布图(3点)

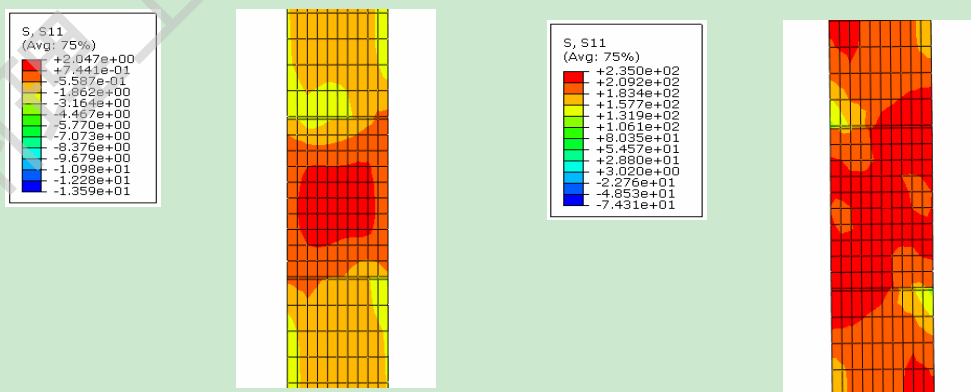


(d) 破坏时应力分布图(4点)

图2.17 方形截面节点混凝土的纵向变形

#### (4) 节点核心区剪切应力

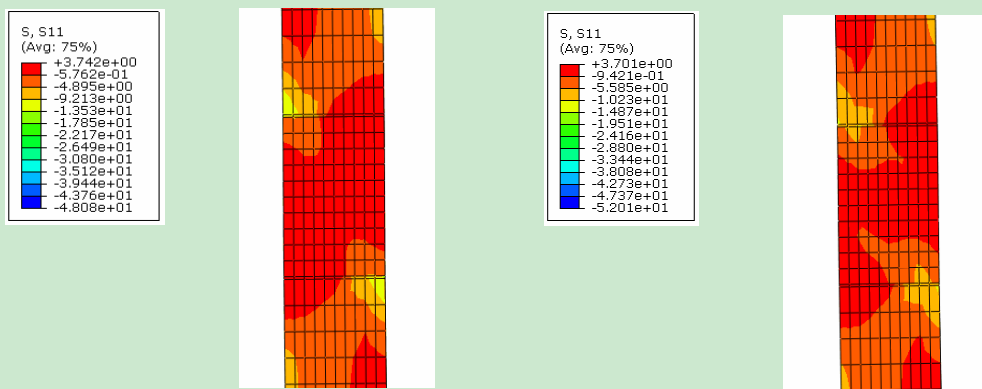
由图 2.18 给出的节点区混凝土剪切应力的分布及发展可知，方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点所受剪与圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点基本相似。从节点区各构件的应力发展可以看出在弯矩和剪力的作用下，节点混凝土开始受剪（1 点），随着水平荷载的增加，节点受剪作用增大，节点区混凝土形成斜裂缝，将混凝土分成斜压杆（2 点），水平荷载继续增大，斜压杆宽度增大（3 点），最终由于梁端塑性铰的形成，节点破坏。在此过程之中箍筋受力逐渐增大，但箍筋受力不大，原因是型钢承担了很大的剪力。



(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)

(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)



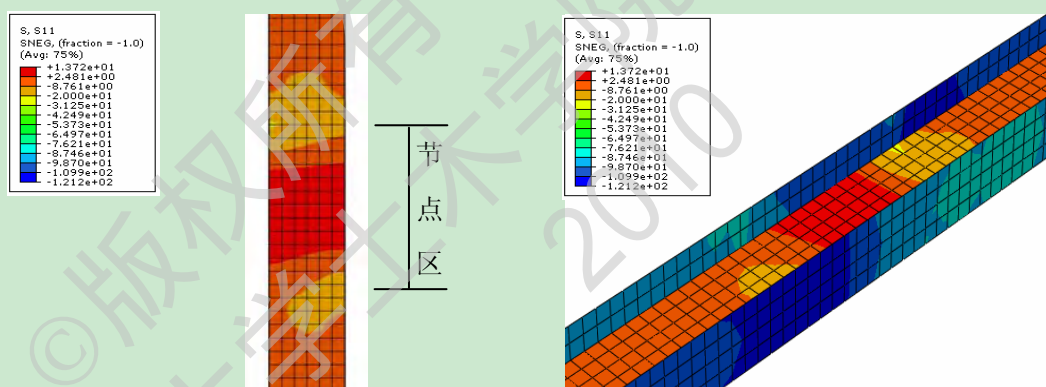


(c) 极限阶段应力分布图(3点)

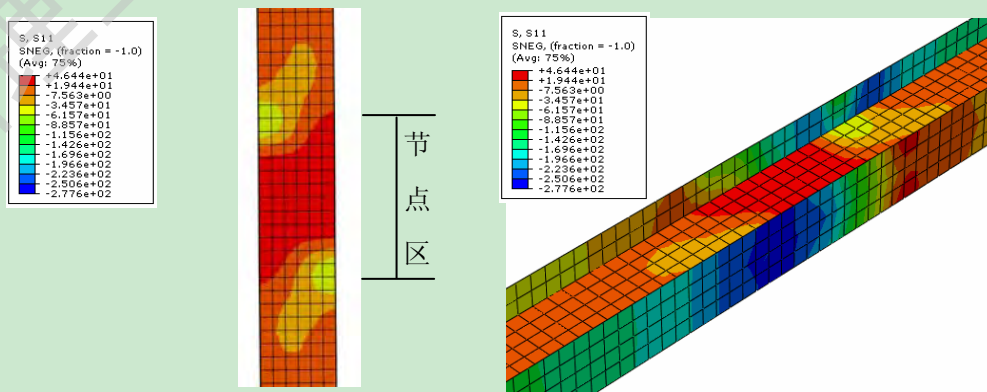
(d) 破坏时应力分布图(4点)

图2.18 方形截面节点区混凝土及箍筋应力分布发展图

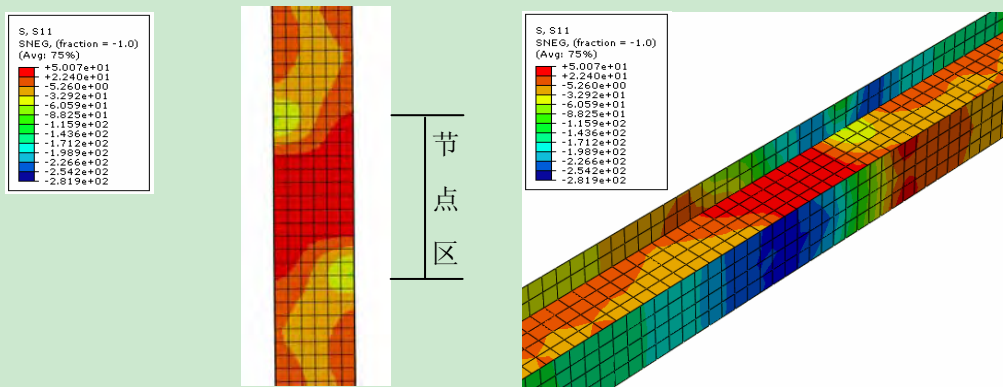
图 2.19 给出了的节点区型钢剪切应力的分布及发展可知，与圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点类似。从节点区各构件的应力发展可以看出，在弯矩和剪力的作用下，节点型钢开始受剪，由图可知型钢腹板承担主要的剪力，翼缘也受力，但承担剪力作用较小（1 点）。随着水平荷载进一步增加，节点核心区型钢腹板剪力开始发展，腹板受剪且作用增大，翼缘受剪也增大，但翼缘的贡献很小（2 点）。荷载继续增大，型钢腹板抗剪承载力达到最大（3 点）。随着节点的破坏，型钢受剪继续增大（4 点）。



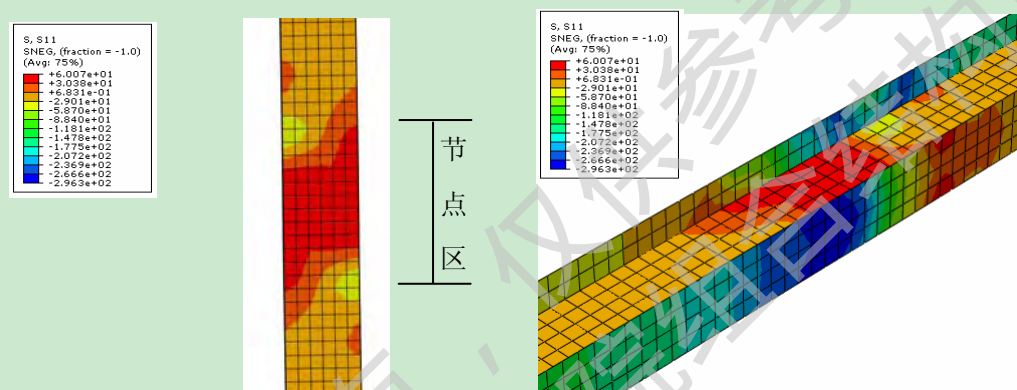
(a) 初始裂缝时应力分布图(1点)



(b) 裂缝贯通阶段应力分布图(2点)



(c) 极限阶段应力分布图(3点)



(d) 破坏时应力分布图(4点)

图2.19 方形截面节点区型钢应力分布发展图

## 2.5 小结

本章主要对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了理论分析,主要工作如下:

(1) 本文运用ABAQUS通用有限元软件,对已有的钢管混凝土构件,钢管约束混凝土构件,钢筋环绕式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点和钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了合理的模拟,并且理论计算与试验结果总体上吻合良好,在此基础上对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点进行了有限元模拟。

(2) 基于此有限元模型,对典型钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行可分析,对其整体以及各个组成部分,在不同加载特征点时的受力特性进行了分析。分析表明:钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点这种新型的节点有良好的受力性能,其节点受力性能类似与型钢混凝土梁柱节点。

### 第三章 参数分析及承载力实用计算方法

#### 3.1 概述

由前面的分析，可以看出利用有限元软件 ABAQUS 分析是合适的，可以通过此模型对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行非线性分析，从而深入了解节点的力学性能和工作机理，但该分析方法还是较为复杂，不便于工程应用。因此，本章利用非线性有限元程序对影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的承载力各主要因素进行参数分析，确定影响其承载力的主要因素及其影响规律，进一步为确定钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的承载力提供条件，以为工程实践提供参考。

节点的弯矩、转角计算主要本文中节点弯矩和梁柱相对转角选取方法如下：

(1) 节点弯矩 ( $M_{uj}$ )：根据节点梁柱转角主要是由节点弯矩引起的，节点弯矩按照下列公式确定：

$$M_{uj} = P(H/2 - h/2) + N_0(\delta_u - \delta_m) \quad (3.1)$$

上式中， $P$ —为柱顶水平荷载；

$N_0$ —为作用于柱顶的轴压力；

$H$ —为柱的高度；

$h$ —为梁的高度；

$\delta_u$ —为柱顶的水平位移；

$\delta_m$ —为节点核心区水平位移。

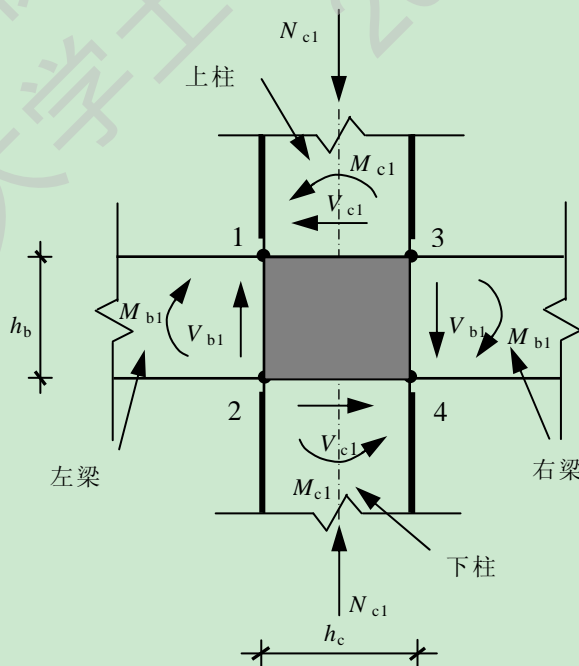


图3.1 节点核心区受力及相对转角计算位置

(2) 梁柱相对转角 ( $\theta$ ) 对于钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点，由于柱

子转角相对较小，节点转角主要有梁端所受弯矩产生。节点域受弯变形，在梁端距柱不远的地方混凝土开裂，钢筋屈服，产生塑性铰。节点转角应为屈服后梁柱的夹角，即  $\theta_{uj}=\theta_b-\theta_c$ ； $\theta_j$  为节点转角， $\theta_b$  为梁转角， $\theta_c$  为柱转角。在本文的参数分析中柱转角很小，节点转角  $\theta_{uj}$  可近似的定义为梁上下翼缘水平位移只差  $\delta$  除以梁高  $h$ ，即  $\theta_{uj}\approx\tan\theta_{uj}=\delta/h$ 。

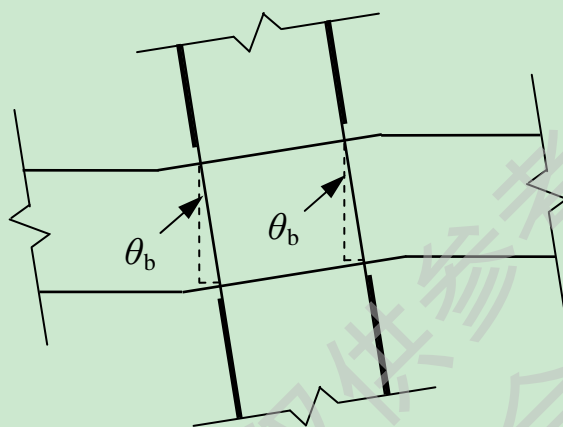


图3.2 节点局部屈曲

### 3.2 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点弯矩转角关系参数分析

影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点弯矩-转角关系曲线的因素可能有：节点区的混凝土强度、节点区的含钢率、节点区的型钢强度、轴压比、梁柱弯矩比、梁柱线刚度比、长细比、梁混凝土强度、梁钢筋强度等。以下采用典型试件来分析以上各参数对弯矩-转角关系曲线的影响规律。

参数分析时，依据工程常用参数范围进行：

材料参数：

柱混凝土 ( $f_{cu}$ )：40、60、80MPa

梁混凝土 ( $f_{cu}$ )：40、50、60MPa

梁柱钢筋强度 ( $f_y$ )：HPB235、HRB335、HRB400

型钢强度 ( $f_s$ )：Q235、Q345、Q420

几何参数：

梁柱线刚度比 ( $k=(E_b I_b) H / (E_{sc} I_{sc}) L$ )：0.25、0.5、0.75、0.1

梁柱弯矩比 ( $k_m=M_{ub}/M_{uc}$ )：0.4、0.6、0.8

柱长细比 ( $\lambda$ )：25、36、48

荷载参数：轴压比 ( $n$ )：0.2、0.4、0.6

截面类型：方形、圆形

型钢截面：H型钢、十字型钢、箱形型钢

本文分析的钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（内配 H 型钢），按“强柱弱梁，强节点”的要求设计。首先要确定典型构件。典型构件的基本信息如下：

圆钢管约束混凝土柱采用  $D \times t = 400 \times 9.3 \text{mm}$ , 柱截面含钢率  $\alpha = 0.1$ , Q345 钢材, 柱 C60 混凝土, 选用 HRB335 级钢筋, 节点区配置工字型钢尺寸截面尺寸  $200 \times 200 \times 20 \times 20$ , 柱钢筋直径  $8 \phi 28$ , 箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ , 型钢及柱钢筋深入柱中两倍梁高。钢筋混凝土梁采用 C40 混凝土, 选用 HRB335 级钢筋, 梁钢筋柱  $4 \phi 25$ , 梁端加密区箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ , 其余为  $\phi 8 @ 200$ 。柱高  $H = 3.6 \text{m}$ , 梁跨度  $L = 6.6 \text{m}$ , 轴压比取 0.4。

方钢管约束混凝土柱采用  $B \times t = 400 \times 9.3 \text{mm}$ , 柱截面含钢率  $\alpha = 0.1$ , Q345 钢材, 柱 C60 混凝土, 选用 HRB335 级钢筋, 节点区配置工字型钢尺寸截面尺寸  $280 \times 200 \times 20 \times 20$ , 柱钢筋直径  $12 \phi 28$ , 箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ , 型钢及柱钢筋深入柱中两倍梁高。钢筋混凝土梁采用 C40 混凝土, 选用 HRB335 级钢筋, 梁钢筋柱  $8 \phi 28$ , 梁端加密区箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ , 其余为  $\phi 8 @ 200$ 。柱高  $H = 3.6 \text{m}$ , 梁跨度  $L = 6.6 \text{m}$ , 轴压比取 0.4。

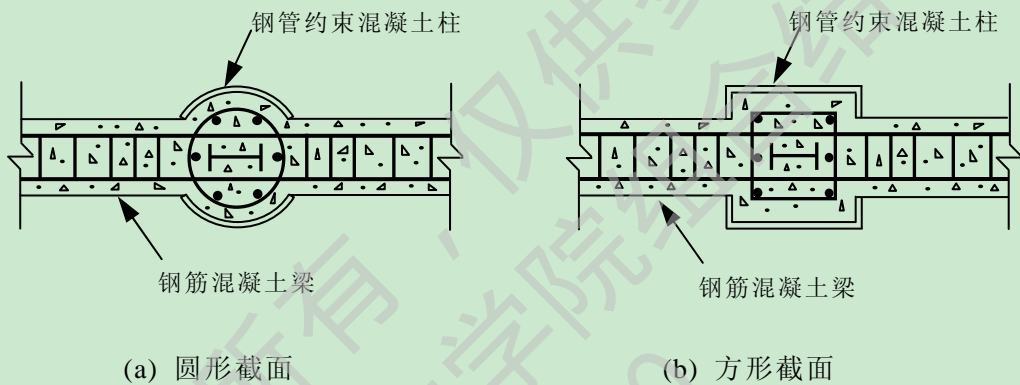


图 3.3 钢管约束混凝土柱节点横截面

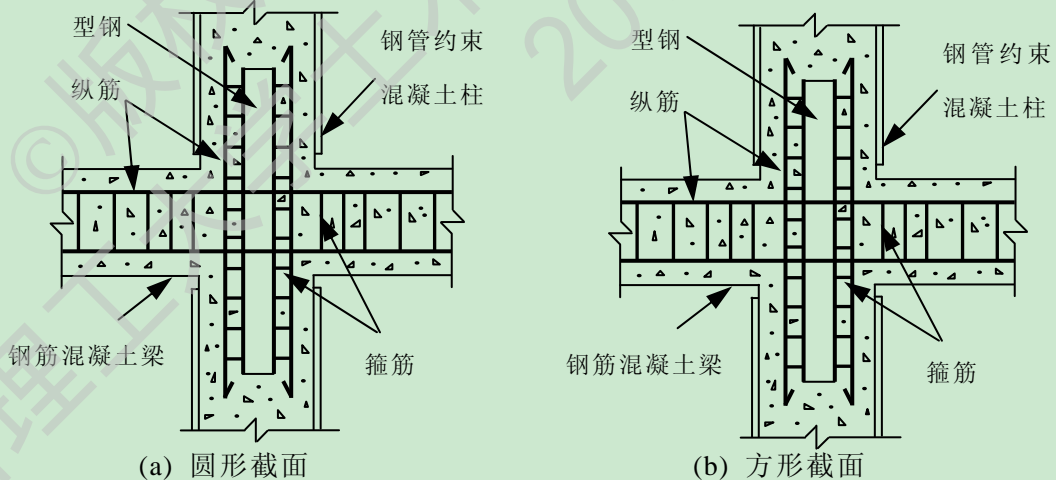


图 3.4 钢管约束混凝土柱节点

### 3.2.1 梁柱弯矩比

图 3.5 给出了梁柱弯矩比对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点弯矩-转角曲线的影响。从图中可以看出, 对圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的初始刚度随梁柱弯矩比的增大而增大, 节点的抗弯承载力提高, 曲线随梁柱弯矩比的增大变化不大

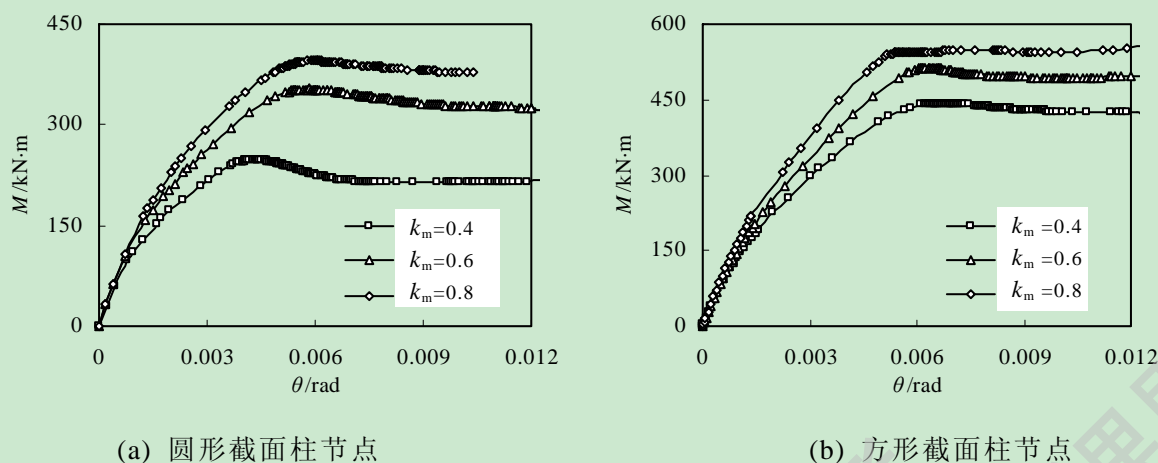


图3.5 梁柱弯矩比对节点抗弯承载力的影响（内配H型钢）

### 3.2.2 梁柱线刚度比柱

图 3.6 显示了梁柱线刚度比对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的影响，对于圆钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点随着线刚度的增大，初始刚度增大很多，承载力也略有提高，说明梁对柱的约束增强，分配到梁端的弯矩也随线刚度比的增大而增大，塑性铰出现提前。

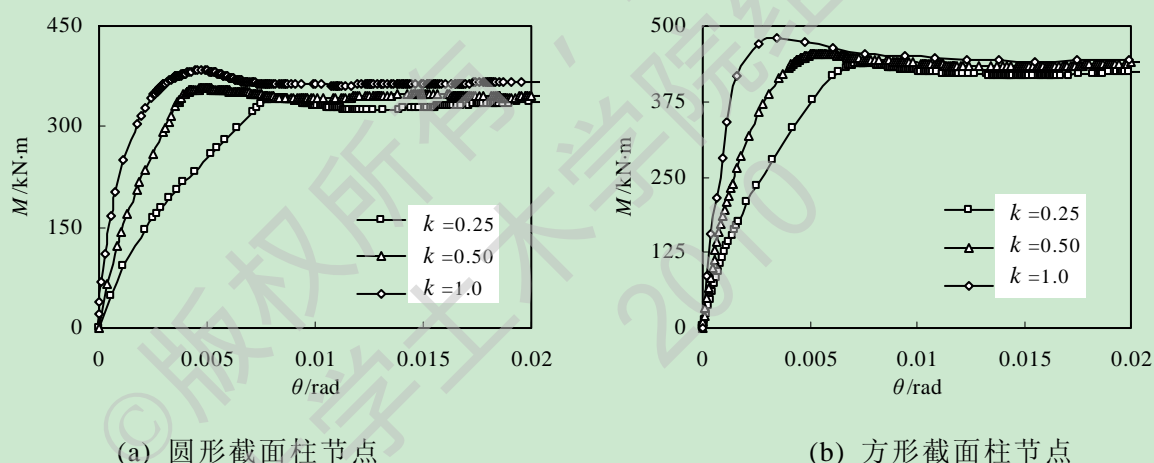
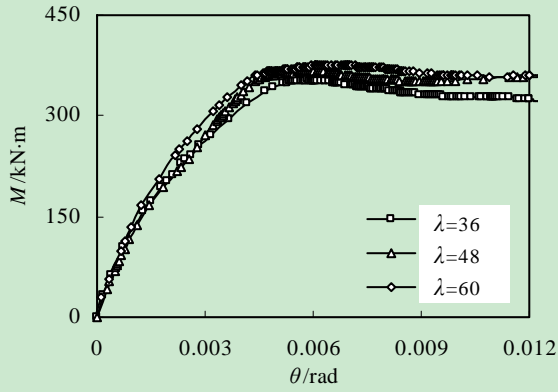


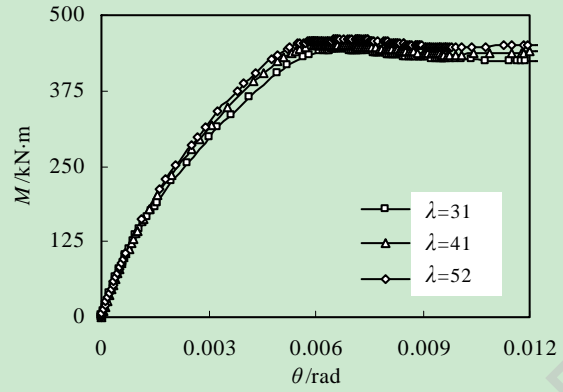
图3.6 梁柱线刚度比对节点抗弯承载力的影响（内配H型钢）

### 3.2.3 柱长细比

图 3.7 给出了柱长细比对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的影响。从图中可以看出，随着长细比的增加，初始刚度基本不变，略有提高，节点的抗弯承载力也有增大。曲线形状变化不大。这主要是因为随着柱长细比的增加，柱高度虽然增加，但节点的水平极限承载力会降低，还有由轴力引起的二次弯矩也会增大，另外还由于本文是强柱弱梁节点，梁的抗弯承载力起控制作用。所以柱长细比对节点的抗弯承载力影响不大。



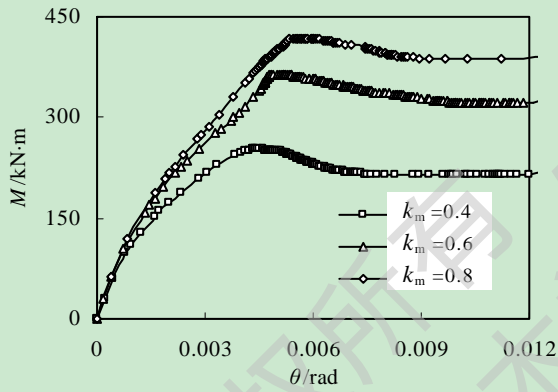
(a) 圆形截面柱节点



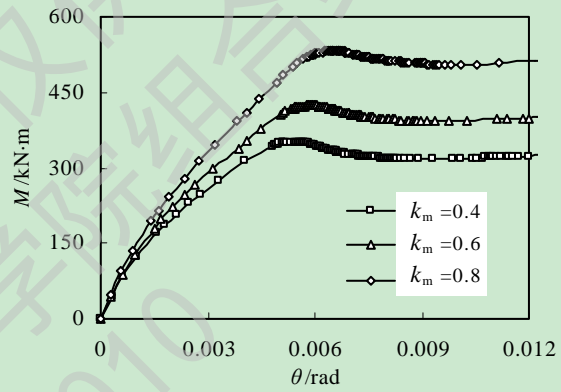
(b) 方形截面柱节点

图3.7 柱长细比对节点抗弯承载力的影响（内配H型钢）

钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（内配十字型钢和箱形型钢）的节点弯矩-转角曲线如下。由分析可知，影响节点内配置十字型钢和箱形型钢的节点因素同节点内配置 H 型钢的节点，且影响规律相同，在此不再赘述。

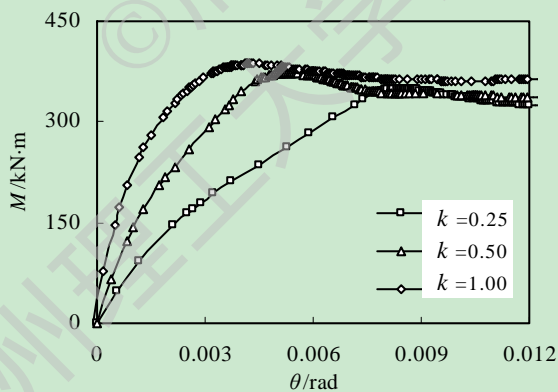


(a) 圆形截面柱节点

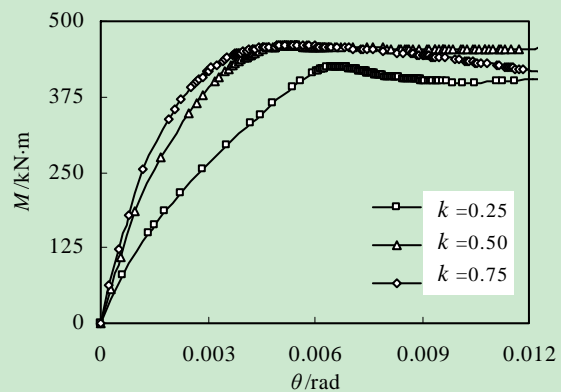


(b) 方形截面柱节点

图3.8 梁柱弯矩比对节点抗弯承载力的影响（内配十字型钢）

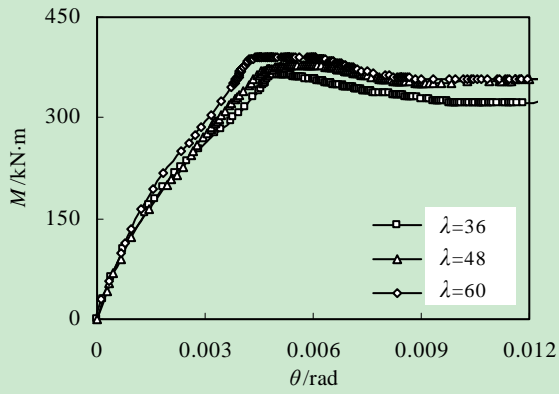


(a) 圆形截面柱节点

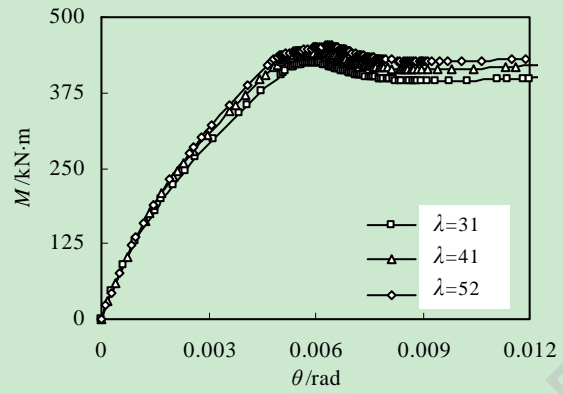


(b) 方形截面柱节点

图3.9 梁柱线刚度比对节点抗弯承载力的影响（内配十字型钢）

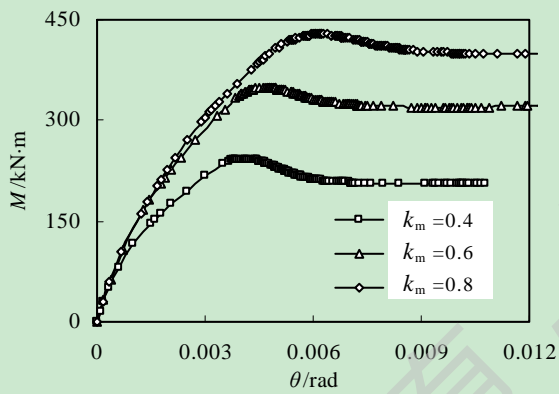


(a) 圆形截面柱节点

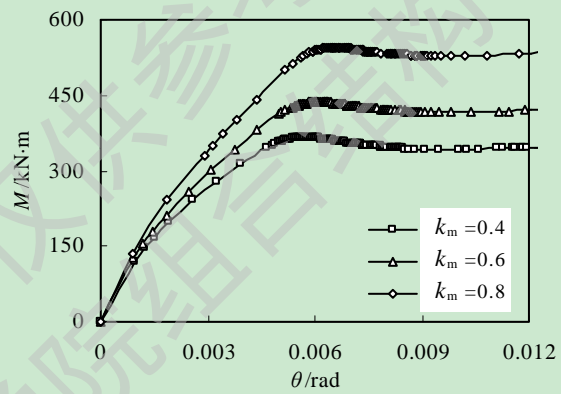


(b) 方形截面柱节点

图3.10 柱长细比对节点抗弯承载力的影响（内配十字型钢）

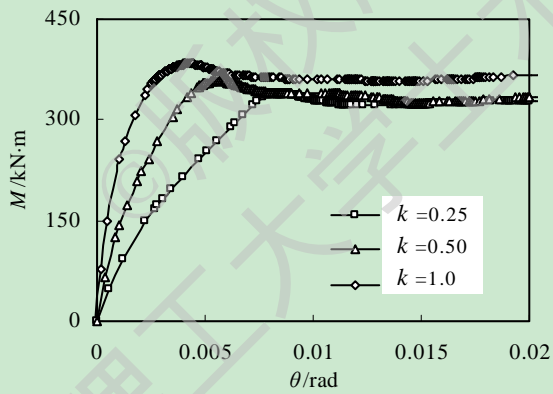


(a) 圆形截面柱节点

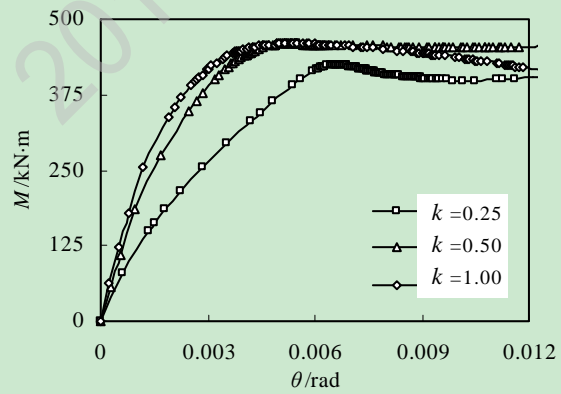


(b) 方形截面柱节点

图3.11 梁柱弯矩比对节点抗弯承载力的影响（内配箱形型钢）



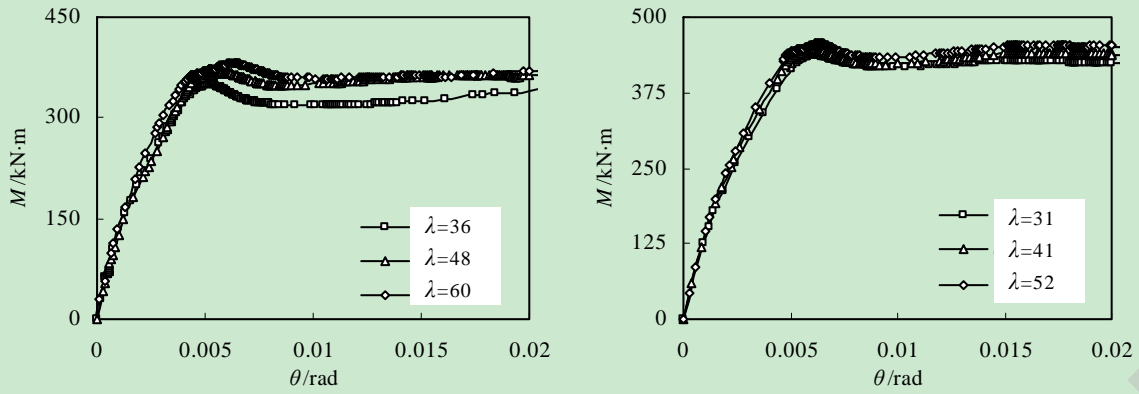
(a) 圆形截面柱节点



(b) 方形截面柱节点

图3.12 梁柱线刚度比对节点抗弯承载力的影响（内配箱形型钢）





(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

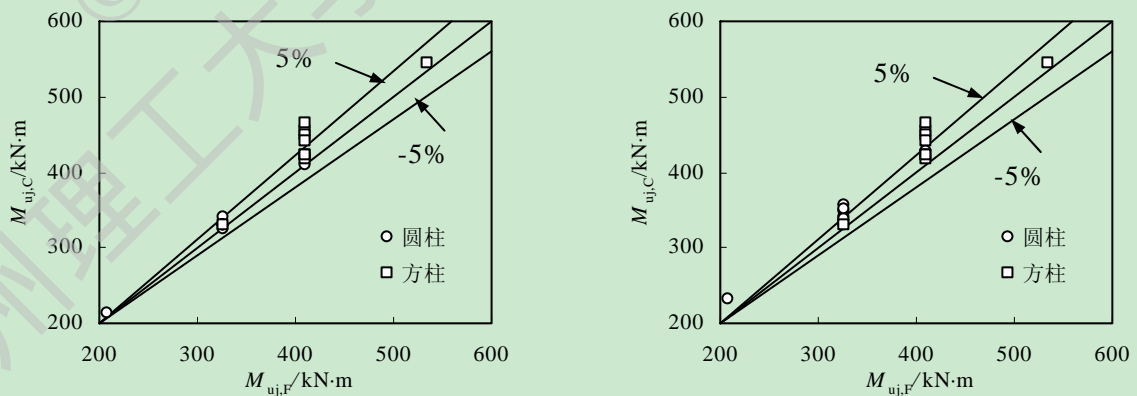
图3.13 柱长细比对节点抗弯承载力的影响（内配箱形型钢）

### 3.3 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗弯承载力计算方法

本节主要是在上节有限元分析的基础上，根据节点模型的传力机理以及各主要参数对节点抗弯承载力的影响规律，提出节点抗弯承载力计算方法。由上述参数分析可知，影响节点抗弯承载力主要是梁端弯矩，梁柱线刚度比、柱长细比对节点承载力略有影响。由于本文的梁柱节点为“强柱弱梁、强节点”，因此节点的最终破坏主要表现为梁破坏。本文取梁的塑性弯矩 $M_{ub}$ 为节点的极限抗弯承载力 $M_{uj}$ 。

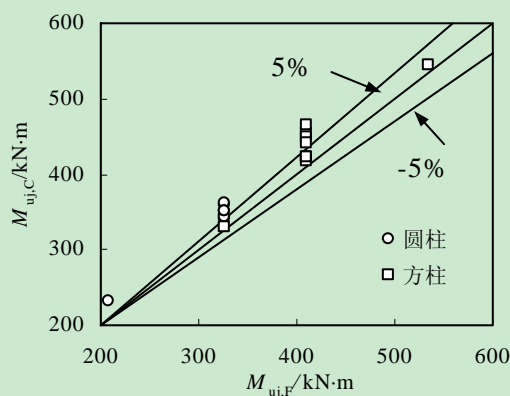
$$M_{uj} \leq \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y ' A_s ' (h_0 - a_s ' ) \quad (3.2)$$

图3.14对节点抗弯承载力的简化计算值与有限元计算值进行了比较。表明：本文采用《混凝土结构设计规范》<sup>[76]</sup>算出的抗弯承载力的简化计算公式有较好的精确性。其中， $M_{uj,C}$ 和 $M_{uj,F}$ 分别为按简化公式计算和有限元计算的数值。



(a) 节点内配H型钢

(b) 节点内配H型钢



(c) 节点内配箱形型钢

图 3.14 节点抗弯承载力的简化计算与有限元计算比较

### 3.4 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗剪性能分析

梁柱节点是框架结构中连接梁、柱构件的关键部位。钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点类似于型钢混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的形式，主要由混凝土、箍筋和型钢抗剪。在竖向荷载和水平荷载作用下，节点域处于压、弯、剪复合应力状态，其中的混凝土、箍筋和型钢三部分有机的联系传递内力。对于核心区来说，主要承受剪力和压力。在强烈地震作用下，梁、柱通过节点传递内力，节点核心区存在较大的剪力，往往容易发生节点核心区的剪切破坏，结构抗震设计中“强节点弱构件”的设计原则，充分体现了节点可靠性对抗震设计的重要性。因此，保证节点具有足够的抗剪承载力对保证结构可靠工作具有重要意义。

#### 3.4.1 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁柱节点的受力性能分析

钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的受力同型钢混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的形式相同，其承受梁端、柱端传来的轴力、弯矩和剪力，处于复合受力状态。节点的受剪元件有型钢、混凝土和箍筋，而外力产生的效应在各抗力元件之间传递、分配，进而材料达到强度破坏。节点域的剪力传递方式如下图 3.15 所示。

##### (1) 型钢

节点核心区参与工作的型钢包括工字钢的翼缘和腹板。而在本文的节点中，型钢承担着部分轴向力、剪力和弯矩，由于型钢腹板的抗侧刚度要比翼缘大得多，故型钢承担的剪力主要由腹板承担；翼缘因相对于腹板高度很薄，抗剪能力较低。在节点受剪承载力计算中，考虑到常用工字钢对抗剪能力的提高影响不大和它的作用主要表现在对后期变形能力的影响上，可不考虑翼缘框的抗剪作用。

##### (2) 混凝土

初裂前，型钢混凝土节点中的混凝土主要起抗剪作用，随着荷载的增加，沿节点对角线方向产生斜裂缝，形成斜压杆，故钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节

点中的混凝土与钢筋混凝土节点中的相似，为斜压杆机理。

### (3) 箍筋

在钢筋混凝土节点中，箍筋的作用是抗剪、约束混凝土和防止纵筋压屈。在本文节点内，箍筋起着固定纵筋位置和防止其压屈的基本作用，在施工阶段和在使用阶段，都是不可或缺的，箍筋的约束作用对节点承载能力和变形的提高也会有显著影响。由第二章中典型试件分析可知，节点核心区箍筋屈服较晚，一般在腹板屈服之后。

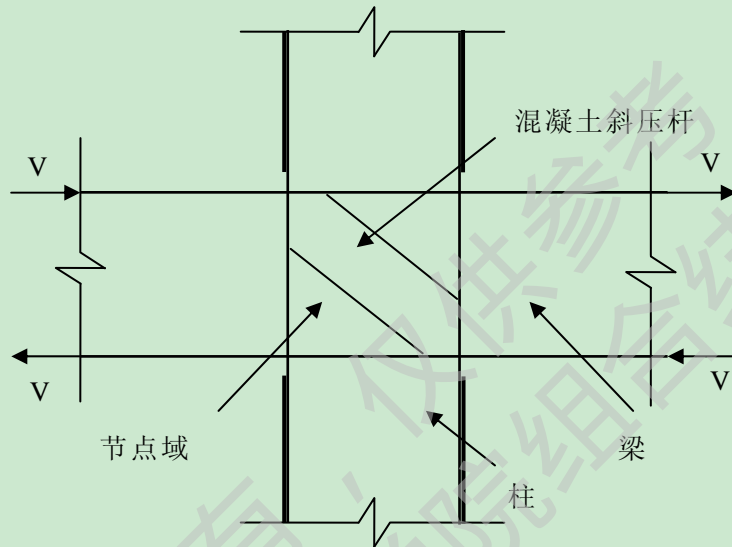


图3.15 节点域的剪力传递图

### 3.4.2 节点抗剪承载力参数分析

对于钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗剪承载力的影响，可能涉及的因素有节点混凝土强度、节点含箍率、型钢强度、型钢腹板厚度、轴压比等。故采用典型试件的分析对各可能的影响参数对进行分析，最终得出节点剪力-应变关系曲线的影响规律。

节点核心区的破坏主要是剪切破坏，故首先要求先出节点剪力及剪切应变，其剪力及剪切应变可由下列各式得出：

节点核心区剪力可由下式确定（张大旭，2000<sup>[77]</sup>）：

$$V_j = \left( \frac{M_l}{h} + \frac{M_r}{h} \right) - P = \left( \frac{R_l \cdot (L/2 - D/2)}{h} + \frac{R_r \cdot (L/2 - D/2)}{h} \right) - P \quad (3.3)$$

式中  $M_l$ 、 $M_r$  分别为节点左、右梁的弯矩， $R_l$ 、 $R_r$  分别为左、右支座反力， $L$  为梁长， $D$  为柱截面尺寸， $P$  为柱顶水平荷载。

节点核心区受剪切作用变形，钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点在荷载作用下，节点域的变形如下图3.16（唐九如，1989<sup>[78]</sup>）。

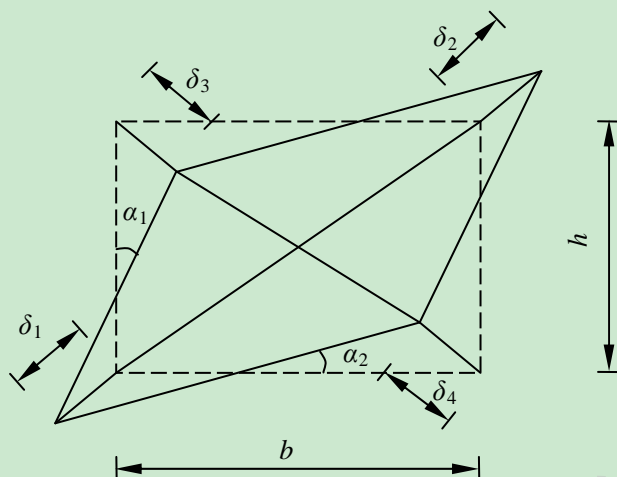


图3.16 节点剪切变形示意图

由图可知其剪力及其剪切应力可由下式求的：

$$\sin \theta = \frac{b}{\sqrt{h^2 + b^2}}, \quad \cos \theta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + b^2}} \quad (3.4)$$

$$\alpha_1 = \frac{\bar{X} \sin \theta}{h}, \quad \alpha_2 = \frac{\bar{X} \cos \theta}{h} \quad (3.5)$$

其应变为

$$\gamma_j = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) \frac{\sqrt{b^2 + h^2}}{bh} \quad (3.6)$$

式中： $b$  和  $h$  分别为柱宽和梁高。

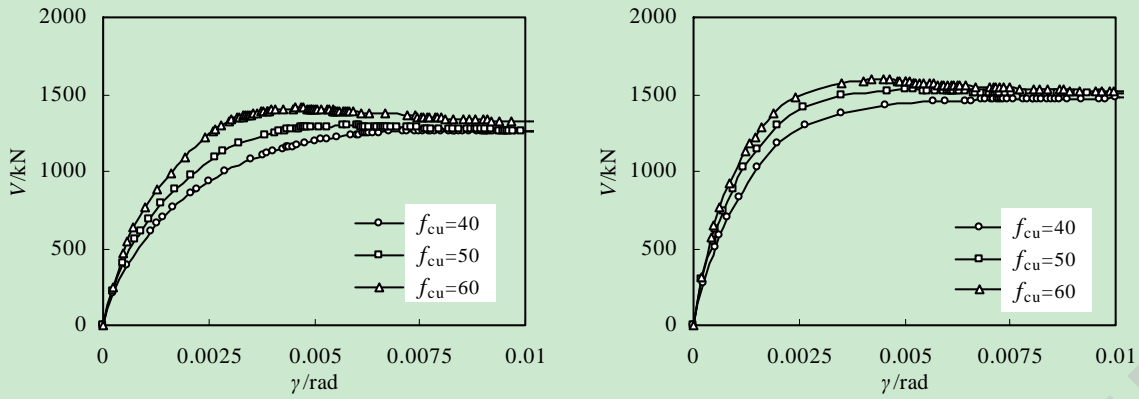
由上可知，设计钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点时使节点核心区抗剪弱一些，使其能够发生剪切破坏，这样才能得出节点的抗剪承载力。故节点核心区配置H型钢典型构件的基本信息如下：

圆钢管约束混凝土柱采用  $D \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱含钢率  $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高  $H = 3.6\text{m}$ ；钢筋混凝土梁的混凝土强度为C40，钢筋混凝土梁中钢筋对称配置双层钢筋，一侧配置  $4\phi 28$ ，箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ ，非加密区  $\phi 8 @ 200$ ，梁跨度  $L = 6.6\text{m}$ ；节点区钢筋采用  $8\phi 28$ ，箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ ，型钢尺寸  $200 \times 200 \times 20 \times 20$ ；轴压比取0.4。

方钢管约束混凝土柱采用  $B \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱含钢率  $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高  $H = 3.6\text{m}$ ；钢筋混凝土梁的混凝土强度为C40，钢筋混凝土梁中钢筋对称配置双层钢筋，一侧配置  $4\phi 28$ ，箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ ，非加密区  $\phi 8 @ 200$ ，梁跨度  $L = 6.6\text{m}$ ；节点区钢筋采用  $12\phi 28$ ，箍筋采用  $\phi 8 @ 100$ ，型钢尺寸  $280 \times 200 \times 15 \times 20$ ；轴压比取0.4。

### (1) 柱混凝土强度

图3.17给出了柱混凝土强度对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点剪力-剪切变形关系曲线。可见柱混凝土强度对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的  $V-\gamma$  影响不大，随着柱混凝土强度的增强，节点抗剪强度略有提高。



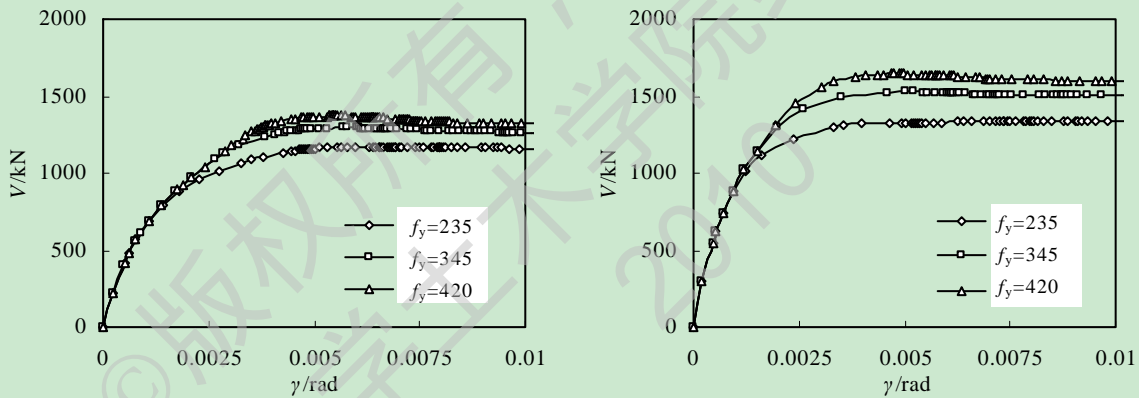
(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.17 柱混凝土强度对节点抗剪承载力的影响

(2) 节点区型钢强度

图3.18给出了节点区型钢强度对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点剪力-剪切变形关系曲线。可见节点区型钢强度对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的 $V-\gamma$ 影响，随着节点区型钢强度的增强，节点抗剪强度也有提高，但曲线后期强度增大明显。



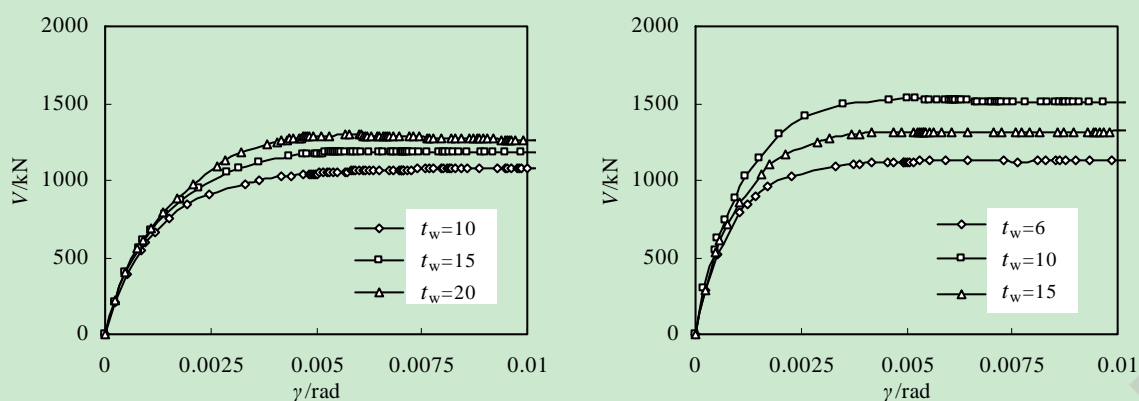
(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.18 节点区型钢强度对节点抗剪承载力的影响

(3) 型钢腹板厚度

图3.19给出了节点区型钢腹板厚度对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点剪力-剪切变形关系曲线。可见型钢腹板厚度对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的 $V-\gamma$ 影响较大，随着型钢腹板厚度的增大，剪切刚度略有增大，节点抗剪强度提高明显，且后期强度增大明显。这主要是因为节点区主要型钢腹板抗剪。



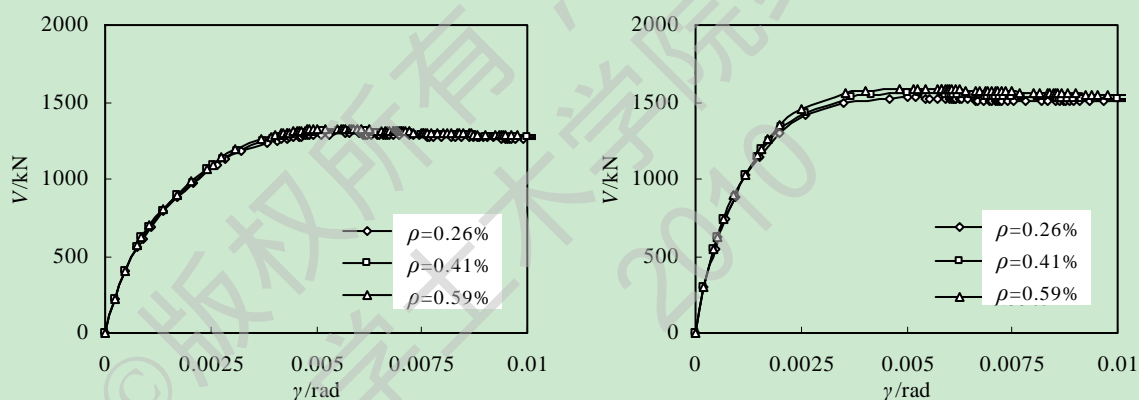
(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.19 型钢腹板厚度对节点抗剪承载力的影响

#### (4) 节点区含箍率

图3.20给出了节点区含箍率对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点剪力-剪切变形关系曲线。可见节点区含箍率对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的 $V-\gamma$ 影响不大，随着节点区含箍率的增大，节点抗剪强度几乎没有提高，这是因为型钢承担了剪力，在型钢屈服后，箍筋才能起到抗剪作用，且其提供的抗剪强度不大。



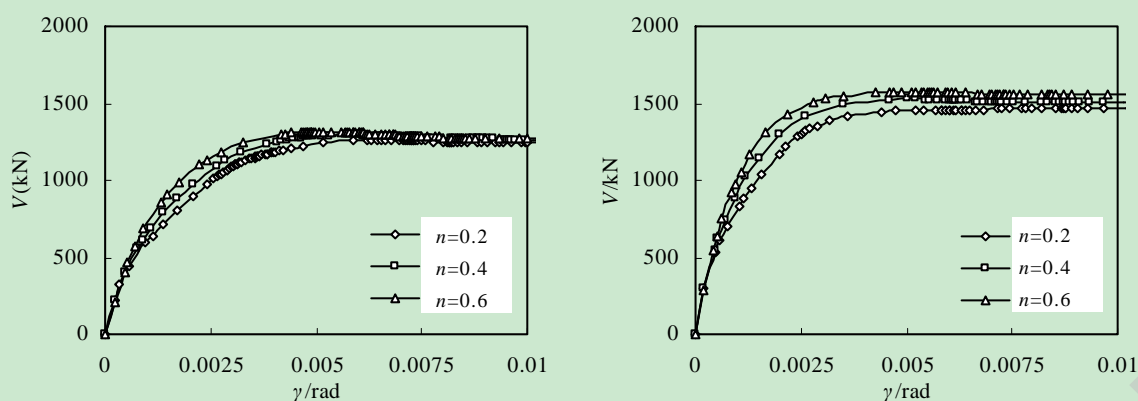
(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.20 节点区含箍率对节点抗剪承载力的影响

#### (5) 轴压比

图3.21给出了轴压比对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点剪力-剪切变形关系曲线。由图可见，轴压比对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的 $V-\gamma$ 影响，随着轴压比的增大，剪切刚度有所提高，节点抗剪强度也有提高，而且曲线后期趋于平缓，说明轴压比对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点可产生有利的影响。



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.21 柱轴压比对节点抗剪承载力的影响

### 3.4.3 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗剪承载力简化计算

钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的节点区的构造和型钢混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的构造相似。参考《钢骨混凝土结构规程 YB 9082-2006》(2007)<sup>[79]</sup>和《型钢混凝土组合结构技术规程 JGJ 138-2001》(2001)<sup>[80]</sup>,从而给出钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗剪承载力计算方法。节点抗剪承载力由混凝土、箍筋和型钢共同作用。分别考虑型钢、混凝土和箍筋的抗剪承载力,然后简单的叠加组成其节点的抗剪承载力。

$$V_j = V_{RC} + V_s = V_c + V_{sv} + V_w \quad (3.7)$$

式中： $V_{RC}$ 为钢筋混凝土的抗剪承载力； $V_s$ 为型钢的抗剪承载力； $V_c$ 为混凝土的抗剪承载力； $V_{sv}$ 为箍筋的抗剪承载力， $V_w$ 为型钢腹板的抗剪承载力。

#### (1) 型钢

根据上述情况,可暂不考虑翼缘的抗剪作用,而对型钢腹板抗剪作用作如下分析:腹板受力情况如图3.22所示,处于压剪状态。其中 $\sigma_c$ 为型钢腹板所受柱传来的轴压应力。在型钢屈服以前,处于弹性状态,则可得

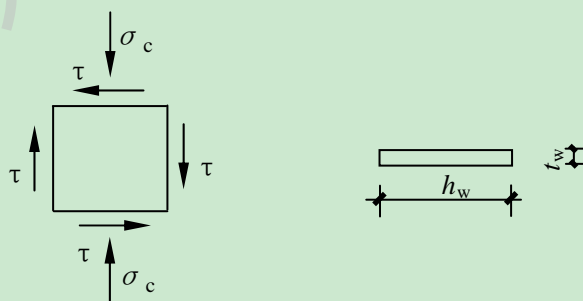


图3.22型钢腹板应力

$$\text{主拉应力: } \sigma_1 = \sigma_c / 2 + \sqrt{(\sigma_c / 2)^2 + \tau^2} \quad (3.8-a)$$

$$\text{主压应力: } \sigma_1 = \sigma_c / 2 - \sqrt{(\sigma_c / 2)^2 + \tau^2} \quad (3.8-b)$$

当节点达到极限状态前, 型钢处于剪切流动状态。由于一般型钢混凝土结构中配置的型钢为塑性的碳素钢和低合金钢, 则可应用第四强度理论建立起剪切屈服时的条件:

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3} \quad (3.8-c)$$

其中  $\sigma_y$  为简单拉伸时型钢的屈服强度。将 (3.8-a), (3.8-b) 式代入 (3.8-c) 式, 便可得到节点腹板达到屈服时的剪切屈服应力为

$$\tau_y = \sqrt{\frac{\sigma_y^2 - \sigma_c^2}{3}} \quad (3.8-d)$$

在设计中考虑材料分项系数, 故在节点承载能力设计表达式中, 用腹板的抗拉强度设计值来表达, 则有

$$\tau_y = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{f_s^2 - \sigma_c^2} \quad (3.8-e)$$

由此可见, 轴向应力无论是压应力还是拉应力, 都会使节点中型钢腹板的抗剪能力降低而产生不利影响。为计算简单、概念清晰起见, 在节点剪切计算中, 型钢的剪切屈服强度可采用纯剪时的剪切屈服强度  $1/\sqrt{3} f_s$ 。

于是即可按照下列公式计算型钢混凝土节点中型钢腹板的抗剪能力。

$$V_w = \frac{1}{\sqrt{3}} f_s t_w h_w \quad (3.9)$$

## (2) 混凝土

初裂前, 节点中的混凝土起主要抗剪作用。随着荷载增加, 沿节点对角线方向产生斜裂缝, 形成斜压杆。故节点中的混凝土与钢筋混凝土节点中的相似, 为斜压杆机理。但是, 由于箍筋及钢骨的约束作用, 使其抗剪能力比钢筋混凝土节点中的混凝土要大一些。

根据以上分析, 节点中混凝土的抗剪能力  $V_c$  可表示为

$$V_c = H b_j f_c \quad (3.10)$$

式中:  $H$  为混凝土斜压杆的等效宽度, 可表达为节点核心区对角线的某一比值

$$H = \alpha \sqrt{h_c^2 + h_b^2} \quad (3.11)$$

一般情况下, 节点截面高度  $h_j$  等于柱截面高度  $h_c$ , 即  $h_c = h_j$ ; 梁截面高度  $h_b$  可表达为柱截面高度的某一比值, 写成  $h_b = \beta h_c = \beta h_j$ , 则



$$H = \alpha \sqrt{h_j^2 + \beta^2 h_j^2} = \alpha \sqrt{1 + \beta^2} h_j \quad (3.12)$$

令  $\gamma = \alpha \sqrt{1 + \beta^2}$ ，则混凝土的抗剪能力为

$$V_c = H b_j f_c = \gamma f_c b_j h_j \quad (3.13)$$

式中  $\gamma$  为一特定系数，它综合反映了节点中的混凝土在各种约束下的抗剪作用。当节点截面为圆形时，取  $b_j h_j$  为  $A_j$ ，其中  $A_j$  为圆形截面积。

### (3) 箍筋

节点区箍筋起着固定纵筋位置和防止其压屈的基本作用，且箍筋对混凝土和型钢的约束作用可使节点的位移延性提高。其中箍筋承担的剪力，可参考钢筋混凝土节点的研究成果，采用下式表达：

$$V_{sv} = \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} (h_0 - a'_s) \quad (3.14)$$

式中： $V_{sv}$  为箍筋抗剪承载力； $f_{yv}$  为箍筋抗拉强度设计值； $A_{sv}$  为同一截面内各箍筋的总截面积； $s$  为节点核心区箍筋间距。

综上所述：便可得到钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁中节点的抗剪承载力计算公式为：

$$V_j = \gamma f_c b_j h_j + \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} (h_0 - a'_s) + \frac{1}{\sqrt{3}} f_s t_w h_w \quad (3.15)$$

式中  $\gamma$  为系数，可以看成节点核心区混凝土的抗剪承载力影响系数。根据前面对节点抗剪承载力各影响参数的分析，可以通过轴压力影响系数  $\eta$  对节点的抗剪承载力的影响来确定影响系数  $\gamma$ 。

其中，轴压力影响系数定义为：

$$\eta = \frac{N}{f_c A_c + f_y A_s + f_s A_{ss}} \quad (3.16)$$

式中： $N$  为节点所受的轴压力；

$f_c$  为节点区混凝土强度；

$A_c$  为节点区混凝土截面积；

$f_y$  为节点区竖向钢筋强度；

$A_s$  为节点区竖向钢筋截面积；

$f_s$  为节点区型钢强度；

$A_{ss}$  为节点区型钢截面积；

表3.1、3.2给出了有限元模型建立的圆、方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置H型钢）的详细资料，其中给出了节点区混凝土强度，型钢尺寸和强度，柱高，跨度以及轴压比。

表3.1 有限元模型节点参数汇总

节点 编号	节点尺寸及配筋(mm)		轴压比 $n$	
	截面	长度		
JCH1	节点区混凝土C40, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH2	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH3	节点区混凝土C80, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH4	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.2
		梁	6600	
JCH5	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH6	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.6
		梁	6600	
JCH7	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=235$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH8	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH9	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=420$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH10	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×10×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH11	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCH12	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×200×20×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	

注：节点尺寸及配筋均为 $D=384.1\text{mm}$ ；节点区纵筋 $8\phi 28$ ；梁纵筋 $8\phi 28$ ；箍筋 $\phi 8@100$ ；

第一个字母表示节点；

第二个字母表示截面形状，其中C为圆形，S为方形；

第三个字母表示所用型钢类型，H表示H型钢；

表中 $n$ 为轴压比。

表3.2 有限元模型节点参数汇总

节点 编号	节点尺寸及配筋(mm)		轴压比 $N$	
	截面	长度		
JSH1	节点区混凝土C40, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH2	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH3	节点区混凝土C80, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH4	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.2
		梁	6600	
JSH5	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH6	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.6
		梁	6600	
JSH7	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=235$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH8	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH9	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=420$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH10	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×6×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH11	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×10×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSH12	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H280×200×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	

注：节点尺寸及配筋均为 $B=384.1\text{mm}$ ；节点区纵筋 $12\phi 28$ ；梁纵筋 $8\phi 28$ ；箍筋 $\phi 8@100$ ；

第一个字母表示节点；

第二个字母表示截面形状，其中C为圆形，S为方形；

第三个字母表示所用型钢类型，H表示H型钢；

表中 $n$ 为轴压比。

表3.3 钢管约束混凝土节点抗剪承载力计算

节点编号	$V_j/\text{kN}$	$f_c b_j h_j/\text{kN}$	$V_w$	$V_{sv}$	$\Gamma$
JCH1	1196	3060	717	72	0.133
JCH2	1293	4396	717	72	0.115
JCH3	1420	5732	717	72	0.110
JCH4	1242	4396	717	72	0.103
JCH5	1293	4396	717	72	0.115
JCH6	1315	4396	717	72	0.120
JCH7	1160	4396	488	72	0.136
JCH8	1293	4396	717	72	0.115
JCH9	1420	4396	873	72	0.108
JCH10	1045	4396	358	72	0.140
JCH11	1171	4396	538	72	0.128
JCH12	1293	4396	717	72	0.115

注： $\gamma$ 为核心区混凝土抗剪影响系数；

其中节点编号同上。

表3.4 钢管约束混凝土节点抗剪承载力计算

节点编号	$V_j/\text{kN}$	$f_c b_j h_j/\text{kN}$	$V_w$	$V_{sv}$	$\Gamma$
JSH1	1420	3898	777	73.5	0.146
JSH2	1527	5600	777	73.5	0.121
JSH3	1583	7302	777	73.5	0.100
JSH4	1457	5600	777	73.5	0.108
JSH5	1527	5600	777	73.5	0.121
JSH6	1571	5600	777	73.5	0.129
JSH7	1329	5600	529	73.5	0.130
JSH8	1527	5600	777	73.5	0.121
JSH9	1643	5600	946	73.5	0.111
JSH10	1120	5600	311	73.5	0.131
JSH11	1312	5600	518	73.5	0.129
JSH12	1527	5600	777	73.5	0.121

注： $\gamma$ 为核心区混凝土抗剪影响系数。

其中节点编号同上。

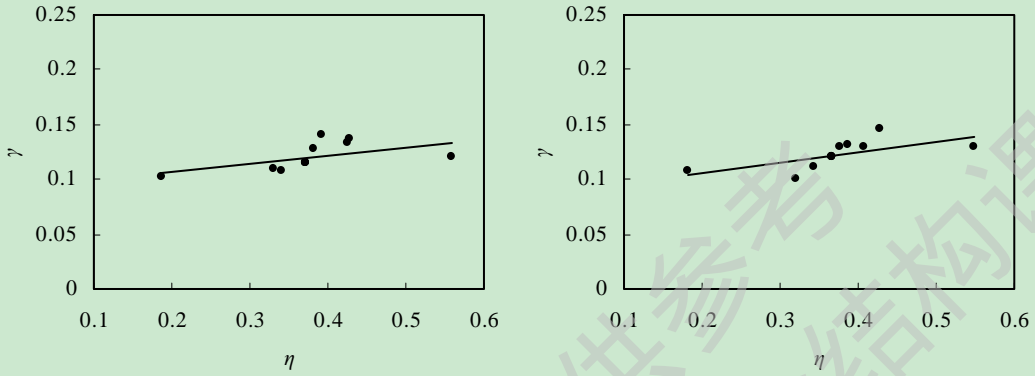
对其进行数值回归得到下式：

圆钢管约束混凝土节点：

$$\gamma = 0.0767 + 0.0907\eta \quad (3.17)$$

方钢管约束混凝土节点：

$$\gamma = 0.0931 + 0.0877\eta \quad (3.18)$$



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.23  $\gamma$ - $\eta$ 关系曲线（内配H型钢）

根据以上的分析，钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置H型钢）的抗剪承载力计算公式如下：

$$V_j = \gamma f_c b_j h_j + \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} (h_0 - a'_s) + \frac{1}{\sqrt{3}} f_s t_w h_w \quad (3.19)$$

式中： $V_j$ 为钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗剪承载力；

$f_c$ 为混凝土强度；

$b_j$ 为节点核心区表面宽度；

$h_j$ 为柱截面的高度；

$\gamma$ 为影响系数：对于圆钢管混凝土： $\gamma = 0.0767 + 0.0907\eta$

对于方钢管混凝土： $\gamma = 0.0931 + 0.0877\eta$

此公式的适用范围为混凝土强度等级在C40-C80之间，型钢强度Q235-Q420之间，轴压比 $n$ 在0.2-0.6之间的内配H型钢的钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点。

将简化公式的计算结果与有限元计算结果对比，见下表3.5、3.6。可见，简化计算值与试验值吻合良好。

表3.5 钢管约束混凝土节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

节点编号	$V_j^f$ /kN有限元计算值	$V_j^e$ /kN简化计算值	$V_j^e / V_j^f$
JCH1	1196	1156	0.966
JCH2	1293	1299	1.005

JCH3	1420	1437	1.012
JCH4	1242	1242	0.999
JCH5	1293	1299	1.004
JCH6	1315	1356	1.031
JCH7	1160	1087	0.937
JCH8	1293	1299	1.004
JCH9	1420	1446	1.018
JCH10	1045	947	0.906
JCH11	1171	1123	0.959
JCH12	1293	1299	1.005

注： $V_{jy}^f$ 为有限元计算值， $V_{jy}^e$ 为简化公式计算值

其中节点编号同上。

表3.6 钢管约束混凝土节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

节点编号	$V_j^f$ /kN有限元计算值	$V_j^e$ /kN简化计算值	$V_j^e / V_j^f$
JSH1	1420	1351	0.951
JSH2	1527	1538	1.007
JSH3	1583	1718	1.085
JSH4	1457	1446	0.992
JSH5	1527	1538	1.007
JSH6	1571	1631	1.038
JSH7	1329	1312	0.987
JSH8	1527	1538	1.007
JSH9	1643	1695	1.032
JSH10	1120	1083	0.967
JSH11	1312	1285	0.980
JSH12	1527	1538	1.007

注： $V_{jy}^f$ 为有限元计算值， $V_{jy}^e$ 为简化公式计算值

其中节点编号同上。

节点核心区配置十字型钢和节点核心区配置H型钢节点类似，采用同样的方法计算如下。

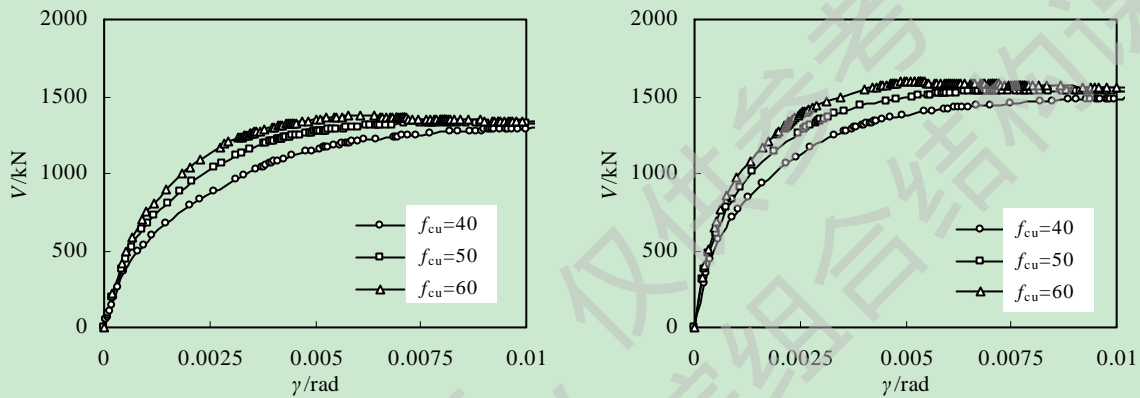
节点核心区配置十字型钢型钢典型构件的基本信息如下：

圆钢管约束混凝土柱采用 $D \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱含钢率 $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.6\text{m}$ ；钢筋混凝土梁的混凝土强度为C40，钢筋混凝土梁中钢筋对称配置双层钢筋，一侧配置 $4\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，非加密区 $\phi 8 @ 200$ ，梁跨度 $L = 6.6\text{m}$ ；节点区钢筋采用 $8\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，型钢尺寸 $200 \times 140 \times 10 \times 13$ ；

轴压比取0.4。

方钢管约束混凝土柱采用 $B \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱含钢率 $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.6\text{m}$ ；钢筋混凝土梁的混凝土强度为C40，钢筋混凝土梁中钢筋对称配置双层钢筋，一侧配置 $4\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，非加密区 $\phi 8 @ 200$ ，梁跨度 $L = 6.6\text{m}$ ；节点区钢筋采用 $12\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，型钢尺寸 $250 \times 180 \times 15 \times 20$ ；轴压比取0.4。

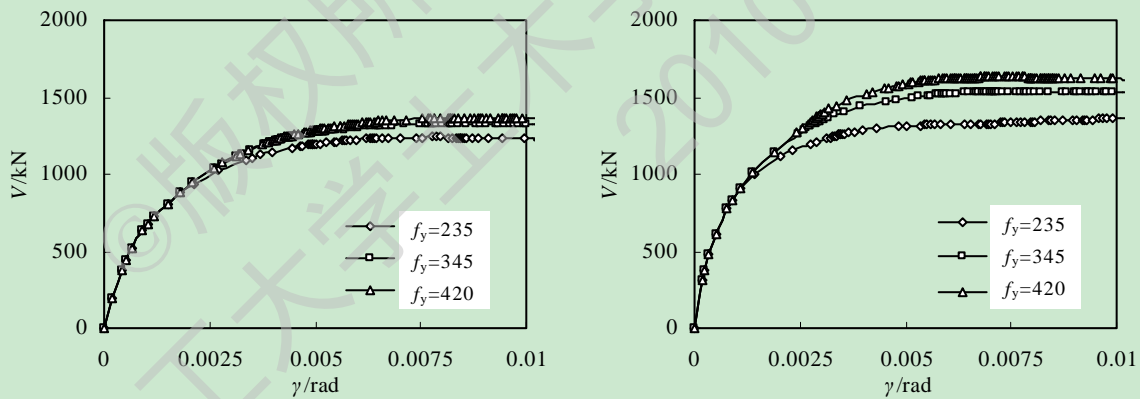
下面分别对影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置十字型钢）的参数节点混凝土强度、节点含箍率、型钢强度、型钢腹板厚度、轴压比进行分析，各参数的对节点承载力的影响同上，在此不再赘述。



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

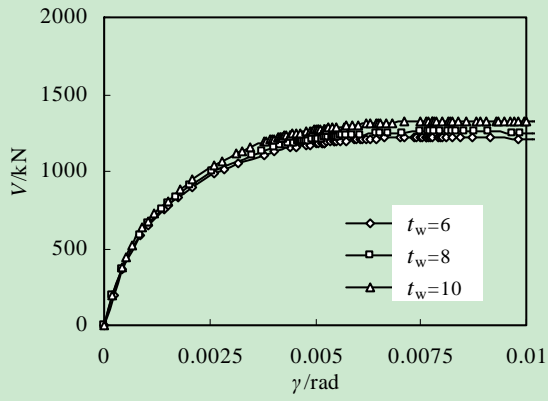
图3.24 柱混凝土强度对节点抗剪承载力的影响（内配十字型钢）



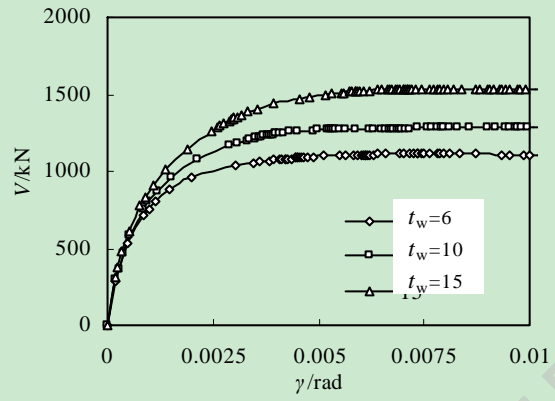
(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.25 节点区型钢强度对节点抗剪承载力的影响（内配十字型钢）

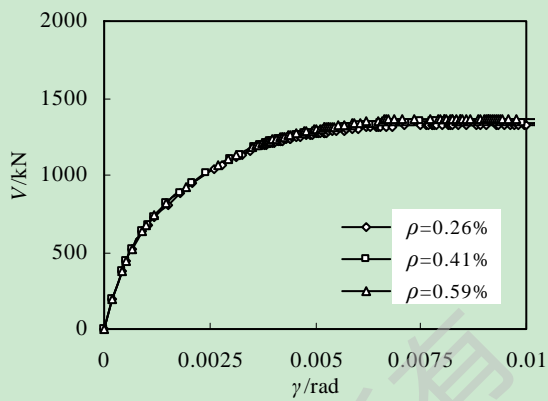


(a) 圆形截面柱节点

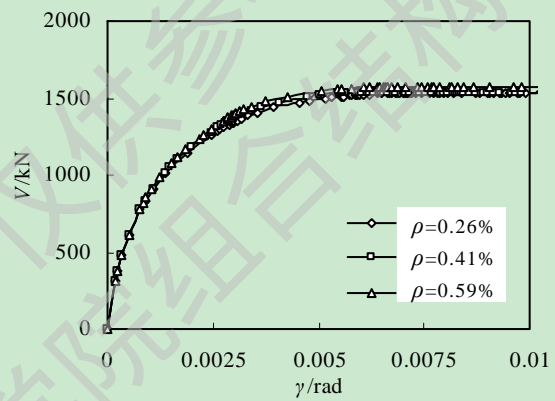


(b) 方形截面柱节点

图3.26 型钢腹板厚度对节点抗剪承载力的影响（内配十字型钢）

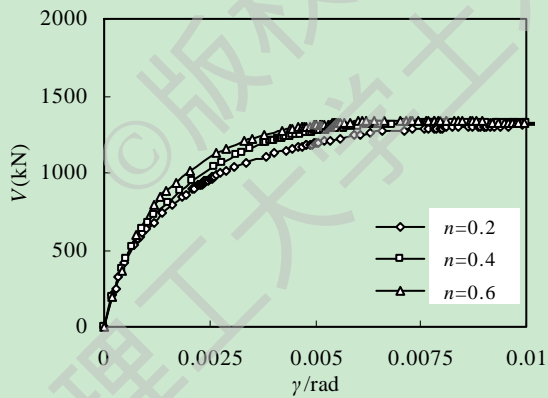


(a) 圆形截面柱节点

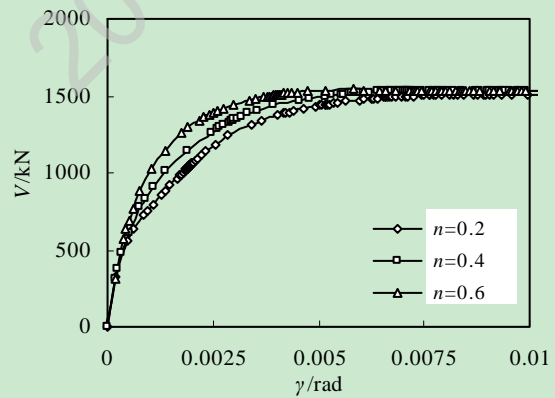


(b) 方形截面柱节点

图3.27 节点区含箍率对节点抗剪承载力的影响（内配十字型钢）



(a) 圆形截面柱节点



(b) 方形截面柱节点

图3.28 节点区轴压比对节点抗剪承载力的影响（内配十字型钢）

表3.7、3.8给出了有限元模型建立的圆、方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置十字型钢）的详细资料，其中给出了节点区混凝土强度，型钢尺寸和强度，柱高，跨度以及轴压比。



表3.7 有限元模型节点参数汇总

节点 编号	节点尺寸及配筋(mm)		轴压比 $n$	
	截面	长度		
JCS1	节点区混凝土C40, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS2	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS3	节点区混凝土C80, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS4	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.2
		梁	6600	
JCS5	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS6	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.6
		梁	6600	
JCS7	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=235$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS8	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS9	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=420$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS10	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×6×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS11	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×8×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCS12	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H200×140×10×13	柱	3600	0.4
		梁	6600	

注：节点尺寸及配筋均为 $D=384.1\text{mm}$ ；节点区纵筋 $8\phi 28$ ；梁纵筋 $8\phi 28$ ；箍筋 $\phi 8@100$ ；

第一个字母表示节点；

第二个字母表示截面形状，其中C为圆形，S为方形；

第三个字母表示所用型钢类型，S表示十字型钢；表中为单个型钢截面尺寸；

表中 $n$ 为轴压比。

表3.8 有限元模型节点参数汇总

节点 编号	节点尺寸及配筋(mm)		轴压比 $n$	
	截面	长度		
JSS1	节点区混凝土C40, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS2	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS3	节点区混凝土C80, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS4	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.2
		梁	6600	
JSS5	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS6	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.6
		梁	6600	
JSS7	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=235$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS8	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS9	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=420$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS10	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×6×10	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS11	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×10×15	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSS12	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢 H250×180×15×20	柱	3600	0.4
		梁	6600	

注：节点尺寸及配筋均为 $B=384.1\text{mm}$ ；节点区纵筋 $12\phi 28$ ；梁纵筋 $8\phi 28$ ；箍筋 $\phi 8@100$ ；

第一个字母表示节点；

第二个字母表示截面形状，其中C为圆形，S为方形；

第三个字母表示所用型钢类型，S表示十字型钢；表中为单个型钢截面尺寸；

表中 $n$ 为轴压比。

表3.9 钢管约束混凝土节点抗剪承载力计算

节点编号	$V_j/\text{kN}$	$f_c b_j h_j/\text{kN}$	$V_w$	$V_{sv}$	$\gamma$
JCS1	1109	3060	372	72	0.217
JCS2	1268	4396	372	72	0.187
JCS3	1390	5732	372	72	0.165
JCS4	1191	4396	372	72	0.170
JCS5	1268	4396	372	72	0.187
JCS6	1306	4396	372	72	0.196
JCS7	1194	4396	254	72	0.198
JCS8	1196	4396	372	72	0.171
JCS9	1287	4396	453	72	0.173
JCS10	1179	4396	223	72	0.201
JCS11	1209	4396	298	72	0.191
JCS12	1268	4396	372	72	0.187

注： $\gamma$ 为核心区混凝土抗剪影响系数。

其中节点编号同上。

表3.10 钢管约束混凝土节点抗剪承载力计算

节点编号	$V_j/\text{kN}$	$f_c b_j h_j/\text{kN}$	$V_w$	$V_{sv}$	$\gamma$
JSS1	1330	3898	687	73.5	0.146
JSS2	1490	5600	687	73.5	0.130
JSS3	1596	7302	687	73.5	0.114
JSS4	1462	5600	687	73.5	0.125
JSS5	1518	5600	687	73.5	0.135
JSS6	1539	5600	687	73.5	0.139
JSS7	1329	5600	468	73.5	0.141
JSS8	1531	5600	687	73.5	0.138
JSS9	1633	5600	892	73.5	0.119
JSS10	1099	5600	281	73.5	0.133
JSS11	1267	5600	478	73.5	0.128
JSS12	1497	5600	747	73.5	0.121

注： $\gamma$ 为核心区混凝土抗剪影响系数；

其中节点编号同上。

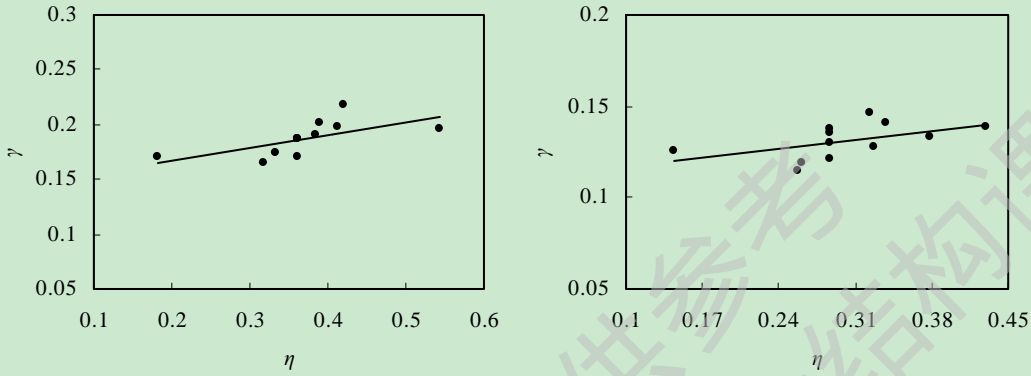
对其进行数值回归得到下式：

圆钢管约束混凝土节点：

$$\gamma = 0.1181 + 0.1434\eta \quad (3.20)$$

方钢管约束混凝土节点：

$$\gamma = 0.0713 + 0.1093\eta \quad (3.21)$$



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.29  $\gamma$ - $\eta$ 关系曲线（内配十字型钢）

根据以上的分析，钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置十字型钢）的抗剪承载力计算公式如下：

$$V_j = \gamma f_c b_j h_j + \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} (h_0 - a'_s) + \frac{1}{\sqrt{3}} f_s t_w h_w \quad (3.22)$$

式中： $V_j$ 为钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗剪承载力；

$f_c$ 为混凝土轴压强度；

$b_j$ 为节点核心区表面宽度；

$h_j$ 为柱截面的高度；

$\gamma$ 为影响系数：对于圆钢管混凝土： $\gamma = 0.1181 + 0.1434\eta$

对于方钢管混凝土： $\gamma = 0.0713 + 0.1093\eta$

此公式的适用范围为混凝土强度等级在C40-C80之间，型钢强度Q235-Q420之间，轴压比 $n$ 在0.2-0.6之间的内配十字型钢的钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点。

将简化公式的计算结果与有限元计算结果对比，见下表3.11、3.12。可见，简化计算值与试验值吻合良好。

表3.11 钢管约束混凝土节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

节点编号	$V_j^f$ /kN有限元计算值	$V_j^e$ /kN简化计算值	$V_j^e / V_j^f$
JCS1	1109	991	0.894
JCS2	1268	1195	0.942

JCS3	1390	1388	0.998
JCS4	1191	1083	0.909
JCS5	1268	1195	0.942
JCS6	1306	1306	1.000
JCS7	1194	1107	0.927
JCS8	1196	1195	0.998
JCS9	1287	1259	0.978
JCS10	1179	1062	0.901
JCS11	1209	1134	0.938
JCS12	1268	1195	0.942

注： $V_{jy}^f$ 为有限元计算值， $V_{jy}^e$ 为简化公式计算值

其中节点编号同上。

表3.12 钢管约束混凝土节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

节点编号	$V_j^f/\text{kN}$ 有限元计算值	$V_j^e/\text{kN}$ 简化计算值	$V_j^e / V_j^f$
JSS1	1330	1238	0.931
JSS2	1490	1433	0.961
JSS3	1596	1622	1.016
JSS4	1462	1376	0.941
JSS5	1518	1433	0.944
JSS6	1539	1489	0.967
JSS7	1329	1233	0.928
JSS8	1531	1433	0.936
JSS9	1633	1627	0.996
JSS10	1099	1063	0.967
JSS11	1267	1240	0.978
JSS12	1497	1492	0.997

注： $V_{jy}^f$ 为有限元计算值， $V_{jy}^e$ 为简化公式计算值

其中节点编号同上。

节点核心区配置箱形型钢和节点核心区配置H型钢节点类似，采用同样的方法计算如下。

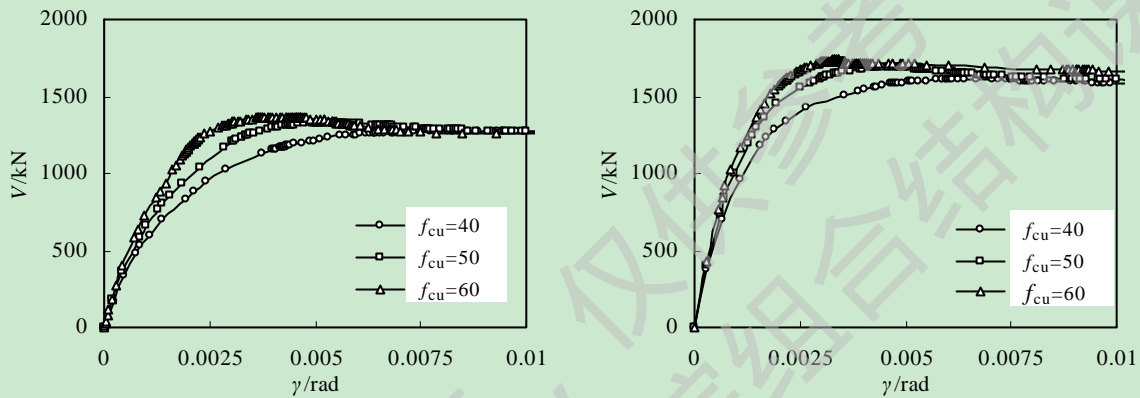
节点核心区配置箱形型钢典型构件的基本信息如下：

圆钢管约束混凝土柱采用 $D \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱含钢率 $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.6\text{m}$ ；钢筋混凝土梁的混凝土强度为C40，钢筋混凝土梁中钢筋对称配置双层钢筋，一侧配置 $4\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，非加密区 $\phi 8 @ 200$ ，梁跨度 $L = 6.6\text{m}$ ；节点区钢筋采用 $8\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，型钢尺寸 $200 \times 200 \times 8$ ；轴压

比取0.4。

方钢管约束混凝土柱采用 $B \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，柱含钢率 $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.6\text{m}$ ；钢筋混凝土梁的混凝土强度为C40，钢筋混凝土梁中钢筋对称配置双层钢筋，一侧配置 $4\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，非加密区 $\phi 8 @ 200$ ，梁跨度 $L = 6.6\text{m}$ ；节点区钢筋采用 $12\phi 28$ ，箍筋采用 $\phi 8 @ 100$ ，型钢尺寸 $250 \times 250 \times 8$ ；轴压比取0.4。

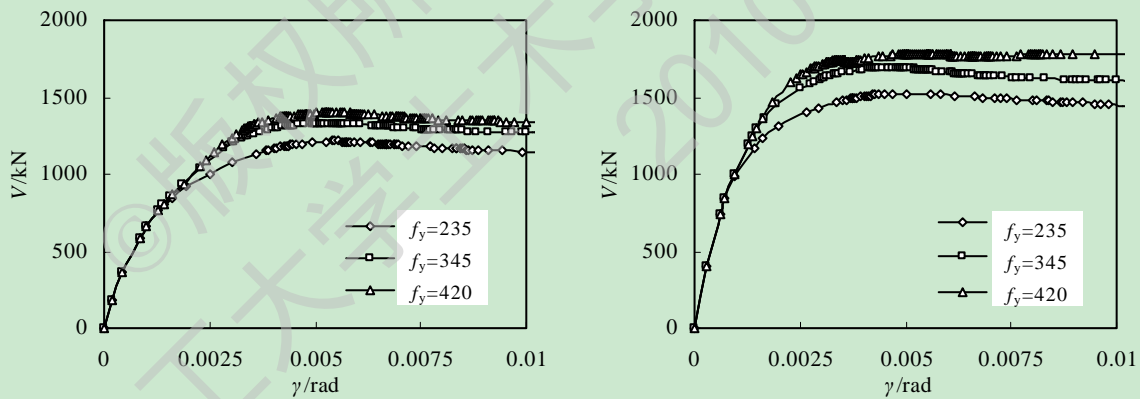
下面分别对影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置箱形型钢）的参数节点混凝土强度、节点含箍率、型钢强度、型钢腹板厚度、轴压比进行分析，各参数的对节点承载力的影响同上，在此不再赘述。



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.30 柱混凝土强度对节点抗剪承载力的影响（内配箱形型钢）



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图3.31 节点区型钢强度对节点抗剪承载力的影响（内配箱形型钢）

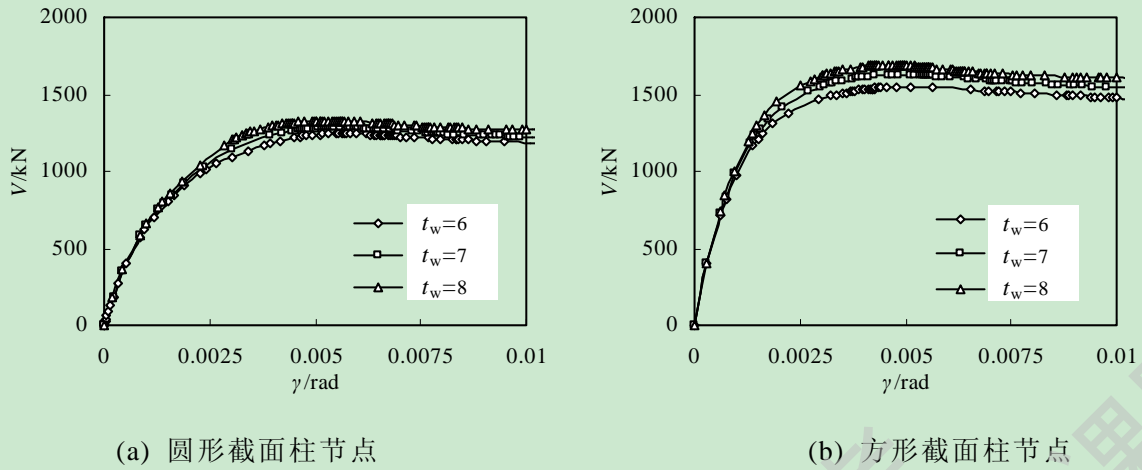


图3.32 型钢腹板厚度对节点抗剪承载力的影（内配箱形型钢）

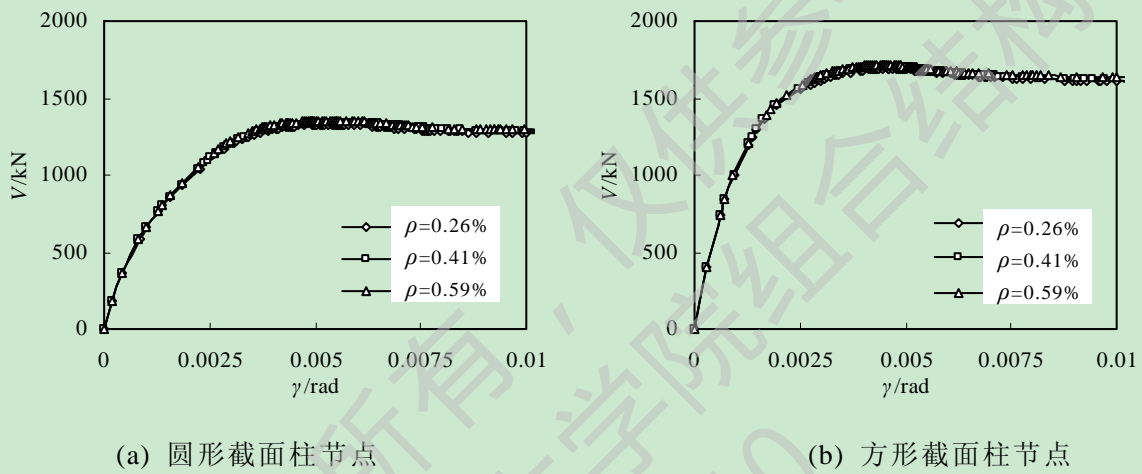


图3.33 节点区含箍率对节点抗剪承载力的影响（内配箱形型钢）

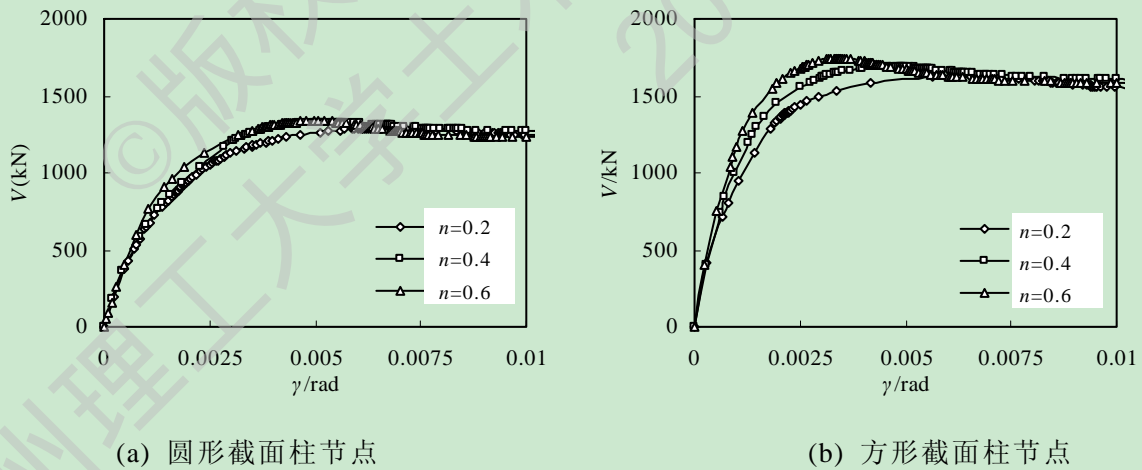


图3.34 节点区轴压比对节点抗剪承载力的影响（内配箱形型钢）

表3.13、3.14给出了有限元模型建立的圆、方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置箱形型钢）的详细资料，其中给出了节点区混凝土强度，型钢尺寸和强度，柱高，跨度以及轴压比。

表3.13 有限元模型节点参数汇总

节点 编号	节点尺寸及配筋(mm)		轴压比 $n$	
	截面	长度		
JCX1	节点区混凝土C40, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX2	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX3	节点区混凝土C80, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX4	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.2
		梁	6600	
JCX5	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX6	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.6
		梁	6600	
JCX7	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=235$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX8	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX9	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=420$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX10	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×6	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX11	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×7	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JCX12	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢200×200×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	

注：节点尺寸及配筋均为 $D=384.1\text{mm}$ ；节点区纵筋 $8\phi 28$ ；梁纵筋 $8\phi 28$ ；箍筋 $\phi 8@100$ ；

第一个字母表示节点；

第二个字母表示截面形状，其中C为圆形，S为方形；

第三个字母表示所用型钢类型，X表示箱形型钢；

表中 $n$ 为轴压比。



表3.14 有限元模型节点参数汇总

节点 编号	节点尺寸及配筋(mm)		轴压比 $n$	
	截面	长度		
JSX1	节点区混凝土C40, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX2	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX3	节点区混凝土C80, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX4	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.2
		梁	6600	
JSX5	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX6	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.6
		梁	6600	
JSX7	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=235$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX8	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX9	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=420$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX10	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×6	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX11	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×7	柱	3600	0.4
		梁	6600	
JSX12	节点区混凝土C60, 型钢强度 $f_y=345$ , 型钢250×250×8	柱	3600	0.4
		梁	6600	

注：节点尺寸及配筋均为 $B=384.1\text{mm}$ ；节点区纵筋 $12\phi 28$ ；；梁纵筋 $8\phi 28$ ；箍筋 $\phi 8@100$ ；

第一个字母表示节点；

第二个字母表示截面形状，其中C为圆形，S为方形；

第三个字母表示所用型钢类型，X表示箱形型钢；

表中 $n$ 为轴压比。

表3.15 钢管约束混凝土节点抗剪承载力计算

节点编号	$V_j/\text{kN}$	$f_c b_j h_j/\text{kN}$	$V_w$	$V_{sv}$	$\gamma$
JCX1	1214	3060	612	72	0.173
JCX2	1327	4396	612	72	0.146
JCX3	1370	5732	612	72	0.120
JCX4	1264	4396	612	72	0.132
JCX5	1327	4396	612	72	0.146
JCX6	1338	4396	612	72	0.149
JCX7	1214	4396	417	72	0.165
JCX8	1330	4396	612	72	0.147
JCX9	1400	4396	745	72	0.133
JCX10	1244	4396	464	72	0.161
JCX11	1282	4396	538	72	0.153
JCX12	1330	4396	574	72	0.156

注： $\gamma$ 为核心区混凝土抗剪影响系数。

其中节点编号同上。

表3.16 钢管约束混凝土节点抗剪承载力计算

节点编号	$V_j/\text{kN}$	$f_c b_j h_j/\text{kN}$	$V_w$	$V_{sv}$	$\gamma$
JSX1	1511	3898	771	73.5	0.171
JSX2	1646	5600	771	73.5	0.143
JSX3	1734	7302	771	73.5	0.122
JSX4	1534	5600	771	73.5	0.123
JSX5	1677	5600	771	73.5	0.149
JSX6	1742	5600	771	73.5	0.160
JSX7	1497	5600	525	73.5	0.160
JSX8	1688	5600	771	73.5	0.151
JSX9	1733	5600	9389	73.5	0.129
JSX10	1531	5600	583	73.5	0.156
JSX11	1615	5600	678	73.5	0.154
JSX12	1688	5600	797	73.5	0.146

注： $\gamma$ 为核心区混凝土抗剪影响系数。

其中节点编号同上。

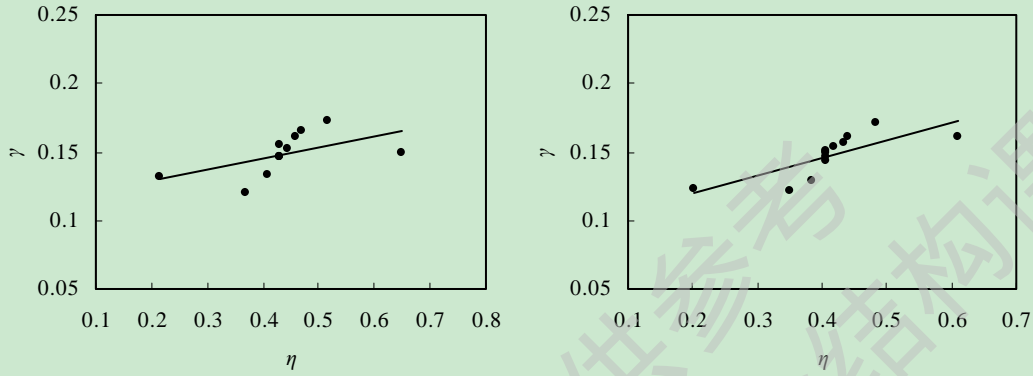
对其进行数值回归得到下式：

圆钢管约束混凝土节点：

$$\gamma = 0.0837 + 0.1117\eta \quad (3.23)$$

方钢管约束混凝土节点：

$$\gamma = 0.1278 + 0.0942\eta \quad (3.24)$$



(a) 圆形截面柱节点

(b) 方形截面柱节点

图 3.35  $\gamma$ - $\eta$  关系曲线（内配箱形型钢）

根据以上的分析，钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点（配置箱形型钢）的抗剪承载力计算公式如下：

$$V_j = \gamma f_c b_j h_j + \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} (h_0 - a'_s) + \frac{1}{\sqrt{3}} f_s t_w h_w \quad (3.25)$$

式中： $V_j$ 为钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗剪承载力；

$f_c$ 为混凝土轴压强度；

$b_j$ 为节点核心区表面宽度；

$h_j$ 为柱截面的高度；

$\gamma$ 为影响系数：对于圆钢管混凝土： $\gamma = 0.0837 + 0.1117\eta$

对于方钢管混凝土： $\gamma = 0.1278 + 0.0942\eta$

此公式的适用范围为混凝土强度等级在C40-C80之间，型钢强度Q235-Q420之间，轴压比 $n$ 在0.2-0.6之间的内配箱形型钢的钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点。

将简化公式的计算结果与有限元计算结果对比，见下表3.17、3.18。可见，简化计算值与试验值吻合良好。

表3.17 钢管约束混凝土节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

节点编号	$V_j^f$ /kN有限元计算值	$V_j^e$ /kN简化计算值	$V_j^e / V_j^f$
JCX1	1214	1147	0.945
JCX2	1327	1319	0.994

JCX3	1370	1484	1.083
JCX4	1264	1243	0.983
JCX5	1327	1319	0.994
JCX6	1338	1395	1.042
JCX7	1214	1138	0.937
JCX8	1330	1319	0.992
JCX9	1400	1444	1.031
JCX10	1244	1181	0.950
JCX11	1282	1250	0.975
JCX12	1330	1281	0.963

注： $V_{jy}^f$ 为有限元计算值， $V_{jy}^e$ 为简化公式计算值

其中节点编号同上。

表3.18 钢管约束混凝土节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

节点编号	$V_j^f$ /kN有限元计算值	$V_j^e$ /kN简化计算值	$V_j^e / V_j^f$
JSX1	1511	1440	0.953
JSX2	1646	1644	0.999
JSX3	1734	1834	1.058
JSX4	1534	1496	0.975
JSX5	1677	1644	0.980
JSX6	1742	1792	1.029
JSX7	1497	1424	0.951
JSX8	1688	1644	0.974
JSX9	1733	1797	1.036
JSX10	1531	1475	0.963
JSX11	1615	1560	0.966
JSX12	1688	1670	0.989

注： $V_{jy}^f$ 为有限元计算值， $V_{jy}^e$ 为简化公式计算值

其中节点编号同上。

### 3.5 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点构造建议

钢管混凝土梁柱节点的核心区是结构受力的关键部位，所以节点的连接构造是影响钢管混凝土结构工程应用的关键技术问题之一。节点的应构造简单、传力明确、安全可靠和施工方便。节点的设计应做到构造合理，节点具有一定的强度和延性，并且节点核心区不允许有过大的局部变形。

钢管混凝土的柱梁连接可以分为钢管混凝土柱-钢梁连接和钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁连接两种型式。目前,国内钢管混凝土柱与钢梁节点在工程实践中应用较为广泛,而钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁的连接型式相应研究则很少。

传统的钢管混凝土柱和钢筋混凝土梁节点均为钢管混凝土柱竖向贯通,钢筋混凝土梁不穿过钢管,只能在钢管外壁焊接钢牛腿,梁纵筋绕过钢管混凝土柱,(如钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁环绕式节点),或者在钢管外壁焊水平肋钢筋或水平肋板,梁纵筋通过预留孔穿越钢管(如穿筋式节点),形成钢筋混凝土环梁等方法与节点相连接。传统的节点设计传递弯矩的能力较差,连接点处构造复杂,施工难度大。

钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点在节点区柱钢管不贯通,且钢管上下端距节点区梁上下表面有一定的距离。钢管约束混凝土柱与钢筋混凝土柱相比,钢管本身可以作为模板,方便施工;且钢管并不直接承受纵向荷载,钢管只起到约束作用,可更充分的发挥钢材抗拉强度高的优点;钢筋混凝土梁可以和钢管约束混凝土柱中混凝土现浇,这样节点类似于钢筋混凝土节点,整体性好,而且钢筋混凝土梁不用绕过钢管混凝土柱,减少了施工难度。由于本文节点应用极少,为使钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点在工程上推广应用。根据以往相关试验研究和经验,并考虑到本节点的特殊性,本文提出一些钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的构造设计。

### 3.5.1 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的连接构造特点

钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的连接构造,具有以下特点:

(1) 该节点构造简单、传力明确、直接可靠,突破了沿钢管混凝土柱竖向贯通的传统节点模式。梁中纵筋在节点内直通,使核心区和梁中的混凝土成为一体,保证了节点的刚性。无需在钢管上焊接钢牛腿或加劲肋,避免了大量的现场焊接,简化了节点的构造。

(2) 在节点核心区设置型钢、竖向钢筋和箍筋,补偿了中断外钢管对节点核心区的削弱,保证了钢管混凝土柱在节点区的连续,提高节点承受水平剪力的能力,满足“强节点”设计要求。

(3) 本文节点使用的钢管约束混凝土柱与钢筋混凝土柱相比,钢管本身可以作为模板,方便施工;与钢管混凝土柱相比,钢管不直接承受纵向荷载,钢管只起到约束作用,可更充分的发挥钢材抗拉强度高的优点;钢筋混凝土梁可以和钢管约束混凝土柱中混凝土现浇,节点的传力明确,受力性能好,而且钢筋混凝土梁不用绕过钢管混凝土柱,减少了施工难度。

(4) 节点周边梁的存在,对节点核心区混凝土也可提供了一定约束。

### 3.5.2 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的构造要求

节点是梁柱连接的关键部位,在框架中起着传递、分配内力和保证结构整体性的作用。因而,梁柱节点核心区应该具有足够的承载力、刚度和延性。为保证

节点的质量，提出以下建议构造要求：

(1) 节点核心区纵筋、型钢和箍筋仅在节点区设置，上下均需伸入钢管约束混凝土柱中。建议纵筋、型钢和箍筋锚入上、下钢管约束混凝土柱中两倍的梁高。

(2) 为了施工方便，确定各部分尺寸时，梁纵筋最好能直通核心区。节点核心区型钢和纵筋的布置也应为梁中纵筋贯穿留出通道。梁中所有钢筋应从型钢翼缘侧边通过，不应穿过节点核心区型钢翼缘，梁中纵筋也不得与节点核心区型钢直接焊接。

(3) 在与节点区型钢连接的梁端，可设置一段钢梁与梁主筋搭接。钢梁的高度应不小于0.8倍梁高，长度应不小于梁截面高度的2倍，且应满足梁内主筋搭接长度要求。在梁内主筋搭接长度要求。在钢梁的上下翼缘上应设置栓钉连接件，栓钉的直径不小于19mm，栓钉的间距不大于200mm，且栓钉至型钢板材边缘的距离不小于50mm。梁内的应有不小于1/3主筋的面积穿过钢骨混凝土柱连接配置。从梁端至钢梁端部以外2倍梁高范围内，应按钢筋混凝土梁端箍筋加密区的要求配置箍筋。

(4) 型钢腹板部分设置钢筋贯穿孔时，截面缺损率不应超过腹板面积的20%。当不能避免在型钢翼缘上开孔时，截面缺损率也必须控制在20%的限度内。节点核心区的箍筋应按计算确定，箍筋间距不要大于150mm，箍筋直径不小于柱端箍筋加密区的箍筋直径。

(5) 为了保证梁端内力更好的传递，节点核心区型钢内梁翼缘水平位置处可设置加劲肋，其构造应便于混凝土浇灌，并保证混凝土密实。水平加劲肋厚度不宜小于12mm。

### 3.6 小结

本章运用ABAQUS有限元通用软件对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点模型的抗弯承载力、抗剪承载力进行了参数分析，得到了以下结论：

(1) 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点抗弯承载力与梁柱弯矩比、柱长细比、梁柱线刚度比有关。其中梁柱弯矩比对节点的承载力影响较大，这是因为梁柱弯矩比反映了对于强柱弱梁节点，梁端弯矩对节点的抗弯承载力起控制作用，另外随着柱长细比、梁柱线刚度比的增大，节点的刚度和强度略有增大。

(2) 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗剪承载力与节点区混凝土强度、轴压比、节点区型钢强度、节点区腹板厚度及含箍率有关。其中混凝土和型钢对节点抗剪承载力影响较大，轴压比在0.2-0.6范围之内对节点的抗剪可提供有利的帮助。含箍率对节点的抗剪承载力略有帮助，箍筋还起到约束混凝土、防止纵筋压屈和增加节点延性的作用。

(3) 提出了关于钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗弯承载力和抗剪承载力简化计算方法。

(4) 最后给出了钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的一些构造建议。

## 结论与展望

### 结论

本文对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点力学性能与设计方法进行了研究，并在 ABAQUS 通用有限元软件对其抗弯、抗剪承载力进行了参数分析，得出以下结论：

(1) 在 ABAQUS 有限元软件下对钢管混凝土柱、钢管约束混凝土柱、钢筋环绕式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点、钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了模拟，理论计算与试验结果总体上吻合良好。基于此对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行 ABAQUS 有限元模拟，对典型试件的各组成部件进行了在单调荷载作用下的非线性全过程分析，通过对各部件在受力过程中的裂缝、应力分布等分析，明确了各部件之间的协调工作以及节点的工作机理。

(2) 基于对理论的分析，对可能影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点的抗弯承载力的参数：梁柱弯矩比、梁柱线刚度比和柱长细比进行了分析。分析结果表明：钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗弯承载力与梁柱弯矩比、梁柱线刚度比、柱长细比有关。

(3) 基于对理论的分析，对可能影响钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点的抗剪承载力的参数进行了分析，结果表明：钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土节点抗剪承载力与节点区混凝土强度、型钢腹板厚度、型钢强度、含箍率、轴压比有关。

(4) 最终根据以上的分析，简单提出了钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗弯承载力和抗剪承载力计算公式。

### 展望

在得出以上结论的基础上，作者认为在以下几方面尚需进一步研究：

(1) 本文仅给出了一定范围内的圆、方钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗弯、抗剪承载力简化计算公式，为了能为实际工程设计提供参考，得出更为合理的节点形式、抗弯和抗剪承载力计算公式及构造措施，尚需大量试验来完善。

(2) 本文的研究模型为平面十字中节点、单向受力，而工程实际中，框架结构体系的受力是三维的，节点周围的梁会对节点产生约束，日后研究尚应以空间节点、双向受力分析。

(3) 本文只对钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了静力分析，后续尚应对该类节点进行动力性能或抗震性能的分析，以便得出更为合理的计算方法。

(4) 本文主要研究了节点区配置 H 型钢、十字型钢和箱形型钢的节点形式，还可以研究节点区配置角钢、芯钢管等节点形式，另外还可研究加大节点区截面，增强其节点承载力的方法。在此基础之上，建立更加完善的钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的抗弯、抗剪承载力公式。

(5) 由于钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点是一种新型的节点，对于其构造措施需要进一步的研究。

©版权所有，仅供参考  
兰州理工大学土木学院组合结构课题组  
2010



## 参 考 文 献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第二版). 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构-试验、理论和方法. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 蔡绍怀和焦占拴. 钢管混凝土短柱基本性能和强度计算. 建筑结构学报, 1984, 5(6): 13-29
- [4] Sakino K, Tomii M, Watanabe K. Sustaining load capacity of plain concrete stub columns confined by circular steel tubes. Proceedings of the International Specialty Conference on Concrete-Filled Steel Tubular Structures, ASCCS, 1985, Harbin, China, 112-118.
- [5] Orito Y, Sato T, Tanaka N, Watanabe Y. Study on the unbonded steel tube concrete structure. Proceedings, Composite Construction in Steel and Concrete, 1987.
- [6] O'Shea M D, Bridge R Q. Tests on circular thin-walled steel tubes filled with medium and high strength concrete. Department of Civil Engineering Research Report No.R755, The University of Sydney, Sydney, Australia, 1997a.
- [7] O'Shea M D, Bridge R Q. Tests on circular thin-walled steel tubes filled with very high strength concrete. Department of Civil Engineering Research Report No.R754, The University of Sydney, Sydney, Australia, 1997b.
- [8] Johansson M. Structural behaviors of circular steel-concrete composite columns: Non-linear finite element analyses and experiments. Licentiate thesis, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2000.
- [9] Johansson M. The efficiency of passive confinement in CFT Columns. Steel and Composite Structures, 2002, 2(5): 379-396.
- [10] Fam A, Qie F S, Rizkalla S. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 631-640.
- [11] Peter M, John F B, Mohamed L. Composite response of high-strength concrete confined by circular steel tube. ACI Structural Journal, 2004, 101(4): 466-474.
- [12] 尧国皇, 韩林海. 钢管约束混凝土压弯构件滞回性能的实验研究. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 89-96.
- [13] 陈志波. 钢管约束混凝土压弯构件力学性能研究: [硕士学位论文]. 福州:

- 福州大学, 2003.
- [14] Zhang S M, Liu J P. Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(9): 1194-1207.
- [15] 张素梅, 刘界鹏, 马乐, 邢涛. 圆钢管约束高强混凝土轴压短柱的试验研究与承载力分析. *土木工程学报*, 2007, 40(3): 24-31.
- [16] 刘界鹏, 张素梅, 郭兰慧. 方钢管约束高强混凝土短柱的轴压力学性能. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(10): 1542-1545.
- [17] 于清, 陶忠, 陈志波, 吴颖星. 钢管约束混凝土纯弯构件抗弯力学性能研究. *工程力学*, 2008, 25(3): 187-193.
- [18] 刘界鹏, 张素梅, 郭兰慧. 圆钢管约束高强混凝土短柱的轴压力学性能. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(4): 528-531.
- [19] 郭兰慧, 张素梅, 刘界鹏. 不同加载模式下方钢管混凝土力学性能试验研究与理论分析. *工程力学*, 2008, 25(9): 143-148.
- [20] Liu J P, Zhang S M, Zhang X D, Guo L H. Behavior and strength of circular tube confined reinforced-concrete (CTRC) columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(7): 1447-1458.
- [21] Yu Q, Tao Z, Liu W, Chen Z B. Analysis and calculations of steel tube confined concrete (STCC) stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(1): 53-64.
- [22] 钟善桐. 高层钢管混凝土结构. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999.
- [23] 钟善桐. 钢管混凝土结构. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [24] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术 (第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [25] 钟善桐, 白国良. 高层建筑组合结构框架梁柱节点分析与设计. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [26] 李至钧, 阎善章. 钢管混凝土框架梁柱刚性抗震节点的试验研究. *工业建筑*, 1994, 24(2): 8-15.
- [27] 吴发红, 梁书亭, 李麟, 钱劲松. 钢加强环钢管混凝土梁柱节点试验研究. *盐城工学院学报*, 2001, 14(2): 46-49.
- [28] 韩小雷, 陈晖, 季静, 陈庆军, 余新, 赵立东. 穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点的试验研究. *华南理工大学*, 1999, 27(10): 96-101.
- [29] 韩小雷, 王永仪, 季静, 陈庆军. 穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点的试验研究. *工业建筑*, 2002, 32(7): 68-70.
- [30] 韩小雷, 贺锐波, 季静. 带环板的穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点试验研究. *工*

- 业建筑, 2005, 35(11): 21-23.
- [31] 王秀丽, 刘明路, 师伟. 新型方钢管混凝土柱与混凝土梁的节点破坏机理. 兰州理工大学学报, 2006, 32(6): 131-135.
- [32] 季静, 吴爱明, 王燕珺, 韩小雷. 新型穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点试验及分析. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 114-120.
- [33] 王清湘, 孙健, 刘士润. 新型穿心钢筋暗牛腿钢管混凝土梁柱节点动力性能研究. 钢结构, 2009, 1(24): 15-20.
- [34] 方小丹, 李少云, 陈爱军. 新型钢管混凝土柱节点的实验研究. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 2-15.
- [35] 吕西林和李学平. 方钢管混凝土柱外置式环梁节点的试验及设计方法研究. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 7-13.
- [36] 周栋梁, 钱稼茹, 方小丹. RC 环梁连接的钢管混凝土柱-RC 梁框架计算模型研究. 工程力学, 2005, 22(6): 117-121.
- [37] 傅剑平, 马良璇, 黄宗瑜, 方长建, 张兰, 程思聪. 带抗剪环的钢管混凝土柱环梁节点单调直剪试验研究. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(1): 34-39.
- [38] 方小丹, 黄圣钧, 李少云, 钱稼茹, 周栋梁. RC 梁-圆钢管混凝土柱节点环梁承载力设计方法. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 20-33.
- [39] 代红军, 季韬. 钢管混凝土柱-RC 环梁节点受力性能分析. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 587-562.
- [40] 季韬, 杨华, 戴益华. 钢管混凝土柱-环扁梁中节点破坏形态和耗能能力研究. 福州大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 115-121.
- [41] 代红军, 季韬. CFST-RC 环扁梁节点性能试验. 西南科技大学学报, 2008, 23(4): 19-24.
- [42] 陈洪涛, 吴时适, 肖永福, 张金龙, 吕明翔. 钢管混凝土框架钢筋贯通式刚性节点的实验研究. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(2): 21-25.
- [43] 蔡健, 杨春, 苏恒强. 穿心钢筋暗牛腿式钢管混凝土柱节点试验研究. 工业建筑, 2000, 30(3): 61-64.
- [44] 李帼昌, 赵兴, 杨景利, 聂尧, 柏吉. 钢筋贯通式钢管煤矸石混凝土节点的试验. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(4): 699-703.
- [45] 福建省工程建设地方标准 DBJ13-51-2003. 钢管混凝土结构技术规程. 福州, 2003.
- [46] 曲慧, 陶忠, 韩林海. CFST 柱-RC 梁柱梁钢筋环绕式节点抗震性能试验. 工业建筑, 2006, 36(11): 27-31.
- [47] 曲慧, 王文达. 钢管混凝土柱-梁连接节点弯矩-转角关系计算方法. 工程力学, 27(5): 106-113.

- [48] 顾伯禄, 朱筱俊, 吕清芳, 刘亚飞, 蒋永生. 新型钢管砼框架节点试验研究及其应用. 东南大学学报, 1998, 28(6): 106-110.
- [49] 蔡健, 黄泰赟, 苏恒强. 新型钢管混凝土中柱劲性环梁式节点的设计方法初探. 土木工程学报, 2002, 35(1): 6-10.
- [50] 苏恒强, 蔡健, 郭远翔, 黄炎生. 劲性梁-钢管砼柱不穿心节点轴压承载力的试验. 广东工业大学学报, 2006, 23(1): 8-12.
- [51] 黄襄云, 周福霖, 罗学海, 王立超. 钢管混凝土柱结构节点抗震性能研究. 建筑结构, 2001, 31(7): 3-7.
- [52] 欧谨, 杨放, 刘伟庆, 蓝宗建. 钢管混凝土双梁节点试验及现场测试. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(1): 74-77.
- [53] 刘志斌, 钟善桐. 钢管混凝土柱钢筋混凝土双梁节点的刚性研究. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(4): 26-29.
- [54] 杨春, 蔡健, 吴轶, 苏恒强. 钢管混凝土柱节点试验研究—双梁、单梁、单一双梁节点构造形式. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(sup): 147-149.
- [55] 程国亮, 于德介, 李向真, 周福霖. 钢管混凝土单梁节点有限元研究. 广西大学学报(自然科学版), 2002, 1(6): 62-64.
- [56] 梅力彪, 周云, 张春梅. 钢管混凝土柱单梁节点空间非线性有限元分析. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10): 1267-1270.
- [57] 陈庆军, 蔡健, 林瑶明, 梁剑, 唐泽东. 柱钢管不直通的新型钢管混凝土柱-梁节点(I)—轴压下采用钢筋网加强钢管不直通的节点区的性能. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(9): 91-95.
- [58] 陈庆军, 蔡健, 林瑶明, 梁剑, 唐泽东. 柱钢管不直通的新型钢管混凝土柱-梁节点(II)—轴压下采用环形钢筋加强钢管不直通的节点区的性能. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(12): 58-61.
- [59] 梁剑. 一种新型钢管混凝土梁柱节点试验研究—RC 楼层间钢管非连通型节点[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2002, 30(10): 79-83.
- [60] 刘付钧, 蔡健, 张学文, 刘丽艳, 罗国庆, 唐珉, 符景明. 新型钢管混凝土柱-平板节点轴压性能研究(I)—试验概况及结果分析. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 77-80.
- [61] 张学文, 蔡健, 刘付钧, 符景明, 唐珉. 新型钢管混凝土柱-平板节点轴压性能研究(II)—承载力计算公式及构造要点. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 81-84.
- [62] 聂建国, 柏宇, 李盛勇, 赵洁, 米日巴·阿米提. 分层钢管混凝土节点轴压性能的试验研究. 建筑结构, 2004, 34(12): 57-59.
- [63] 王毅红, 汤文锋. 芯钢管连接的钢管混凝土中柱节点试验研究. 建筑结构,

- 2004, 34(12): 60- 63.
- [64] 王毅红, 蒋建飞, 周绪红, 付敏, 郭增辉. 芯钢管连接的钢管混凝土半连通边节点试验研究. 土木工程学报, 2006, 39(12): 54-59.
- [65] 王毅红, 卢先军, 周绪红, 郭增辉, 付敏. 芯钢管连接的钢管混凝土半连通角节点试验研究. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 51-57.
- [66] 王再峰. 钢管约束混凝土柱-钢筋混凝土梁节点抗震性能研究[硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2006.
- [67] 陈庆军, 蔡健, 徐刚, 吴轶. 节点区柱钢管不全贯通式钢管混凝土柱-梁节点区的受压试验研究. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 10-15.
- [68] 陈庆军, 蔡健, 徐刚, 吴轶. 节点区柱钢管不连通式钢管混凝土柱-梁节点轴压承载力. 工程力学, 2008, 25(9): 170-174.
- [69] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS Version 6.5: The Manual, User's Manual, Verification Manual and Example problems Manual. Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, Inc.; 2005.
- [70] Attard M M, Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 432-442.
- [71] CEB-FIP. CEB-FIP Model Code 1990. London, 1991.
- [72] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [73] Sakino K, Hayashi H. Behavior of concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. Proc, The Third International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Fukoka, Japan, 1991, 25-30.
- [74] Hu H T, Huang C S, Wu M H, Wu Y M. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. Journal of Structural Engineering. 2003, 129(10): 1322-1239.
- [75] Lubliner J, Oliver J, Oller S, Onate E. A plastic-damage model for concrete structures. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [76] 中华人民共和国国家标准 GB50010-2002. 混凝土结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [77] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震(第一版). 南京: 东南大学出版社, 1989.
- [78] 张大旭, 张素梅. 钢管混凝土柱与梁节点荷载-位移滞回曲线理论分析. 哈尔滨建筑大学学报, 34(4): 1-6.
- [79] 中华人民共和国黑色冶金行业标准 YB 9082-2006. 钢骨混凝土结构规程. 北京: 中国冶金工业出版社, 2007.
- [80] 中华人民共和国行业标准 JGJ 138-2001. 型钢混凝土组合结构技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

## 致 谢

本文是在导师王文达副教授的悉心指导下完成的。在学习过程中，无论从论文的选题、理论及有限元软件的学习再到论文的修改，都得到了王老师极大的帮助。同时，王老师渊博的学识、严谨的治学态度也令我十分敬佩，王老师积极乐观的人生态度，淡泊名利的高尚情操，深深影响着我，已经并将继续鼓舞着我在人生道路上不畏困难、风雨兼程；王老师严谨务实的工作作风，谦虚求是的治学精神，时刻鞭策着我，已经并将继续引领着我在学术科研的道路上不骄不躁、脚踏实地。在此特向王老师表示衷心的感谢。他严谨细致，一丝不苟的作风以及持续学习的精神是我以后工作中的榜样。

感谢课题组的秦庚师兄、文天鹏师兄、陈宇超师兄、张鹏鹏、靳垚、夏秀丽，还有师弟王双、邹爱华、王军、王景玄等，大家的共同探讨解决了课题中的一些问题，使我少走了弯路，节约了时间。

最后，衷心的感谢我的父母在我学习过程中给予的支持、鼓励和爱。

本论文的研究得到了甘肃省高等学校基本科研业务费专项(编号：0904ZTB147)、兰州理工大学博士基金(编号：SB04200801)及甘肃省高等学校研究生导师科研项目(编号：0703B-05)的资助，特此感谢。

郭智峰

2009年4月

## 附录A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

### 在学期间发表的学术论文：

- [1] 秦庚, 郭智峰, 王文达. 钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点抗剪承载力计算探讨. 中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十二次学术会议论文集. 厦门, 2009年10月, P141-144
- [2] 郭智峰, 王文达. 外包钢管约束加固火灾后钢筋混凝土柱初探. 第四届全国抗震加固改造技术学术研讨会论文集. 厦门, 2009年12月, P24-29
- [3] 王文达, 郭智峰, 史艳莉. Mechanical behavior of steel tube strengthening the RC columns after exposure to fire. 12th International Conference on Inspection, Appraisal, Repair & Maintenance of Structures, Vol2, p1149-1155, 23-25 April, 2010, Yantai, China, ISBN 978-981-08-5199-6 (ISTP 收录国际会议)

### 在学期间参与的科研项目：

- [1] 甘肃省高等学校基本科研业务费专项 (编号: 0904ZTB147): “钢管混凝土组合框架体系抗震关键技术研究”, 项目参加人, 在研。
- [2] 兰州理工大学博士基金 (编号: SB04200801): “常温及火灾后钢管混凝土柱-钢梁框架力学性能研究”, 项目参加人, 在研。
- [3] 甘肃省高等学校研究生导师科研项目 (编号: 0703B-05): “钢管混凝土框架抗震性能的研究”, 项目参加人, 已完成。