

学校代号 10731

学 号 062081402033

分 类 号 TU398

密 级 公开



## 硕士学位论文

# 钢管混凝土柱-钢梁环板节点 力学性能与设计方法研究

学位申请人姓名 秦 庚

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 钢与混凝土组合结构

论文提交日期 2009年5月20日

学校代号：10731

学 号：062081402033

密 级：公开

兰州理工大学硕士学位论文

钢管混凝土柱-钢梁环板节点  
力学性能与设计方法研究

学位申请人姓名：秦 庚

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：2009年5月20日

论文答辩日期：2009年6月3日

答辩委员会主席：马国纲 教授级高工

Research on Behavior and Design of Steel Beam to CFST Column  
Joints with External Stiffening Ring

By

QIN Geng

B.E. (Chongqing University) 2003

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

May, 2009

# 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 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应用 .....            | 1  |
| 1.2 钢管混凝土梁柱连接节点类型 .....            | 2  |
| 1.2.1 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点 .....        | 3  |
| 1.2.2 钢管混凝土柱-钢梁节点 .....            | 4  |
| 1.3 国内外钢管混凝土柱-钢梁环板节点研究状况 .....     | 6  |
| 1.4 本文的研究内容 .....                  | 11 |
| 1.4.1 研究对象 .....                   | 11 |
| 1.4.2 研究内容 .....                   | 12 |
| 第二章 钢管混凝土柱-钢梁环板节点的数值分析 .....       | 13 |
| 2.1 概述 .....                       | 13 |
| 2.2 有限元模型的建立 .....                 | 13 |
| 2.2.1 材料的本构关系 .....                | 13 |
| 2.2.2 单元类型及网格划分 .....              | 15 |
| 2.2.3 边界条件及荷载施加方式 .....            | 16 |
| 2.2.4 钢管与混凝土的界面模型 .....            | 16 |
| 2.2.5 非线性方程组求解 .....               | 17 |
| 2.3 算例分析 .....                     | 18 |
| 2.4 钢管混凝土柱-钢梁环板节点单调加载全过程分析 .....   | 21 |
| 2.4.1 典型试件的确定 .....                | 21 |
| 2.4.2 节点受力特性分析 .....               | 22 |
| 2.5 环板宽度对环板节点受力性能的分析 .....         | 30 |
| 2.6 小结 .....                       | 32 |
| 第三章 参数分析及承载力实用计算方法 .....           | 33 |
| 3.1 概述 .....                       | 33 |
| 3.2 钢管混凝土柱-钢梁环板节点弯矩-转角关系参数分析 ..... | 34 |
| 3.2.1 环板宽度 .....                   | 34 |
| 3.2.2 钢梁塑性极限弯矩 .....               | 35 |
| 3.2.3 柱截面含钢率 .....                 | 36 |
| 3.2.4 钢管强度 .....                   | 36 |
| 3.2.5 钢梁强度 .....                   | 37 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 3.2.6 混凝土强度 .....                     | 38 |
| 3.2.7 轴压比 .....                       | 39 |
| 3.2.8 梁柱线刚度比 .....                    | 39 |
| 3.3 钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点抗弯承载力计算方法 .....   | 40 |
| 3.3.1 节点弯矩-转角模型 .....                 | 41 |
| 3.3.2 节点抗弯承载力 .....                   | 41 |
| 3.3.3 节点初始刚度 .....                    | 44 |
| 3.3.4 形状参数 .....                      | 45 |
| 3.4 钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点抗剪承载力计算方法 .....   | 47 |
| 3.4.1 钢管混凝土柱抗剪承载力与节点核心区抗剪承载力的区别 ..... | 47 |
| 3.4.2 节点抗剪强度承载力参数分析 .....             | 49 |
| 3.4.3 加强环式节点抗剪承载力简化计算 .....           | 53 |
| 3.5 小结 .....                          | 58 |
| 结论及展望 .....                           | 59 |
| 参 考 文 献 .....                         | 61 |
| 致 谢 .....                             | 66 |
| 附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录 .....           | 67 |

## 摘 要

钢管混凝土柱-钢梁环板节点是实际工程中应用较为广泛的一种节点形式,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。

本文主要对钢管混凝土柱-钢梁外加强环板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混凝土柱-钢梁外加强环式节点进行数值分析。利用已有的试验结果对有限元模型进行了校核,在得到大量算例验证后,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,明晰了在受力过程中,组成节点的各构件截面上应力分布等微观机理,以及破坏模态。同时也分析了不同环板宽度下,节点破坏的特性。

2、对影响钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点梁端弯矩-转角关系的主要参数进行了分析,如:环板宽度、钢梁塑性极限弯矩、柱截面含钢率、钢管强度、钢梁强度、混凝土强度、轴压比、梁柱线刚度比等,得到各参数对此类节点抗弯承载力及初始刚度的影响规律。并在此基础上得到此类节点的抗弯承载力和初始刚度简化计算公式,并对简化计算模型进行了验证。

3、分析了主要参数对节点抗剪承载力的影响规律,并探讨得出了此类节点的屈服抗剪承载力计算公式。并校核了有限元计算结果与简化公式计算结果,理论计算与简化公式总体上吻合良好。

**关键词:** 钢管混凝土; 钢梁; 外环板节点; 抗剪承载力; 抗弯承载力; 环板宽度;

## Abstract

Steel beam to CFST column joints with external stiffening ring is actually a typical connection configuration in the building. The mechanical behavior and design approach of the joints are important for theoretical and practical research. In this paper, this type of joints mechanical behaviour and design approach were studied, specifically the following works:

1、The paper research on the key issues on CFST columns to steel beam joints with external stiffening ring, a 3-D finite element model (FEM) was established by ABAQUS. The load versus deformation curves of this type joints were comparison between theoretical and experimental results, and they are match well with each other.

2、Parameters study were performed based the FEM model, and those parameters were included, such as the width of external stiffening ring, the ultimate flexial strength of steel beam, the steel ratio of CFST column, the strength of steel tube and steel beam, the core concrete strength, the axial compression ratio and the beam to column linear stiffness ratio. The simplified practical design approaches for the ultimate flexural and initial bending stiffness of these joints were proposed based on parameter analysis. The simplified model was validated by FEM results.

3、Some parameters were analyzed on the panel shear load-carrying capacity of the type of joints based on the FEM model. A simplified design approaches for the ultimate shear capacity of the panel of these joints were proposed based on parameter analysis.

**Key words: concrete filled steel tube(CFST); steel beam; joint with stiffening ring; shear load-carrying capacity; flexual load-carrying capacity; width of ring;**



# 第一章 绪论

## 1.1 钢管混凝土结构的特点及应用

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(韩林海, 2007)<sup>[1]</sup>。目前工程中最常用的截面形式主要是圆形、方形和矩形, 见图 1.1(韩林海和杨有福, 2007)<sup>[2]</sup>。

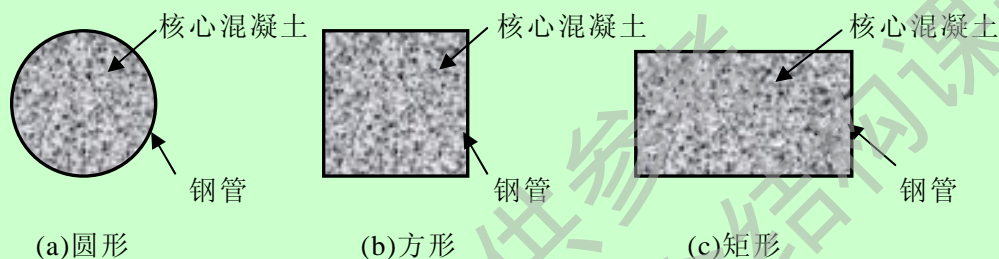


图 1.1 常见的钢管混凝土构件截面形式

钢管混凝土的基本原理有二: 借助钢管对核心混凝土的套箍约束作用, 使核心混凝土处于三向受压状态, 从而使核心混凝土具有更高的抗压强度和压缩变形能力; 借助内填混凝土的支撑作用, 增强钢管壁的几何稳定性, 改变空钢管容易失稳的模式, 从而提高其承载能力(蔡绍怀, 2003)<sup>[3]</sup>。

钢管混凝土的特点可简要归纳如下:

1、承载力高。正如基本原理所介绍, 钢管与混凝土相互弥补了彼此的弱点, 又充分发挥了各自的长处, 从而使钢管混凝土具有很高的承载能力, 一般都高于组成钢管混凝土的钢管和核心混凝土单独承载力之和。

2、塑性和韧性好。混凝土的脆性相对较大, 对于高强度混凝土更是如此。钢管混凝土结构的核心混凝土在钢管的约束下, 不但在使用阶段改善了它的弹性性质, 而且在破坏时具有较大的塑性变形。此外, 此类结构在承受冲击荷载和振动荷载时, 也具有很大的韧性。由于钢管混凝土具有良好的塑性和韧性, 因此抗震性能较好。

3、施工方便。与钢筋混凝土结构相比, 钢管本身就是耐侧压的模板, 因而浇筑混凝土时, 可省去支模、拆模等工序; 钢管本身就是钢筋, 它兼有纵向钢筋和横向箍筋的作用; 钢管本身又是承重骨架, 其焊接工作量远比一般型钢骨架少, 吊装质量较轻, 从而可简化施工安装工艺、节省脚手架、减少施工用地, 加速施工进度。

4、耐火性能较好。与钢结构相比, 火灾下, 由于核心混凝土可吸收钢管传来的热量, 从而使其钢管的升温滞后, 使其承载力损失相对较小, 而钢管也可以保护混凝土不发生崩裂现象。此外, 火灾后的加固补强工作量也相对较少。

5、经济效果好。理论分析和工程实践都表明，与钢结构相比，在保持自重相近和承载力相同的条件下，可节省钢材约百分之五十，焊接工作量可大幅度减少；与普通钢筋混凝土结构相比，在保持自重相近和承载力相同的条件下，构件的横截面尺寸可减少约一半，从而加大了建筑的有效面积，混凝土和水泥用量以及构件自重相应减少约百分之五十。



图 1.2 台北国际金融中心



图 1.3 广州电视塔

综上所述，由于钢管混凝土结构在承载力、抗震性能、施工工艺、耐火性能、经济效果等方面具有的优点，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、商业广场、多层办公楼及住宅，尤其高层和超高层建筑以及桥梁结构中，取得了良好的经济效果和建筑效果。如图 1.2 为 2003 年建成的台北国际金融中心，该建筑地下 5 层，地上 101 层，建筑高度 508m，柱采用了矩形钢管混凝土。图 1.3 为 2008 年建成的广州电视塔，总高度 610 米，其中塔身高 454 米，上部天线高 156 米，结构外筒采用 24 根圆形钢管混凝土柱斜交形成的网格筒体结构。

## 1.2 钢管混凝土梁柱连接节点类型

根据组成钢管混凝土框架结构中框架梁材料的不同，将钢管混凝土梁柱节点分为钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点和钢管混凝土柱-钢梁节点两大类。不同材料的框架梁及构造方式，节点的受力特点也不同。根据其受力特点，钢管混凝土结构的梁柱节点又分为刚接、铰接和半刚接三种：(1)刚接节点：在受力过程中，梁和钢管混凝土柱轴线的夹角保持不变，节点可以承受和传递支座反力和弯矩。(2)铰接节点：在荷载作用下，梁和柱的轴线在节点处的夹角可任意改变，梁只传递支座反力给钢管混凝土柱。(3)半刚接节点：受力过程中梁和钢管混凝土轴线的

夹角发生改变,即二者之间有相对转角位移(韩林海和杨有福,2007)<sup>[2]</sup>。以下对两种不同类型的节点就其受力特点进行分析归纳。

### 1.2.1 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点

钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点在一些工程中也得到了广泛应用。韩林海和杨有福(2007)<sup>[2]</sup>,钟善桐(1999<sup>[4]</sup>;2003<sup>[5]</sup>)已对此类节点进行了较为系统的论述,由于本文主要研究钢管混凝土柱-钢梁连接节点,在此只介绍几种典型的钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点形式。

#### (1) 钢筋贯通式节点

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。

陈洪涛等(1999)<sup>[9]</sup>进行了开圆孔和开长圆孔的钢管贯通式节点的实验研究。研究表明,节点开孔后通过加肋补强,不会影响柱子的承载力。

蔡健等(2000)<sup>[10]</sup>进行了钢管贯通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。

此类节点的特点是:传力明确、受力性能较好,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。

#### (2) 外加强环式节点

在钢管混凝土柱上,于梁的顶面和底面纵筋位置上设置上、下外加强环板,上、下环板之间的竖向钢板用来搭焊梁内斜筋,以传递梁端竖向剪力。

李至钧和阎善章(1994)<sup>[11]</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地震区推广应用。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>[12]</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,吴发红等(2001)<sup>[12]</sup>提出如下建议:(1)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;(2)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。

#### (3) 钢筋混凝土环梁式节点

这种节点是在梁截面高度处围绕钢管设置一圈钢筋混凝土圈梁,在环梁的中、

下部，于钢管的外表面焊上环形钢筋，用于传递剪力。

方小丹等(1999)<sup>[13]</sup>，周栋梁等(2005)<sup>[14]</sup>对此类节点进行了的试验研究及有限元分析，包括节点的反复循环荷载试验和一个两跨三层框架的反复循环荷载试验。通过分析表明，在环梁一定高度范围内，环梁与柱之间会有很窄的缝隙。环梁宽度和框架梁宽度对转角刚度和等效宽度影响较大。因此此类节点只能作为半刚接节点来对待；而且还应确定一个环梁的最小高度，以保证环梁的混凝土保护层处于弹性工作阶段。

由于此类节点基本没有现场焊接工作，制作简单，施工和经济方面的优越性明显，因此目前已大量用于实际工程。

#### (4) 劲性环梁式节点

这种节点形式是将节点区的抗剪牛腿截面加高至梁的纵筋以下，并将牛腿加长，使得牛腿的抗弯剪能力提高，在钢管周围敷设好环梁筋后，浇筑混凝土在节点周边形成了一圈刚度较大的劲性混凝土环梁，即刚性节点区，弯矩、剪力便通过此区域传到钢管混凝土柱上。

蔡健等(2002)<sup>[15]</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。

此类节点的特点是刚度大，承载力高，钢管柱能充分参与梁端弯矩的分配，力学性能较好，而且能避免穿心牛腿带来的麻烦，对钢筋混凝土梁比较适用，但是由于在节点区有布置较密的环梁钢筋，影响混凝土的浇筑。

### 1.2.2 钢管混凝土柱-钢梁节点

钢管混凝土柱-钢梁节点在国内外的多、高层建筑中得到广泛应用，韩林海和杨有福(2007)<sup>[2]</sup>，钟善桐(1999<sup>[4]</sup>；2003<sup>[5]</sup>)，钟善桐和白国良(2005)<sup>[6]</sup>对此类节点进行了较为系统的论述，下面介绍几种较为常见的钢管混凝土柱-钢梁节点的类型。

#### (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。

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。

#### (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。

此类节点的优点是：构造简单，用钢材少，不占室内空间。由于本文主要研究钢管混凝土柱-钢梁环板节点，因此对此类节点的研究将在下节详述。

### (3)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满焊。

Elremaily 和 Azizinamini(2001)<sup>[16]</sup>对圆钢管混凝土柱-穿心钢梁式节点进行了实验研究。试件尺寸约为原型结构的 2/3，钢管截面外直径为 305mm 和 406mm 两种。结果表明，尽管各试件的破坏形态不同，但都表现出良好的延性。当柱的抗弯强度达到梁的 1.5 倍时，即可形成具有良好抗震性能的“强柱弱梁”式节点。

Fujimoto 等(2000)<sup>[17]</sup>对带有穿心隔板及节点区柱身带有加劲肋的节点进行了研究。考察的参数主要有：材料强度、节点构造、几何尺寸、轴压比和荷载作用方式等。研究结果表明，各类节点都没有发生明显的刚度和强度退化现象，耗能能力良好。

这种节点主要用于弯矩和剪力都很大的框架结构体系中。该节点的刚度很大，但钢材用量较多，加工较复杂，节点处的复杂结构对混凝土的浇筑有很大的影响。

### (4)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。

Oh 等(1998)<sup>[18]</sup>对 T 形外加劲板型节点的滞回性能进行了实验研究。实验结果表明，除了 T 形加劲件较小的节点外，其余节点都表现了良好的变形能力，同时还发现，在钢管壁外焊接 T 型加劲板，会导致冷弯钢管的角部焊缝处发生剪切破坏，应采取构造措施予以避免。

Kang 等(2001)<sup>[19]</sup>T 形外加劲板型节点，进行了实验研究和有限元分析。实验结果表明，在往复荷载作用下，T 形外加劲板有利于提高节点的极限弯矩及刚度；研究结果表明，T 形外加劲板的设置可改变节点的破坏模态，即由钢管壁角部发生弯曲屈服变为受拉屈服破坏模态。

Kim(2002)<sup>[20]</sup>进行了 6 个较大尺寸的钢管混凝土柱 T 形外加劲板型节点的滞回性能实验研究。实验结果表明，实测的滞回曲线饱满。试件有三种破坏形态，即水平组件抗剪破坏、竖向组件受拉破坏和钢梁屈曲破坏。

### (5)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困难。

#### (6) 锚定式

此类节点适用于钢管混凝土柱和钢梁连接。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。这种节点形式同加强环式节点比较，节省钢材，但管内焊接不方便，节点刚度较小，只能用于管径较大而拉力又较小的情况。

#### (7) 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。因而应用不多。

由于钢管混凝土在多、高层建筑中的广泛应用，以及随着建筑结构形式的多样，还会产生新的节点形式，如竖直加劲肋式、狗骨式等。我们不仅要研究符合新结构形式的节点，还要对已有的节点形式进行更深入细致的研究，使节点的设计在安全的基础上，更能符合实际，以便节约材料。

由于环板式节点具有传力明确、刚度大、塑性性能好、承载力高等优点，在实际工程中运用较多，因此对此类节点的研究也相对较多。下节主要介绍国内外对钢管混凝土柱-钢梁环板节点的研究现状。

### 1.3 国内外钢管混凝土柱-钢梁环板节点研究状况

李至钧(1987)<sup>[21]</sup>提出了用柱比法计算加强环内力，通过试验得出了环管混凝土试件最先屈服的部位是 $\varphi=30^\circ$ ，按照日本规范确定加强环和管壁共同工作的宽度 $b_e$ ，通过试验研究提出日本规范的近似法计算值偏大并给出的计算公式。

张大旭和张素梅(2001)<sup>[22]</sup>对圆钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点的力学性能进行了实验研究，包括强柱弱梁及削弱节点区两类节点，基于实验结果，张素梅和张大旭(2001)<sup>[23]</sup>对钢管混凝土梁柱节点梁端荷载-位移滞回曲线进行了理论分析，建立了节点恢复力模型，按照传统和改进两种分析方法，编制数值计算程序进行节点荷载-位移滞回曲线分析，理论计算结果与实验数据吻合良好。

郑锦桐(2002)<sup>[24]</sup>对梁翼缘与外环板采用角焊缝和全熔透焊缝，上下环板之间的竖板与环板相连或者分离的五个圆钢管混凝土节点进行了梁端加载的往复实验。实验结果表明轴力较高时，节点核心区剪力变形明显，整体延性好；相对轴力较低时，节点核心区剪力变形较小，整体韧性差。采用核心区剪力理论和柱挠曲理论预测核心区的剪力传递行为。

苏恒强和蔡健(2003)<sup>[25]</sup>研究了2个钢管混凝土加强环式梁柱节点的力学行为，分析了梁、钢管壁和加强环的应变分布规律。试件均采用钢梁，并采用构造不同的

环间加劲肋。试验结果表明,钢管混凝土加强环式节点力学性能良好,节点刚度大;环间加劲肋的构造对节点的受力性能影响不大;加劲肋可以看作加强环梁的弹性支座,可有效地降低环梁的跨度。

闫月梅和杜晓巍(2004)<sup>[26]</sup>利用有限元软件ANSYS对钢管混凝土加强环式节点中受拉加强环板的应力应变分布情况及其主要影响因素进行了分析。结果表明:受拉加强环板在转角处存在着应力集中现象,但是通过化角的措施可以有效降低其影响。受拉加强环的受力状况类似一道偏心受拉的环形梁,加强环板的厚度和宽度是影响加强环承载力的主要因素。钢管壁在外力作用下能有效地参与环板受力,但是参与工作的范围有限。分析结果可为今后加强环式节点的设计提供重要的参考价值。

陈娟和王湛(2004)<sup>[27]</sup>借助ANSYS软件建立实体模型来分析加强环式钢管混凝土柱节点的性能;制作了6个比例1:3的节点模型进行试验,研究节点在不同钢梁尺寸下的受力变形性能和半刚性特性,并利用试验结果对有限元模型的适用性进行了校核,得到与实际相符的有限元模型;然后在此模型基础上,对三种形式的加强环节点进行刚度分析比较,确定计算模型。分析表明,加强环式钢管混凝土柱节点在梁端荷载作用下,之间存在着相对转动;加强环形式对节点刚度有一定影响,整环节点的刚度要比部分环节点刚度大,部分环节点的刚度可按其相对的整环节点刚度的89%进行折减;在所有影响节点刚度的参数中,梁的截面高度影响最大,而梁腹板厚度几乎没有影响;最后确定的该节点的 $M-\theta$ 模型,可以在设计时参考使用。

李成玉和郭耀杰(2004)<sup>[28]</sup>外加强同心圆环式节点的受拉环简化为T形截面的圆环结构。应用曲梁的有关理论,得出了环板的应力分布规律:单向受拉环板的应力最大区出现在梁-环结合转角处,双向受拉环板的应力最大区则不仅出现在梁-环结合转角处,而且还出现在 $45^\circ$ 的内侧区域。

李成玉等(2005)<sup>[29]</sup>对12个足尺钢管混凝土柱-钢梁外加强环空间节点进行了静力试验。基于“挠度法”,对节点刚度进行了测试。根据测试结果,分析了影响节点刚性的各种因素,如环板尺寸、加载方式及柱径后比( $D/t$ )。最后指出,外加强环式节点可以当作刚性节点使用,但必须满足一定的条件,即外加强环必须具有足够的刚度。另外这种节点还具有明显的空间特性。

吕西林等(2005)<sup>[30]</sup>介绍了《矩形钢管混凝土结构技术规程 CECS159:2004》<sup>[7]</sup>中节点设计的部分内容,主要是关于矩形钢管混凝土柱与钢梁连接节点的设计,包括梁柱的连接形式、节点抗弯强度的设计方法、节点域的抗剪设计方法,以及构造方面的规定。

霍静思(2005)<sup>[31]</sup>进行了14个火灾作用后钢管混凝土柱-钢梁连接节点在恒定轴压力和低周反复荷载作用下的滞回性能实验研究。通过实验,研究了常温下和



火灾后、不同梁柱线刚度比和轴压比情况下、以及常温下与经过修复后节点力学性能的变化规律。提出了可计算火灾作用后钢管混凝土结构节点在单调和往复加载情况下荷载-位移关系的理论分析模型,该模型考虑了结构在荷载作用下的物理和几何双重非线性。算例分析结果表明,该理论模型的计算结果与实验结果吻合较好。

秦凯等(2005)<sup>[32]</sup>对方钢管混凝土柱和钢梁间采用外加强环的节点进行了实验研究。通过对5个节点的拟静力实验,得到下列结论:(1)节点试件的滞回曲线呈明显的梭形,且较丰满,耗能能力强。(2)轴压比和外加强环尺寸对节点的承载力影响不显著,但对节点的延性有显著的影响。轴压比增大及外加强环的削弱都将降低节点的变形能力,从而降低节点的延性。(3)混凝土楼板对节点试件的正向刚度有提高作用,在刚度分析中应考虑混凝土楼板的作用。

金刚等(2005)<sup>[33]</sup>对方钢管混凝土结构内隔板节点进行了试验研究。通过低周反复荷载试验研究了方钢管混凝土结构的抗震性能。结果表明,与钢梁相交的方钢管混凝土节点结构具有承载能力大、滞回特性稳定、延性大和吸收能量多等优点。试验结果与根据现有规范计算得到的结果其有较好的一致性。

王文达等(2006)<sup>[34]</sup>进行了8个方钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点试件在恒定轴力和水平往复荷载作用下的滞回性能实验研究,考察了钢管混凝土柱轴压比和环板宽度对节点力学性能的影响。结果表明:柱轴压比对节点的水平承载力和抗震性能影响较大,随着轴压比的增大,节点的水平极限承载力下降,位移延性和耗能能力降低;不同环板宽度节点的滞回曲线均为饱满的梭形,强度和刚度退化不明显。

王静峰等(2007)<sup>[35]</sup>对王文达等(2006)<sup>[34]</sup>的试验进行了有限元分析。给出了有限元计算中钢材和混凝土本构关系模型、钢管及其核心混凝土之间界面模型等确定方法,并提出了合理的环板宽度设计建议,理论计算结果与试验结果吻合较好。

陈曦和王湛(2007)<sup>[36]</sup>利用有限元软件ANSYS对加强环式钢管混凝土节点梁柱连接的刚度进行了有限元分析。对节点域各个参数进行分析,从而确定影响梁柱连接刚度的重要因素。最后,利用MATLAB将有限元数据拟合成描述该节点梁柱连接刚度通用的 $M-\theta$ 公式。

凡红等(2007)<sup>[37]</sup>通过对4个隔板贯穿式方钢管混凝土柱-钢梁连接节点试件的静力性能试验研究,揭示此类节点的受力机理和破坏形态,探讨了梁端翼缘两侧的侧板、钢管柱的宽厚比以及隔板的外伸长度等因素对节点承载力和传力机理的影响。试验结果表明:该类节点具有受力明确,传力途径清晰的特点;宽厚比的改变对节点承载力的影响不大,但对于节点板剪应变的影响较大;梁端翼缘两侧增加侧板可以减缓隔板与梁相交的角隅处应力集中现象,使塑性铰出现梁上,远离脆弱的梁端焊接区,提高了节点的延性。



杜培源等(2007)<sup>[38]</sup>利用有限元软件ANSYS对方钢管混凝土柱-钢梁节点进行了非线性静力分析和滞回分析,讨论外隔板式节点翼缘斜率对节点的应力分布规律、承载力、延性和滞回性能的影响。分析表明:外隔板式节点具有很好的刚度和延性,节点滞回环饱满,耗能能力强,当梁端翼缘斜率不小于1/4时,可获得更好的受力性能。梁柱连接处柱脚附近应力集中现象严重,因此梁柱连接的焊缝质量要有充分保证。

徐礼华等(2008)<sup>[39]</sup>制作5个隔板贯穿式节点试件,通过低周反复加载试验,探讨此类节点的抗震性能,分析梁端翼缘两侧的侧板、钢管柱的宽厚比以及隔板的外伸长度等因素对节点抗震性能的影响。试验结果表明:各试件实测滞回曲线均比较饱满,没有明显的刚度退化现象,具有较好的耗能性能;梁端翼缘两侧增加侧板不仅可以缓解隔板与梁相交的角隅处应力集中现象,而且提高了节点的延性。

聂建国和徐桂银(2009)<sup>[40]</sup>研究了方钢管混凝土柱节点的受剪屈服问题,建立了方钢管混凝土柱节点抗剪受力模型。并且在试验的基础上,将方钢管混凝土柱节点抗剪受力过程分为协同工作、共同工作、屈服强化和极限变形4个阶段,抗剪受力由钢管腹板和节点核心区混凝土共同承担,其中核心区混凝土又以平面抗剪和压杆模式分别对抗剪承载力作出贡献。

Choi等(1995a)<sup>[41]</sup>进行了11个钢管混凝土柱-钢梁节点在单调或反复荷载作用下力学性能的研究,比较了“无外加强环板”、“与钢管有无焊接的外加强环板”、“无焊接的改进T型外加强环板”和“外加强环板加环向锚固钢筋”等构造措施情况下节点的工作性能。Choi等(1995b)<sup>[42]</sup>的研究结果表明:焊接外加强环板和外加强环板加环向锚固钢筋等类型节点都具有较高的承载力和刚度,其滞回曲线饱满,且表现出良好的延性。

Shim等(1995)<sup>[43]</sup>进行了钢管混凝土柱与H型钢梁节点的静力及滞回性能实验研究,考察的参数主要有:加强环板开口尺寸和厚度、节点区是否浇筑混凝土等。研究发现,即使内加强环板圆孔的开口率达到50%,试件的强度也几乎不会降低。如果加强环板的厚度为钢梁翼缘厚度的一半,应使内加强环板圆孔的开口率低于50%,以保证节点工作的稳定性。

Alostaz 和 Schneider(1996)<sup>[44]</sup>利用三维非线性有限元方法分析了钢管混凝土柱-钢梁节点在不同构造措施情况下的抗震性能。研究的节点类型有:(1)简单焊接节点;(2)外加强环板式节点;(3)预埋焊接变形钢筋式节点;(4)内埋铆钉式节点;(5)穿心腹板加内埋铆钉式节点;(6)穿心钢梁式节点等。对钢管径厚比、轴压比及梁的弯矩剪力比等参数对节点力学性能影响的分析结构表明,与钢梁直接焊接到钢管上的节点相比,带有把钢梁内力传递给核心混凝土组件的节点具有更高的承载力和刚度。

Schneider 和 Alostaz(1998)<sup>[45]</sup>进行了六种钢管混凝土节点的实验,研究了不同

的节点细部构造对节点力学性能的影响。结果表明：不同类型节点在反复荷载作用下的滞回性能与 Alostaz 和 Schneider(1996)<sup>[43]</sup>的理论分析结果相同，即在受力过程中，对于钢梁直接焊接于钢管上的节点，由于受力过程中钢管会发生较大的屈曲变形，从而会导致钢梁翼缘板与钢管之间连接焊缝发生撕裂，因此工程中不宜采用该类节点。研究结果还表明：(1)不同的穿心构件的性能差别比较大，穿心腹板节点可以用于支撑框架中；(2)外加强环板可以把翼缘板上的力传递到钢管周围，从而使钢梁达到其抗弯强度；(3)焊接贯通钢筋式节点可以显著地提高节点的耗能性能，可使节点抗弯承载力达到 1.5 倍钢梁的塑性抗弯承载力；(4)穿心翼缘板节点的滞回性能较差，但穿心钢梁式节点可把钢梁的内力有效地传递给核心混凝土、减轻钢管的应力集中，且抗震性能最为优越。

Cheng 等(2000)<sup>[46]</sup>研究了钢管宽厚比和钢管内灌混凝土与否等因素对贯通加强环板-腹板栓接式节点力学性能的影响。结果表明：钢管内浇筑混凝土后可显著提高构件的强度和屈服后的刚度，且钢管壁越厚，构件的延性越好。

Chiew 等(2001)<sup>[47]</sup>对钢梁-钢管混凝土柱节点在单调荷载作用下的力学性能进行了有限元分析与实验研究，并根据理论分析结果与其他研究者的实验结果，推导出节点抗弯强度的简化计算公式。

Nishiyama 等(2004)<sup>[48]</sup>对贯通是内加强环板和外加强环板式节点进行了实验研究与理论分析，包括 7 个中柱节点、3 个边柱节点和 1 个空间节点。主要考察了荷载作用方向、节点类型、钢管截面形状、钢材屈服强度、混凝土强度、轴向荷载等节点力学性能的影响。结果表明：全部试件都是在节点区发生屈服破坏。整个加载过程中，节点区的变形发展稳定，且破坏也是缓慢达到的，没有发生承载力快速下降、钢管屈曲以及混凝土被压碎的现象，圆钢管混凝土柱节点的延性好于矩形钢管混凝土柱节点。在整个加载过程中，钢管混凝土柱和钢梁几乎处于弹性状态，节点区的变形在塑性阶段占了全部变形的大部分，当外加强环节点受轴向拉力时，由于节点去混凝土的开裂，使得节点区的变形在塑性阶段占全部变形的比例降低；钢材强度越高，节点的承载力越大，但延性降低。试件的轴压比越大，其延性越低。实验获得的试件屈服强度和极限强度均高于 AIJ(1991)计算的短期允许强度和极限强度。由于考虑了钢管对混凝土的约束作用，其理论计算的节点剪力-剪切角骨架曲线与实验曲线吻合较好。

Cheng 和 Chung(2003)<sup>[49]</sup>提出了模拟钢管混凝土梁柱节点剪力传递的非线性分析模型，该模型可考虑轴力对节点核心区剪力传递的影响。

Choi 等(2006)<sup>[50]</sup>采用 ANSYS 对方钢管混凝土柱外环板式节点进行了三维实体非线性有限元分析，分析组成节点构件的各个参数对  $M-\theta$  曲线的影响，最后通过最小均方的方法回归得出这种节点的  $M-\theta$  函数方程。

Wang 等(2008)<sup>[51]</sup>对钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点，在轴向压力和水平

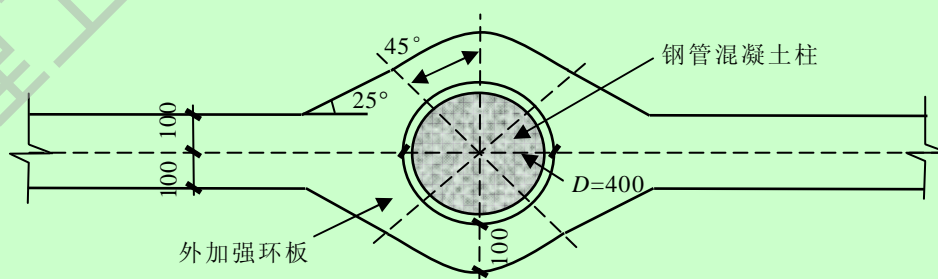
荷载共同作用进行了实验研究和理论分析,其中包括 5 个变截面和 3 个基本节点。研究表明:在相同荷载作用下变截面节点与基本节点相比较,横向水平荷载和位移曲线并没有明显的变化,耗能能力得到明显改善。

综上所述,目前对钢管混凝土柱-钢梁加强环式节点的研究较多,但对此类节点受力机理研究较少,节点承载力与环板宽度计算方法仍有待完善。此外对加强环式节点的刚性研究较多,但是对此类节点在考虑系统参数前提下研究节点抗剪、抗弯承载力计算方法的研究还不是很多。此外在论述文献的过程中也发现一些问题。如《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>中规定矩形钢管混凝土柱-钢梁节点承担的弯矩为柱翼缘板和环板两部分提供,节点极限抗弯承载力为上述两项之和再乘以力臂。这种方法未把节点核心区内钢管与混凝土共同工作的效应体现。另一种方法是通过试验及数值模拟后进行参数回归,国内外学者通过此方法进行了一些研究,并且得到了钢管节点抗弯承载力公式,但由于所研究的方法和侧重的参数,以及对节点转角的定义等都不同而限定了其适用范围。因此,确定一种可以合理体现节点核心区受力机理的试验方法和理论模型,对节点进行系统参数分析,是进一步完善节点抗弯强度计算方法的关键。因此,进行全面系统的分析加强环式节点的力学性能和设计方法研究是必要的。

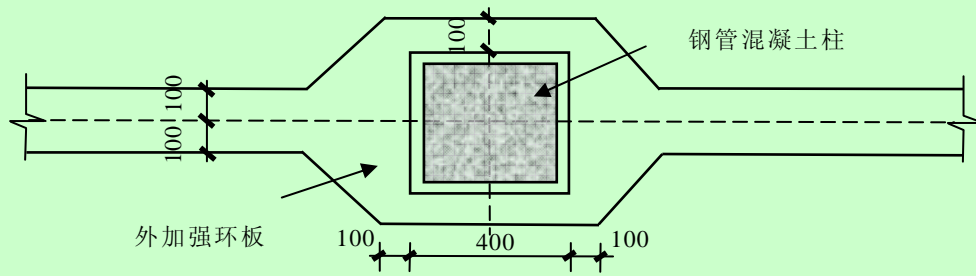
## 1.4 本文的研究内容

### 1.4.1 研究对象

由于钢管混凝土柱-钢梁加强环式节点具有传力明确、刚度大、塑性性能好、承载力高等优点;越来越多的高层建筑采用此类节点,但是对如何合理确定加强环板宽度缺乏合理的计算依据。本文主要的研究对象是加强环与钢梁之间带有圆弧过度的此类节点,如图1.4节点示意图。



(a)圆钢管混凝土



(b)方钢管混凝土

图1.4 加强环节点示意图

### 1.4.2 研究内容

本文运用ABAQUS有限元软件，采用数值分析的方法，研究钢管混凝土柱-钢梁环板节点的力学性能和破坏机理，针对环板节点的研究现状，拟展开以下几个方面的工作：

1、在总结国内外对钢管混凝土柱-钢梁环板节点研究成果的基础上，基于ABAQUS有限元软件，建立钢管混凝土柱-钢梁加强环节点的实体模型，并根据本课题组所收集的试验数据结果和有限元结果相比较，校核有限元模型。

2、利用校核后的有限元模型，分析钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点的工作机理，及各组成构件在受力过程中截面上的应力分布等微观机理，以明晰外加强环板节点的破坏模态。同时也分析了不同环板宽度时，节点破坏的特性，为如何确定合理的环板宽度奠定了基础。

3、对影响钢管混凝土柱-钢梁加强环节点荷载-位移关系的主要因素，如：环板宽度、钢梁塑性极限弯矩、柱截面含钢率、钢管强度、钢梁强度、混凝土强度、轴压比以及梁柱线刚度比等参数进行分析。在此基础上，得到钢管混凝土柱-钢梁加强环节点的抗剪、抗弯承载力实用计算方法，为钢管混凝土结构的合理设计提供依据。



## 第二章 钢管混凝土柱-钢梁环板节点的数值分析

### 2.1 概述

本章采用有限元软件ABAQUS(Hibbitt等, 2005)<sup>[52]</sup>进行钢管混凝土柱-钢梁环板节点的数值分析, 并且对ABAQUS中材料的本构关系、单元类型、网格划分、荷载及边界条件做了介绍。最后建立了钢管混凝土柱-钢梁环板节点的模型, 在此基础上, 进行大量算例计算, 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。并通过建立的模型分析了典型试件节点的受力性能及破坏机理。

### 2.2 有限元模型的建立

#### 2.2.1 材料的本构关系

##### 1、钢材的应力-应变关系模型

本文中低碳钢选用韩林海(2007)<sup>[11]</sup>中的二次塑流模型, 由图2.1应力-应变关系曲线所示, 二次塑流模型分为弹性段(oa)、弹塑性段(ab)、塑性段(bc)、强化段(cd)和二次塑流(de)等五个阶段。高强钢材选用双线性强化模型, 强化段的模量取值为 $0.01E_s$ ,  $E_s$ 为钢材的弹性模量。

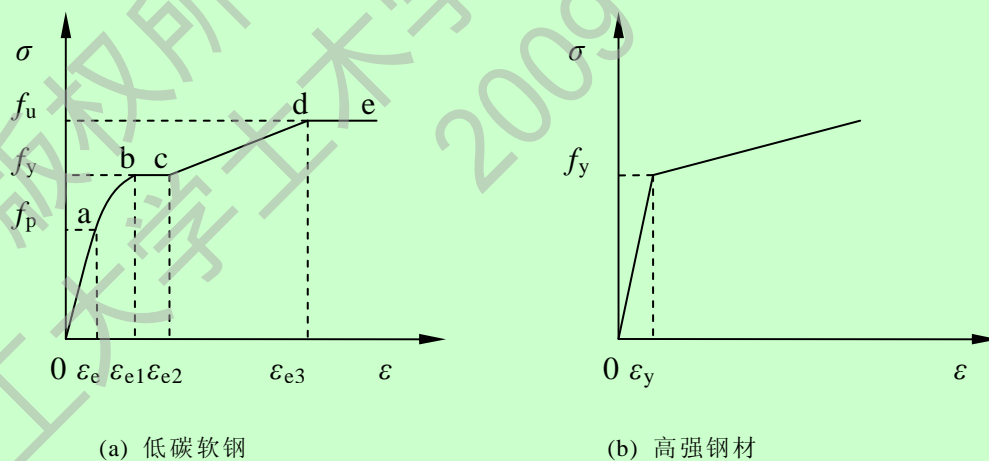


图2.1 钢材应力-应变关系

钢材三向应力状态时的应力强度和应变强度分别为:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad (2.2)$$

各阶段的应力强度-应变强度的增量关系详见文献(韩林海, 2007)<sup>[11]</sup>。

## 2、核心混凝土的应力-应变关系模型

由于混凝土本身的特点决定了其材料组成的不均匀性和应力-应变关系的复杂性，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。

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha \times \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (2.3)$$

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。

### a) 受压混凝土的应力-应变关系模型

本文中核心混凝土采用韩林海(2007)<sup>[11]</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：

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0 \cdot (x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2.4)$$

式中：

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

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

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

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

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

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

### b) 受拉混凝土的应力与断裂能关系

本文混凝土受拉软化性能采用应力-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：①采用混凝土受拉的应力-应变关系；②采用混凝土应力-裂缝宽度关系；③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。其中，采用能量破坏准则定义混凝土受拉软化性能时具有更好的计算收敛性(Hillerborg等，1976<sup>[53]</sup>)，该准则基于脆性破坏概念定义开裂的单位面积作为材料参数。混凝土受拉软化模型见图2.2，图中， $\sigma_f$ 和 $U_1$ 分别为混凝土

应力和裂缝宽度，当裂缝尖端受拉应力达到开裂应力 $\sigma_{t0}$ 时裂缝形成，应力沿着裂缝长度方向线性降低，在裂缝宽度达到 $U_{10}$ 时降为零。断裂能 $G_f$ 参考Hibbitt等(2005)<sup>[52]</sup>确定，对于C20混凝土， $G_f$ 取为40N/m；对于C40混凝土， $G_f$ 取为120N/m，中间插值计算。参考沈聚敏等(1993)<sup>[54]</sup>中提供的混凝土抗拉强度计算公式，建议开裂应力 $\sigma_{t0}$ 近似按下式确定：

$$\sigma_{t0} = 0.26 \times (1.25 f_c')^{2/3} \quad (2.5)$$

其中， $f_c'$ 为混凝土圆柱体抗压强度。

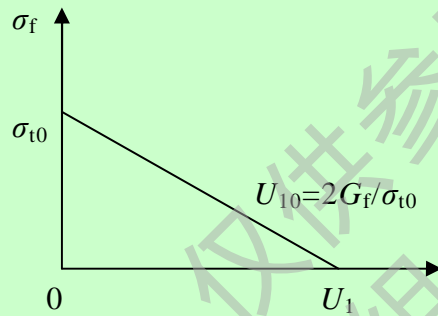


图2.2 混凝土受拉软化模型

### 2.2.2 单元类型及网格划分

在建立的ABAQUS有限元模型中，钢管混凝土柱-钢梁环板节点是由钢管、钢管内核心混凝土、环板、钢梁及加载板组成。钢管内核心混凝土和加载板采用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。钢管和钢梁及环板采用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。

节点模型的网格划分，钢管、钢管内核心混凝土、刚性加载板采用映射网格；对加强环和钢梁采用扫掠网格。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，柱底部铰接，两侧梁端处各有一支杆。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，在第三章参数分析中，为计算方便，取1/2模型进行模拟计算。

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2.3所示。在钢管混凝土柱底部的钢垫块底面中线上，施加1、2、3三个方向的位移约束，以模拟柱底部的铰支座。在左右梁端仅施加2、3两个方向的位移约束，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。

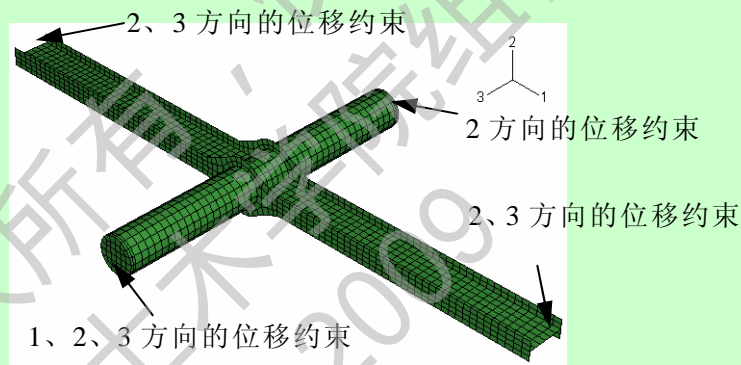


图2.3 节点网格划分与边界条件示意图

### 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，界面可以传递剪应力，直到剪应力达到临界值，界面之间产生相对滑动，在滑动过程中界面上的剪应力保持为临界值不变，界面临界剪应力与界面法向压力的关系如图2.4所示。剪应力临界值与界面接触压力成比例，且不小于平均界面粘结力，即：

$$\tau_{\text{crit}} = \mu \cdot p \geq \tau_{\text{bond}} \quad (2.6)$$

其中， $\mu$ 为界面摩擦系数，根据Schneider(1998)<sup>[56]</sup>建议取 $\mu=0.25$ 。钢管与核心混凝土之间的平均界面粘结力，对于圆钢管混凝土可以根据Roeder(1999)<sup>[57]</sup>的研究成果，按下式确定：



$$\tau_{\text{bond}} = 2.314 - 0.0195 \cdot (d/t) \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2.7)$$

根据Morishita等(1979a<sup>[58]</sup>,1979b<sup>[59]</sup>)的研究成果,约为圆钢管混凝土的0.75倍。其中,  $d$ 为核心混凝土的直径或边长。

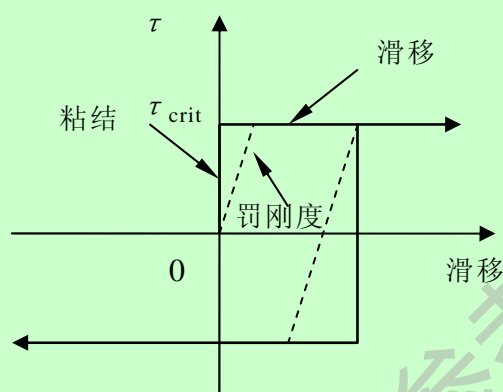


图2.4 界面剪应力与滑移

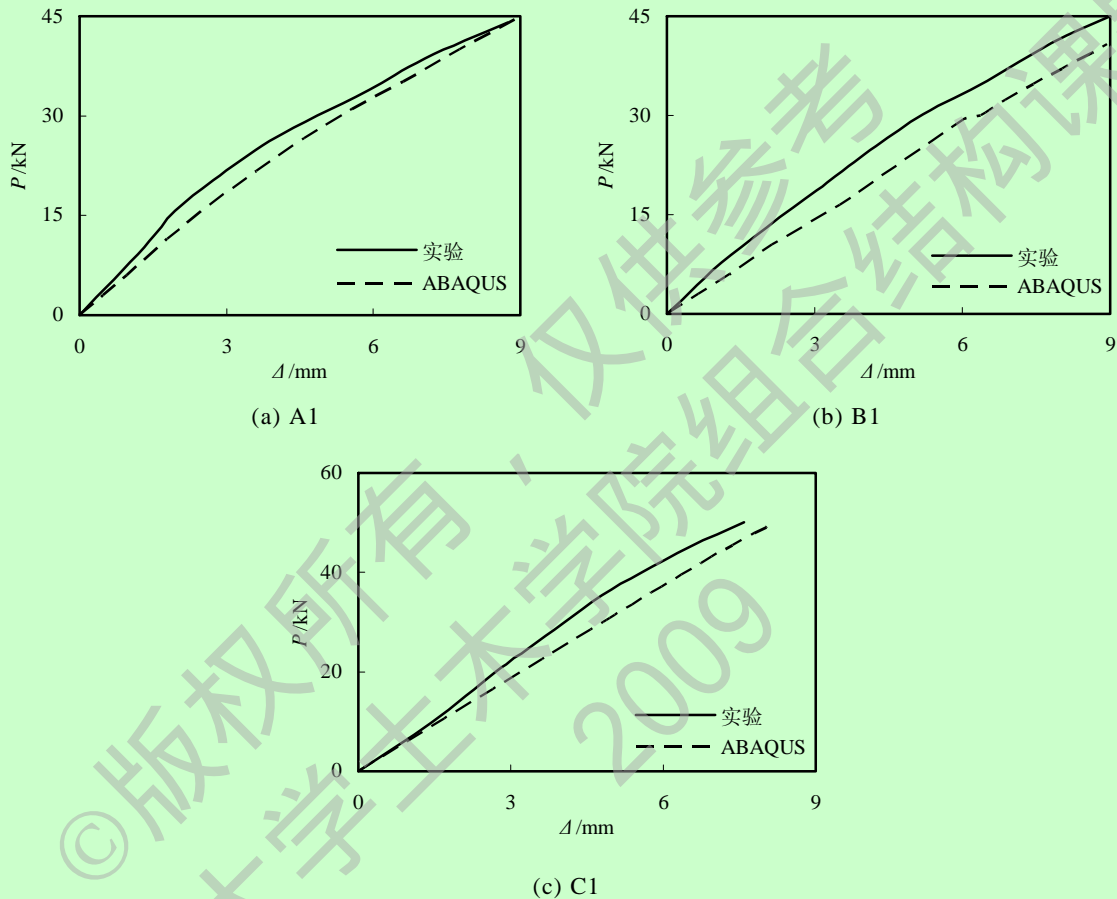
本文钢管混凝土节点有限元模型中,除了主要的钢管与混凝土的接触外,还应该考虑环板与钢管的接触,钢梁自身翼缘与腹板的接触,以及加载板与柱端混凝土、钢管的接触等。本文中加强环板、腹板与钢管均采用焊接,钢梁由钢板焊接而成。因为主要考查节点的极限承载力和初始刚度,钢梁由腹板、翼缘分别建模组成,考虑焊缝至少等强,采用绑定约束(TIE)来模拟。在利用ABAQUS分析中,以上各处接触均采用自由度耦合的办法处理,即认为这些连接处具有相同连续的自由度。采用约束命令中的TIE命令将采用焊接的面约束起来。柱两端加载板与钢管的接触采用约束命令中的Shell-to-Solid Coupling,加载板与柱端混凝土也采用约束命令TIE。

### 2.2.5 非线性方程组求解

本文的计算包括,钢材与混凝土的材料、几何、接触三类非线性问题。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,其计算过程将模拟划分为一定数量的载荷增量步,并在每个荷载增量步结束时寻求近似的平衡构形。对于一个给定的荷载增量步,通常需要若干次迭代才能确定一个可以接受的解。采用自动增量步长法,可以方便而有效的求解非线性问题,即如果连续两个增量步小于5次迭代即收敛,则自动将增量提高50%,为避免由于增量步过大造成收敛困难,可以设定最大增量步长。如果经过16次迭代求解仍不能收敛,即放弃当前增量步,并将增量步减小为原来的25%重新计算,用较小的荷载增量步来寻求能够收敛的解答。在终止分析之前,允许至多5次减小增量步的值。

### 2.3 算例分析

为了验证本文计算方法和所建模型的可靠性,进行大量钢管混凝土柱-钢梁环板节点的算例分析。图2.5-图2.8分别给出了陈娟和王湛(2004)<sup>[27]</sup>,李成玉等(2005)<sup>[29]</sup>,王文达等(2006)<sup>[34]</sup>,周天华(2004)<sup>[63]</sup>所进行的钢梁节点实验和本文模拟计算结果的比较。通过比较可以发现采用本文的计算方法分析所得的结果与实验结果吻合良好。



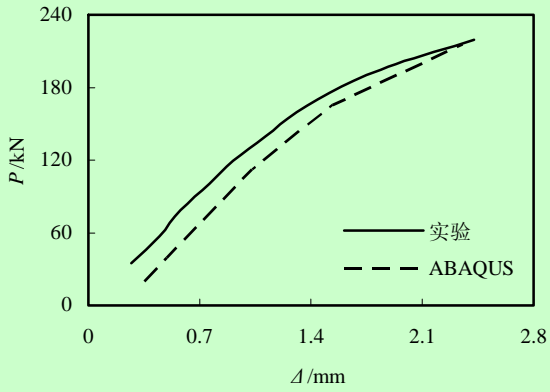
试件尺寸: A1:钢管 $B \times t \times H = 159 \times 5 \times 1000$  mm, 钢梁I16  $L = 2000$  mm, 加强环 $D \times t = 80 \times 10$  mm

B1:钢管 $B \times t \times H = 159 \times 5 \times 1000$  mm, 钢梁H175 $\times 90 \times 5 \times 8$  mm  $L = 2000$  mm

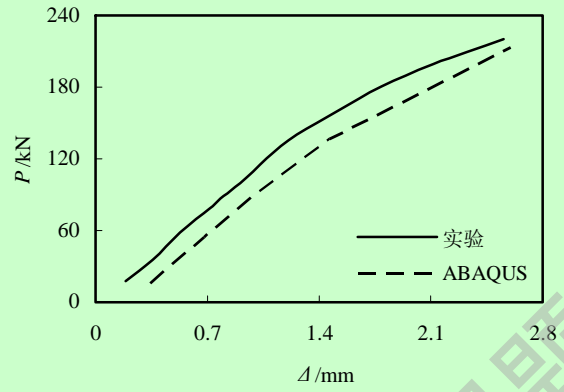
C1:钢管 $B \times t \times H = 159 \times 5 \times 1000$  mm, 钢梁H198 $\times 99 \times 4.5 \times 7$  mm  $L = 2000$  mm

B1、C1加强环 $D \times t = 80 \times 8$  mm

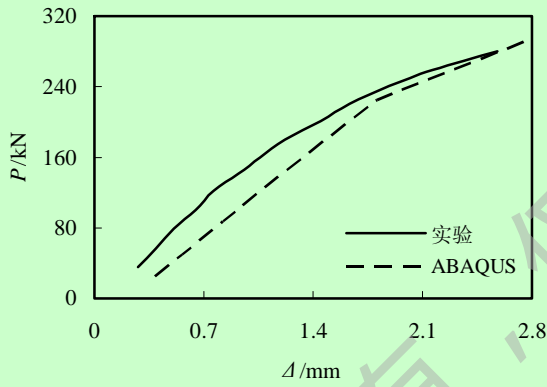
图2.5 节点梁端荷载-挠度实验值与有限元值比较(陈娟和王湛, 2004<sup>[27]</sup>)



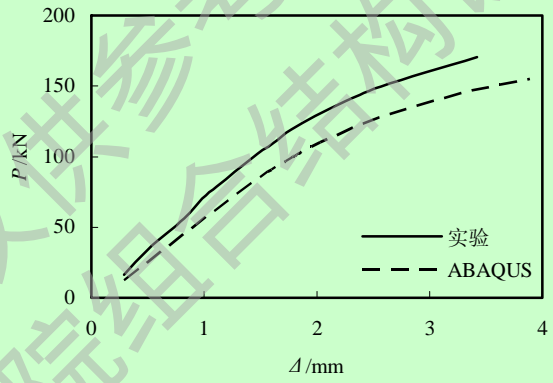
(a) A350a单向



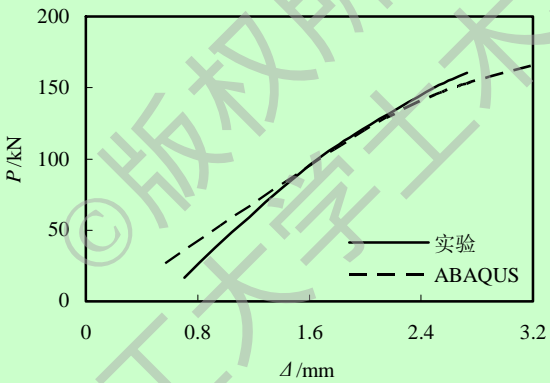
(b) A350a双向



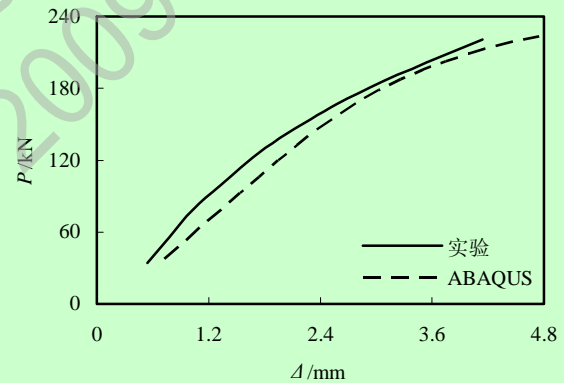
(c) A350b



(d) B310a

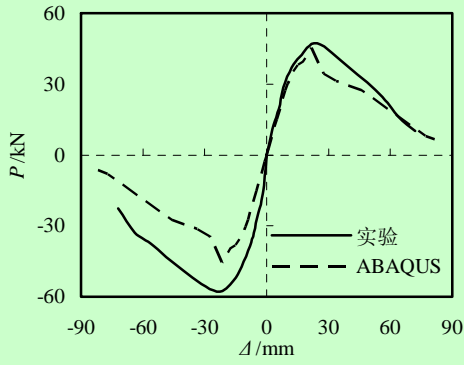


(e) B310b单向

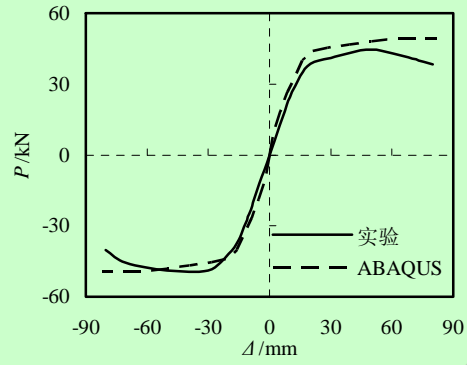


(f) B310b双向

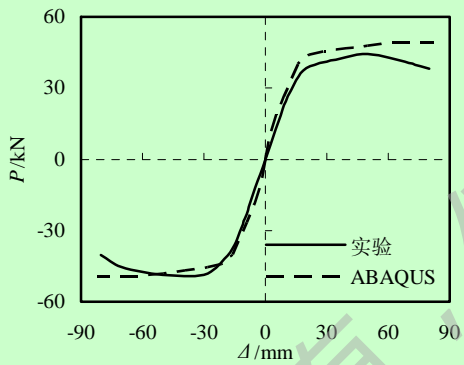
试件尺寸: A350a:钢管 $B \times t = 350 \times 8$  mm, 钢梁 $H450 \times 180 \times 8 \times 12$  mm, 上环 $50 \times 12$  mm, 下环 $50 \times 12$  mm  
 A350b:钢管 $B \times t = 350 \times 8$  mm, 钢梁 $H450 \times 180 \times 8 \times 12$  mm, 上环 $100 \times 12$  mm, 下环 $50 \times 12$  mm  
 A310a:钢管 $B \times t = 350 \times 8$  mm, 钢梁 $H350 \times 180 \times 8 \times 10$  mm, 上环 $50 \times 10$  mm, 下环 $50 \times 10$  mm  
 A310b:钢管 $B \times t = 350 \times 8$  mm, 钢梁 $H350 \times 180 \times 8 \times 10$  mm, 上环 $100 \times 10$  mm, 下环 $50 \times 10$  mm  
 图2.6 节点梁端荷载-挠度实验值与有限元值比较(李成玉等, 2005<sup>[29]</sup>)



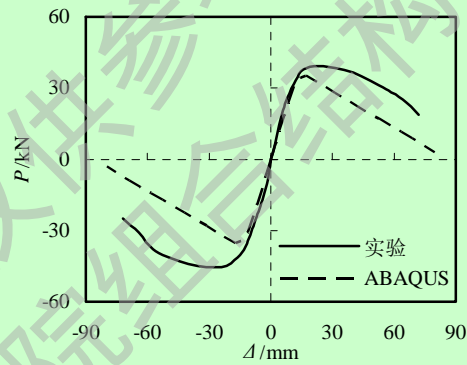
(a) sj-13



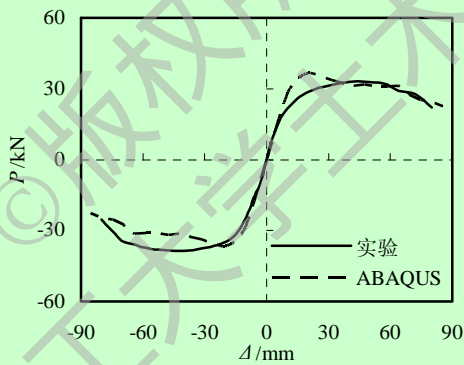
(b) sj-21



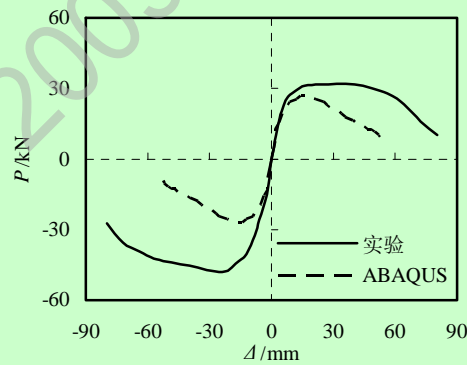
(c) sj-22



(d) sj-23



(e) sj-32

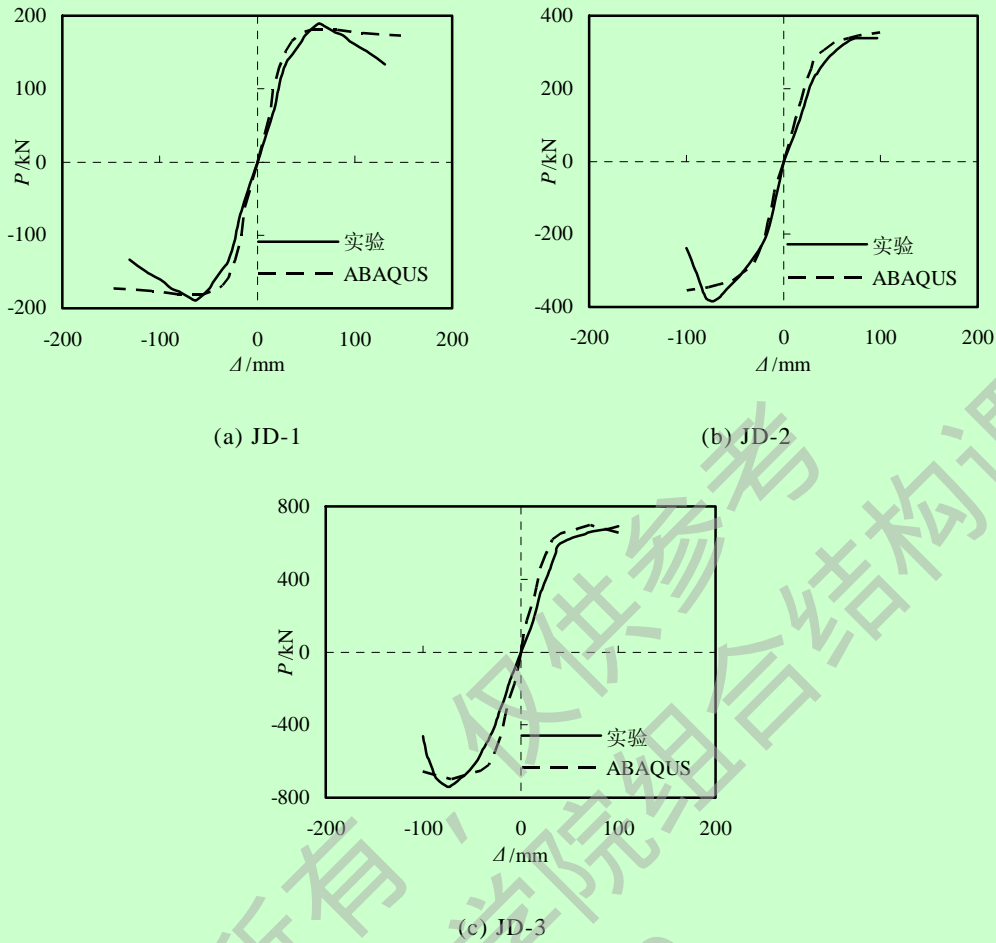


(f) sj-33

试件尺寸：钢管 $B \times t \times H = 120 \times 3.46 \times 1050$  mm，钢梁 $H160 \times 80 \times 3.53 \times 3.53$  mm  $L = 1500$  mm

sj13加强环 $D \times t = 60 \times 3.53$  mm  $n = 0.6$       sj23加强环 $D \times t = 40 \times 3.53$  mm  $n = 0.6$   
 sj21加强环 $D \times t = 40 \times 3.53$  mm  $n = 0.04$     sj32加强环 $D \times t = 20 \times 3.53$  mm  $n = 0.3$   
 sj22加强环 $D \times t = 40 \times 3.53$  mm  $n = 0.3$     sj33加强环 $D \times t = 20 \times 3.53$  mm  $n = 0.6$

图2.7 节点骨架曲线实验值与有限元值比较(王文达等, 2006<sup>[34]</sup>)



试件尺寸：JD-1钢管 $B \times t = 500 \times 16$  mm，钢梁 $H330 \times 130 \times 6 \times 10$  mm，内隔板厚16 mm  
 JD-2钢管 $B \times t = 500 \times 20$  mm，钢梁 $H426 \times 150 \times 8 \times 12$  mm，内隔板厚22 mm  
 JD-3钢管 $B \times t = 500 \times 25$  mm，钢梁 $H468 \times 250 \times 8 \times 16$  mm，内隔板厚28 mm  
 图2.8 节点骨架曲线实验值与有限元值比较(周天华等，2004<sup>[63]</sup>)

## 2.4 钢管混凝土柱-钢梁环板节点单调加载全过程分析

### 2.4.1 典型试件的确定

本节将对钢管混凝土柱-钢梁环板节点的工作机理、破坏模态进行分析。为了能更好的反映符合实际节点的受力特性，需选择合适的典型试件。

典型试件的基本信息如下：钢管混凝土柱采用 $D(B) \times t = 400 \times 9.3$  mm，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)。Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.3$  m；钢梁采用Q345钢材，钢梁截面 $H400 \times 200 \times 8 \times 10$  mm，跨度 $L = 6.6$  m。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，按照《钢管混凝土结构技术规程DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>确定)。梁柱线刚度比取为 $i = 0.2$  ( $i = (E_b I_b) H / (E_{sc} I_{sc}) L$ )，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。钢管混凝土柱的抗弯刚度 $E_{sc} I_{sc}$ 按照《钢管混凝土

土结构技术规程DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>确定， $E_{sc}I_{sc} = E_s I_s + \alpha \cdot E_c I_c$ ，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(圆钢管混凝土， $\alpha=0.8$ ，方形钢管混凝土， $\alpha=0.6$ )。

## 2.4.2 节点受力特性分析

为了更好地分析节点的工作机理，选择不同受力阶段不同位置的应力状态，如图2.9的节点 $P-\Delta$ 关系曲线上取三个对应的特征点进行比较分析，三个特征点分别取：1点为节点钢梁两端翼缘开始屈服的点；2点为节点水平极限荷载 $P_{max}$ 对应的点；3点为节点二倍极限位移对应的点(极限荷载 $P_{max}$ 对应的位移为极限位移 $\Delta_{max}$ )。

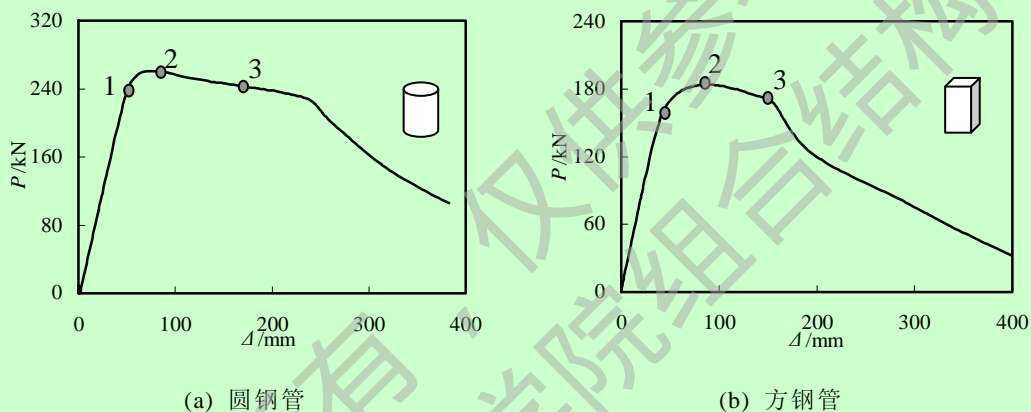
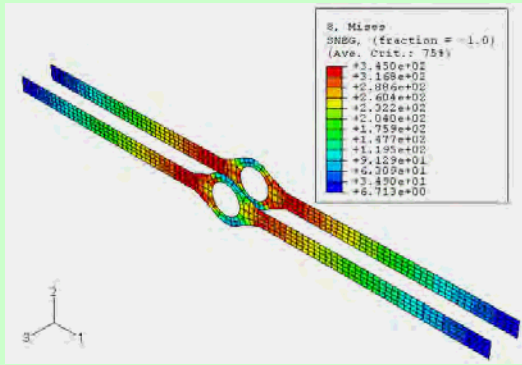


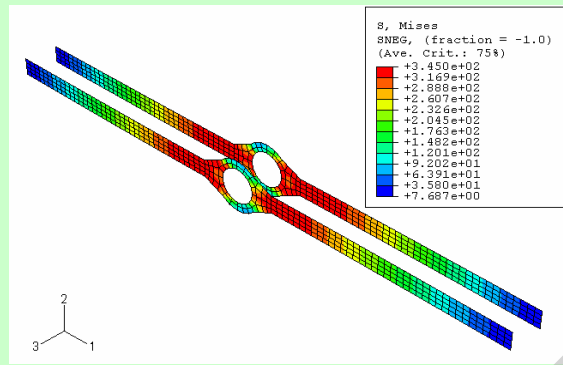
图2.9 钢管混凝土节点典型荷载-位移( $P-\Delta$ )关系曲线

### (1) 圆钢管混凝土柱节点钢梁翼缘、腹板、钢管、混凝土的应力发展

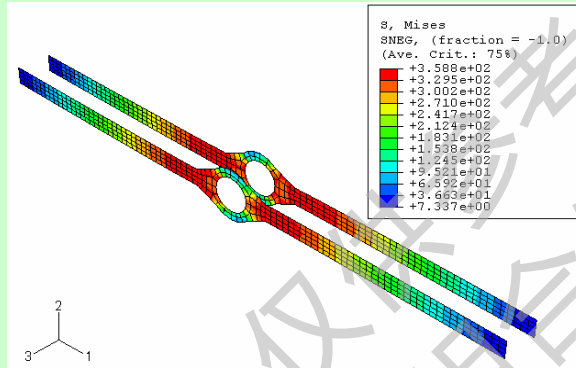
由图2.10圆钢管混凝土柱节点各部位的应力云图可知：梁翼缘与加强环交界边缘处最先屈服，随着柱端水平荷载的增加，屈服面逐渐扩大，加强环2轴方向两侧的应力值较小；梁翼缘屈服后，继续增加柱端水平荷载，与加强环交界处的腹板也开始屈服；由钢管应力图可知，随着柱端水平荷载的继续增加，钢管柱壁参与加强环受力的高度逐渐增加，增加到一定程度后此高度基本保持不变；混凝土塑性区应力图呈鸡蛋形，随着水平荷载的增加(从1点到2点)，塑性区域面积收缩变小，从2点到3点，面积和形状变化不大。梁腹板中部1轴方向的应力值非常小，随着柱端水平荷载的增大，腹板与翼缘交界处开始屈服，腹板的屈服范围呈工字形；由以上分析可知，可以在钢梁的翼缘与加强环交界处设置加劲肋来有效的提高钢梁的抗弯强度。



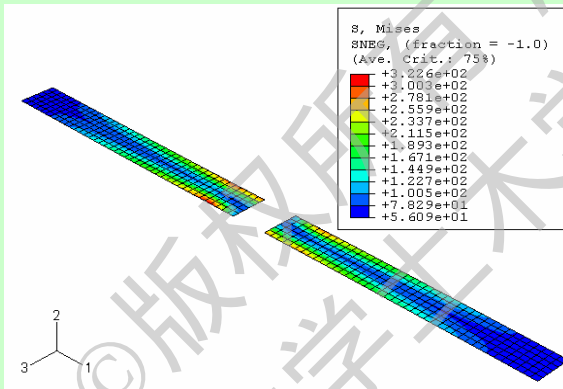
(a) 钢梁翼缘、环板应力分布(1点)



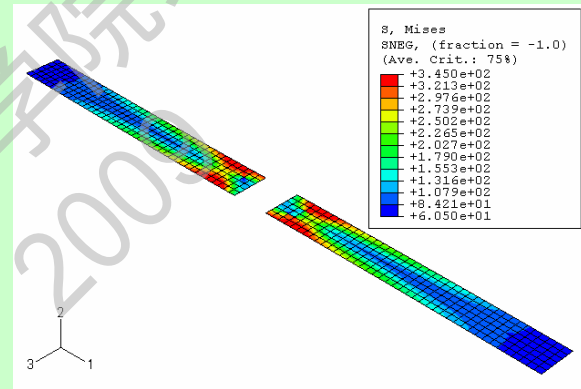
(b) 钢梁翼缘、环板应力分布(2点)



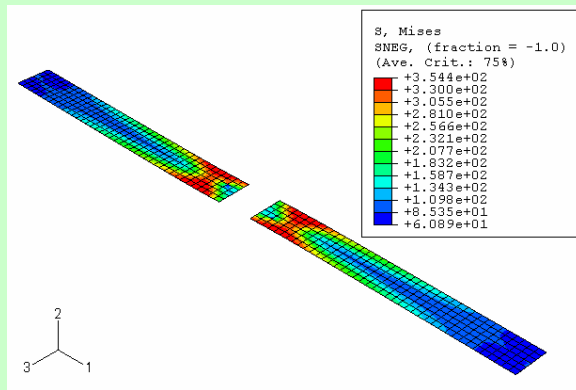
(c) 钢梁翼缘、环板应力分布(3点)



(d) 钢梁腹板应力分布(1点)

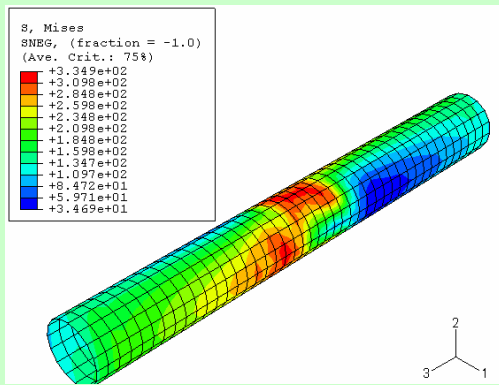


(e) 钢梁腹板应力分布(2点)

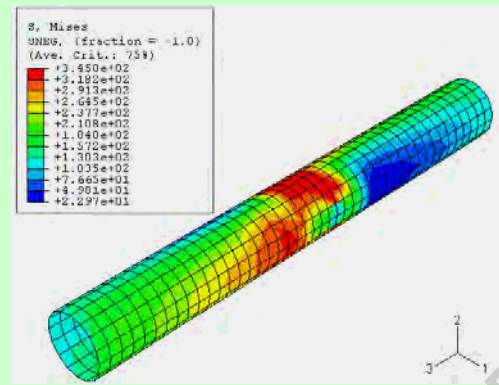


(f) 钢梁腹板应力分布(3点)

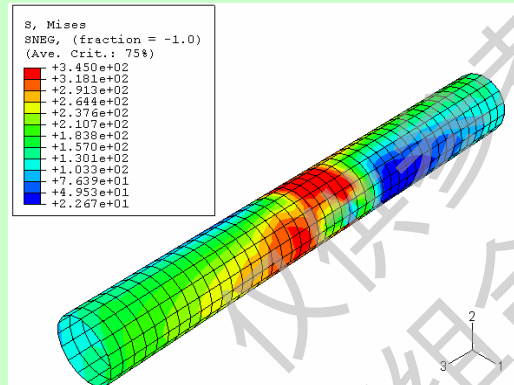




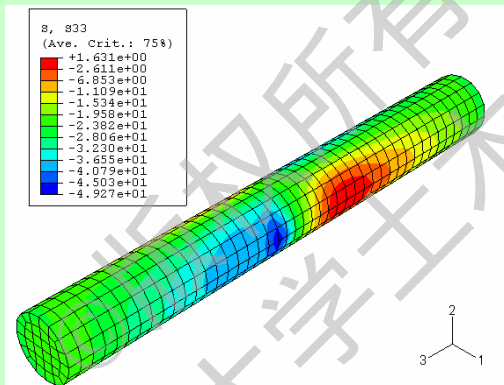
(g) 钢管应力分布(1点)



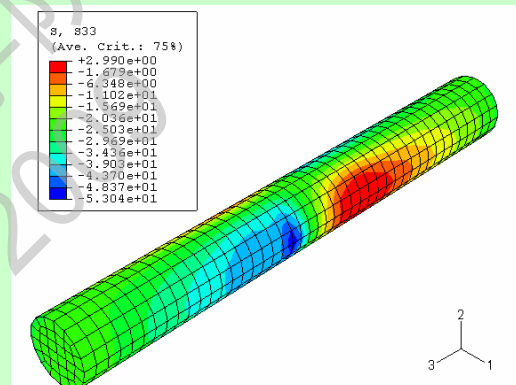
(h) 钢管应力分布(2点)



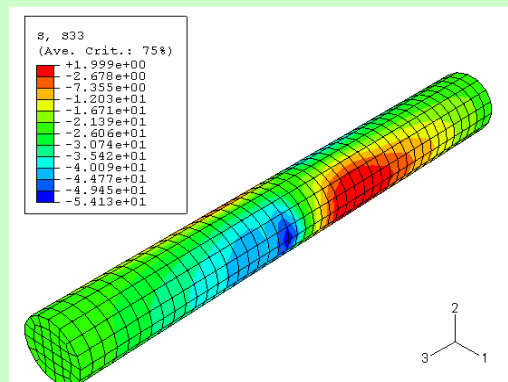
(i) 钢管应力分布(3点)



(j) 混凝土应力分布(1点)



(k) 混凝土应力分布(2点)



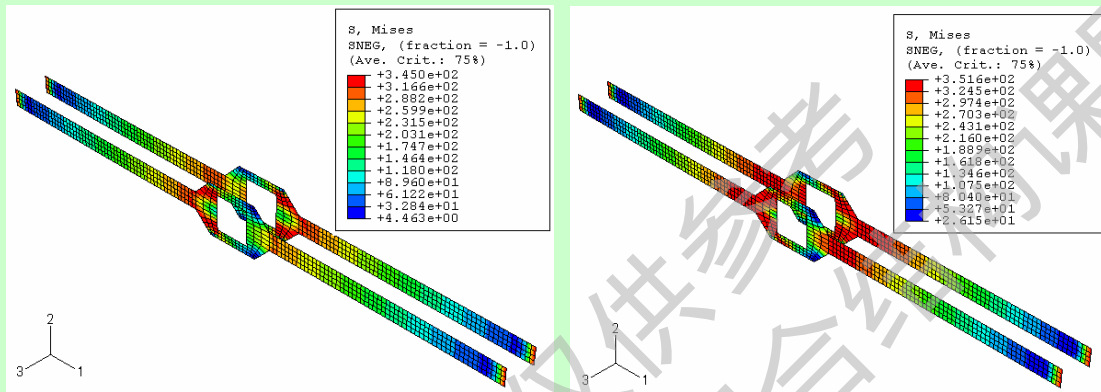
(l) 混凝土应力分布(3点)

图2.10 圆柱节点部件应力分布



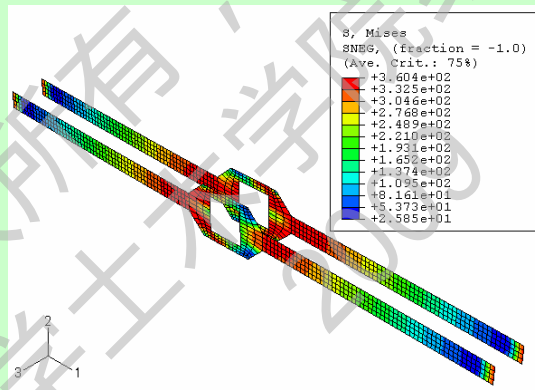
(2) 方钢管混凝土柱节点钢梁翼缘、腹板、钢管、混凝土的应力发展

由图2.11方钢管混凝土柱节点的应力发展与圆钢管混凝土柱节点相似；梁翼缘与加强环交界边缘处最先屈服，随着柱端水平荷载的增加，屈服面逐渐扩大；加强环2轴方向两侧的应力值较小；腹板中部1轴方向的应力值非常小；柱钢管壁参与加强环受力的高度小于圆钢管柱，出现这种情况的原因是，方柱在节点核心区应力集中现象比圆柱明显；混凝土塑性区面积和形状变化不大。

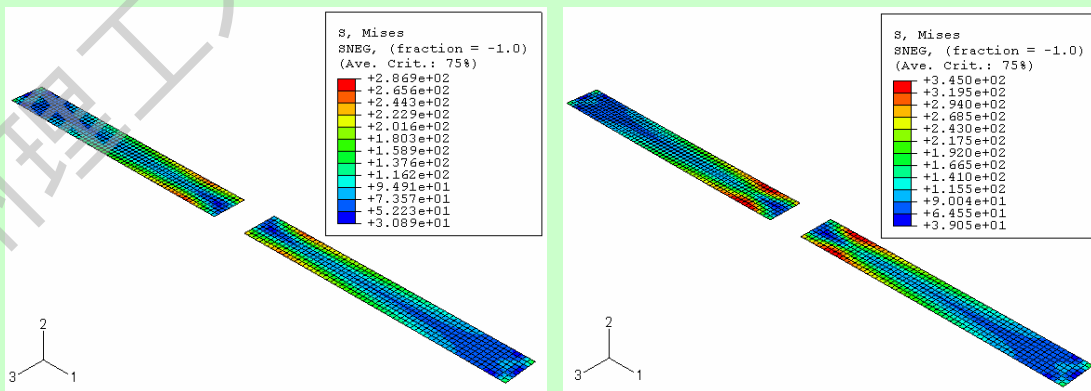


(a) 钢梁翼缘、环板应力分布(1点)

(b) 钢梁翼缘、环板应力分布(2点)

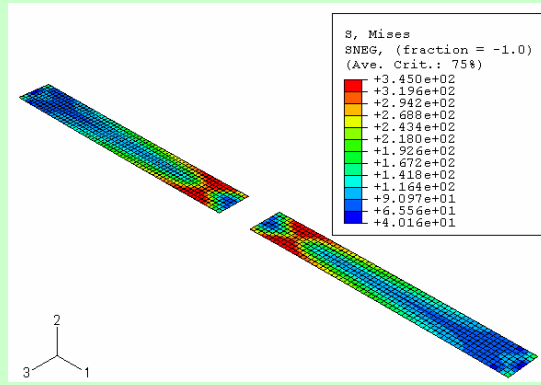


(c) 钢梁翼缘、环板应力分布(3点)

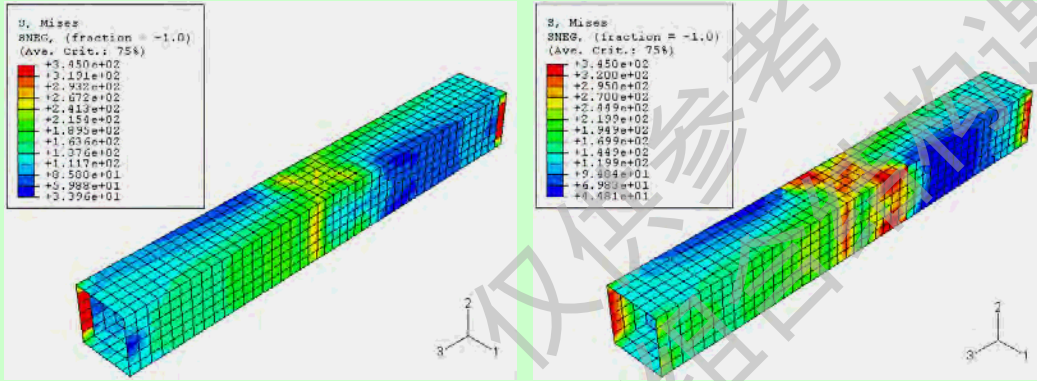


(d) 钢梁腹板应力分布(1点)

(e) 钢梁腹板应力分布(2点)

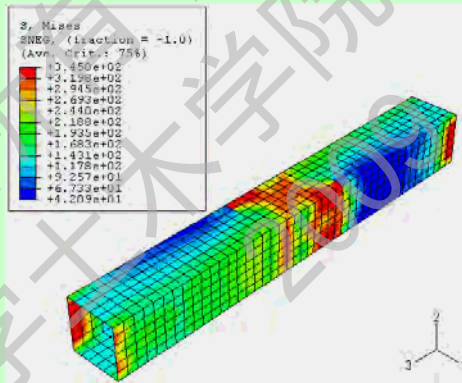


(f) 钢梁腹板应力分布(3点)

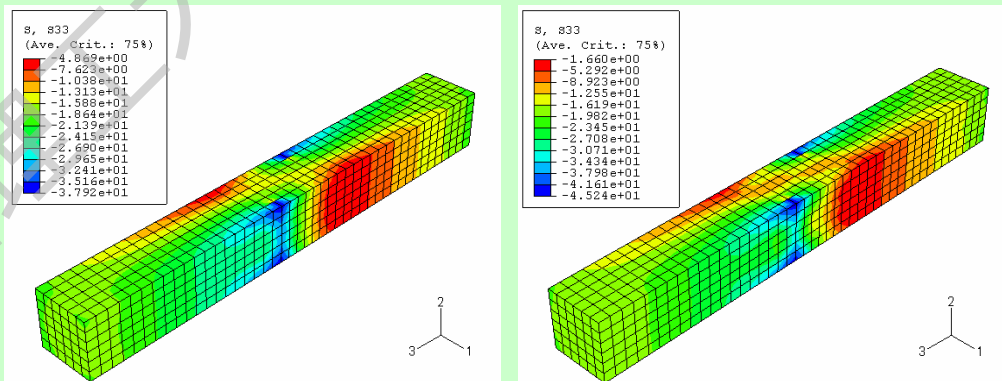


(g) 钢管应力分布(1点)

(h) 钢管应力分布(2点)

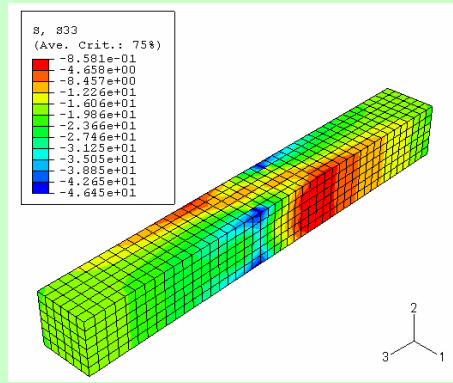


(i) 钢管应力分布(3点)



(j) 混凝土应力分布(1点)

(k) 混凝土应力分布(2点)



(I) 混凝土应力分布(3点)

图2.11 方柱节点部件应力分布

(3) 核心混凝土沿梁上翼缘截面应力分布

由图2.12、2.13核心区混凝土截面应力分布可知，在整个加载过程中，钢管混凝土柱由受压构件转变为压弯构件。随着柱顶水平荷载的增加，核心区混凝土沿梁翼缘截面上的受拉区不断扩大，圆柱沿水平加载方向应力变化较规则，而方柱沿水平加载方向应力变化则极其不规则。在整个加载过程中，节点的破坏表现为钢梁的屈服破坏，而钢管混凝土柱并没有破坏。

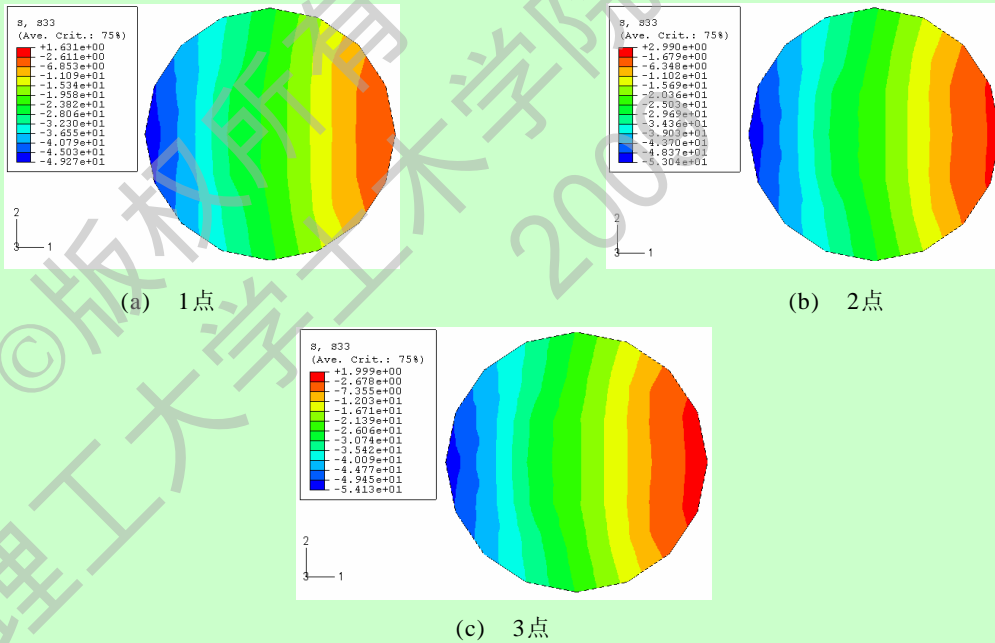
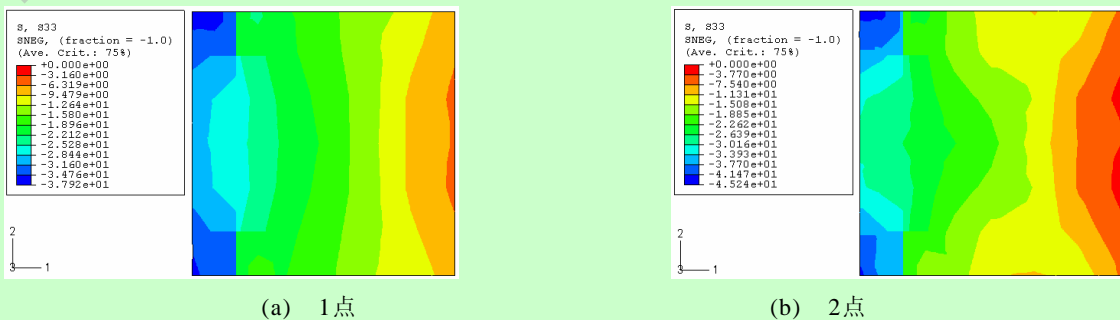
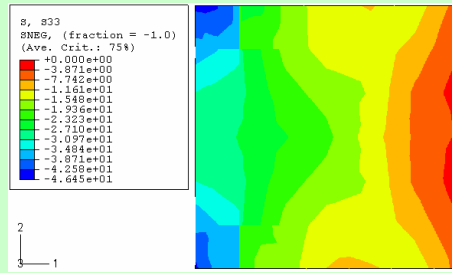


图2.12 圆柱节点混凝土沿梁上翼缘截面纵向应力分布



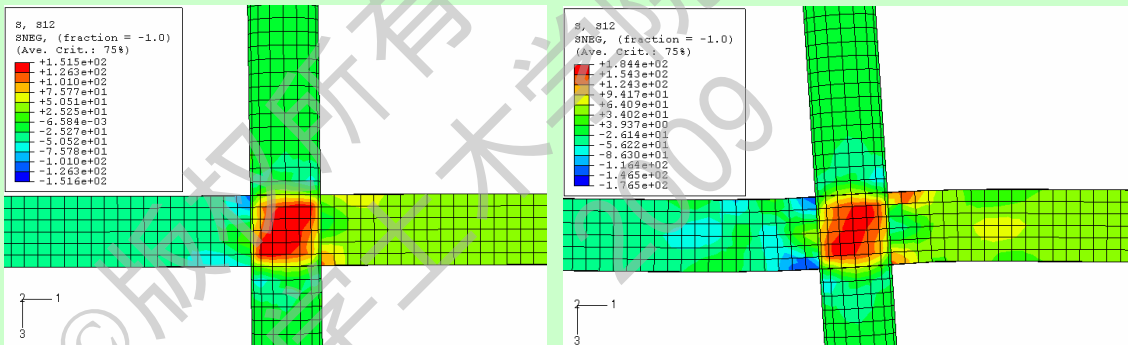


(c) 3点

图2.13 方柱节点混凝土沿梁上翼缘截面纵向应力分布

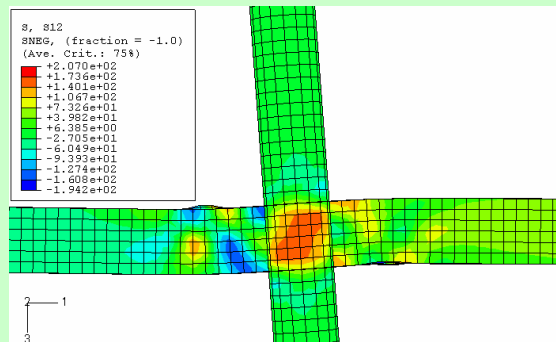
(4) 节点核心区剪切应力

由图2.14、2.15给出的节点剪切应力的分布及发展可知，圆、方柱节点所受剪应力基本相似。在弯矩的作用下，节点核心区钢管、混凝土以及钢梁腹板截面上形成较大的剪应力，而环板承受的剪应力则相对较小。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大。随着水平荷载进一步增加，节点的剪应力不断增大，至环板与钢梁的交界处出现屈服，节点破坏。由以上分析可知，增加核心区钢管厚度，钢梁腹板厚度、混凝土强度、环板宽度及厚度，可以有效的提高节点抗剪承载力。

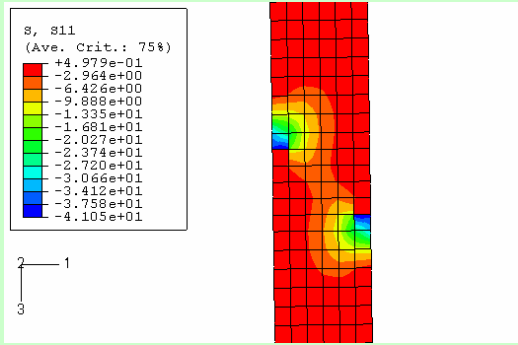


(a) 钢管、钢梁剪应力分布 (1点)

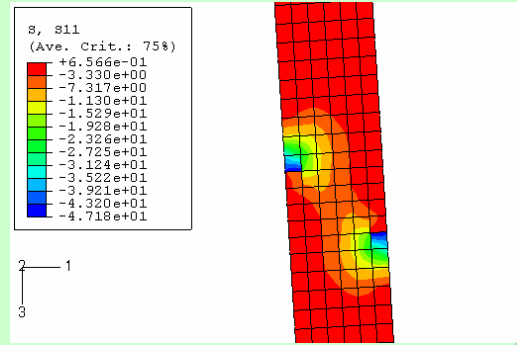
(b) 钢管、钢梁剪应力分布 (2点)



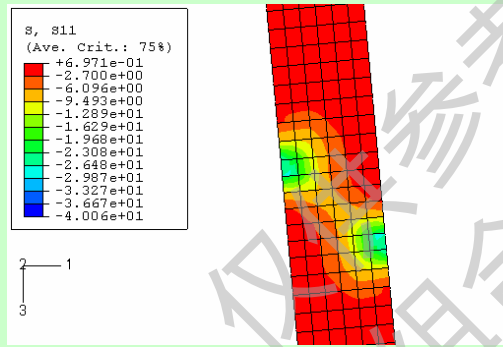
(c) 钢管、钢梁剪应力分布 (3点)



(d) 核心区混凝土剪应力分布 (1点)

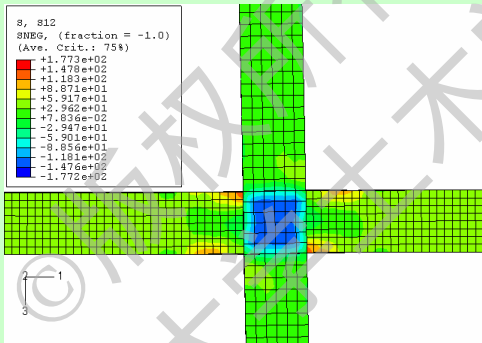


(e) 核心区混凝土剪应力分布 (2点)

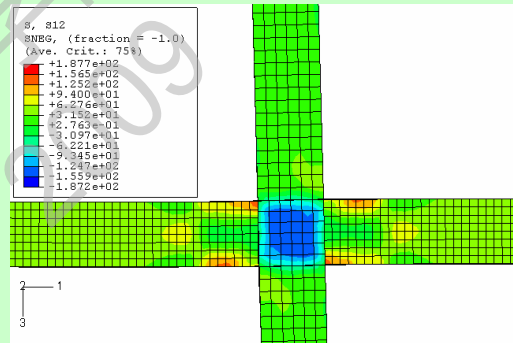


(f) 核心区混凝土剪应力分布 (3点)

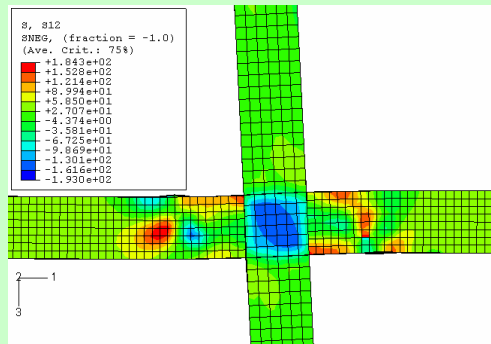
图2.14 圆钢管混凝土柱节点核心区剪应力分布



(a) 钢管、钢梁剪应力分布 (1点)



(b) 钢管、钢梁剪应力分布 (2点)



(c) 钢管、钢梁剪应力分布 (3点)

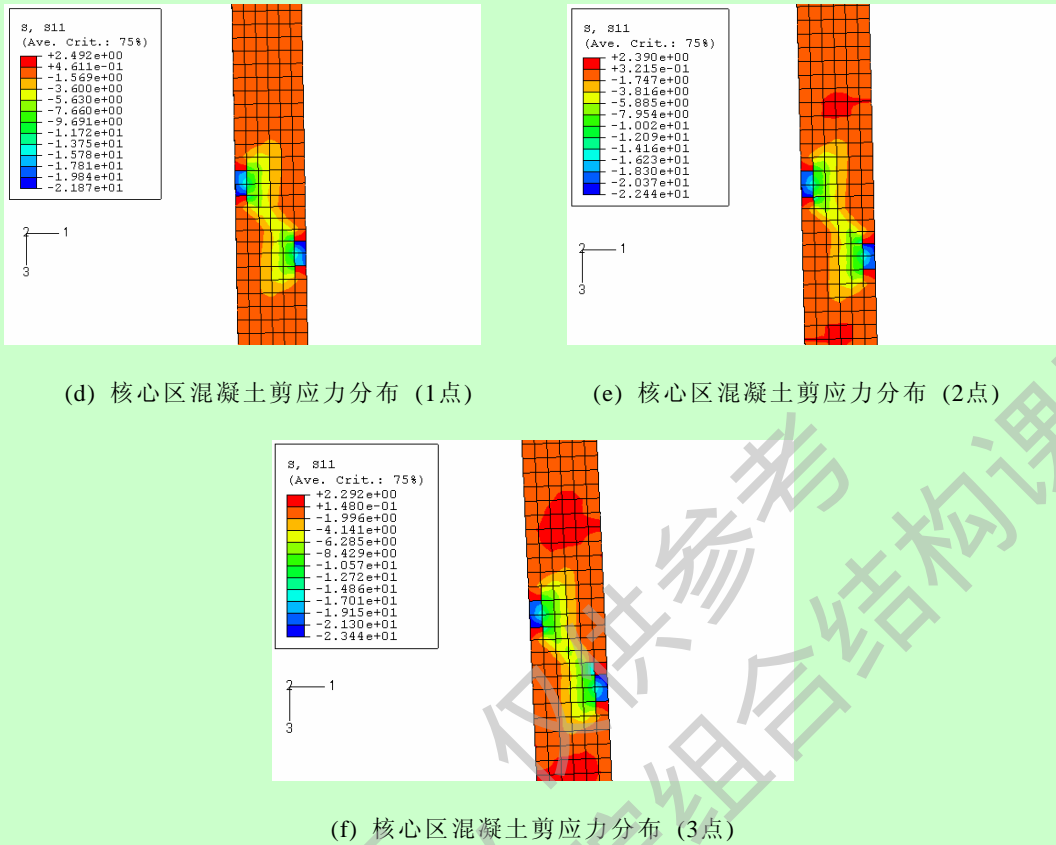


图2.15 方钢管混凝土柱节点核心区剪应力分布

## 2.5 环板宽度对环板节点受力性能的分析

上节对典型尺寸的圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点的各组成部分在定义的特征点下的应力状态进行了分析。根据以往的研究表明，环板的宽度对节点的刚度和承载力都有影响，随着环板宽度的增大，节点的刚度和抗弯承载力都有所增大。但是如何合理确定环板宽度，在以往的文献中未见报道。本节主要分析环板宽度对钢管混凝土柱-钢梁节点受力特性的影响。由于本文节点在受力过程中主要施加轴向荷载和水平荷载，因此主要考察环板宽度对位于节点核心区梁上下翼缘位置的钢管混凝土柱的剪应力分布的影响。下面通过比较各环板宽度分别为50mm、100mm、150mm、200mm的节点试件达到极限承载力时，梁上下翼缘位置上钢管混凝土柱的节点核心区剪应力分布来分析环板宽度的影响。

从图2.16圆钢管混凝土柱节点，可以看出环板宽度在50mm、100mm、150mm下的节点均表现为钢梁梁端破坏(即：梁端产生塑性铰)后的节点核心区剪切破坏，从应力云图中可以看出，随着环板宽度的增大，梁端产生塑性铰的位置也相对远离节点，但环板宽度为100mm、150mm的节点产生塑性铰的位置基本相同。



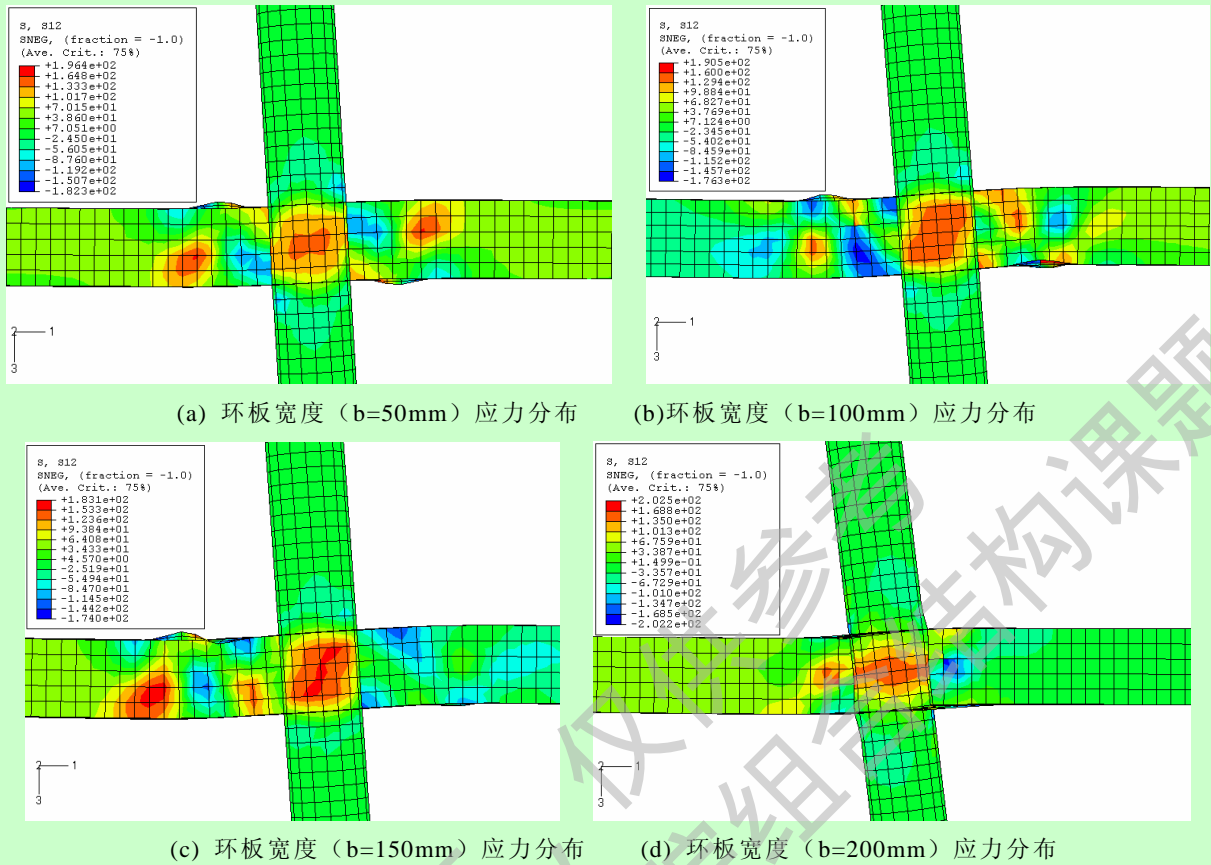


图2.16 圆钢管混凝土柱节点破坏时应力分布

由图2.17节点荷载-位移曲线可以看出，随着环板宽度的增大，节点所承担的水平荷载也逐渐增大，但增大到一定程度后，节点的破坏模式发生了变化，如图2.16环板宽度为200mm的节点，由于节点刚度过大造成钢管壁撕裂发生破坏。方钢管情况与圆钢管的受力特性基本相同。通过对不同环板宽度节点的数值分析，为合理确定环板宽度尺寸奠定了基础。

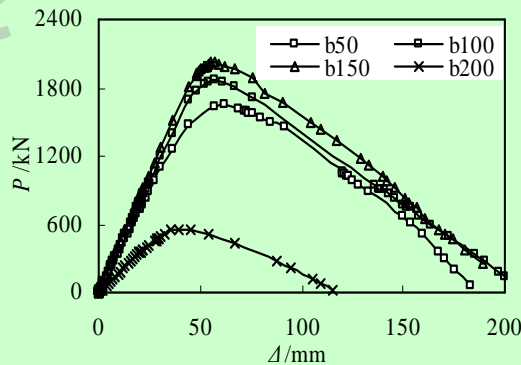


图2.17 圆柱节点荷载-位移曲线

## 2.6 小结

本章主要对钢管混凝土柱-钢梁环板节点进行了理论分析，主要工作如下：

1、运用ABAQUS有限元软件，选择了合适的钢材以及核心混凝土的材料本构关系模型，建立了钢管混凝土柱-钢梁环板节点的有限元模型，验算已有的试验数据，理论计算与试验结果总体上吻合良好。

2、利用此有限元模型，对典型构件的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。并且就环板宽度对环板节点受力性能进行了数值分析。分析表明：随着环板宽度的增大，环板所承担节点核心区的剪应力也逐渐增大，但增大到一定程度后效果不明显。



### 第三章 参数分析及承载力实用计算方法

#### 3.1 概述

通过上一章的分析，说明利用有限元软件ABAQUS建立的节点模型是适用的，可以通过此模型对钢管混凝土柱-钢梁环板节点进行非线性分析，从而得到节点各组成部分的力学性能指标，但此分析方法比较复杂，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混凝土柱-钢梁环板节点的承载力、刚度的各主要因素进行参数分析，确定影响其承载力、刚度的主要因素及其影响规律，从而得出较为合理的钢管混凝土柱-钢梁环板节点承载力简化计算方法，为工程实践提供参考。

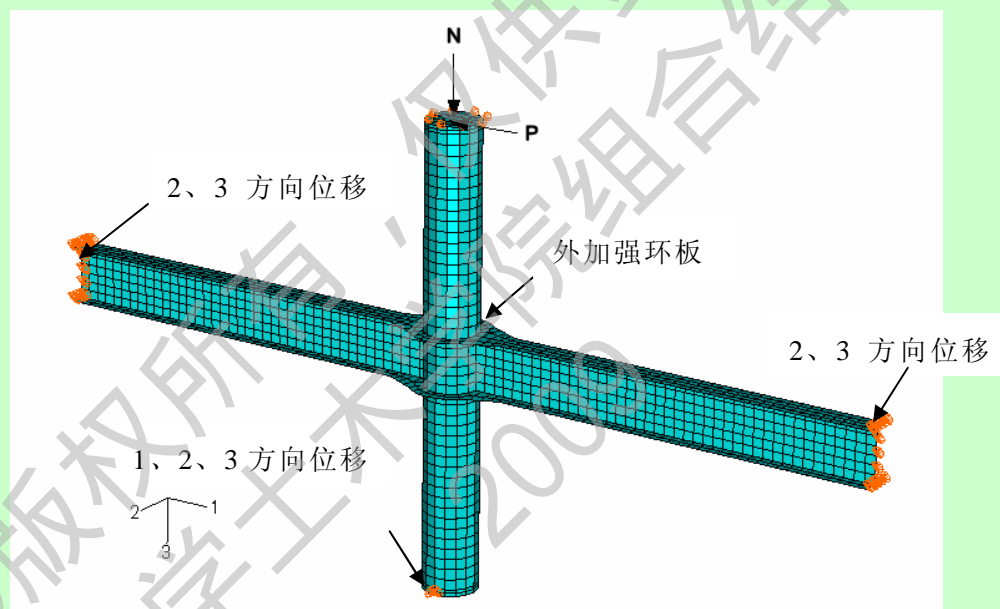


图3.1 节点有限元模型

本文分析的是有侧移框架的中节点，而且属于强柱弱梁节点，图3.1为节点有限元模型的边界条件与加载方式。由于本章主要是通过有限元计算寻求各参数的影响规律。因此，首先要确定典型构件。典型构件的基本信息如下：钢管混凝土柱采用 $D(B) \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，含钢率 $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.3\text{m}$ ，钢梁采用Q345钢材，钢梁截面 $H400 \times 200 \times 8 \times 10\text{mm}$ ，跨度 $L = 6.6\text{m}$ ，轴压比取0.4，梁柱线刚度比取0.2。

对于外加强环板节点，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。图3.2为在柱端加载下典型的节点域局部屈曲。节点域受弯变形，在梁与加强环交接处产生塑性铰，变形包括梁与柱交接处的梁上下翼缘水平位移差，以及柱腹板上下水平位移差。节点转角应为屈服后梁柱的夹角，即 $\theta_j = \theta_b - \theta_c$ ； $\theta_j$ 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 $\theta_j$

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 $\theta_j \approx \tan \theta_j = \delta/h$ 。

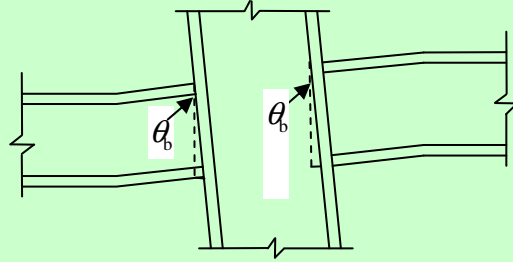


图3.2 节点局部屈曲

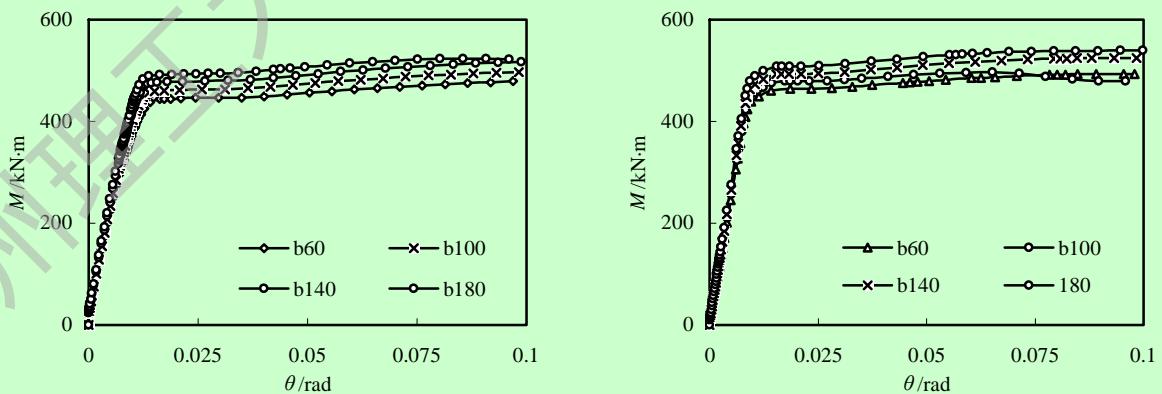
参数分析时节点的极限抗弯承载力暂取节点水平极限荷载 $P_{max}$ 对应点的极限抗弯承载力，而节点的初始刚度则参考韩林海(2007)<sup>[1]</sup>暂取节点弯矩-转角关系曲线中 $0.2M_{u,j}$ 所对应的割线刚度。

### 3.2 钢管混凝土柱-钢梁环板节点弯矩-转角关系参数分析

影响钢管混凝土柱-钢梁环板节点弯矩-转角关系曲线的因素可能有：环板宽度、钢梁塑性极限弯矩、柱截面含钢率、钢管强度、钢梁强度、混凝土强度、轴压比、梁柱线刚度比。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。

#### 3.2.1 环板宽度

图3.3、3.4分别给出了圆、方钢管柱-钢梁节点在不同环板宽度下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。图例中b60代表环板宽度为60mm，其余类似。由图可知保持其他参数不变，环板宽度从60mm到180mm变化，结果表明：环板宽度对弯矩-转角关系有影响，随着环板宽度增大，节点抗弯承载力和初始刚度越大，但增加的幅度不是很大。初始刚度也随着环板宽度的增大而增大，总体上初始刚度的变化趋势没有承载力变化明显。



(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点

(b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.3 环板宽度对节点抗弯承载力的影响

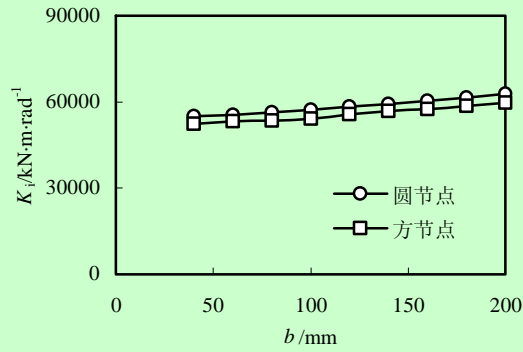
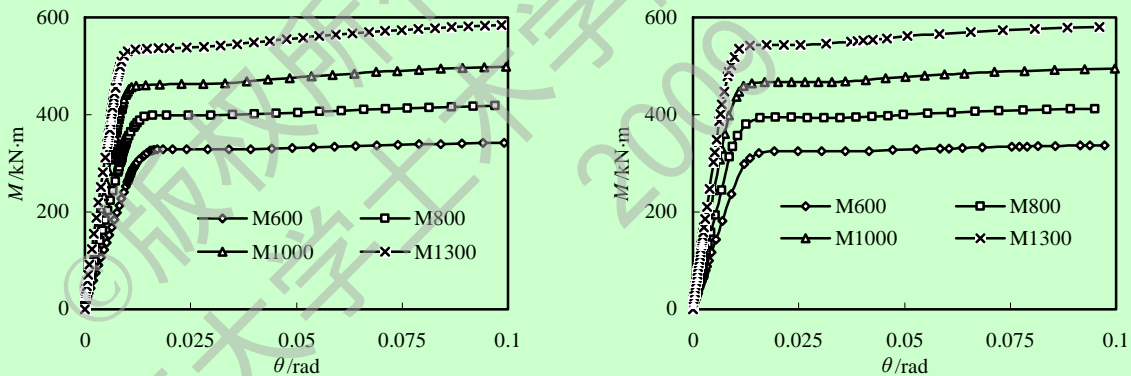


图3.4 环板宽度对节点初始刚度的影响

### 3.2.2 钢梁塑性极限弯矩

图3.5、3.6分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点在不同钢梁塑性弯矩下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。图例中M600代表钢梁的塑性弯矩为600kN·m，其余类似。本文中钢梁塑性极限弯矩为  $M_{uj} = \gamma W_{nx} f_y$ ，式中， $\gamma$  为钢梁截面塑性发展系数(《钢结构设计规范》GB50017, 2003)<sup>[69]</sup>， $W_{nx}$ 为钢梁静截面抗弯抵抗模量， $f_y$ 为钢材的抗拉强度。保持其他参数不变，通过改变梁的高度来改变钢梁的塑性弯矩。由图所示随着钢梁塑性弯矩的增大，节点的承载力和初始刚度增大，并且增大的趋势明显。



(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点

(b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.5 钢梁塑性极限弯矩对节点抗弯承载力的影响

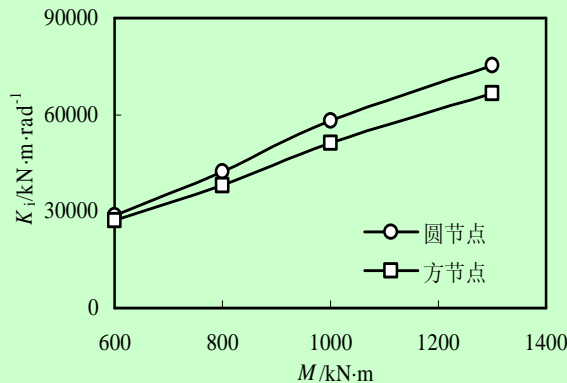


图3.6 钢梁塑性极限弯矩对节点初始刚度的影响

### 3.2.3 柱截面含钢率

图3.7、3.8分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点在不同含钢率下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。实际工程结构中通常采用钢管混凝土柱的截面含钢率为0.1, 本文考察柱截面含钢率的范围为0.1-0.2, 通过改变钢管管壁的厚度来改变柱截面含钢率, 同时通过调整钢管及钢梁长度来保证梁柱线刚度比不变。如图所示, 柱截面含钢率对节点的抗弯承载力和初始刚度的影响较大, 随着柱截面含钢率的逐渐增大, 节点抗弯承载力和初始刚度相应增大。

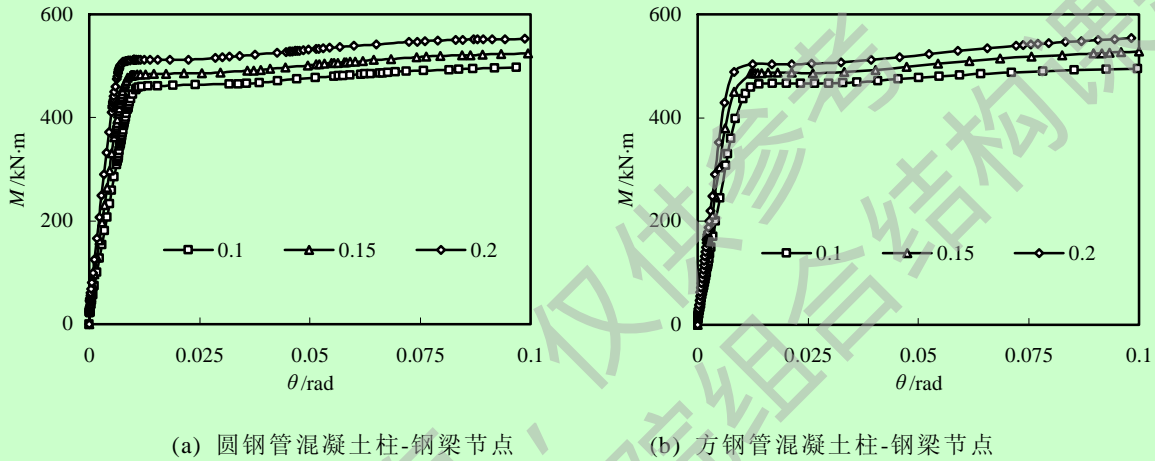


图3.7 含钢率对节点抗弯承载力的影响

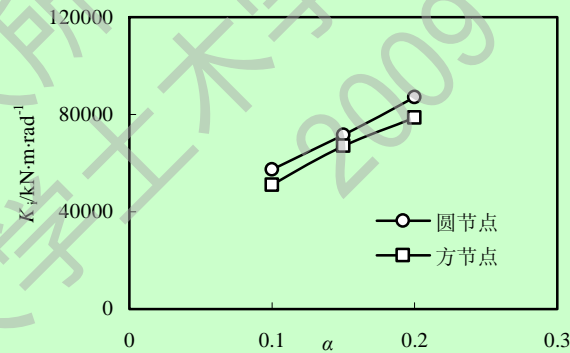
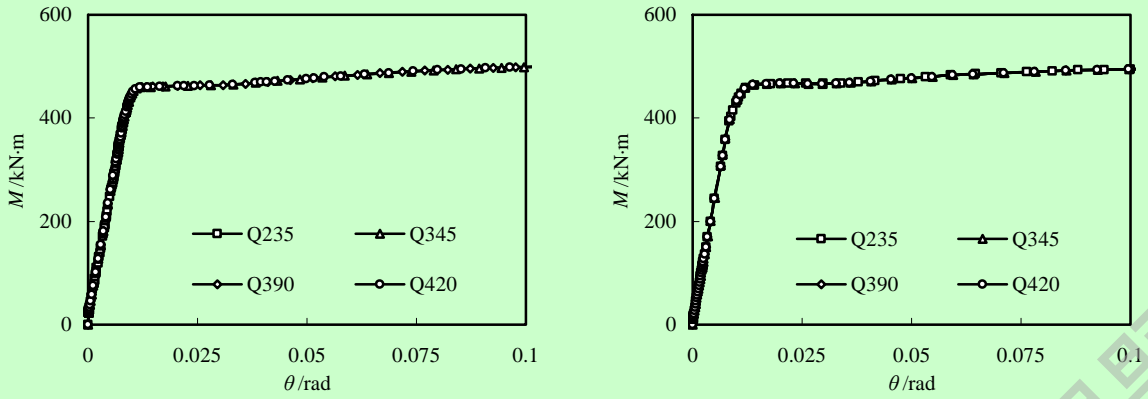


图3.8 含钢率对节点初始刚度的影响

### 3.2.4 钢管强度

图3.9、3.10分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点的钢管在不同强度下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。如图所示, 钢管强度对节点弯矩-转角关系影响不大, 随着钢管强度的增大, 节点抗弯承载力和节点初始刚度增大趋势不明显。钢管强度之所以对节点弯矩-转角关系影响不大, 主要是由于本文分析的是强柱弱梁节点, 节点的抗弯承载力主要是由钢梁起控制作用。



(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点 (b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.9 钢管强度对节点抗弯承载力的影响

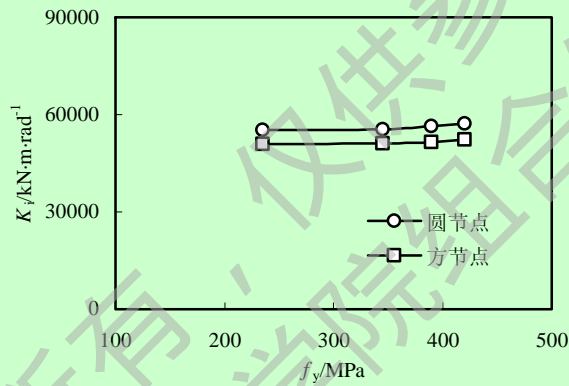
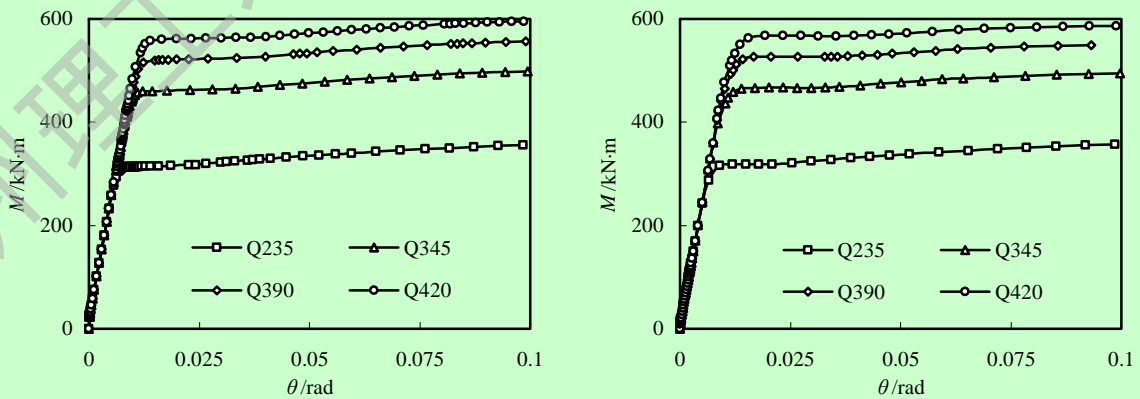


图3.10 钢管强度对节点初始刚度的影响

### 3.2.5 钢梁强度

图3.11、3.12分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点，钢梁在不同强度下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。如图所示，钢梁强度对节点弯矩-转角关系有很大影响，随着钢梁强度的增大，节点抗弯承载力增大，节点初始刚度增大趋势不明显。



(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点 (b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.11 钢梁强度对节点抗弯承载力的影响



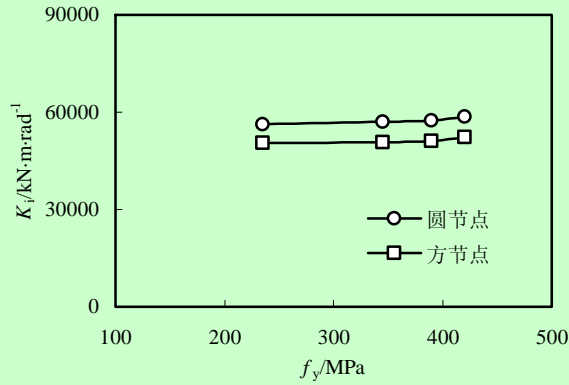
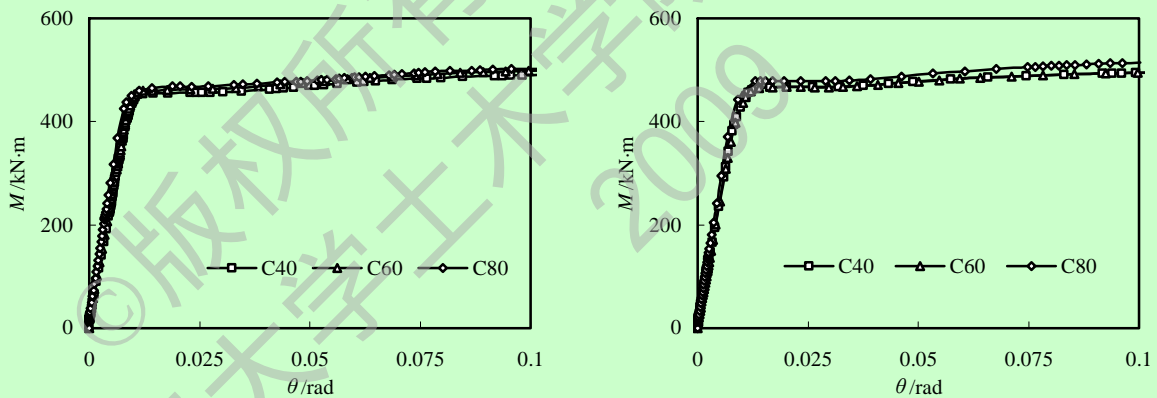


图3.12 钢管强度对节点初始刚度的影响

### 3.2.6 混凝土强度

图3.13、3.14分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点在不同混凝土强度等级下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。如图所示,随着钢管内混凝土强度等级的增大,节点抗弯承载力增大,但增大趋势不明显;随着混凝土强度的增大,节点的初始刚度稍有增大。混凝土强度之所以对节点弯矩-转角关系影响不明显,主要是由于本文分析的是强柱弱梁节点,节点的抗弯承载力主要是由钢梁起控制作用。



(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点

(b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.13 混凝土强度对节点抗弯承载力的影响

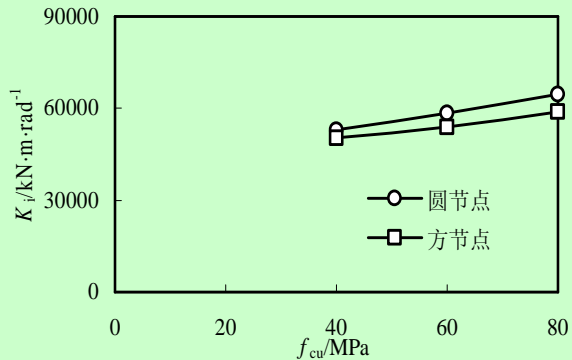


图3.14 混凝土强度对节点初始刚度的影响

### 3.2.7 轴压比

图3.15、3.16分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点在不同轴压比下的弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。由于过小的轴压比在实际情况较少出现,因此在保持其他参数不变的基础上,轴压比从0.4到0.8变化。由图可知,改变轴压比对节点的屈服抗弯承载力几乎没有影响,但是随着轴压比的增大,节点承载力的下降段出现的越早。节点初始刚度随轴压比的增大略有增大。

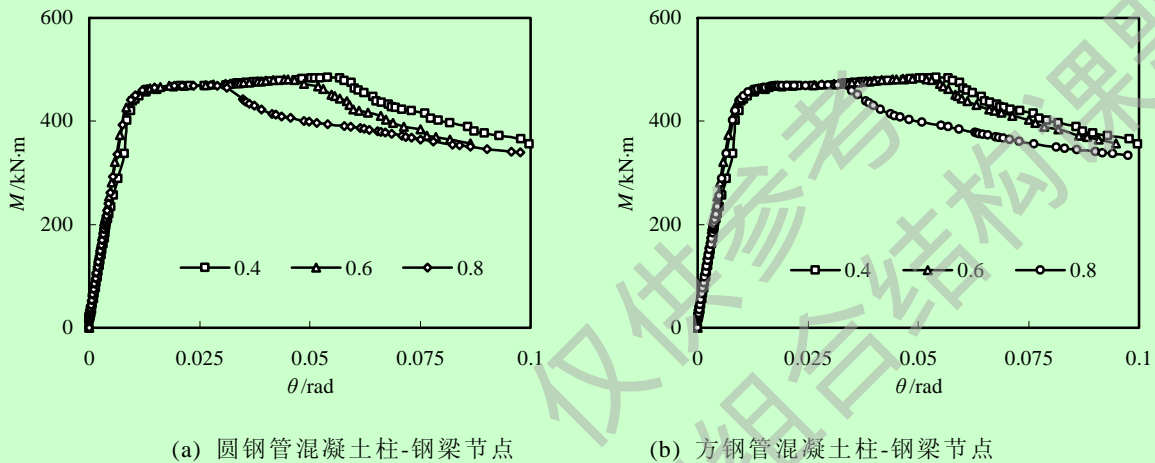


图3.15 轴压比对节点抗弯承载力的影响

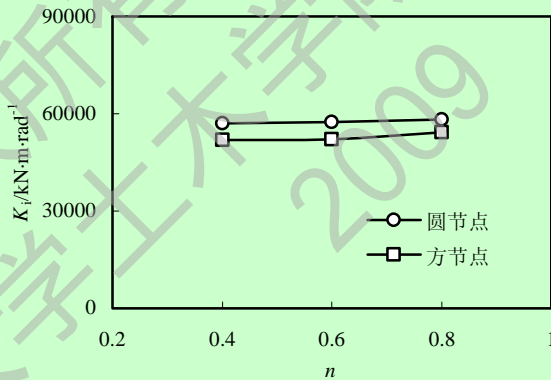


图3.16 轴压比对节点初始刚度的影响

### 3.2.8 梁柱线刚度比

梁柱线刚度比反映了梁对柱的约束程度,线刚度比越大,说明梁对柱的约束作用越强,反之则越弱。本文对梁柱线刚度比的变化是通过调整梁的跨度来实现。本文所选典型构件柱的线刚度较大,在调整梁跨度基础上分析了梁柱线刚度比从0.15-0.4的变化规律。图3.17, 3.18分别给出了圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点在不同梁柱线刚度比的情况下,弯矩-转角( $M-\theta$ )曲线及节点初始刚度的影响情况。如图所示,随着梁柱线刚度比的增大,节点的抗弯承载力增大,节点的初始刚度增大且十分明显。

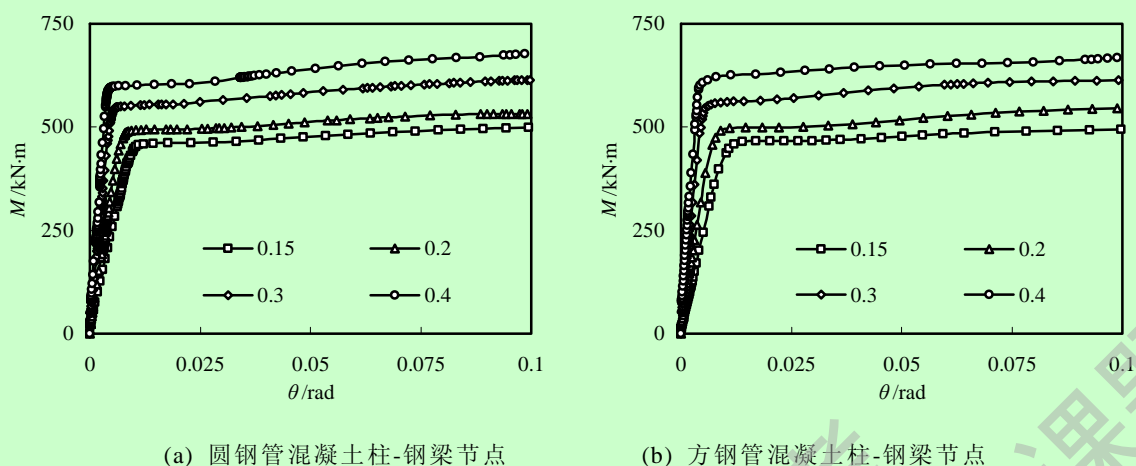


图3.17 梁柱线刚度比对节点抗弯承载力的影响

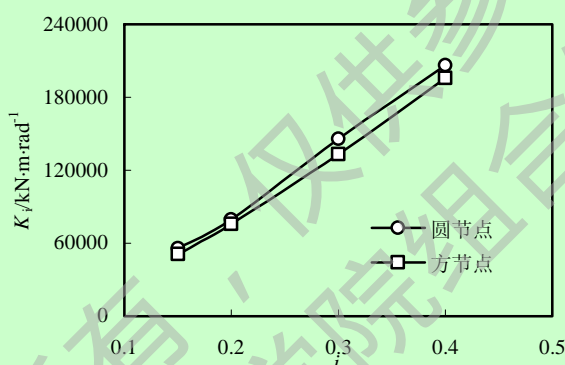


图3.18 钢管强度对节点初始刚度的影响

通过上述的数值分析可以看出，钢管强度、钢管内混凝土强度、轴压比对节点的抗弯承载力影响相对较小，影响节点抗弯承载力的主要因素有环板宽度、钢梁的塑性弯矩、钢管截面含钢率、钢梁的强度、梁柱的线刚度比。

### 3.3 钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点抗弯承载力计算方法

《矩形钢管混凝土结构技术规程CECS159:2004》<sup>[7]</sup>中规定矩形钢管混凝土柱-钢梁节点承担的弯矩为柱翼缘板和环板两部分提供，节点极限抗弯承载力为上述两项之和再乘以力臂。这种方法无论从理论和形式上都很容易理解，计算结果与试验也基本相符，但是对节点核心区内钢管与混凝土共同工作的效应并没有明确的体现。

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，通过数值分析回归拟合，提出节点抗弯承载力计算方法。并通过有限元分析结果和计算结果的比较，对节点抗弯承载力计算方法的合理性做出判断。

### 3.3.1 节点弯矩-转角模型

基于3.2节的参数分析结果，参考Kish和Chen<sup>[60]</sup>提出的三参数幂函数数学模型，本节采用如式(3.1)所示的数学表达式来描述加强环式钢管混凝土柱-钢梁连接节点的 $M-\theta_r$ 关系，即：

$$M = \frac{K_0 \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{1/n}} = \frac{M_u \cdot \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)}{\left[1 + \left(\frac{\theta_r}{\theta_0}\right)^n\right]^{1/n}} \quad (3.1)$$

式中 $M_u$ 为极限抗弯承载力； $K_0$ 为初始刚度； $\theta_0$ 为极限抗弯承载力 $M_u$ 对应的塑性转角( $M_u/K_0$ )， $n$ 为形状参数。

### 3.3.2 节点抗弯承载力

通过前述参数分析可知，节点抗弯承载力主要与环板宽度、钢梁的塑性弯矩、钢梁的强度、柱截面含钢率、梁柱的线刚度比有关。

对 $M$ 数值计算结果进行分析，可回归出节点的抗弯承载力的计算公式如下：

$$M = R \cdot M_{b0} \cdot M_{b1} \cdot M_f \cdot M_\alpha \cdot M_i \quad (3.2)$$

式中： $R$ 为系数，对于圆形柱节点取 $1.33 \times 10^{-4}$ ，方形柱节点取 $5.37 \times 10^{-5}$ ， $M_{b0}$ 、 $M_{b1}$ 、 $M_f$ 、 $M_\alpha$ 、 $M_i$ 分别为 $M$ 与环板宽度、钢梁塑性弯矩、钢梁强度、柱截面含钢率、梁柱线刚度比的数学关系。

#### (1)圆钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.19为圆钢管混凝土柱节点根据各参数对节点抗弯承载力影响规律回归出的关系式。

##### A、抗弯承载力与环板宽度之间的关系

$$M_{b0} = 0.411b + 423.72 \quad (3.2a-1)$$

##### B、抗弯承载力与钢梁塑性弯矩之间的关系

$$M_{b1} = 5.722M_b^{0.6335} \quad (3.2a-2)$$

##### C、抗弯承载力与钢梁强度之间的关系

$$M_f = 1.302f_{by} + 15.62 \quad (3.2a-3)$$

##### D、抗弯承载力与柱截面含钢率之间的关系

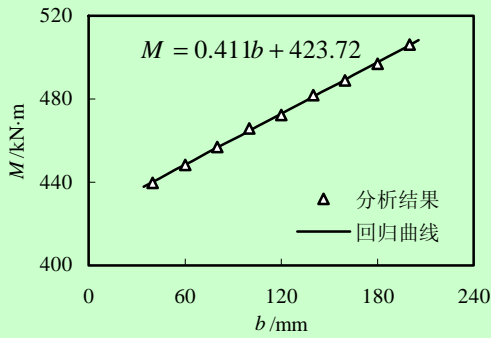
$$M_\alpha = 1321\alpha^2 + 128.43\alpha + 438.35 \quad (3.2a-4)$$

##### E、抗弯承载力与梁柱线刚度比之间的关系

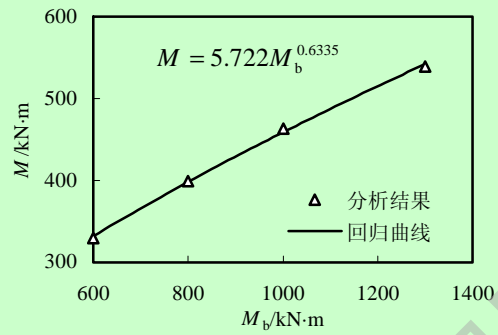
$$M_i = 801.6i^{0.2923} \quad (3.2a-5)$$

对(3.2a-1)~(3.2a-5)合并，得出圆钢管混凝土柱节点抗弯承载力的具体表达式为：

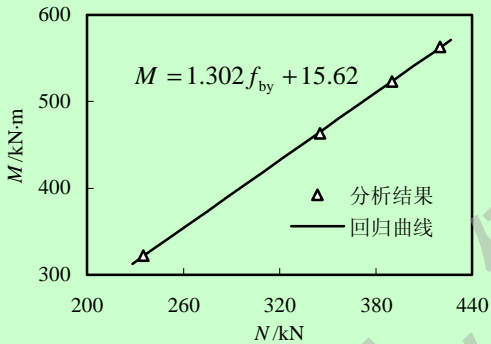
$$M_u = 1.33 \times 10^{-4} (0.411b + 423.72)(1.302f_{by} + 15.62)(\alpha^2 + 0.1\alpha + 0.332)M_b^{0.6335}i^{0.2923} \quad (3.2a)$$



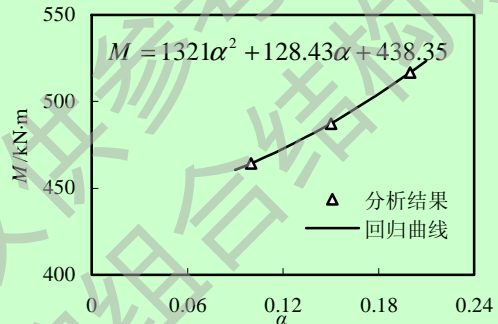
(a) 环板宽度与节点抗弯承载力关系



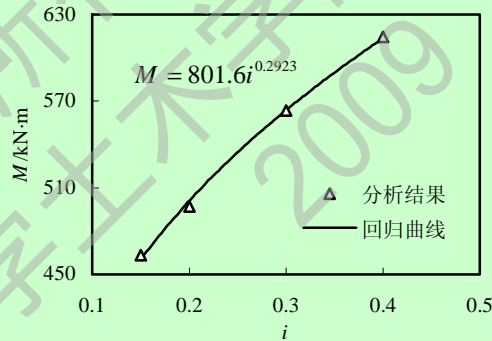
(b) 钢梁塑性弯矩与节点抗弯承载力关系



(c) 钢梁强度与节点抗弯承载力关系



(d) 柱截面含钢率与节点抗弯承载力关系



(e) 梁柱线刚度比与节点抗弯承载力关系

图3.19 圆钢管混凝土柱回归曲线拟合图

(2)方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.20为方钢管混凝土柱节点根据各参数对节点抗弯承载力影响规律回归出的关系式。

A、抗弯承载力与环板宽度之间的关系

$$M_{b0} = 345.51b^{0.078} \quad (3.2b-1)$$

B、抗弯承载力与钢梁塑性弯矩之间的关系

$$M_{b1} = -0.0001M_b^2 + 0.513M_b + 452.77 \quad (3.2b-2)$$

C、抗弯承载力与钢梁强度之间的关系

$$M_f = 1.311f_{by} + 15.45 \quad (3.2b-3)$$



D、抗弯承载力与柱截面含钢率之间的关系

$$M_u = -818.62\alpha^2 + 650.07\alpha + 409.64 \quad (3.2b-4)$$

E、抗弯承载力与梁柱线刚度比之间的关系

$$M_i = 688.88i + 363.81 \quad (3.2b-5)$$

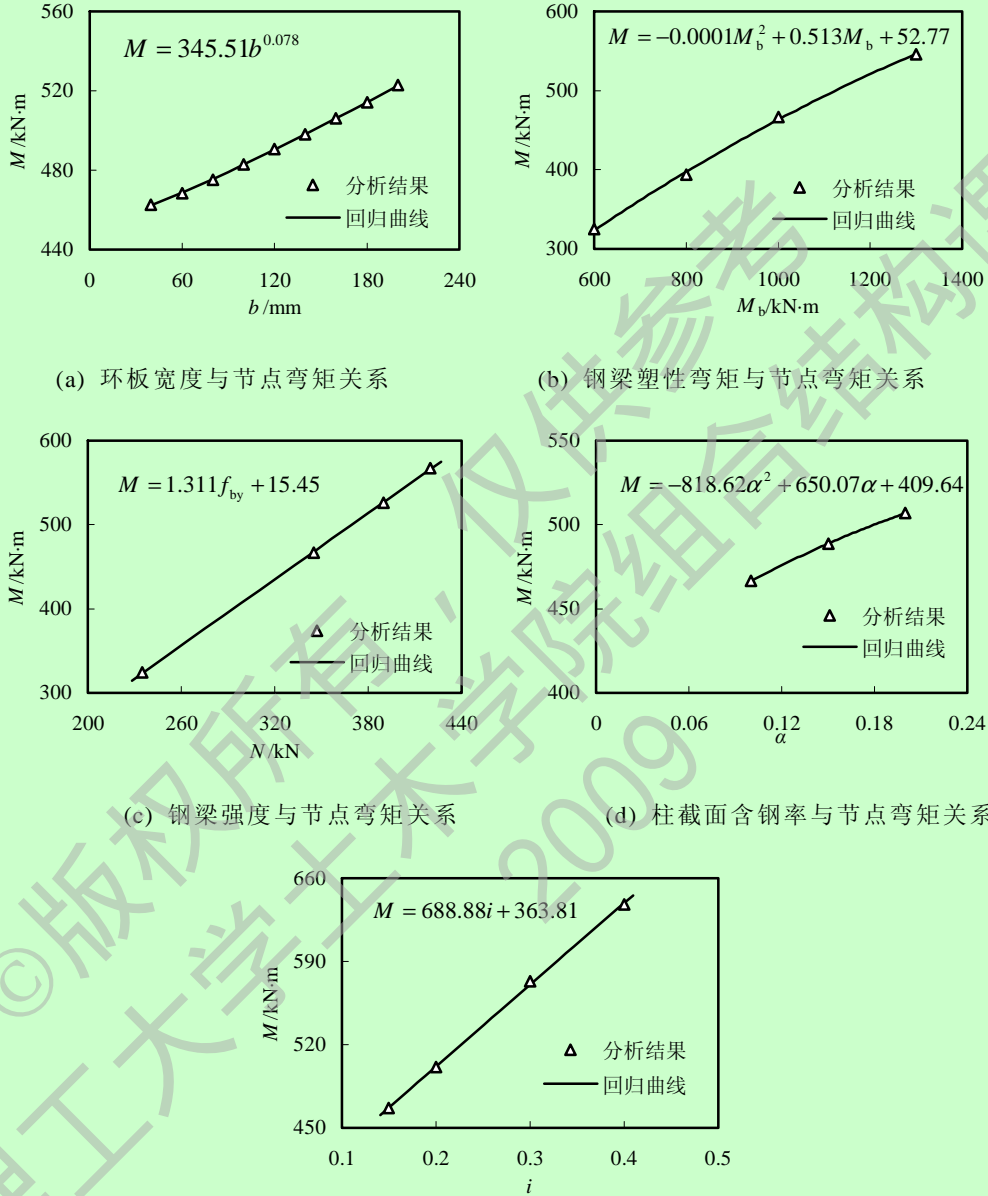


图3.20 方钢管混凝土柱回归曲线拟合图

对(3.2b-1)~(3.2b-5)合并，得出方钢管混凝土柱节点抗弯承载力的具体表达式为：

$$M_u = 5.37 \times 10^{-5} (0.01M_b^2 - 51.3M_b - 5277)(f_{by} + 11.78)(\alpha^2 - 0.8\alpha - 0.5)(i + 0.53)b^{0.078} \quad (3.2b)$$

式中， $M_u$ 节点抗弯承载力(kN·m)， $b$ 为环板宽度(mm)， $M_b$ 为钢梁的塑性弯矩(kN·m)， $f_{by}$ 为钢梁的强度(N/mm<sup>2</sup>)， $\alpha$ 为柱截面含钢率， $i$ 为梁柱的线刚度比。

本公式适用于钢管强度在Q235-Q420之间、混凝土强度等级在C40-C80之间、

柱截面含钢率在0.1-0.2之间、钢梁塑性弯矩在600kN-1300kN之间、梁柱线刚度比在0.15-0.4之间的圆形和方形钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点。

图3.21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。由图3.21所示，除了圆钢管中有两点误差相对较大，但误差也在合理的范围之内，其余各点都吻合良好。表明本文提出的节点抗弯承载力的简化计算公式有较好的精确性。 $M_{u,cal}$ 和 $M_{u,FEM}$ 分别为按简化公式计算和有限元计算的数值。

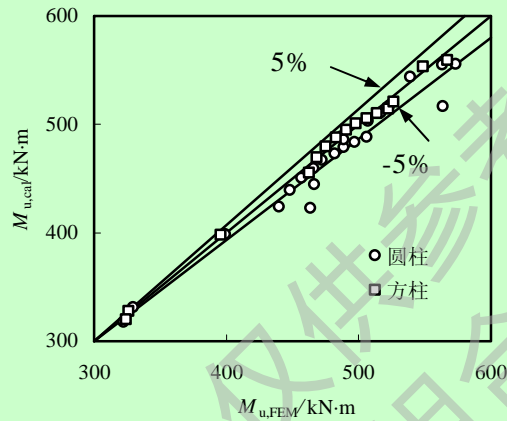


图3.21 节点抗弯承载力的简化计算与有限元计算比较

### 3.3.3 节点初始刚度

如3.2节中所述，通过参数分析可知，节点初始刚度与环板宽度、钢梁的塑性弯矩、柱截面含钢率、钢管内混凝土强度、梁柱的线刚度比有关。数值回归方法同节点抗弯承载力。

节点的初始刚度 $K_0$ 计算公式如下：

圆钢管混凝土柱-钢梁节点：

$$K_0 = 9.7 \times 10^{-5} (0.11b^2 + 23.25b + 53883)(M_b - 163.1)(f_{cu} + 138.3)(\alpha + 0.1)(i^2 + 3.2i - 172.4) \quad (3.3)$$

方钢管混凝土柱-钢梁节点：

$$K_0 = 2.4 \times 10^{-4} (0.089b^2 + 25.43b + 51096)(M_b - 120.3)(f_{cu} + 198.6)(\alpha + 0.09)(i^2 + 0.58i - 0.013) \quad (3.4)$$

式中 $K_0$ 为节点初始刚度(kN·m/rad)， $b$ 为环板宽度(mm)， $M_b$ 为钢梁的塑性弯矩(kN·m)， $f_{cu}$ 为钢管内混凝土的强度标号值(N/mm<sup>2</sup>)， $\alpha$ 为柱截面含钢率， $i$ 为梁柱的线刚度比。

本公式适用于钢梁塑性弯矩在600kN-1300kN之间、钢管内混凝土强度在C40-C80之间、柱截面含钢率在0.1-0.2之间、梁柱线刚度比在0.15-0.4之间的圆形和方形钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点。

图3.22对节点初始刚度的简化计算值与有限元计算值进行了比较。由图3.22所示，各点都吻合良好。表明本文提出的节点初始刚度的简化计算公式有较好的精确性。 $K_{0,cal}$ 和 $K_{0,FEM}$ 分别为按简化公式计算和有限元计算的数值。

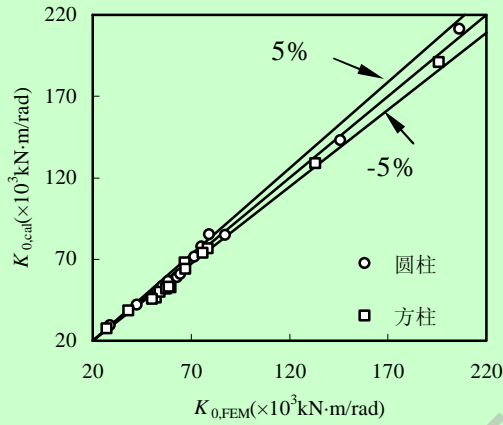


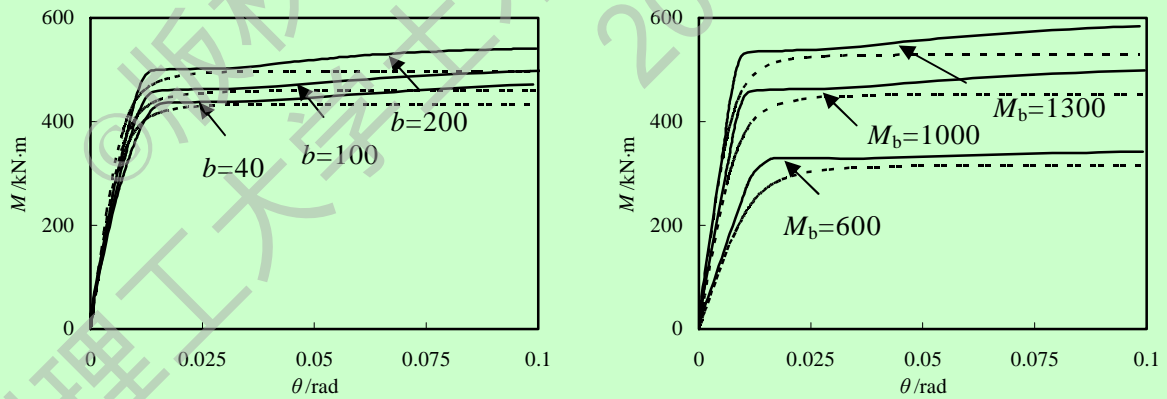
图3.22 节点初始刚度的简化计算与有限元计算比较

### 3.3.4 形状参数

梁柱节点的形状参数是由三参数模型决定的，形状参数主要与节点的几何尺寸有关。节点弯矩-转角模型的形状参数为：

$$n = 3 \quad (3.5)$$

图3.23、图3.24对环板节点弯矩-转角关系的有限元分析值与简化公式计算值进行比较。实线表示有限元分析值，虚线表示简化公式计算值。由图可以看出，节点弯矩-转角关系的有限元分析值与简化计算值吻合较好，由此可见，本文分析得出的环板节点弯矩-转角简化计算模型具有很好的准确性。



(a) 环板宽度

(b) 钢梁塑性弯矩

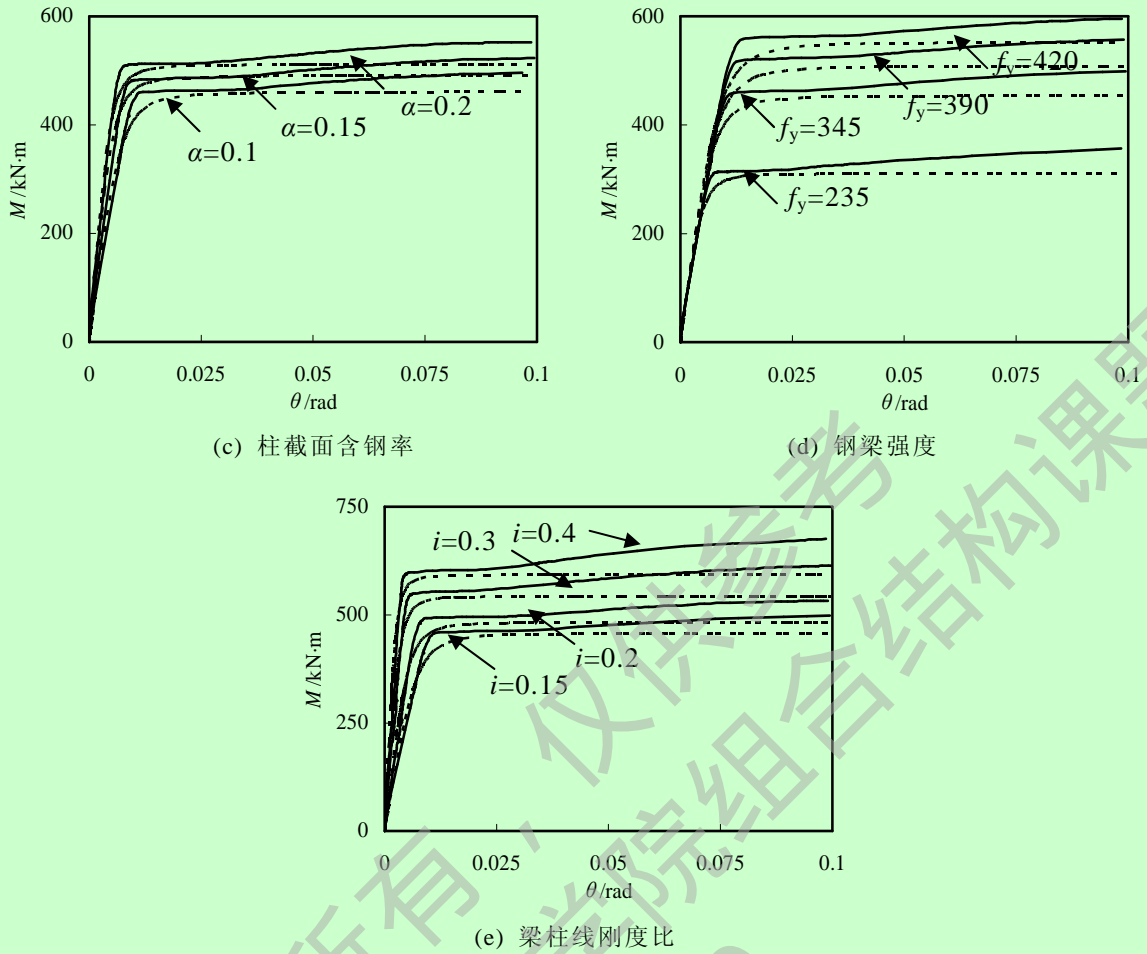
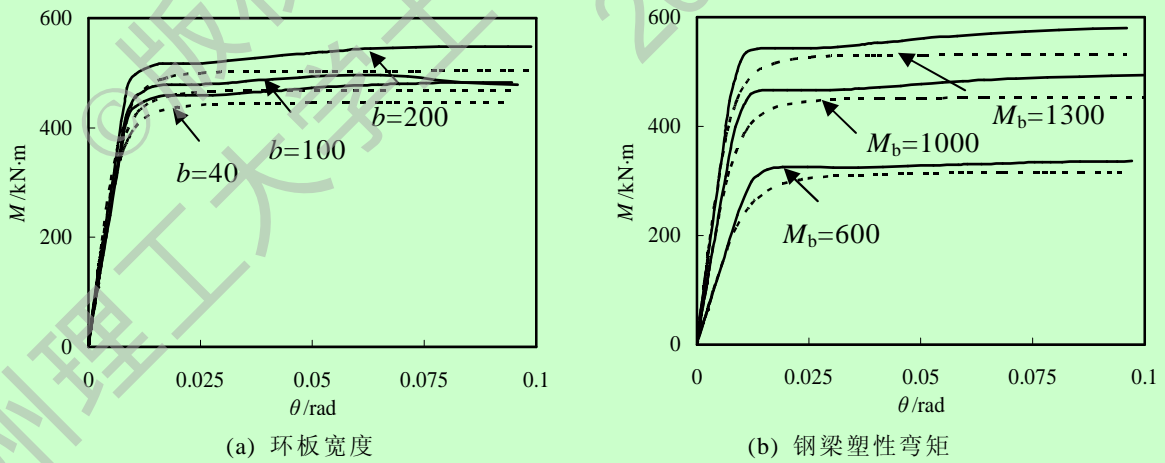


图3.23 圆钢管混凝土柱-钢梁节点有限元计算与简化模型对比



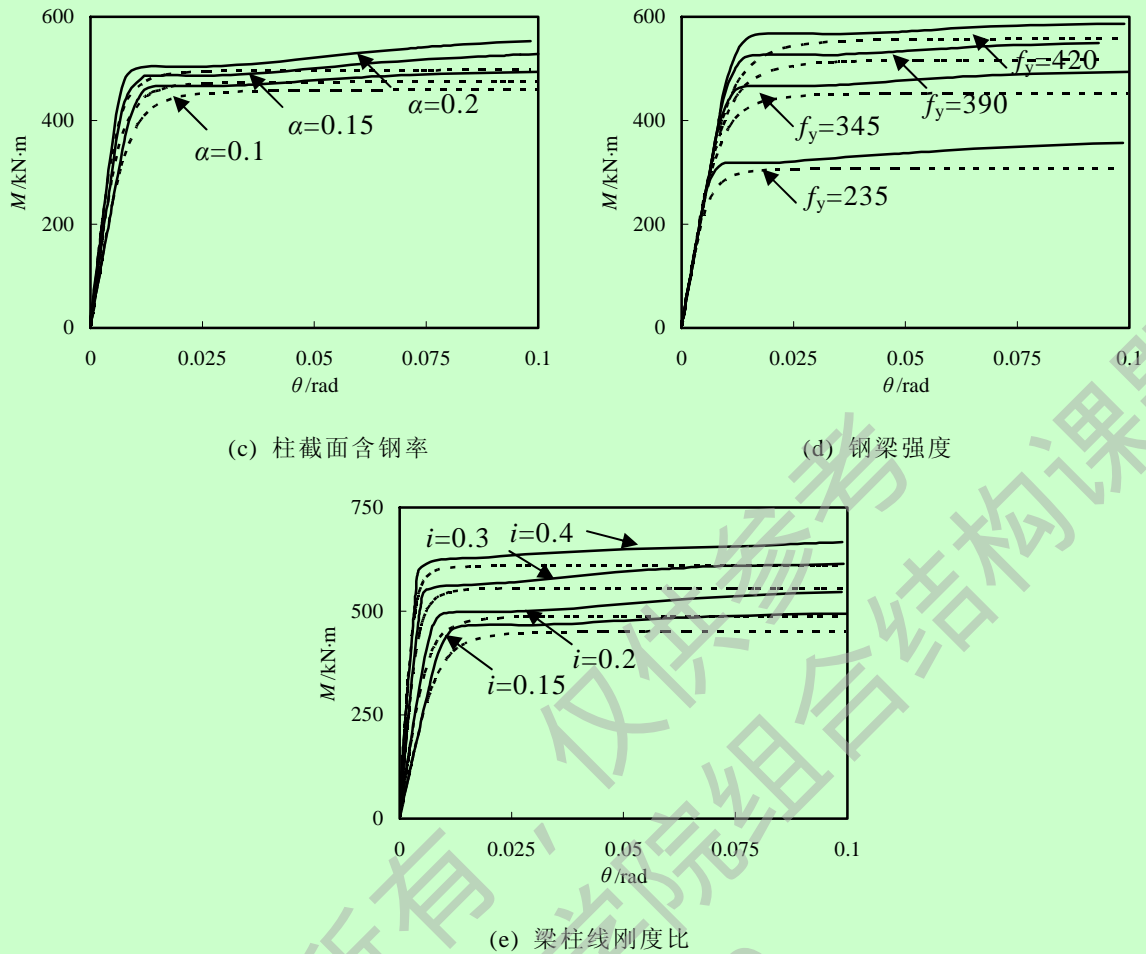


图3.24 方钢管混凝土柱-钢梁节点有限元计算与简化模型对比

### 3.4 钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点抗剪承载力计算方法

以往研究钢管混凝土节点的抗剪承载力是将其分为三部分：节点域钢管腹板的抗剪承载力、节点域加强环板的抗剪承载力和节点域混凝土的抗剪承载力。然后根据材料力学分别得出结果再相加。吕西林等(2007)<sup>[30]</sup>, Chen和Chung(2003)<sup>[48]</sup>, 聂建国和秦凯(2007)<sup>[62]</sup>, 周天华(2004)<sup>[63]</sup>分别对圆、方钢管混凝土钢梁或钢筋混凝土梁节点的抗剪承载力进行了研究, 分析了组成节点的各部件所承担的剪力, 并得出了初步的节点抗剪承载力的公式。

这种方法无论从理论还是形式上都很容易理解, 计算结果与试验结果也基本相符, 但是对节点核心区内钢管与混凝土共同工作的效应并没有明确的体现。因此, 还需根据试验及理论模型进行大量的参数分析, 如钢管的直径、厚度, 加强环板尺寸, 钢材及混凝土强度等, 进一步得出更为合理的节点抗剪强度计算方法。

#### 3.4.1 钢管混凝土柱抗剪承载力与节点核心区抗剪承载力的区别

为了更好的理解钢管混凝土柱节点核心区的抗剪承载力, 首先要明确钢管混凝土柱与节点核心区抗剪承载力的区别。



(1) 钢管混凝土柱抗剪承载力

肖从真等(2005)<sup>[64]</sup>和钱稼茹等(2005)<sup>[65]</sup>对圆、方钢管混凝土柱的受剪承载力进行了试验研究。分析了各种参数如：混凝土强度、剪跨比和轴压比对抗剪承载力的影响。并推荐了圆、方钢管混凝土柱的受剪承载力的计算公式。

由于钢管混凝土柱内核心混凝土对钢管的支撑作用和钢管对核心混凝土的套箍约束作用，使得钢管混凝土在横向剪力作用下能保持其横截面几何形状的稳定性，并呈现出相当良好的塑性，具有较好的抗剪承载力，因此，通常不需要演算其抗剪承载力。韩林海(2007)<sup>[2]</sup>对圆、方钢管混凝土构件的纯剪进行了研究，通过分析可能影响钢管混凝土纯剪 $\tau$ - $\gamma$ 关系曲线的因素，如混凝土强度、钢材屈服强度和含钢率。并通过计算结果的回归分析，得到钢管混凝土抗剪强度的计算公式。

钢管混凝土纯剪试件抗剪强度承载力公式为：

$$V_u = \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} \quad (3.6)$$

对于圆钢管混凝土：

$$\gamma_v = 0.97 + 0.2 \ln(\xi) \quad (3.7)$$

对于方钢管混凝土：

$$\gamma_v = 0.954 + 0.162 \ln(\xi) \quad (3.8)$$

式中： $V_u$ 为横向抗剪承载力；

$\gamma_v$ 为钢管混凝土抗剪强度承载力计算系数；

$A_{sc}$ 为钢管混凝土构件的组合截面面积；

$\tau_{scy}$ 为钢管混凝土的组合剪切强度设计值；

(2) 钢管混凝土节点核心区抗剪承载力

钢管混凝土结构节点承受柱传来的轴向力、弯矩和剪力，且同时承受框架梁传来的弯矩和剪力。节点域的剪力传递图如 3.25 所示。但与普通的混凝土框架节点相比，在钢管混凝土结构中，钢管使节点域核心区混凝土三向受压，其节点内力更加复杂。

Sasaki等(1995)<sup>[66]</sup>和余勇(1998)<sup>[67]</sup>根据虚功原理建立了方钢管混凝土柱节点的抗剪承载力分析模型，并在此基础上提出了节点的抗剪承载力计算公式。周天华(2004)<sup>[63]</sup>则将方钢管混凝土柱节点的抗剪承载力贡献分三部分进行了分析，给出了相应各部分抗剪承载力的计算方法，并在此基础上叠加得到了节点域整体的抗剪承载力计算公式。聂建国等(2007)<sup>[62]</sup>在试验研究的基础上，对方钢管混凝土柱节点的抗剪受力性能进行了分析，将节点域的抗剪贡献分为，节点域钢管腹板贡献，节点域钢管翼缘与外环板构成的钢板框架贡献及节点域混凝土的抗剪贡献。根据剪切变形协调的条件将三部分曲线进行叠加，得到节点的剪力-剪切变形曲线，并由此建立了节点的抗剪承载力计算公式。

综上所述，加强环式节点的剪力传递路径为，水平剪力通过钢梁翼缘传递到

加强环和钢管壁，再通过钢管壁和混凝土间的粘结力传递到核心混凝土；节点的抗剪承载力( $V_{ju}$ )由钢管壁( $V_{bu}$ )、加强环( $V_{su}$ )和核心混凝土( $V_{cu}$ )三部分承担。通过前一章的分析可知，随着水平剪力的不断增大，钢管壁和混凝土之间可能出现粘结破坏，部分水平剪力直接通过加强环传递到钢管混凝土柱的另一面。其破坏形式有：剪切破坏和撕裂破坏。

$$V_{ju} = V_{bu} + V_{su} + V_{cu} \quad (3.9)$$

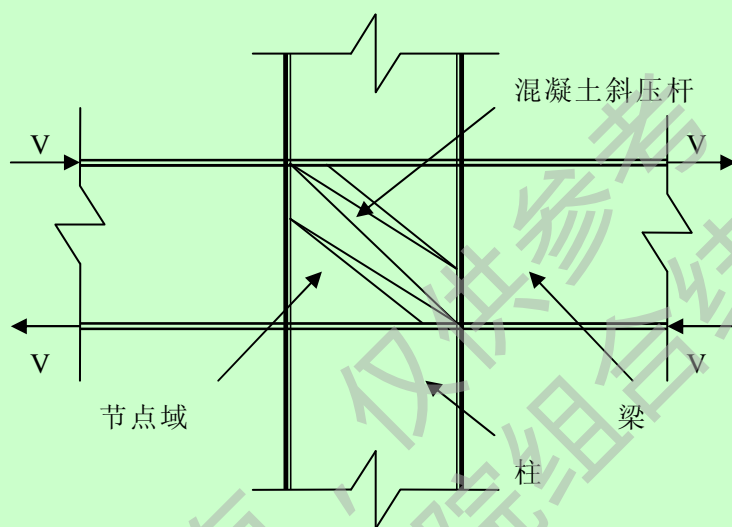


图3.25 节点域的剪力传递图

通过剪力的传递途径可以看出钢管混凝土柱与环板节点核心区剪力的区别，对于钢管混凝土柱的水平剪力主要由钢管壁和核心混凝土提供，在计算时通常取一个组合值代替钢管与混凝土的强度；加强环式节点的剪力主要由钢管壁，加强环以及核心混凝土承担，三者所承担的剪力叠加得到加强环节点的抗剪承载力。

### 3.4.2 节点抗剪强度承载力参数分析

影响钢管混凝土环板节点的抗剪承载力关系曲线的可能因素有环板宽度、柱截面含钢率、钢管强度、钢梁强度、混凝土强度、轴压比等。仍然采用典型试件来分析以上各参数对节点剪力应变关系曲线的影响规律。

典型构件的基本信息如下：钢管混凝土柱采用 $D(B) \times t = 400 \times 9.3\text{mm}$ ，含钢率 $\alpha = 0.1$ ，Q345钢材，C60混凝土，柱高 $H = 3.3\text{m}$ ，钢梁采用Q345钢材，钢梁截面 $H400 \times 200 \times 8 \times 10\text{mm}$ ，跨度 $L = 6.6\text{m}$ ，轴压比取0.4，梁柱线刚度比取0.2。

首先确定节点域的剪切变形，如图3.26所示，在柱端水平荷载作用下，节点域侧面由原来的矩形变为菱形，节点域对角点的相对位移为 $\Delta_1 + \Delta_2$ 和 $\Delta_3 + \Delta_4$ ，由此可以得到节点域的剪切变形：

$$\gamma_j = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{1}{2}(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4) \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab} \quad (3.10)$$

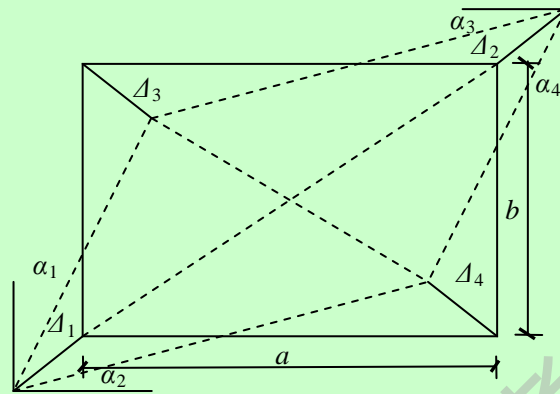
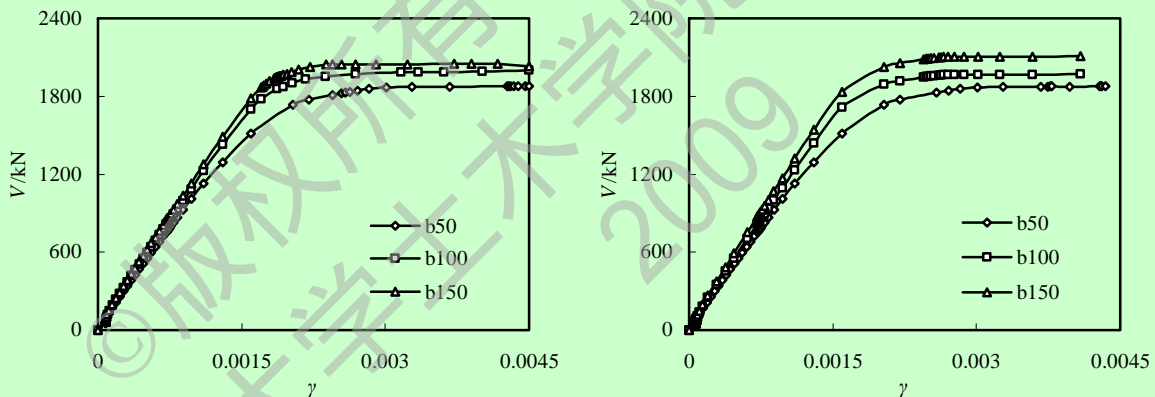


图3.26 节点剪切变形示意图

(1)环板宽度

图3.27给出了不同环板宽度的钢管混凝土环板节点剪力-剪切应变关系曲线。图例中b50代表环板宽度为50mm，其余类似。可见环板宽度对圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱 $V-\gamma$ 关系曲线影响规律基本相同；在其它参数不变的情况下，随着环板宽度的增大，节点的抗剪强度逐渐增大。



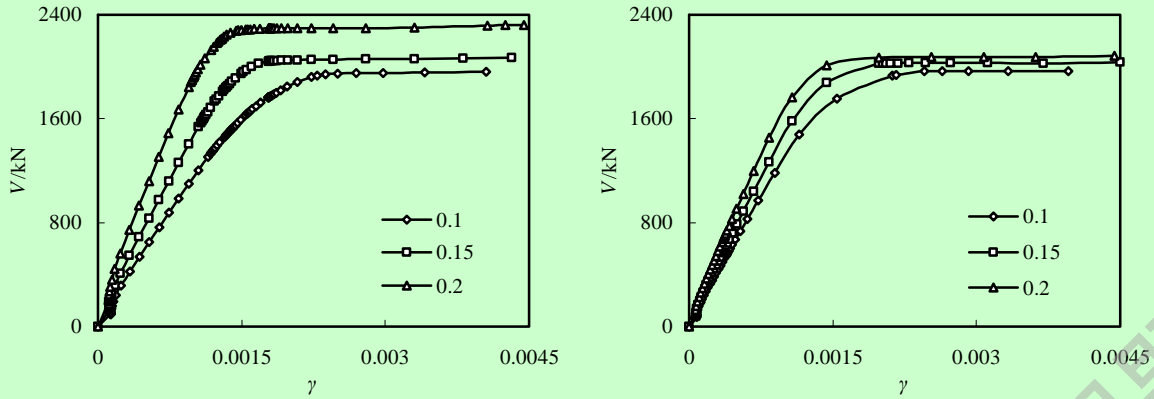
(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点

(b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.27 环板宽度对 $V-\gamma$ 曲线的影响

(2)柱截面含钢率

图3.28给出了不同柱截面含钢率的钢管混凝土环板节点剪力-剪切应变关系曲线。可见柱截面含钢率对圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱 $V-\gamma$ 关系曲线影响规律基本相同；在其它参数不变的情况下，随着含钢率的增大，节点的抗剪强度和弹性阶段剪切刚度也逐渐增大。

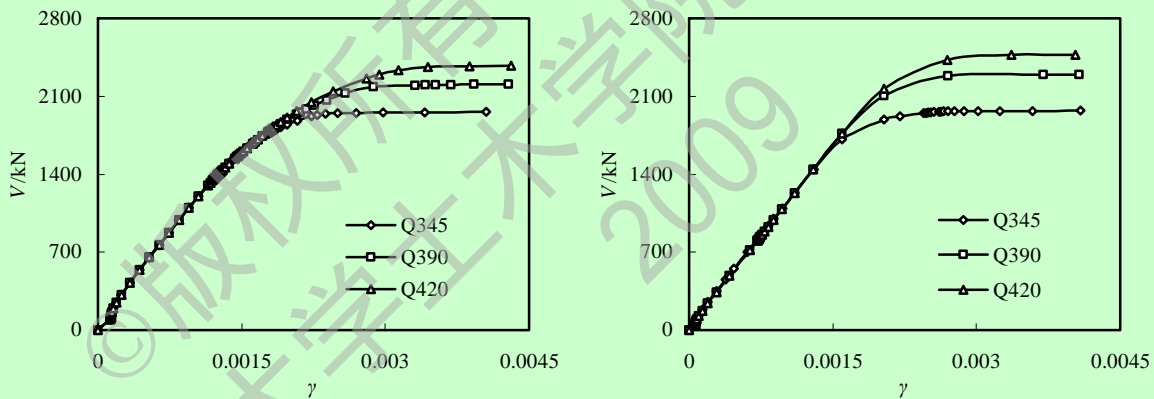


(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点 (b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.28 含钢率对 $V-\gamma$ 曲线的影响

(3) 环板钢材屈服强度

图3.29给出了不同环板强度的钢管混凝土环板节点剪力-剪切应变关系曲线。可见环板强度对圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱 $V-\gamma$ 关系曲线影响规律基本相同；在其它参数不变的情况下，随着环板强度的增大，节点的抗剪强度逐渐增大。钢材强度的变化对节点弹性阶段的剪切刚度几乎没有影响，这是因为钢材的剪切模量与其强度无关。

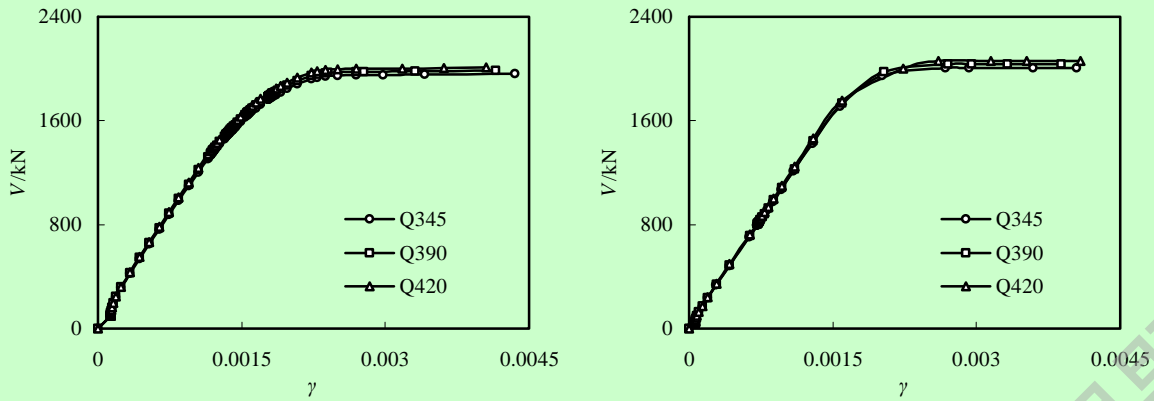


(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点 (b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.29 环板强度对 $V-\gamma$ 曲线的影响

(4) 钢管强度

图3.30给出了不同钢管强度的钢管混凝土环板节点剪力-剪切应变关系曲线。可见钢管强度对圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱 $V-\gamma$ 关系曲线影响规律基本相同；在其它参数不变的情况下，随着钢管强度的增大，节点的抗剪强度略有增大，节点弹性阶段的剪切刚度几乎没有变化。



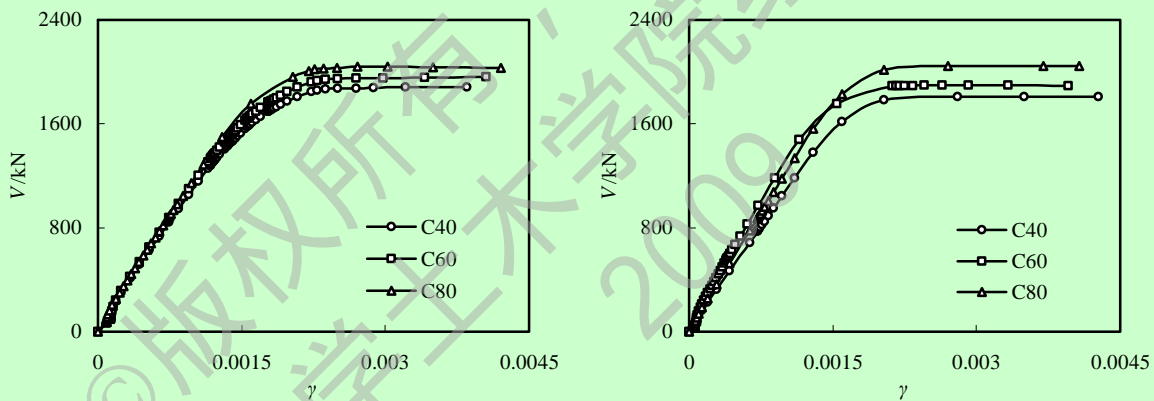
(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点

(b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.30 钢管强度对 $V-\gamma$ 曲线的影响

(5) 混凝土强度

图3.31给出了不同混凝土强度的钢管混凝土环板节点剪力-剪切应变关系曲线。可见混凝土强度对圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱 $V-\gamma$ 关系曲线影响规律基本相同；在其它参数不变的情况下，随着混凝土强度的增大，节点的抗剪强度和弹性阶段剪切刚度也逐渐增大。



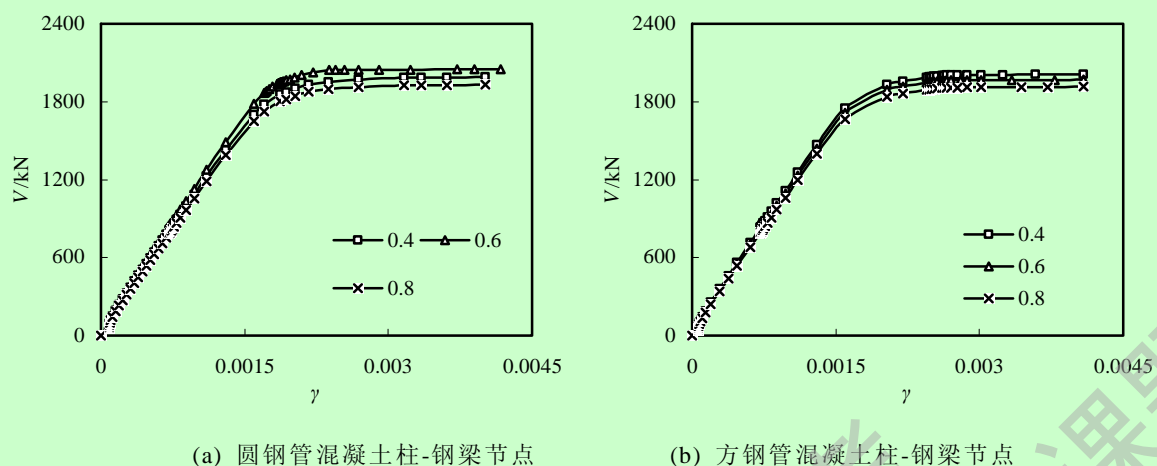
(a) 圆钢管混凝土柱-钢梁节点

(b) 方钢管混凝土柱-钢梁节点

图3.31 混凝土强度对 $V-\gamma$ 曲线的影响

(6) 轴压比

图3.32给出了不同轴压比的钢管混凝土环板节点剪力-剪切应变关系曲线。可见轴压比对圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱 $V-\gamma$ 关系曲线影响规律基本相同；在其它参数不变的情况下，随着轴压比的增大，节点的抗剪强度和弹性阶段剪切刚度也逐渐增大。

图3.32 轴压比对 $V-\gamma$ 曲线的影响

从以上参数分析的计算结果表明，各参数只会影响曲线的数值，对曲线形状影响不明显。

### 3.4.3 加强环式节点抗剪承载力简化计算

目前《矩形钢管混凝土结构技术规程 CECS159:2004》<sup>[7]</sup>和《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>中都没有给出对外加强环式节点的抗剪承载力计算公式。聂建国和秦凯(2007)<sup>[62]</sup>建议了方钢管混凝土柱-钢梁环板节点的抗剪承载力计算公式。本节结合聂建国和秦凯(2007)<sup>[62]</sup>中所提出的抗剪计算公式推导思路，对如何进一步确定合理的钢管混凝土柱-钢梁加强环式节点的抗剪承载力计算公式进行了探讨。

由周天华(2004)<sup>[63]</sup>，Fukumoto(2000)<sup>[68]</sup>等的研究结果可知，方钢管混凝土柱-钢梁节点中腹板的剪力-剪切变形骨架曲线可假设为如图3.33所示的三折线模型。其中， $V_{jwy}$ 表示钢管腹板的屈服剪力， $V_{jwu}$ 表示钢管腹板的极限剪力， $\gamma_{jwy}$ 表示钢管腹板的屈服剪切变形， $\gamma_{jwu}$ 表示钢管腹板的极限剪切变形。

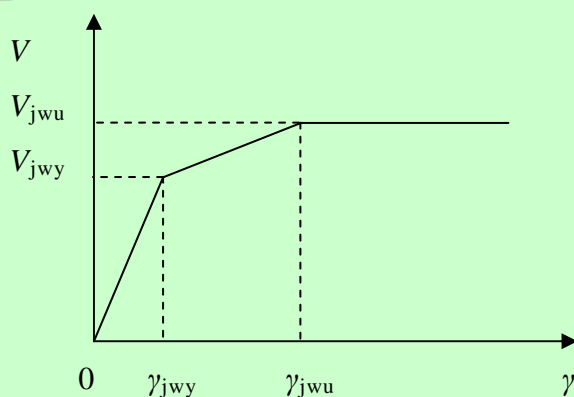


图3.33 钢管腹板的抗剪三折线模型

根据图3.33，聂建国和秦凯(2007)<sup>[62]</sup>建议了方钢管混凝土柱-钢梁环板节点的



抗剪承载力计算公式也由三部分组成，各部分具体表达式如下。

(1) 钢管腹板的抗剪承载力

方钢管腹板的屈服剪力为：

$$V_{jwy} = \frac{1.8t_{cf}(d_c - 2t_{cf})}{\sqrt{3}} \sqrt{f_{yt}^2 - \sigma_s^2} \quad (3.11)$$

其中， $f_{yt}$ 为钢管腹板的屈服强度； $f_{yt} = \sqrt{\sigma_s^2 + 3\tau_s^2}$ ， $\sigma_s = NE_s / (E_s A_s + E_c A_c)$ 为钢管的纵向压应力， $N$ 为柱承受的轴压力， $E_s$ 为钢管的弹性模量， $A_s$ 为钢管横截面面积， $E_c$ 为钢管内核心混凝土的弹性模量， $A_c$ 为核心混凝土横截面面积。 $t_{cf}$ 表示钢管的管壁厚度， $d_c$ 表示钢管的宽度。

(2) 外加强环板及柱翼缘的抗剪承载力

方钢管的翼缘与外加强环板组成的钢板框架的屈服剪力为：

$$V_{jfy} = \frac{4M_{y-edcf}}{h_b - t_{bf}} \quad (3.12)$$

其中， $M_{y-edcf} = \min(M_{yed}, M_{yef})$ ， $M_{yed} = \frac{1}{4} f_{yed} b_{ed} t_{ed}^2$ ， $M_{yef} = \frac{1}{4} f_{yef} (b_c - 2t_{cf}) t_{cf}^2$ ， $f_{yed}$ 表示外加强环板的屈服强度， $b_{ed}$ 表示外加强环板的宽度， $t_{ed}$ 表示外加强环板的厚度， $f_{yef}$ 表示钢管翼缘的屈服强度， $t_{cf}$ 表示钢管翼缘的厚度。

(3) 核心区混凝土的抗剪承载力

核心区混凝土的抗剪承载力为：

$$V_{strut} = 0.3(\sigma_c)_{eff} (d_c - 2t_{cf})(b_c - 2t_{cf}) \quad (3.13)$$

其中， $(\sigma_c)_{eff} = \zeta \sigma_c$ ， $\zeta = \frac{1}{0.85 + 0.27k}$ ， $k=3$ 。

将以上三部分叠加，就得到了方钢管混凝土柱外加强环板节点的屈服抗剪承载力计算公式。

$$V_{jy} = \frac{1.8t_{cf}(d_c - 2t_{cf})}{\sqrt{3}} \sqrt{f_{yt}^2 - \sigma_s^2} + \frac{4M_{y-edcf}}{h_b - t_{bf}} + 0.3(\sigma_c)_{eff} (d_c - 2t_{cf})(b_c - 2t_{cf}) \quad (3.14)$$

以上所述的方钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点抗剪承载力的计算方法，对混凝土与钢管共同作用体现不明显。经过计算发现，式(3.14)中加强环板对节点抗剪承载力贡献很小，因此可以不考虑。抗剪承载力主要由节点核心区内钢管和管内混凝土共同提供。

聂建国和徐桂根(2009)<sup>[40]</sup>通过研究分析，建立了方钢管混凝土柱节点的抗剪受力模型，并将方钢管混凝土柱节点抗剪受力过程分为协同工作、共同工作、屈服强化以及极限变形4个阶段，该模型与试验结果吻合较好。由此可见此类节点的抗剪承载力在达到屈服强度时，节点域内钢管与管内混凝土能够保证共同工作。

本文建议加强环式节点的抗剪承载力可按下式确定：

$$V_{jy} = f_{sc} H b_j \quad (3.15)$$

式中： $f_{sc}$ 为钢管混凝土组合轴压强度设计值，由《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》<sup>[8]</sup>确定；

$b_j$ 为节点核心区宽度；

$H$ 为钢管混凝土斜压杆的等效宽度；

$H$ 可表达为核心区对角线的某一比值，即：

$$H = \alpha \sqrt{h_c^2 + h_b^2} \quad (3.16)$$

一般情况下，节点截面高度 $h_j$ 等于柱截面的高度 $h_c$ ，梁截面的高度 $h_b$ 可以表示成柱截面高度的某一比值，即 $h_b = \beta h_c = \beta h_j$ ，则：

$$H = \alpha \sqrt{h_j^2 + (\beta h_j)^2} = \alpha \sqrt{1 + \beta^2} \cdot h_j \quad (3.17)$$

令 $\gamma = \alpha \sqrt{1 + \beta^2}$ ，则加强环式节点的抗剪承载力公式为：

$$V_{jy} = H b_j f_{sc} = \gamma f_{sc} b_j h_j \quad (3.18)$$

式中 $\gamma$ 为系数，可以看成节点核心区钢管混凝土抗剪影响系数。根据前面各参数对节点抗剪承载力的影响的分析，可以通过柱截面含钢率对节点的抗剪承载力的影响来确定影响系数 $\gamma$ 。 $\gamma$ 的计算结果见表3.2。该系数与含钢率的关系见图3.35。

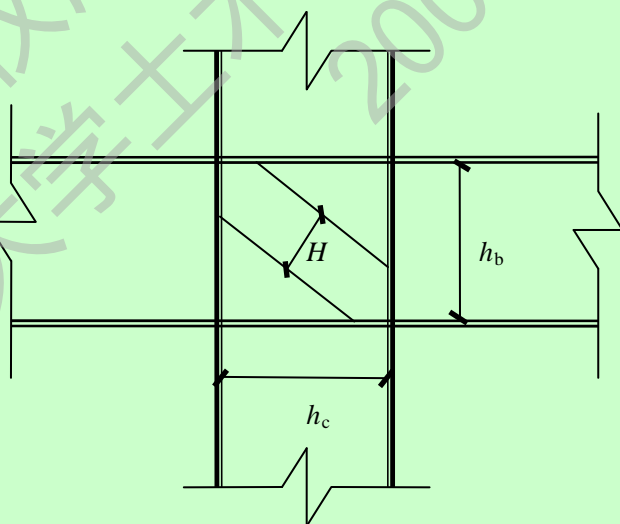


图3.34 节点核心区示意图

表3.1给出了有限元模型建立的圆、方钢管混凝土柱-钢梁节点的详细资料，其中钢管混凝土柱截面尺寸分别为其钢管直径(边长)、壁厚；工字钢梁截面尺寸分别为其梁高、梁宽、腹板厚度、翼缘厚度。

表3.1 有限元模型节点明细表

| 节点<br>编号 | 环板宽度<br>(mm) | 节点尺寸(mm) |               |      | 轴压比<br>$n$ | 含钢率<br>$\alpha$ |
|----------|--------------|----------|---------------|------|------------|-----------------|
|          |              |          | 截面            | 长度   |            |                 |
| J1       | 100          | 柱        | 400×9.3       | 3300 | 0.4        | 0.1             |
|          |              | 梁        | H400×200×8×10 | 6600 |            |                 |
| J2       | 100          | 柱        | 400×15.6      | 3300 | 0.4        | 0.15            |
|          |              | 梁        | H400×200×8×10 | 6600 |            |                 |
| J3       | 100          | 柱        | 400×18        | 3300 | 0.4        | 0.2             |
|          |              | 梁        | H400×200×8×10 | 6600 |            |                 |
| J4       | 100          | 柱        | 400×9.3       | 3300 | 0.4        | 0.1             |
|          |              | 梁        | H400×200×8×10 | 6600 |            |                 |
| J5       | 100          | 柱        | 400×15.6      | 3300 | 0.4        | 0.15            |
|          |              | 梁        | H400×200×8×10 | 6600 |            |                 |
| J6       | 100          | 柱        | 400×18        | 3300 | 0.4        | 0.2             |
|          |              | 梁        | H400×200×8×10 | 6600 |            |                 |

注：J1-J3为圆钢管节点，J4-J6为方钢管节点有限元分析的典型试件。

表中 $n$ 为轴压比， $\alpha$ 为含钢率。

表3.2 方钢管节点抗剪承载力计算

| 节点编号 | $V_{jy}/\text{kN}$ | $f_{sc}b_jh_j/\text{kN}$ | $\gamma$ | $\alpha$ |
|------|--------------------|--------------------------|----------|----------|
| J1   | 1966               | 9418                     | 0.209    | 0.1      |
| J2   | 2029               | 11516                    | 0.176    | 0.15     |
| J3   | 2073               | 13624                    | 0.152    | 0.2      |
| J4   | 1960               | 10087                    | 0.194    | 0.1      |
| J5   | 2061               | 12605                    | 0.164    | 0.15     |
| J6   | 2285               | 15134                    | 0.151    | 0.2      |

注： $\gamma$ 为核心区钢管混凝土抗剪影响系数， $\alpha$ 为柱截面含钢率。

对其进行数值回归得到下式：

圆钢管节点：

$$\gamma = 0.1 - 0.03 \ln(\alpha - 0.07) \quad (3.19-a)$$

方钢管节点：

$$\gamma = 0.014 - 0.08 \ln(\alpha + 0.01) \quad (3.19-b)$$

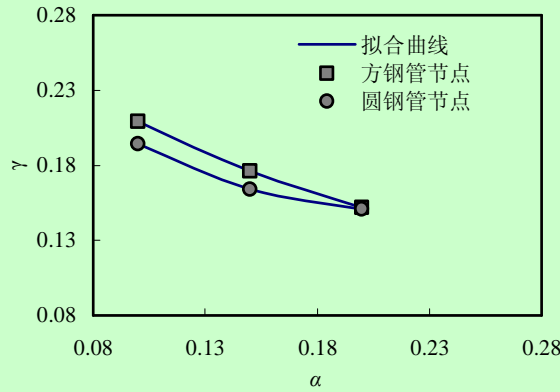


图3.35  $\gamma$ - $\alpha$ 关系曲线

根据以上的分析，钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点的抗剪承载力计算公式如下：

$$V_{jy} = \gamma f_{sc} b_j h_j \quad (3.20)$$

式中： $V_{jy}$ 为加强环式节点的抗剪承载力；

$f_{sc}$ 为钢管混凝土组合轴压强度设计值；

$b_j$ 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： $\gamma = 0.1 - 0.03 \ln(\alpha - 0.07)$

对于方钢管混凝土： $\gamma = 0.014 - 0.08 \ln(\alpha + 0.01)$

此公式的适用范围为钢管强度在Q235-Q420之间、混凝土强度等级在C40-C80之间，含钢率 $\alpha$ 在0.1-0.2之间，轴压比 $n$ 在0.4-0.8之间的钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点。

将简化公式的计算结果与有限元计算结果对比，见下表3.3。可见，简化计算值与试验值吻合良好。在实际工程中可以作为方钢管混凝土钢梁外加强环板节点的抗剪承载力计算参考公式。

表3.3 方钢管节点抗剪有限元计算值与简化计算值比较

| 节点编号 | $V_{jy}^f/\text{kN}$ 有限元计算值 | $V_{jy}^e/\text{kN}$ 简化计算值 | $V_{jy}^f / V_{jy}^e$ |
|------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| J1   | 1966                        | 1932                       | 0.983                 |
| J2   | 2029                        | 2024                       | 0.997                 |
| J3   | 2073                        | 2196                       | 1.05                  |
| J4   | 1960                        | 1922                       | 0.981                 |
| J5   | 2061                        | 2024                       | 0.982                 |
| J6   | 2285                        | 2101                       | 0.920                 |

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

### 3.5 小结

本章运用ABAQUS对典型加强环式节点模型的抗弯、抗剪进行了参数分析，得到了以下结论：

1、外加强环板节点抗弯承载力与环板宽度、钢梁的塑性弯矩、钢梁的强度、柱截面含钢率、梁柱的线刚度比有关。加强环板节点初始刚度与环板宽度、钢梁的塑性弯矩、柱截面含钢率、钢管内混凝土强度、梁柱的线刚度比有关。

2、本文根据各参数对外加强环板节点的影响规律，回归出了此类节点的抗弯承载力和抗弯刚度的简化计算公式，简化计算值与有限元计算值吻合较好。

3、外加强环板节点抗剪承载力与环板宽度、柱截面含钢率、环板钢材屈服强度、钢管强度、混凝土强度、轴压比有关。通过对柱截面含钢率对节点抗剪承载力的影响，回归出节点抗剪承载力的影响系数，最后得出了钢管混凝土柱外加强环板节点抗剪承载力的计算公式，公式计算值与有限元计算值吻合较好。

## 结论及展望

本文主要对钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点力学性能与设计方法进行了研究；运用有限元软件 ABAQUS 对其进行了理论分析以及一系列的参数分析，得出以下结论：

(1) 运用有限元软件 ABAQUS 建立了外加强环板节点的三维实体模型，进行了其荷载-变形曲线的全过程数值模拟，理论计算与试验结果总体上吻合良好。利用此有限元模型，对典型试件各组成部件进行单调荷载下非线性全过程分析，透过各部件在受力过程中的应力分布等微观机理，进一步明确了各部件之间的协调工作以及节点的工作机理。分析结果表明：在梁翼缘与加强环交界处设置加劲肋来有效的提高钢梁的抗弯强度。随着外加强环板宽度的增大，节点的极限承载力升高，初始刚度增大。

(2) 基于理论分析，对可能影响外加强环板节点抗弯承载力和初始刚度的参数：环板宽度、钢梁的塑性弯矩、柱截面含钢率、钢管强度、钢梁强度、钢管内混凝土强度、轴压比、梁柱的线刚度进行了分析。分析结果表明：外加强环板节点抗弯承载力与环板宽度、钢梁的塑性弯矩、钢梁的强度、柱截面含钢率、梁柱的线刚度比有关。加强环板节点初始刚度与环板宽度、钢梁的塑性弯矩、柱截面含钢率、钢管内混凝土强度、梁柱的线刚度比有关。最后根据各参数对外加强环板节点的影响规律，回归出了此类节点的抗弯承载力和抗弯刚度的简化计算公式，简化计算值与有限元计算值吻合较好。

(3) 明晰了钢管混凝土柱和节点核心区抗剪承载力的区别。对可能影响外加强环板节点抗剪承载力的参数进行了分析，结果表明：外加强环板节点抗剪承载力与环板宽度、柱截面含钢率、环板钢材强度、钢管强度、钢管内混凝土强度、轴压比有关。通过对柱截面含钢率对节点抗剪承载力的影响，回归出节点抗剪承载力的影响系数，最后得出了钢管混凝土柱外加强环板节点抗剪承载力的计算公式，公式计算值与有限元计算值吻合较好。

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、方钢管混凝土柱-钢梁外加强环板节点的抗弯承载力简化计算公式，为了能为实际工程设计提供参考，尚需大量试验来完善，以便得出更为合理的抗弯承载力计算公式。

(2) 工程实际中，框架结构体系的受力是三维的，而本文的研究模型为平面节点、单向受力，日后研究尚应以空间节点、双向受力分析，以更加接近工程实际。



(3) 本文进行的为节点静力分析，后续尚应对节点进行动力性能或抗震性能分析，以便得出更为合理的节点环板尺寸计算方法。

©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  
2009

## 参 考 文 献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 钟善桐. 高层钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999.
- [5] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] 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[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [7] 中国工程建设标准化协会标准 CECS159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [8] 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[S]. 福州, 2003.
- [9] 陈洪涛, 吴时适, 肖永福, 等. 钢管混凝土框架钢筋贯通式刚性节点的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(2): 21-25.
- [10] 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[J]. 工业建筑, 2000a, 30(3): 61-64.
- [11] 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[J]. 工业建筑, 1994, 24(2): 8-15.
- [12] 吴发红, 梁书亭, 李麟, 等. 钢加强环钢管混凝土梁柱节点试验研究[J]. 盐城工学院学报, 2001, 14(2): 46-49.
- [13] 方小丹, 李少云, 陈爱军. 新型钢管混凝土柱节点的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(5): 2-15.
- [14] 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[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 117-121.
- [15] 蔡健, 黄泰赞, 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[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 6-10.
- [16] Elremaily A, Azizinamini A. Experimental behavior of steel beam to CFT column connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(10): 1099-1119.
- [17] Fujimoto T, Inai E, Kai M, Mori K, Mori O, Nishiyama I. Behavior beam-to-column connection of CFT column system[C]. The 12th WCEE, 2000,

- No.2197: 1-8.
- [18] Oh Y S, Shin K J, Moon T S. Test of concrete-filled box column to H-beam connections[C]. Fifth Pacific Structural Steel Conference, Seoul, Korea,1998:881-886.
- [19] Kang C H, Moon T S. Behavior of concrete-filled steel tubular beam-column under combined axial and lateral forces[C]. Proceedings of the Fifth Pacific Structural Steel Conference, Seoul, Korea,1998:961-966.
- [20] Kim Y J, Shin K J, Oh Y S, Moon T S. Experimental results of CFT column to H-beam full-scale connections with external T-stiffeners[C]. SEWC2002, Yokohama, Japan, 2002, T1-3-d-1:1-6.
- [21] 李至钧. 钢管混凝土框架加强环节节点的研究与设计[J]. 工业建筑, 1987, 27(12): 17-21.
- [22] 张大旭, 张素梅. 钢管混凝土梁柱节点动力性能试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(1): 21-27.
- [23] 张素梅, 张大旭. 钢管混凝土梁与柱节点荷载-位移滞回曲线理论分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(4): 1-6.
- [24] 郑锦铜, 林衍宏, 钟立来, 等. 圆形钢管混凝土柱与钢梁接头之耐震行为[J]. 结构工程, 2002, 17(2): 71-90.
- [25] 苏恒强, 蔡健. 钢管混凝土加强环式节点的试验研究[J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(1): 80-84
- [26] 闫月梅, 杜晓巍. 钢管混凝土加强环式节点的有限元分析[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(1): 24-27
- [27] 陈娟, 王湛. 加强环式钢管混凝土柱-钢梁节点的刚性研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 43-54.
- [28] 李成玉, 郭耀杰, 李美东. 钢管混凝土结构外加强环式节点刚性试验研究[J]. 国外建材科技, 2005, 26(6): 15-18.
- [29] 李成玉, 郭耀杰. 钢管混凝土结构外加强环式空间节点环板受力性能理论研究[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(5): 32-35.
- [30] 吕西林, 李学平, 余勇. 矩形钢管混凝土柱与钢梁的连接节点设计方法[J]. 建筑结构学报, 2005, 35(1): 7-12.
- [31] 霍静思. 火灾作用后钢管混凝土柱-钢梁节点力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [32] 秦凯, 聂建国, 陈宇, 等. 方钢管混凝土柱外加强环式节点的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005 增刊: 350-353.
- [33] 金刚, 丁洁民, 陈建斌. 方钢管混凝土结构内隔板节点试验研究[J]. 结构工

- 程师, 2005, 21(4): 75-80.
- [34] 王文达, 韩林海, 游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点滞回性能的实验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 17-25.
- [35] 王静峰, 韩林海, 江莹. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点的非线性有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2007, 23(2): 177-181.
- [36] 陈曦, 王湛. 加强环式钢管混凝土节点梁柱连接刚度的有限元分析[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(5): 9-11.
- [37] 凡红, 徐礼华, 杜国峰. 方钢管混凝土柱-钢梁节点静力性能试验研究[J]. 湖南大学学报, 2007, 34(9): 11-15.
- [38] 杜培源, 黄炳生, 黄顾忠. 方钢管混凝土柱-钢梁外隔板式节点静力和滞回性能分析[J]. 工程设计, 2007, 22(8): 51-54.
- [39] 徐礼华, 凡红, 刘胜兵, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 122-131.
- [40] 聂建国, 徐桂根. 方钢管混凝土柱节点的抗剪受力分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 782-786.
- [41] Choi S M, Shin I B, Eom C H, Kim D K, Kim D J. An experimental study on the strength and stiffness of concrete filled steel column connections with external stiffener rings[C]. Proc., 4th Pacific Struct. Steel Conf., Vol. 2, Pergamon, U. K., 1995a: 1-8.
- [42] Choi S M, Shin I B, Eom C H, Kim D K, Kim D J. Elasto-plastic behavior of the beam to concrete filled circular steel column connections with external stiffener rings[C]. Building For The 21st Century, Loo Y C(editor). Griffith University Gold Coast Campus, Australia, 1995b: 451-456.
- [43] Shim J S, Han D J, Kim K S. An experimental study on the structural behaviors of H-Shaped steel beam-to-concrete filled steel square tubular column connections. Building For the 21st Century, Y.C. Loo (Editor). Griffith University Gold Coast Campus, Australia, 1995: 41-48.
- [44] Alostaz Y M, Schneider S P. Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1996, 40(2): 95-127.
- [45] Schneider S P, Alostaz Y M. Experimental behavior connections to concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 45(3): 321-352.
- [46] Cheng C T, Hwang P S, Lu L Y, Chung L L. Connection behaviors of steel beam to concrete-filled circular steel tubes[C]. Proceeding of 6<sup>th</sup> ASCCS Conference,

- Los Angeles, USA, 2000: 581-589.
- [47] Chiew S P, Lie S T, Dai C W. Moment resistance of steel i-beam to CFT column connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, 127(10): 1164-1172.
- [48] Nishiyama I, Fujimoto T, Fukumoto T, Yoshioka K. Inelastic force-deformation response of joint shear panels in beam-column moment connections to concrete-filled tubes[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(2): 244-252.
- [49] Cheng C T, Chung L L. Seismic performance of steel beams to concrete-filled steel tubular column connections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(3): 405-426.
- [50] Choi SM, Hong SD, Kim YS. Modeling Analytical Moment-Rotation Curves of Semi-rigid Connections for CFT Square Columns and Steel Beams [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2006, 9(5): 697-706.
- [51] Wang WD, Han LH, Uy B. Experimental Behaviour of Steel Reduced Beam Section to Concrete-Filled Circular Hollow Section Column Connections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(5): 493-504.
- [52] Hibbitt, Karlson & Sorensen Inc. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.5[M]. Providence (RI): Hibbitt, Karlsson, & Sorensen, Inc.; 2005.
- [53] Hillerborg A, Modeer M, Petersson P E. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976.6:773-782.
- [54] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [55] ATC-24. Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures[S]. Redwood City (CA): Applied Technology Council, 1992.
- [56] Schneider S P. Axially loaded concrete-filled steel tubes[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1998, 124(10) :1125-1138.
- [57] Roeder C W, Cameron B, Brown C B. Composite action in concrete filled tubes[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1999, 125(5) :477-484.
- [58] Morishita Y, Tomii M, Yoshimura K. Experimental studies on bond strength in concrete filled circular steel tubular columns subjected to axial loads[J]. *Transactions of Japan Concrete Institute*, 1979a, Vol.1:351-358.
- [59] Morishita Y, Tomii M, Yoshimura K. Experimental studies on bond strength in concrete filled square and octagonal steel tubular columns subjected to axial loads[J]. *Transactions of Japan Concrete Institute*, 1979b, Vol.1:359-366.

- [60] Kish N, Chen W F. Moment-rotation relations of semi-rigid connections with angles[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1990, 116(7): 1813-1834.
- [61] 叶卫平, 方安平, 于本方. Origin7.0 科技绘图及数据分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [62] 聂建国, 秦凯. 方钢管混凝土柱节点抗剪受力性能的研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(4): 8-17.
- [63] 周天华. 方钢管混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [64] 肖从真, 蔡绍怀, 徐春丽. 方钢管混凝土抗剪性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(4): 5-11.
- [65] 钱稼茹, 崔瑶, 方小丹. 钢管混凝土柱受剪承载力实验[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(5): 1-9.
- [66] Sasaki S, Teraoka M, Morita K, Fujiwara T. Structural behavior of concrete-filled square tubular column with partial-penetration weld corner seam to steel H-beam connections[C]. *Proceedings of the 4th Pacific Structural Steel Conference: Volume 2, Structural Connections*. Singapore: Pergamon Press, 1995: 33-40.
- [67] 余勇. 方钢管混凝土结构的性能研究[D]. 上海: 同济大学, 1998.
- [68] Fukumoto T, Morita K. Elasto plastic behavior of steel beam to square concrete filled steel tube (CFT) column connections[C]//*Proceedings of the 6th ASCCS Conference Vol. 1: Composite and Hybrid Structures*. Los Angeles, USA, 2000: 565-572.
- [69] 中华人民共和国国家标准 GB50017-2003. 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.



## 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。在此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。

感谢课题组的文天鹏、陈宇超、郭智峰、靳垚、张鹏鹏、夏秀丽，还有硕士同学温学涛等，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。

本论文得到甘肃省高等学校研究生导师科研项目计划(0703B-05)、甘肃省建设厅科技攻关项目(JK2007-8)和兰州理工大学博士基金(SB04200801)的资助，特此致谢！

秦庚  
2009年5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，王文达．钢管混凝土环板节点设计的关键问题探讨．华中科技大学学报(城市科学版)，2008，25(4)：321-324．

### 参加科研项目：

- [1] 兰州理工大学博士基金(SB04200801)：“常温及火灾后钢管混凝土柱-钢梁框架力学性能研究”，项目参与者；
- [2] 甘肃省高等学校研究生导师科研项目(编号：0703B-05)：“钢管混凝土柱-钢梁框架力学性能研究”，项目参与者；
- [3] 甘肃省建设厅科技攻关项目(编号：JK2007-8)：“甘肃省工程建设标准《钢管混凝土结构技术规程》的编制及关键技术问题研究”，项目参与者；
- [4] 甘肃省工程建设标准．钢管混凝土结构技术规程DB62/T25-3041-2009．兰州：甘肃省建设厅，甘肃省质量技术监督局，2009年4月13日发布，2009年6月1日实施(编制组成员)。