

学校代号 10731

学 号 092081402047

分 类 号 TU398

密 级 公开



## 硕士学位论文

# 钢管混凝土梁柱连接节点 抗剪力学性能研究

学位申请人姓名 谢 娜

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 王文达 教授 史艳莉 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 2012年5月

学校代号： 10731

学 号： 092081402047

密 级： 公开

兰州理工大学硕士学位论文

# 钢管混凝土梁柱连接节点抗剪 力学性能研究

学位申请人姓名： 谢 娜

导师姓名及职称： 王文达 教授 史艳莉 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： 2012 年 5 月

论文答辩日期： 2012 年 6 月 8 日

答辩委员会主席： 吕元光 教授级高工

Research on Shear Behavior of Steel Beam to CFST Column Connections

By

Xie Na

B.E. (Lanzhou University of Technology) 2009

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,2012

# 兰州理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提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

## 学位论文授权使用授权书

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，同意学校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。

本学位论文属于

1、保密 ，在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。

2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
<b>第一章 绪 论</b> .....	<b>1</b>
1.1 钢管混凝土结构在国内外的应用与发展.....	1
1.2 钢管混凝土梁柱节点连接形式及研究现状.....	2
1.2.1 节点的连接形式.....	3
1.2.2 节点的研究现状.....	8
1.3 钢管混凝土节点抗剪力性能的研究现状.....	12
1.4 问题的提出和课题的意义.....	16
1.5 本文的研究内容及研究方法.....	16
<b>第二章 钢管混凝土柱-钢梁节点的有限元分析</b> .....	<b>18</b>
2.1 钢管混凝土节点受剪的理论基础知识.....	18
2.2 节点有限元模型的建立.....	19
2.2.1 材料的本构模型.....	19
2.2.2 单元类型的选择.....	20
2.2.3 边界条件的模拟及单元接触的定义.....	20
2.2.4 加载方式的确定及网格的划分.....	20
2.2.5 方程组的求解.....	20
2.3 典型算例分析.....	21
2.4 节点受剪承载力的有限元分析.....	23
2.4.1 典型试件的建立.....	23
2.4.2 节点的剪力-剪切变形曲线.....	24
2.4.3 节点的应力-应变分布规律.....	26
2.5 小结.....	35
<b>第三章 钢管混凝土柱加强环节点受剪承载力</b> .....	<b>36</b>
3.1 影响节点抗剪的主要因素.....	36
3.2 剪力-剪切变形曲线的参数分析.....	37
3.2.1 柱混凝土强度.....	38
3.2.2 钢梁强度.....	39
3.2.3 柱钢管强度.....	39
3.2.4 节点环板宽度.....	40
3.2.5 柱截面含钢率.....	41
3.2.6 柱轴压比.....	41

3.2.7 梁柱线刚度比 .....	42
3.2.8 核心区高径比 .....	43
3.3 钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点抗剪承载力计算方法 .....	44
3.4 钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点抗剪承载力简化计算 .....	48
3.4.1 节点抗剪承载力简化计算 .....	49
3.4.2 简化计算方法与有限元值比较 .....	52
3.5 小结 .....	54
<b>第四章 钢管混凝土空间中柱节点受剪承载力初探 .....</b>	<b>55</b>
4.1 空间节点有限元模型的建立 .....	55
4.2 不同加载方式下节点受剪承载力分析 .....	56
4.2.1 平面内(外)梁端加载 .....	56
4.2.2 平面内和平面外依次对梁端加载 .....	57
4.2.3 平面内和平面外同时加载 .....	58
4.2.4 几种加载方式受剪承载力的对比分析 .....	59
4.3 受剪承载力影响因素的分析 .....	70
4.3.1 柱混凝土强度 .....	70
4.3.2 钢梁强度 .....	70
4.3.3 柱钢管强度 .....	71
4.3.4 柱轴压比 .....	72
4.4 小结 .....	72
<b>结论与展望 .....</b>	<b>74</b>
<b>参 考 文 献 .....</b>	<b>76</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>81</b>
<b>附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录 .....</b>	<b>82</b>
<b>附录 B 攻读硕士学位期间参加的科研项目 .....</b>	<b>83</b>

## 摘要

钢管混凝土结构由于其优越的力学性能，被广泛的运用于实际工程之中，随之相关的研究也越来越多。节点是钢管混凝土结构中的一个重要的组成部分，因而节点的设计对于钢管混凝土结构的推广和运用有着关键性的作用。

本文运用 ABAQUS 有限元软件，对钢管混凝土柱-钢梁节点进行了抗剪力学性能的研究。主要进行了以下几个方面的工作：

(1) 在阅读文献的基础上，根据规范所规定的节点设计的一般原则，建立了钢管混凝土柱-钢梁节点的有限元模型，这几种节点形式构造简单，传力明确，相较于其它加强环形式应力集中有明显减少。

(2) 通过大量的典型节点算例分析，验证了本文模型的合理性。并在此基础上，进行了钢管混凝土柱-钢梁节点模型在单调加载下的全过程分析，依据所得到的有限元模型计算结果，分析节点的微观应力-应变关系和宏观破坏形态，以此来明晰节点的受剪机理。

(3) 对影响节点的剪力-剪切变形曲线的主要因素进行参数分析，通过所得的分析结果，提出节点的抗剪承载力公式，并将计算结果与有限元计算结果进行比较，验证公式的合理性，从而给实际工程提供一定的设计依据。

(4) 根据前述建立平面钢管混凝土梁柱节点的理论，设计了空间式钢管混凝土梁柱节点，并对空间节点进行了不同加载情况下的受剪分析。在此基础上对空间节点做了简单的参数分析，从而达到对空间节点研究的初探。

**关键词：**钢管混凝土柱；钢梁；节点；外环板；内隔板；抗剪承载力

## Abstract

Recently, concrete filled steel tube structure have been widely applied to practical project because of the superior mechanical property and more and more researches were proceeding by the following. Connections are important components for the CFST structure. Therefore, the design of connections is the key point for the popularizing and using of CFST structure. This paper researched the shear mechanical property of CFST column-steel beam joints. The main works were shown as follows:

(1) On the basis of reading references, the finite element models of CFST column-steel beam joints were set up by the rules of the design of connections in the standard. There are some advantages of these styles of connections: simple in construction, explicit in force transmission, fewer stress concentration than other connections with stiffening ring.

(2) The models were proved to be reasonable through many typical calculations. On that basis, the overall processes of CFST column-steel beam joints at monotonous loading were analyzed. With the results of research, shear capacity was fixed by studying strain-stress relation in microcosmic view and the fracture morphology in macroscopic view.

(3) The main parameters influence on shearing force-shearing deformation relation were analyzed. Based on the result of simulation analysis, the shear capacity formulas were proposed. Also the formulas were verified by comparing the finite element calculation with t formulas calculation, the consequence proved to be reasonable. Thus, the research can provide some design advice for the practical project.

(4) Based on the theory of modeling CFST column-steel beam joints in a plane, the space joints were designed and the shear capacity was also analyzed under different loadcarrying condition. Preliminary study on shear capacity of space joints was carried out with some simple parameter analysis

**Key words:** CFST column; steel beam; connections; outer stiffening ring; internal diaphragms; shear resisting



# 第一章 绪论

## 1.1 钢管混凝土结构在国内外的应用与发展

钢管混凝土是在钢管内填充混凝土而形成的组合结构材料，一般用作受压构件，包括轴心受压和偏心受压（聂建国，2005<sup>[1]</sup>）。它是在劲性钢筋混凝土结构及螺旋配筋混凝土的基础上发展起来的。目前工程中最常见的钢管混凝土柱横截面形式主要是圆形、方形和矩形。

钢管混凝土与一般套箍混凝土一样，具有强度高、重量轻、塑性好、耐疲劳、耐冲击等优点，除此之外，钢管混凝土还有一些独特的优点：良好的耐火性能；施工方便；经济效果好（蔡绍怀，2007<sup>[2]</sup>）。

最早采用钢管混凝土工程之一是英国的赛文铁路桥桥墩。至今，钢管混凝土结构在土木工程中的应用已有 100 多年的历史。早在 20 世纪 60 年代以前，国外很多国家就对钢管混凝土的基本力学性能进行了实验研究，并成功地推导出了钢管混凝土轴压短柱极限承载力的理论计算公式。在 20 世纪 60 年代后期，苏联、西欧、北美及日本等工业发达的国家开始把钢管混凝土结构技术作为一个重点来研究，对其轴压和偏压柱的实验和理论进行了一定的研究分析，取得很大的研究成果，并把其中一些成果成功地应用于多层建筑、单层厂房及拱桥等工程中。20 世纪 80 年代后期，随着高强混凝土出现和泵送工艺的发展，钢管高强混凝土结构得到了更多的推广应用，从而对其研究也越来越多，这些研究在高层、超高层建筑中得到广泛的应用。由于钢管混凝土结构的各种优点，使其在国外的工程界和研究机构中得到普遍的重视。如图 1.1 是运用最广泛的钢管混凝土加强环式节点框架的建筑工程（图片来自于中华钢结构论坛），图 1.2 是广州丫髻沙大桥，该桥是当时世界跨度最长的桥。



图 1.1 外加强环式节点框架



图 1.2 钢管混凝土在拱桥中的运用

我国从 1959 年开始研究钢管混凝土的基本性能。迄今为止,我国对钢管混凝土结构的研究和应用已有 40 多年的历史。从 1963 年开始,我国的研究人员开始对钢管混凝土的节点构造、基本构件的工作性能、设计方法及施工技术等方面问题开展比较系统的研究。在 20 世纪 60 年代,钢管混凝土柱运用到了地铁和厂房等工程当中,如 1963 年北京地铁车站工程中就使用了钢管混凝土柱。20 世纪 70 年代,随着钢管混凝土结构技术在单层厂房和重型构架中的应用,我国对钢管混凝土结构基本性能的实验研究也随之展开。从 20 世纪 80 年代后的 10 年里,我国成功地建立了一套适用于钢管混凝土结构的设计方法和计算理论,在此基础上研究了钢管高强混凝土结构的基本力学性能。在以后的 10 多年里,国家经济迅猛发展,钢管混凝土结构的研究与应用的到了进一步的重视,在此期间主要研究了钢管混凝土结构的组合材料本构模型,钢管混凝土的轴压(拉)、抗弯、抗剪、压弯、压扭、局部承压等力学性能,钢管高强混凝土柱的力学性能,火灾下和高温后钢管混凝土结构的力学性能等,并很快应用大跨度桥梁和高层建筑中。

综上所述,钢管混凝土结构由于其一般的优点及其自身特殊的优点,它已经运用于各个建筑领域,但部分理论研究还没有趋于成熟。近些年国内外的研究人员对钢管混凝土结构以下几个方面的性能进行了更深入的研究:(1)薄壁钢管混凝土构件力学性能研究;(2)节点性能研究;(3)结构体系的动力性能;(4)高性能的钢管混凝土力学性能研究;(5)钢管混凝土结构的耐火性能研究以及连续性倒塌的研究等。在钢管混凝土节点抗剪的问题中也取得了很大的成绩,但提出的抗剪公式也有一定的局限性,本文进一步来探讨节点的抗剪性能,从而为实际工程提供一定的参考依据。

## 1.2 钢管混凝土梁柱节点连接形式及研究现状

本文研究的内容是钢管混凝土的节点抗剪性能,为了满足梁柱节点抗震设计的“强柱弱梁,强剪弱弯,强节点”的基本原则,在这里有必要概括一下节点的类型。

在钢管混凝土结构中,根据传力机理和受力性能,可将节点划分为三类:刚接节点、半刚性节点、铰接节点。对于刚接节点,其定义是:在受力过程中梁和钢管混凝土柱轴线的夹角保持不变。我们常见的刚接节点主要有:加强环式、锚定式、钢筋贯通式、劲性环梁式、十字板式等。对于铰接节点,它的传力机理是:梁只传递支座反力给钢管混凝土柱。这种节点主要用于钢管柱和梁形成的排架结构中,并有两种类型,一类为铰接简支,一类为铰接连续梁。连续梁的梁柱铰接节点形式有两种:连接双梁式节点及梁端局部加宽式节点。对于半刚性节点的定义是:在受力过程中梁和钢管混凝土柱的轴线夹角发生改变,即二者之间有相对角位移,从而可能引起内力重分布(韩林海和杨有福,2007<sup>[3]</sup>)。半刚接节点主要有抗剪环梁式节点。

在钢管混凝土框架中,梁柱节点按梁材料的不同又可分为三类:钢管混凝土柱-钢梁节点、钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点、钢管混凝土柱-混凝土梁节点。以下对前两种节点的不同类型进行归纳分析。

## 1.2.1 节点的连接形式

### (1) 钢管混凝土柱-钢梁节点

当钢管混凝土柱支承钢结构楼盖时，节点属于钢与钢的连接，构造上比较简单（容柏生，2002<sup>[4]</sup>），由于其多种优点，钢管混凝土柱-钢梁节点在多、高层建筑中得到广泛应用。钟善桐（1999<sup>[5]</sup>；2003<sup>[6]</sup>）已对此类节点进行了较为全面系统的论述。以下是归纳的几种常见的钢管混凝土柱-钢梁节点。

(a) 外加强环式节点。外加强环与内加强环统称为加强环式刚接节点，这类节点是研究最为成熟、应用较多的一种节点型式。外加强环的做法是在钢管混凝土柱与梁上下翼缘交接处设置上下加强环，加强环板的一段钢梁的翼缘、腹板用对接焊接与钢梁相连，采用搭接或加前后两块盖板的连接方式时用高强螺栓连接节点部分的腹板与钢梁。加强环与梁连接后传递弯矩，设置在上下加强环之间的加劲肋板用以传递剪力。这种连接方式的优点是：刚度大、承载力高、传力可靠、没有任何零部件穿过钢管、适用于小直径的钢管混凝土柱、简化了现场安装、减少了现场焊接、在合理的设计下有良好的抗震性能。其缺点是：当柱径较大时，节点用钢量大，加工复杂，焊缝要求高。

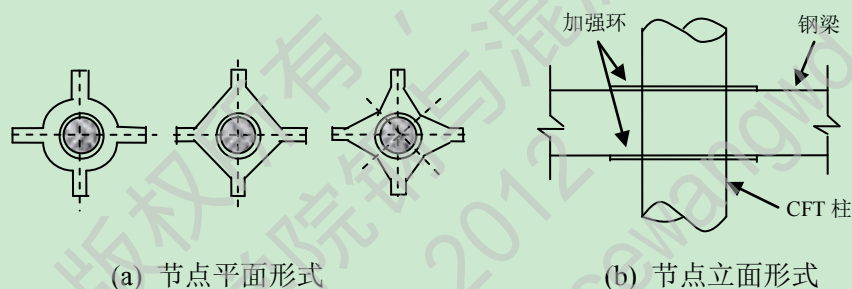


图 1.1 外加强环式节点

(b) 内加强环式节点。内加强环式节点的工作原理是：钢梁直接焊接在管柱外边，内隔板与梁的翼缘在同一水平面，利用内环板传递弯矩。这类节点多用于管径较大时，因为管径较小会使焊接困难，妨碍管内混凝土的浇灌。这类节点的优点是：节约钢材、抗震性能良好、占用空间少。

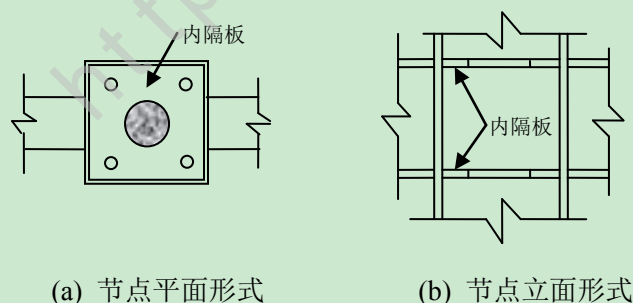


图 1.2 内隔板式节点

(c) 锚定式节点。其工作机理是：在管内焊一 T 形锚板，其与钢梁的上下翼缘在同一平面，将 T 形锚板埋于混凝土中，承受梁翼缘传来的拉力。与加强环式节点相比较，

这类节点的优点是：构造简单、节约钢材、可用于节点内力较小的情况。其缺点是：刚度较小，管内焊接困难。

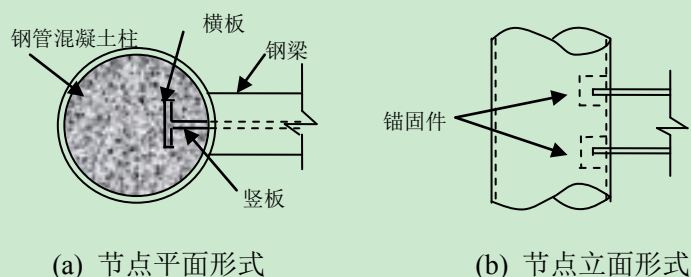


图 1.3 锚定式节点

(d) 十字板式节点。其工作原理是：在管内加设十字加劲板，以承担梁端传来的剪力。这种节点的优点是：刚度大。其缺点是：耗钢量大，且管内施工不方便，还会存在由于钢管壁的局部破坏而降低整体承载力的危险。

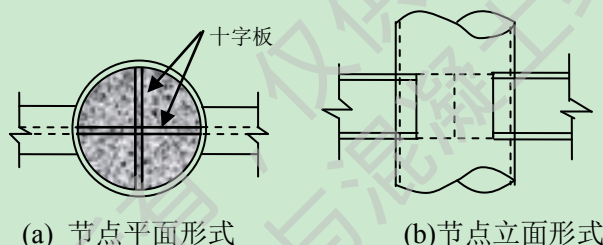


图 1.4 十字板式节点

(e) T形外加劲板式节点。这类节点的构造是：在钢梁上下翼缘与钢管交接处焊上 T形板。由于 T形加劲构件的存在，这种节点具有很好的延性以及良好的耗能能力。

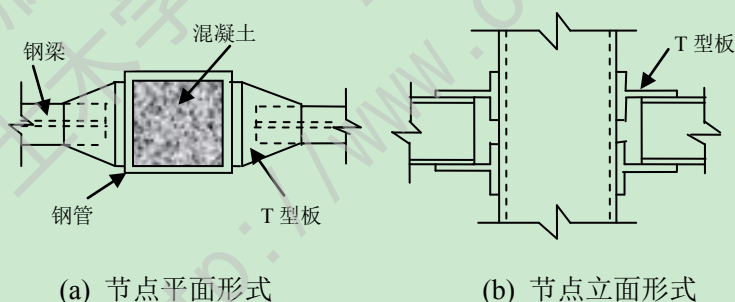


图 1.5 T形外加劲板式节点

(f) 穿心式节点。其工作原理是：梁翼缘直接焊接在钢管上，腹板直接穿入管壁，且保持腹板的连续。剪力的传递主要由穿心的腹板传递给核心混凝土，小部分从腹板到管壁到核心混凝土。这类节点的优点是：传力明确、钢管上附加应力小、刚度较大。其缺点是：用钢量大，浇筑管内混凝土不方便，制作也有一定的困难。但当钢管直径较大(800mm 以上)时，浇筑混凝土的问题，十字交叉的问题，都比较容易解决。



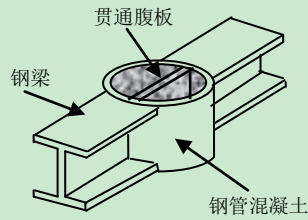


图 1.6 穿心式节点

(g) 承重销式节点。这类节点与穿心节点的构造相似：钢梁直接焊接在管壁上，设置承重销贯穿于管内，其仅用于传递梁端剪力。优点是：传力途径明确、现场焊接量小。缺点是：有穿心构件，当柱径较小时，浇注混凝土受影响。

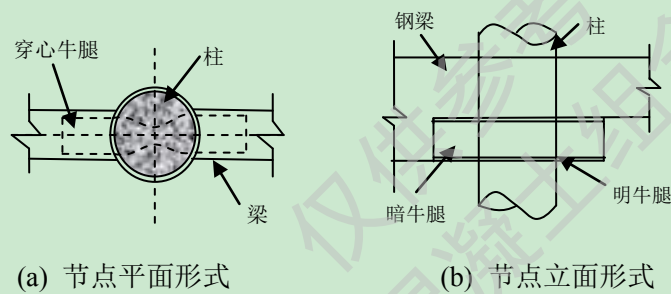


图 1.7 承重销式节点

## (2) 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点

钢管混凝土柱支承钢筋混凝土楼盖时，由于它支承的梁既有混凝土也有钢筋，构造上比较复杂，而且可能的形式亦较多。在工程实践中，不少设计单位和研究单位都提出了各种不同形式的连接形式，而且大多数都进行了理论和实验研究，不少已用于实际工程。以下归纳了几种常见的钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点。

(a) 外加强环式节点。在相应于钢筋混凝土梁上下翼缘位置的 CFST 柱上设置上下外加强环，并在上下环板间焊一竖板传递梁端剪力，外加强环与梁相连后传递弯矩。预制钢筋混凝土梁在梁端处开槽，并在槽内预埋钢板，安装时与在钢管混凝土柱上的竖向钢板相焊。这种节点型式的优点是传力明确、可靠，在满足“强柱弱梁”的条件下设计好加强环，同时注意焊接质量，使塑性较出现在梁端的情况下有良好的抗震性能。其缺点是对预制梁的安装就位要求高，用钢量较大，现场焊接量较大。

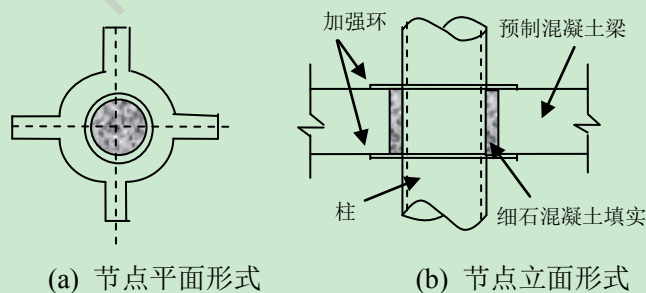


图 1.8 外加强环式节点

(b) 钢筋贯通式节点。这种节点工作原理是：在钢管壁上开孔，使楼盖梁纵筋贯穿

钢管柱，以达到传递弯矩的目的，通过在钢管壁开孔处设加劲肋来弥补孔洞对钢管的削弱。其优点是：构造简单、刚度大、安全可靠。缺点是：由于管内有贯穿的梁钢筋，因此将影响管内混凝土的浇灌；节点的工艺性较差，限制了它在小直径钢管混凝土柱上的应用。

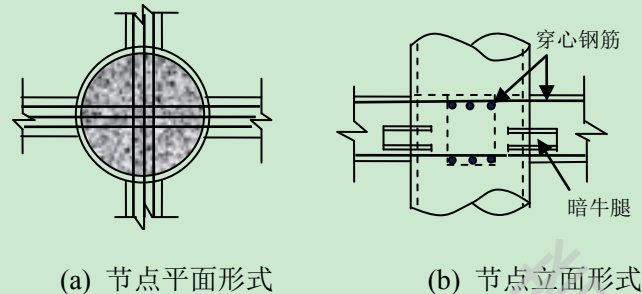


图 1.9 钢筋贯通式节点

(c) 钢筋混凝土环梁节点。其做法是：绕钢管设置一钢筋混凝土环梁用于传递弯矩，在环梁中部或底部钢管外表面贴焊一环形钢筋，用于传递剪力。其优点是：传力可靠、施工简便、焊接量少、有利于梁与柱的任意角度的连接、易达到“强柱弱梁”的要求。缺点是：梁端剪力经抗剪环筋及其贴焊焊缝传给管壁，再通过管壁传给核心混凝土，当环梁出现严重裂缝或局部破坏时，抗剪环筋的抗剪承载能力将急速下降。

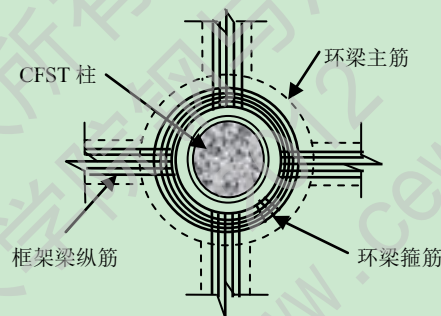


图 1.10 钢筋混凝土环梁节点

(d) 穿心暗牛腿节点。节点的暗牛腿为“工”字型钢牛腿，钢管混凝土的腹板穿过钢管混凝土柱。这种节点的优点是：受力安全可靠。其缺点是：耗钢量大，且施工较困难，一般都将梁的纵筋与暗牛腿焊接以保证弯矩的可靠传递，但这样必然造成节点的现场焊接量大，施工质量很难保证。

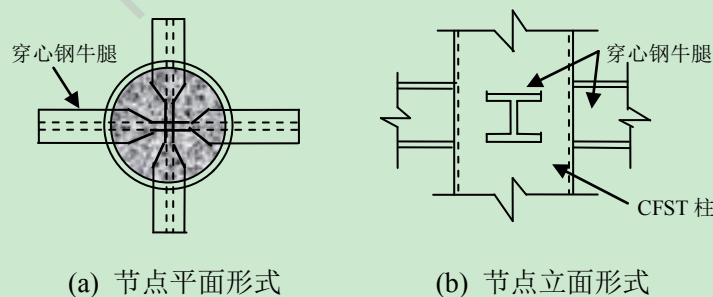


图 1.11 穿心暗牛腿节点

(e) 混合型节点。这种节点有多种型式：穿心暗牛腿环梁节点、半穿心牛腿环梁节

点、加强环-牛腿节点等。穿心暗牛腿环梁节点是由加强环与暗牛腿组成的节点，它的优点是：传力路径明确，节点的刚度大，承载力高。其缺点是：由于穿心牛腿的存在使得管内焊接以及混凝土的浇筑比较困难。半穿心牛腿环梁节点受力不如穿心节点理想，但能满足工程要求。加强环-牛腿节点是加强环与一环形牛腿组成的节点。

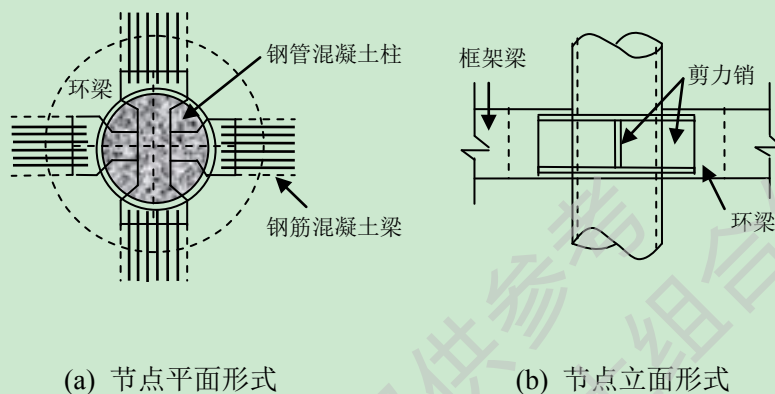


图 1.12 穿心暗牛腿环梁节点

(f) 带环板的穿心暗牛腿节点。研究表明带环梁的穿心暗牛腿式节点是一种传力可靠的节点，但其缺点是在板柱交接处过早地产生裂缝。带环板的穿心暗牛腿节点改进了穿心暗牛腿式环梁节点，在牛腿的上翼缘焊接一环形钢板，用于承受焊接在上面的楼板放射筋传来的拉力。其最大优点是：梁柱节点处不需要设加强环，既满足了建筑美观的要求，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。

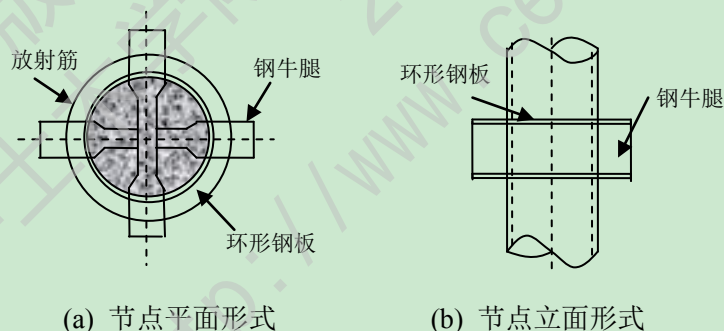


图 1.13 带环板的穿心暗牛腿节点

(g) 劲性环梁式节点。这种节点工作原理是：在原节点区中，把抗剪牛腿提高、加长，并将牛腿加高到钢筋混凝土梁纵筋以下，从而形成抗弯能力较强的抗弯剪牛腿，在浇注混凝土后节点周边形成一个用来承受和传递梁端的弯矩和剪力的刚性节点区。这种节点优点是：刚度大、承载力高、钢管柱参与梁柱弯矩分配的能力强。缺点是：环梁钢筋较密，影响节点区混凝土的浇注。

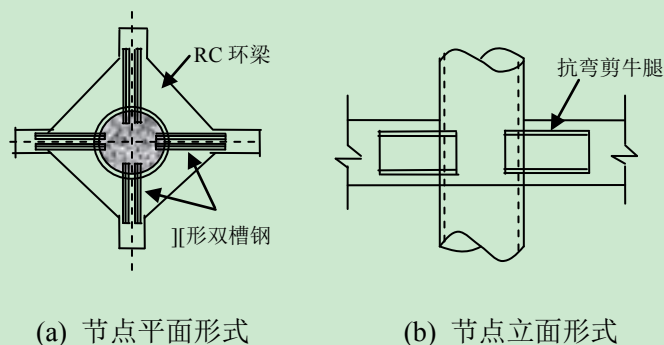


图 1.14 劲性环梁式节点

(h) 钢筋环绕式节点这种类型的节点包括双梁节点和变宽度单梁节点。工作机理是利用连续钢筋来传递弯矩，剪力依靠明暗牛腿来传递。其优点是：构造简单、施工方便、节约钢材、对管柱本身影响小。缺点是：对楼盖梁系布置的影响较大，且节点刚度较弱。

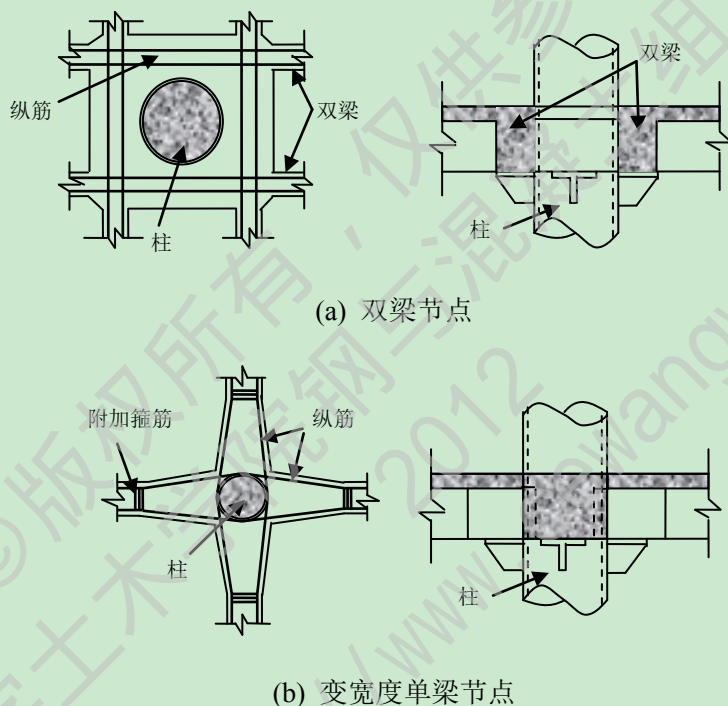


图 1.15 钢筋环绕式节点

## 1.2.2 节点的研究现状

由于钢管混凝土结构的优点，早在 20 世纪 20 年代就开始受到国内外学者的重视并得到广泛的运用。从钢管混凝土结构的出现至今，这种结构的理论研究和工程实践得到了大幅度的提高。对于钢管混凝土的节点的研究也趋于完善化，基于不同的节点形式，国内外许多研究人员进行了大量的研究分析，下面列出了近些年研究钢管混凝土节点的一些相关文献。

苏恒强等(2004)<sup>[7]</sup>进行了 2 个钢管混凝土外加强环式梁柱节点的力学性能的研究，分析了梁、管壁及加强环的应力分布规律。试件采用钢梁，并选取了构造不同的环间加劲肋。分析结果证明钢管混凝土加强环式节点的力学性能良好，刚度大，且环间加劲肋



的构造形式对节点的受力性能影响微小。

陈鹃等(2004)<sup>[8]</sup>利用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。首先制作了6个节点模型来进行试验,在实验的基础上,分析不同钢梁尺寸下的节点受力变形性能和半刚性特性。然后通过试验结果与有限元模型比较,验证了该文有限元模型的合理性。

梅力彪等(2004)<sup>[9]</sup>利用ANSYS有限元分析软件,对穿心暗牛腿钢管混凝土柱与现浇钢筋混凝土梁的单梁节点进行了空间非线性有限元分析,研究了垂直对称荷载作用下节点内的应力分布情况及内力传递机理,并与试验结果进行了比较,结果表明:建立的有限元模型能够较准确地揭示结构的实际受力特点。并且根据结果,给出了节点构造的改进意见。

Shin等(2004)<sup>[10]</sup>运用有限元软件ABAQUS对带T型加劲肋的方钢管混凝土柱-H型钢梁节点进行了有限元分析。该文对节点进行了低周反复荷载下的全过程分析,其中钢材的材性采用了双折线模型。然后通过有限元分析结果得出了节点的滞回性能。

闫月梅和杜晓巍(2005)<sup>[11]</sup>对加强环式节点的加强环板应力应变分布规律及其主要的影响因素进行了有限元分析。根据加强环的应力应变分布情况可知受拉加强环板在转角处存在着应力集中,通过化角措施可以有效降低应力集中的影响。受拉加强环的受力状况与偏心受拉的环形梁的受力状况相似,且环板厚度和宽度是影响节点承载力的主要因素。在外力作用下钢管壁可以有效地参与环板受力,但是参与工作范围有限。

李成玉和郭耀杰(2005)<sup>[12]</sup>在曲梁的有关理论和有限元分析的基础上,得出了同心圆环式节点的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-环结合的转角处,双向受拉环板的应力最大区则不仅出现在梁-环结合的转角处,并且还出现在45°的内侧区域。

刘飞鹏(2005)<sup>[13]</sup>提出了适用于中小尺寸方形钢管混凝土柱与钢梁的T型钢锚定式节点的型式,包括T型锚固件腹板竖放和腹板横放两种型式。节点锚固件可以传递框架梁端弯矩向,该文建立了考虑大变形的几何非线性和材料非线性的锚固件拔出的有限元理论分析模型,并对其传力机制进行了分析,得到了其破坏的模式。最后,在前面分析的基础上提出T型钢锚固件抗拔承载力设计公式和构造建议。

王来等(2005)<sup>[14]</sup>建立了方钢管混凝土框架模型,节点采用内隔板式节点。该文采用拟静力的试验方法,加载方式为在框架上施加低周反复水平荷载,得出了该框架的内隔板节点的P- $\Delta$ 曲线、节点延性、节点破坏机制和破坏特点等抗震性能。

金刚等(2005)<sup>[15]</sup>通过低周反复荷载试验进行了方钢管混凝土结构内隔板式节点的抗震性能的研究。结果表明:与钢梁相交的方形节点结构有承载能力大、滞回特性稳定、延性大和吸收能量多等优点。试验结果和根据现有规范计算得到的结果具有较好的一致性。

袁继雄等(2005)<sup>[16]</sup>对钢梁-钢管混凝土柱穿心节点的力学性能进行了分析研究。首先

对节点模型进行了静力试验，量测了节点区变形、梁端挠度、 $M-\theta$ 曲线等。然后运用有限元分析方法，并利用试验结果对模型的适用性进行了评价；最后通过有限元模型分析了各种因素对节点的影响，提出其构造的改进意见。

韩小雷等(2005)<sup>[17]</sup>提出了一种带环板的穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点，其最大优点是梁柱节点处不需要设加强环，满足了建筑美观的要求，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，最后提出该节点的设计方法。

李成玉和郭耀杰(2006)<sup>[18]</sup>对12个足尺的空间钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点进行了静力试验。首先根据“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。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。

王文达等(2006)<sup>[19]</sup>对在恒定轴力和水平往复荷载作用下的8个方形外加强环式节点试件进行了滞回性能的实验研究，探讨了柱轴压比和环板宽度对钢管混凝土梁柱节点力学性能的影响。其结果表明：随着柱轴压比提高，节点水平极限承载力下降，随之节点的位移延性和耗能能力也相应降低。且宽度不同的环板节点的滞回曲线均为饱满的梭形，强度和刚度退化不明显。

Choi 等(2006b)<sup>[20]</sup>研究了方钢管混凝土柱-钢梁边柱节点的抗震性能，一共进行了4个节点的实验研究，加载方式为：在柱上加恒定的轴向力，在梁自由端加往复荷载。研究表明：该节点可以减小梁柱相交处的应力集中，提高节点的极限承载力和初始刚度，并且其变形能力相较于内加强环式节点和穿心钢板节点。带圆套筒的更好组合十字板节点的耗能性能和初始刚度则更好。

曲慧等(2006)<sup>[21]</sup>对在低周往复荷载作用下的8个钢管混凝土(CFST)柱-钢筋混凝土(RC)梁钢筋环绕式节点进行了试验研究，分析了其在不同轴压比下的开裂破坏模态、剪切变形、钢筋和钢牛腿变形、滞回特征、延性和耗能性能等。结果表明：节点的破坏模态均为核心区剪切破坏，且圆形节点的滞回曲线较方形节点的滞回曲线饱满，但两者均能满足现行规范的抗震设计要求。

王先铁等(2007)<sup>[22]</sup>对6个在低周反复加载下的锚定式方钢管混凝土柱-H形钢梁节点进行了试验研究，分析不同轴压比情况下节点的耗能性能、强度及刚度退化、破坏模式等。结果表明：破坏前节点具有良好的滞回性能、延性及耗能能力，满足现行抗震规范要求。锚定式方钢管混凝土梁柱节点可以用于拉力较小的节点。该文中提出了有关的设计建议。

聂建国和秦凯(2008)<sup>[23]</sup>对钢管混凝土内隔板式节点进行了低周反复加载试验，其中主要对弯矩-层间转角变形骨架曲线在做了较深入的研究和分析，并提出了该骨架曲线的三折线模型。模型将层间转角变形分解为：梁变形、柱变形和节点变形三个部分来计算。模型结果和实验结果相比较，曲线吻合良好。

方小丹等(2008)<sup>[24]</sup>在实验的基础上,归纳了环梁节点的破坏形态,并提出了基于试件破坏面极限平衡的环梁节点承载力设计方法。该文对在框架梁端弯矩作用下的环梁的应力分布进行了分析,且比较了有无楼板对环梁应力的影响。并在此基础上,提出了节点环梁实用的承载力计算公式。其与试验数据吻合良好,可用于工程设计。

季静等(2008)<sup>[25]</sup>介绍了一种仅带环筋的穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点型式,该类节点能很好地满足建筑及装饰设计要求。在实验的基础上,该文验证了板放射筋和环筋具有较理想的裂缝控制能力以及在往复荷载作用下螺纹套筒连接主筋的工作性能满足抗震设计要求。最后应用有限元软件对试件进行非线性模拟,进一步分析了此节点的受力机理。

江俊毅等(2008)<sup>[26]</sup>运用有限元对钢管混凝土柱劲性环梁节点进行了三维有限元分析,明确了环梁节点的传力机理和内力分配,并验证了节点受力性能的可靠性,得出对实际工程有一定价值的结论,给以后的设计一定的参考。

王砾瑶等(2009)<sup>[27]</sup>选取了6层10.8m柱网的钢管混凝土框架结构中的隔板贯通式节点,对该节点进行了单调加载和低周反复加载下的受力分析,并探讨了细部构造对抗震性能的影响。有限元模拟结果表明:隔板受力良好,不发生破坏,破坏发生在梁端,这满足了“强柱弱梁”的要求;滞回曲线饱满,耗能性能良好;轴压比和混凝土强度对节点受力影响较大。

王清湘等(2009)<sup>[28]</sup>对新型穿心钢筋暗牛腿圆钢管混凝土梁柱节点的动力性能进行了研究。首先对这种新提出来的节点进行了低周反复荷载下的实验研究,然后运用有限元软件ANSYS建立节点的有限元模型,通过对比实验结果和有限元计算结果得出两者的曲线吻合良好。并且实验表明该种钢管混凝土节点有承载力高、抗震性好的优点。

许凤美等(2009)<sup>[29]</sup>对外加强环式圆钢管混凝土柱-钢梁框架节点进行了有限元分析。该文在选择合理的材料本构关系和破坏准则的基础上建立了节点的三维模型,并分析了柱梁抗弯强度比和混凝土对节点受力性能的影响。

Nie等(2009)<sup>[30]</sup>对方钢管混凝土梁柱节点的抗弯承载力进行了分析。首先建立了节点的有限元模型,并考虑了柱轴压、内隔板、钢筋混凝土楼板对节点抗弯的贡献,在此基础上探讨了翼缘等宽情况下和冲剪破坏机制下的节点抗弯承载力。最后依据有限元结果提出了不同情况下的抗弯承载力公式。

李成玉等(2010)<sup>[31]</sup>对在低周反复加载下的加强环式节点进行了模拟分析,结果表明,在加载初期环板就出现贯穿的塑性带,节点滞回曲线主要是柱壁变形而不是梁端塑性变形提供。基于此缺点,对钢梁翼缘进行削弱处理,通过模拟分析发现,节点受力情况得到一定的改善。因此对节点进行削弱钢梁翼缘处理可以而到达“强节点”的要求。

杨芳等(2010)<sup>[32]</sup>进行了钢管混凝土柱-环梁中节点在静载荷低周反复荷载作用下的设计方法的研究,并用实验数据验证了其可靠性。结果表明:钢管混凝土柱-环梁节点结构体系在震区有较强的可行性。



杨群和刘小兵(2010)<sup>[33]</sup>对空间钢管混凝土节点与空钢管节点进行了应力集中分析。基于近些年钢管混凝土结构在拱桥当中的运用,节点的设计变成一个重要的研究课题。该文对直接焊接的几个主支管交汇而成的三维空间结构进行了有限元分析,文章通过有限元软件ANSYS选取三种典型管节点形式进行研究,分析了主支管管径比和夹角两个参数对节点应力集中的影响。

尧国皇等(2010)<sup>[34]</sup>提出了一种新型的钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点,这种节点在钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁交界处,把钢管局部开矩形孔,节点域钢管加强,让梁内的纵向钢筋深入到节点内,同时把节点内混凝土和梁内混凝土浇筑成整体。该文对这种节点进行了有限元分析,结果证明该节点可以实现“强节点弱构件”的抗震设计要求。

Park等(2010)<sup>[35]</sup>对3个带楼板的方钢管混凝土柱-钢梁端节点进行了实验分析,节点的形式为螺栓贯通式节点。通过实验加载后的分析,结果表明2个改进的螺栓贯通式节点比另外1个普通螺栓贯通式节点刚度大,且相对于现有的其它一些节点表现出更好的延性,有利于抗震设防。

李严鹏和徐建超(2011)<sup>[36]</sup>基于有限元软件ANSYS对钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点进行了分析。首先选取了两种节点类型,然后进行有限元分析,依据分析结果得出了节点的承载能力和应力的分布规律,并提出了节点的梁转角滞回曲线,为以后实际工程提供一定的参考依据。

王文达等(2011)<sup>[37]</sup>运用有限元软件ABAQUS对钢管混凝土柱-钢梁环板节点的抗弯承载力进行了分析。首先对模型进行了试验验证,结果证明有限元得到的结果和实验结果吻合良好。在此基础上对模型进行了一系列的参数分析,并通过这些参数分析的结果回归出了抗弯承载力公式,计算结果证明其与有限元计算结果基本吻合。

丁永君等(2012)<sup>[38]</sup>对矩形钢管混凝土柱-H型钢梁节点进行了抗震性能的实验研究和有限元分析。实验研究是以天津泰达广场为背景,选取了6个足尺节点进行拟静力实验,分析了节点延性、耗能能力强度退化等性能。有限元分析是运用ANSYS10.0对节点进行了循环荷载下的非线性模拟分析。最后将理论结果和有限元分析结果进行了对比分析,结果证明曲线吻合良好。

### 1.3 钢管混凝土节点抗剪力学性能的研究现状

节点是钢管混凝土框架中一个重要的组成部分,它是连接各种构件的关键部位,其对于结构的整体性和稳定性起着非常重要的作用。又由于其形式的多样以及受力的不同,使得节点的研究更为复杂。本文研究的是节点的受剪力学性能,近些年,许多研究人员对节点的受剪力学性能进行了一定的研究,本文将在阅读文献的基础上,对钢管混凝土节点受剪力学性能进行进一步的分析研究。下面列出了一些相关的文献。

Fukumoto和Sawamoto(1997)<sup>[39]</sup>对带内隔板及外垂直加劲肋的方钢管混凝土柱-钢梁节点的力学性能进行了实验研究,环板上有八边形的浇筑孔以及对称轴与水平轴成 $45^\circ$

的方形浇筑孔，方钢管由2块厚钢板和2块薄钢板间隔焊接组成。研究表明：混凝土强度、钢材强度、钢管宽厚比对此类节点的变形能力影响较小，其抗剪承载力可以用基于拱理论的叠加法确定。

Fujimoto等(2000)<sup>[40]</sup>研究了带有穿心隔板及节点柱身有加劲肋的钢管混凝土梁柱节点。主要考察的参数有：节点构造、材料强度、几何尺寸、轴压比及荷载的作用等。分析结果表明：大部分节点的实验结果与理论计算结果和日本设计规程AIJ-SRC(1987)的计算结果吻合良好，而节点的腹板抗剪承载力则均大于日本规程中计算的极限承载力。

Koester等(2000)<sup>[41]</sup>对在反复荷载作用下的钢管混凝土柱-穿心螺栓T形分离板焊接式节点进行了力学性能的实验研究。该文主要考察了节点核心区约束混凝土传递剪力的能力，初步研究表明：其提出的节点抗剪承载力公式的计算结果与实验结果吻合较好。

Chiew等(2001)<sup>[42]</sup>对8个钢管混凝土梁柱节点进行了实验研究，并考察了几何尺寸、细部构造等对节点力学性能的影响。研究表明：采用外加强环板和钢筋贯通的构造措施可以把大部分的剪力直接传递给核心混凝土，并且可以避免钢管由于受剪过大而过早的发生局部屈曲。

张大旭(2000)<sup>[43]</sup>进行了钢管混凝土梁柱节点动力性能理论与试验研究，首先推导了节点核心区的抗剪承载力简化计算公式，然后进行了在低周反复荷载作用下节点动力性能的试验研究。并在实验试验的基础上，提出了节点核心区剪力-剪切角恢复力关系模型，应用数值计算方法得到了钢管混凝土梁柱节点梁端的荷载-变形关系曲线。

张大旭和张素梅(2001)<sup>[44]</sup>研究了钢管混凝土柱与梁节点的抗剪承载力，把钢管混凝土抗剪承载力分成钢管和混凝土两部分考虑，通过引入破坏面的概念，运用力学方法推导了在压弯情况下的钢管混凝土梁柱节点核心区斜截面的抗剪承载力计算公式，并将公式加以简化。

季静等(2001)<sup>[45]</sup>进行了7个缩小比例的钢管混凝土梁柱节点的模型试验，通过变化板、环梁、穿心牛腿等参数，研究它们对节点抗剪、抗弯及轴压承载力的影响。并在实验的基础上，对节点型式的改进和优化进行了分析讨论。

Nishiyama等(2002<sup>[46]</sup>; 2004<sup>[47]</sup>)考察了主要参数对钢管混凝土梁柱节点力学性能的影响，这些参数包括：荷载作用方向、节点类型、钢管截面形状(圆形和矩形)、钢材强度、混凝土强度、轴压比等。由于该文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>[48]</sup>建议对钢管混凝土梁柱节点的剪力传递性能用非线性受力变形来分析，并且在该模型中考虑了轴力对受剪性能的影响。为了验证建议的正确性，该文设计了5个十字型的钢管混凝土梁柱连接节点试件进行试验分析，试验结果表明：所有的试件在还没有进入非线性时就已经发生焊接破坏；轴力越大，结构的延性就越好。通过实验结果与理论结果比较得出：对于轴力大的实验，剪力在合理的范围内，

而对于小轴力的实验则偏于保守。

张重阳(2004)<sup>[49]</sup>针对节点设计方法中的钢管混凝土梁柱节点受剪承载力计算方法进行了研究,分析了钢管混凝土梁柱节点的受力状态,探讨了穿心节点和非穿心节点的抗剪机理及破坏形式,提出了高层钢管混凝土结构梁柱节点的受剪承载力计算方法,并将计算结果和实验进行比较,验证了公式的合理性。

Fukumoto和Morita(2005)<sup>[50]</sup>研究了由高强度材料制作的钢管混凝土柱-钢梁节点的抗震性,对8个试件进行了实验研究,主要的实验参数有:柱截面形式、弱部件类型、钢材强度、混凝土强度、钢管宽厚比。最后提出了一种基于叠加原理的节点区剪力-剪切变形模型和节点区的抗剪承载力计算方法。

周天华等(2005)<sup>[51]</sup>研究了用于高层建筑的带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点的受力和变形特征。该文给出了不同抗震设防要求时方钢管混凝土柱-钢梁节点的梁柱连接的受弯、受剪计算公式及建议;其次建立了钢“框架-剪力墙”和混凝土“斜压短柱”的受力模型及其屈服机制,提出了节点核心区受剪承载力计算的叠加公式,并比较了“规程”公式和非线性有限元近似模拟分析结果,证明该文提出的节点核心区受剪承载力计算公式,反映了轴压比对节点受剪承载力的影响,其结果安全合理。

周威等(2005)<sup>[52]</sup>进行了矩形截面钢管混凝土柱框架节点域承载力的分析。该文运用ANSYS软件计算了一系列节点模型,得出了节点域的抗剪、抗弯承载力和各参数对节点域承载力的影响情况,试验结果和计算公式与有限元计算结果吻合良好。并依据计算及结果分析,对实际工程中节点域设计提出了一些建议。

范晓燕等(2006)<sup>[53]</sup>通过理论分析和试验结果,推导并提出了钢管混凝土结构梁柱节点的抗剪承载力计算公式。公式考虑了节点的实际受力状态,而且考虑了钢管和混凝土的组合作用。最后给出了公式的适用范围,可以给设计人员提供参考。

肖万松等(2007)<sup>[54]</sup>介绍了矩形钢管混凝土柱-钢梁内隔板式节点域的构造措施,并提出了其节点域受剪屈服机制,然后利用薄腹板梁受剪理论和斜压短柱理论分别分析了节点域钢管受剪承载力和节点域混凝土受剪承载力,在此基础上运用虚功原理推导了节点域受剪承载力计算公式,通过公式计算值与试验数据的比较、现行规程公式和有限元计算结果进行比较,表明:公式概念明确,应用简单,与试验数据值吻合较好,且偏安全。

徐梦琴和许成祥(2007)<sup>[55]</sup>在钢管混凝土梁柱节点的受力状态的基础上,探讨了轴向力、钢管、柱端弯矩和梁端竖向剪力对节点抗剪承载力的影响,提出了圆钢管混凝土节点抗剪承载力的计算公式,并运用有限元分析软件ANSYS建立了有限元计算模型,通过对有限元计算结果和公式计算结果的对比可知,模型适用于圆钢管混凝土-钢梁节点的有限元分析。

聂建国和秦凯(2007)<sup>[56]</sup>在实验的基础上,分析方钢管混凝土柱节点的抗剪受力性能,分别提出了三个部分对节点抗剪贡献的剪力-剪切变形曲线,将三部分曲线叠加,就可以得到节点的剪力-剪切变形骨架线。最后提出了方钢管混凝土柱节点剪力-剪切变形曲



线的恢复力模型。并在此基础上,提出了方钢管混凝土柱节点屈服抗剪承载力和极限抗剪承载力的计算公式。

Cheng等(2007)<sup>[57]</sup>提出了方钢管混凝土柱-钢梁节点的剪力-剪切变形骨架曲线,并分析了带楼板的方钢管混凝土柱-钢梁节点在单调荷载下以及往复荷载下的受力性能,得出了节点的骨架曲线。由得到的有限元分析结果和实验结果相比较,发现所建议的模型可以较好的模拟实验的骨架曲线结果。

李志南等(2008)<sup>[58]</sup>介绍了有限元分析方法,分析了荷载试验中得到的钢管混凝土柱环梁节点的破坏形态和力学性能,并概括了抗弯、抗剪承载力设计方法以及环梁和框架梁配筋要求,最后对有楼板的环梁节点的楼板配筋进行了探讨。

魏琰等(2008)<sup>[59]</sup>针对钢管混凝土柱-RC环梁节点型式,分别对边柱、中柱、角柱处采用三种不同形式钢管混凝土-环梁节点,并对其受力性能进行有限元分析,通过参照有关实验结果,提出了环梁截面内的扭矩、弯矩和剪力的实用计算方法,为这类节点设计提供依据。

高春彦等(2008)<sup>[60]</sup>在研究方钢管混凝土框架节点受力机理的基础上,推导出了内隔板式节点核心区受剪承载力计算叠加公式,并与我国规程的相关公式及试验结果进行了比较。结果表明:规程推荐的受剪承载力公式计算值偏大,且没有考虑轴压比的影响。该文推荐的节点核心区受剪承载力公式计算值与试验值吻合良好,且考虑了轴压比的影响,理论比较完善,公式的力学概念清晰,计算结果偏于安全。

傅剑平等(2008)<sup>[61]</sup>通过试验,量测环梁截面环筋等应变分布,记录了试件的荷载-位移曲线。结果表明:环梁合理配筋构造,可以使抗剪环-环梁节点能够有效地传递梁端弯矩和剪力。无论最终破坏发生在梁端还是环梁,试件都可以满足所要求的承载能力和延性。且增大环梁截面高度与纵梁截面高度的比例,可将试件发生破坏时混凝土的压碎区从环梁斜裂缝下端转移到纵梁端下部,从而形成纵梁端发生理想破坏模式的弯曲破坏。

聂建国和徐桂根(2009)<sup>[62]</sup>对方钢管混凝土柱节点的受剪屈服问题进行了研究,建立了方形节点的抗剪受力模型,并且依据节点的剪力-剪切变形曲线将抗剪受力过程分为四个阶段。节点的剪力由钢管腹板及节点核心区混凝土共同承担,其中核心区混凝土在协同工作阶段以平面抗剪对抗剪承载力作出贡献,在进入共同工作阶段时开始以压杆模式对抗剪承载力作出贡献。综合这三者的作用得到剪力-剪切变形曲线,该模型与试验结果吻合较好。

曾恒等(2009)<sup>[63]</sup>介绍了钢管混凝土环梁节点的构造和受力机理,概括了有限元计算和试验中得出的环梁节点的力学特性,总结了可以运用于实际工程的抗剪承载力验算方法和承载力实用设计方法。

秦庚(2009)<sup>[64]</sup>进行了钢管混凝土柱-钢梁环板节点力学性能与设计方法的研究。该文通过有限元软件ABAQUS建立了加强环式节点的实体模型,分析了影响节点梁端弯矩-

转角关系的因素，并提出了抗弯承载力的简化公式，最后分析了影响节点抗剪承载力的主要因素，并探讨了此类节点的屈服抗剪承载力计算公式。

何益斌等(2010)<sup>[65]</sup>在试验和理论研究的基础上，分析了方钢管混凝土柱穿心高强螺栓-端板节点核心区的受力机理，推导出节点核心区的抗剪承载力计算公式。公式不仅考虑了螺栓和柱轴力对节点核心区受力状态的影响，而且考虑了钢管对混凝土的约束作用。并用公式计算了3个方钢管混凝土柱穿心高强螺栓-端板节点的节点区的抗剪承载力，其计算结果与试验结果吻合较好。

刘晓刚等(2012)<sup>[66]</sup>对钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力进行了计算分析。该文将国内外的部分节点实验的数据结果进行了统计，并将统计的结果与AII规范公式、Fukumoto的计算方法和Nishiyama的计算方法分别进行了对比分析，结果证明后两者比规范公式更准确可靠。最后通过参数分析给出了公式各自的适用范围以及其修正公式。

Li和Han(2012)<sup>[67]</sup>对带钢筋混凝土楼板的钢管混凝土-钢梁节点的抗震性能进行了研究。该文基于前人对节点的实验和数值分析的基础上，通过有限元的参数分析研究了圆钢管混凝土-钢梁外加强环式节点域的抗剪刚度和抗剪变形，并提出了节点域的抗剪恢复力模型，它能综合反映节点的抗剪刚度、抗剪承载力、抗剪变形。最后提出了节点的纤维单元有限元分析方法，结果证明该方法有较好的精确性和合理性，能运用于大尺寸和复杂结构系统的抗震性能的研究。

## 1.4 问题的提出和课题的意义

近年来，随着钢管混凝土结构的发展，其在工程上的应用越来越多，随之对其理论的研究也越来越多。目前，国内外的研究人员对节点的抗震性能进行了一定的实验研究和理论研究，但是对节点的抗剪性能研究还不成熟，有待于完善，主要还存在以下几个方面的问题：

- (1) 由于钢管混凝土节点的抗剪机理比较复杂，目前没有一套明确完整的节点计算公式和设计方法，再加上存在加强环、钢牛腿等构件，使得节点受力更加复杂；
- (2) 以前的节点分析大多数是将钢管和混凝土分开考虑，没有充分考虑两者的协同作用，从而导致材料的浪费；
- (3) 在梁端变形分析中，节点的剪切变形是重要的组成部分，同时其对结构整体变形也会有影响，而以前的研究人员对节点的剪切变形研究相对较少。

如前所述，由于钢管混凝土结构的重要性、优越性及节点抗剪研究中存在的一些问题，已有的成果也存在一些局限性，节点承载力计算方法还有待于完善，所以有必要对钢管混凝土梁柱连接节点的抗剪性能进行进一步的研究，进而为实际工程提供一定的设计依据。因此，开展该方面的研究工作具有重要的理论价值和实用意义。

## 1.5 本文的研究内容及研究方法



研究内容：针对国内外钢管混凝土梁柱节点抗剪性能的研究现状，本文采用非线性有限元软件 ABAQUS，对钢管混凝土梁柱节点进行模拟分析，研究其破坏形态及受剪性能。研究方法如下：

(1) 在阅读文献及总结前人研究成果的基础上，根据《钢管混凝土结构技术规程 DB62/T25-3041-2009》<sup>[68]</sup>节点设计一般原则，建立了 ABAQUS 有限元模型，这几种节点形式构造简单，传力明确，相较于其它加强环形式应力集中有明显减少；

(2) 通过将模型的计算结果和已有的实验值进行比较，验证模型合理性，并进行单调加载下节点的全过程分析，在此基础上，分析节点微观的应力-应变关系及剪力-剪切变形关系曲线，明晰其受力机理和宏观破坏形态。

(3) 对影响  $V-\gamma$  曲线的主要因素进行参数分析，这些参数主要有：混凝土强度、钢材强度、钢管强度，环板宽度(厚度)、截面含钢率、轴压比、梁柱线刚度比、核心区高径比等。并根据得出的结论，提出钢管混凝土梁柱节点的抗剪承载力公式，通过将计算的结果和理论公式的比较，验证公式的合理性，从而给节点设计提供一定的依据。

(4) 依据前面建模要点，建立空间钢管混凝土柱-钢梁节点，对其进行在不同加载情况下的抗剪承载力分析，并对几种情况加载下的结果进行比较分析。在此基础上，对空间节点进行简单的参数分析，得出参数对空间节点的影响规律，对实际工程提供一定的理论依据。

## 第二章 钢管混凝土柱-钢梁节点的有限元分析

本章对钢管混凝土柱-钢梁加强环式节点进行了有限元分析,包括外加强环式节点和内加强环式节点。首先对本文所建的有限元模型进行了试验验证,然后建立了加强环式节点的典型试件,通过对结果的分析,提出了节点的剪力-剪切变形曲线,最后对节点进行了在梁端加载下的全过程应力分析,结果证明其符合典型的剪力-剪切变形曲线。

### 2.1 钢管混凝土节点受剪的理论基础知识

本文采用有限元软件 ABAQUS 对钢管混凝土梁柱节点进行模拟分析,并在此基础上分析节点的受剪情况,以提出节点的抗剪承载力公式。因此,在进行建模前,有必要明晰一些节点受剪的理论知识,从而为后面的工作打下基础。

钢管混凝土柱-钢梁框架与普通的钢框架和钢筋混凝土框架的受力情况是一样的,它不仅要承受由柱端方向传来的轴力、弯矩、剪力,而且要承受梁端方向传来的弯矩及剪力。由于梁承受的轴力很小,这里忽略不计。钢管混凝土梁柱节点的受力情况如图 2.1 中柱节点受力变形示意图:

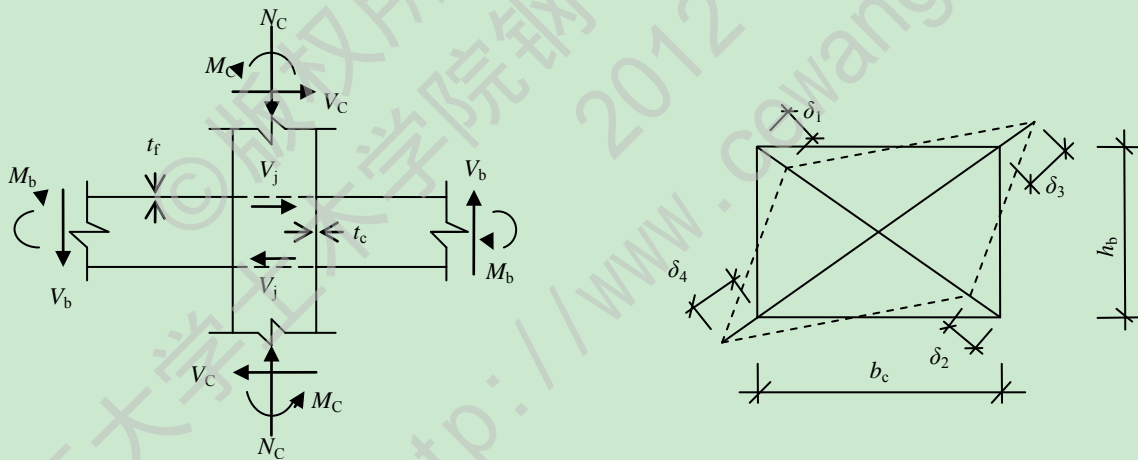


图 2.1 中柱节点受力变形示意图

由节点的受力情况,根据节点受力平衡的原则,可以得出节点剪力为:

$$V_j = \frac{2M_c - V_b(b_c - 2t_c)}{h_b - 2t_f} \quad (2.1)$$

$$\text{其中,柱端方向的弯矩为: } M_c = V_c(H - h_b)/2 \quad (2.2)$$

当节点受剪时,节点域在剪力的作用下,由原先的矩形变为菱形(如上节点域受力变形图所示),因此节点的剪切变形可以表示如下:

$$\gamma_j = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\sqrt{h_b^2 + b_c^2}}{h_b b_c} \bar{X} \quad (2.3)$$

其中， $\bar{X}$  为沿对角线方向的平均变形，计算如下：

$$\bar{X} = \frac{|\delta_1 + \delta_2| + |\delta_3 + \delta_4|}{2} \quad (2.4)$$

以上式中：对于外环板式节点： $V_b = V_c H / L$ ， $H$  为柱的高度， $L$  为钢梁的长度， $h_b$  为钢梁高， $h_c$  为方钢管柱的宽度。

## 2.2 节点有限元模型的建立

### 2.2.1 材料的本构模型

ABAQUS 模型中的钢材选用弹塑性模型，混凝土选用塑性损伤模型，混凝土的受拉软化采用混凝土能量破坏准则即应力-断裂能关系。相对于上面两种材料的本构模型分别选用不同的应力-应变关系模型。对于钢材，当为低碳软钢及低合金钢时，采用二次塑流模型。其应力-应变曲线分为五个阶段：弹性段、塑性段、强化段和二次塑流段。当钢材为高强钢材时，采用双线性模型：弹性段和强化段，强化段的模量可取为  $0.01E_s$ （韩林海等，2007<sup>[3]</sup>）。

混凝土的应力-应变关系模型采用韩林海等(2007)<sup>[3]</sup>提出的混凝土应力-应变关系模型。钢管混凝土的核心混凝土由于受到钢管的约束，使得钢管和混凝土之间存在相互作用，从而使混凝土的受力更加复杂。因此，钢管混凝土结构中的核心混凝土应力-应变关系曲线除了跟自己的本身材料有关外，还主要跟约束效应系数  $\xi$  有关。核心混凝土的应力-应变关系模型如下：

(1) 圆钢管混凝土核心混凝土应力-应变关系

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (2.5)$$

$$y = \begin{cases} 1 + q(x^{0.1\xi} - 1) & (\xi \geq 1.12) \\ x / [\beta(x-1)^2 + x] & (\xi < 1.12) \end{cases} \quad (x > 1) \quad (2.6)$$

(2) 方、矩形钢管混凝土核心混凝土应力-应变关系

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1) \quad (2.7)$$

$$y = x / [\beta(x-1)^7 + x] \quad (x > 1) \quad (2.8)$$

以上式中的约束效应系数  $\xi = (A_s \cdot f_y) / (A_c \cdot f_{ck}) = \alpha \cdot f_y / f_{ck}$ ，公式的适用范围是  $\xi = 0.2 \sim 5$ ， $f_y = 200 \sim 700 \text{MPa}$ ， $f_{cu} = 30 \sim 120 \text{MPa}$ ，对于矩形钢管混凝土，截面高宽比为  $D/B = 1 \sim 2$ 。式中其他符号的意义见韩林海等(2007)<sup>[3]</sup>。

## 2.2.2 单元类型的选择

ABAQUS 具有丰富的单元库，根据单元的种类共分为八大类：实体单元（solid element）、壳单元（shell element）、薄膜单元、梁单元、杆单元、刚体单元、连接单元和无线元，根据节点位移插值的阶数又可分为：线性单元、二次单元和修正的二次单元（石亦平和周玉蓉，2006<sup>[69]</sup>）。

本文用到了实体单元和壳单元两种，混凝土采用 C3D8 单元，即 8 节点六面体线性完全积分单元；钢管和钢梁采用 S4 单元，即 4 节点完全积分单元。

## 2.2.3 边界条件的模拟及单元接触的定义

在有限元软件 ABAQUS 里的 Load 功能模块里可以模拟构件的边界条件。Load 功能模块主要可以进行定义荷载、边界条件、场变量和荷载状况的工作。使用 Load 模块里的 Boundary Condition 项可定义不同类型的边界条件。

在平面节点的抗剪分析中，对柱底约束 1、2、3 方向的线位移，对梁端约束 1、2 方向的线位移（在梁端加竖向荷载时）或者是 2、3 方向线位移（在柱顶加水平荷载时），柱端只约束平面外的 2 方向线位移。

单元的接触在 Interaction 功能模块里定义，主要用到 Interaction 菜单中的界面接触和 Constraint 菜单中的绑定约束、壳体-实体耦合约束和嵌入区域约束。在节点分析中：钢管与混凝土采用界面接触；钢管和钢梁采用绑定约束；混凝土和加载板采用绑定约束；加载板和钢管采用壳体-实体耦合约束；内隔板和混凝土采用嵌入区域约束。对于界面接触中法向方向的接触采用硬接触，即法向方向的界面压力可以完全地在界面间传递。界面接触中切线方向的接触采用库伦摩擦模型，它综合考虑了界面粘结力和摩擦力对界面剪应力传递的贡献，钢管与混凝土间的界面摩擦系数取值范围在 0.2~0.6 之间。

## 2.2.4 加载方式的确定及网格的划分

网格的划分对有限元的结果有很大影响，本文采用独立实体划分网格，三维实体采用结构化网格，壳体采用自由网格。在进行建模时，环板处有转角，会导致应力集中，在划分网格时应将环板处切割成几部分，使网格更均匀。在接触中混凝土为从属表面，其网格的密度不应低于钢管的网格密度。加载方式分为两个步骤，第一步先加柱顶的轴力，第二步在左右梁两端加竖向反对称位移或者是在柱端加水平位移。

## 2.2.5 方程组的求解

采用 ABAQUS/Standard 分析模块，它能够求解广泛领域的线性和非线性问题，在每一个求解增量步中隐式地求解方程组。在求解非线性问题时，ABAQUS/Standard 采用 Newton-Raphson 方法，将在 step 里设置的分析步分解为多个增量步，载荷相应的通过增量的形式逐步施加，在每个载荷增量步中进行一系列的迭代，在每次迭代中使用上一次迭代得到的修正刚度矩阵。通过这样的一个过程，对计算结果逐步修正，直至满足平

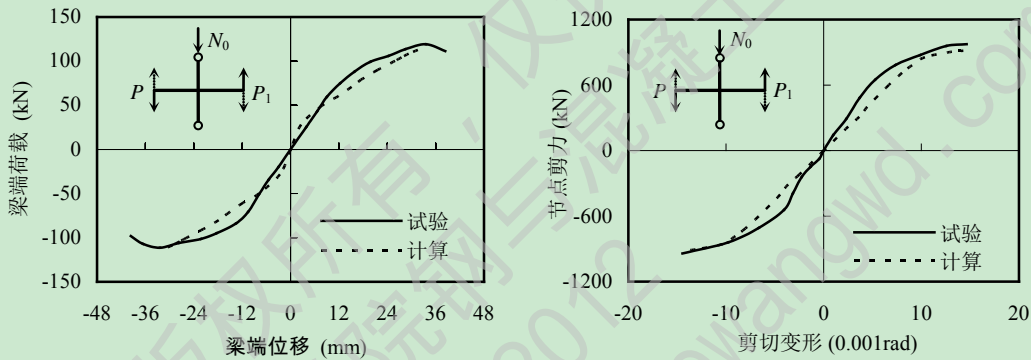
衡方程，最终达到收敛。该平衡方程在采用有限元方法求解时，单元的插值函数以节点位移作为基本的未知量（曹金凤和石亦平，2009<sup>[70]</sup>），形式如下：

$$[K]\{u\} = \{R\} \quad (2.9)$$

式中， $[K]$ 为刚度矩阵， $\{u\}$ 为节点位移矢量， $\{R\}$ 为节点载荷矢量。

### 2.3 典型算例分析

为了验证本文模型的合理性，首先进行大量的算例的分析。分别选取了杜培源(2006)<sup>[71]</sup>文献中的外隔板式节点 SJ-01c 的低周反复加载试验的结果数据，王文达(2006)<sup>[19]</sup>文献中的4个方钢管混凝土节点和2个圆钢管混凝土节点的水平低周往复荷载试验的结果值，以及周天华(2005)<sup>[72]</sup>文献中梁柱采用对接焊接方式的3个不同尺寸的内隔板式节点的低周反复荷载试验的骨架曲线数据值。图 2.2-图 2.4 给出了这些典型实验曲线与本文有限元曲线的比较，由此可见，试验值与有限元值吻合良好。

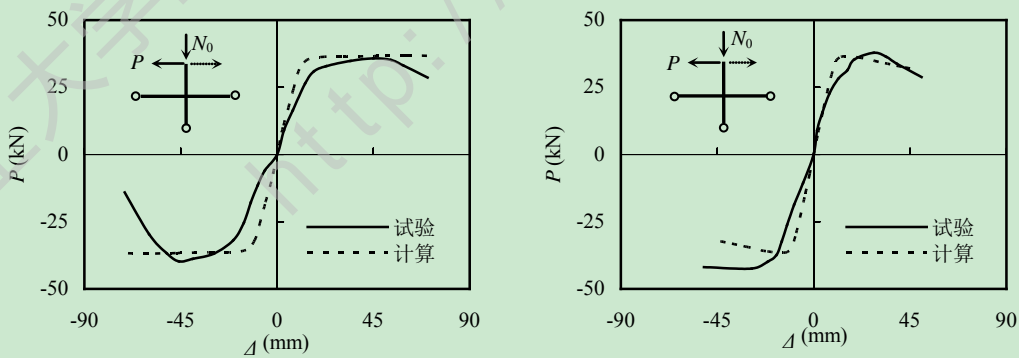


(a) 梁端荷载-梁端位移曲线

(b) 剪力-剪切变形曲线

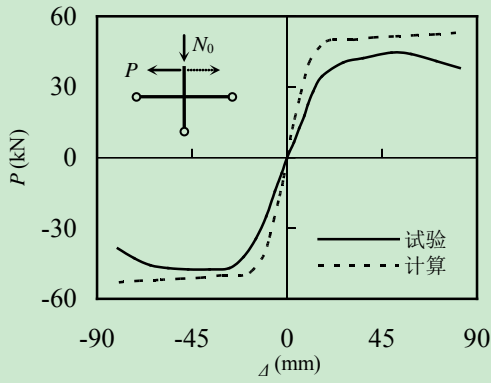
试件基本信息：柱  $B \times t = 200 \times 8 \text{mm}$ ，梁  $H248 \times 124 \times 5 \times 8 \text{mm}$   $f_y = 235 \text{N/mm}^2$ ， $f_{cu} = 20 \text{N/mm}^2$

图2.2 节点SJ-01c 的实验值与有限元值比较(杜培源，2006<sup>[71]</sup>)

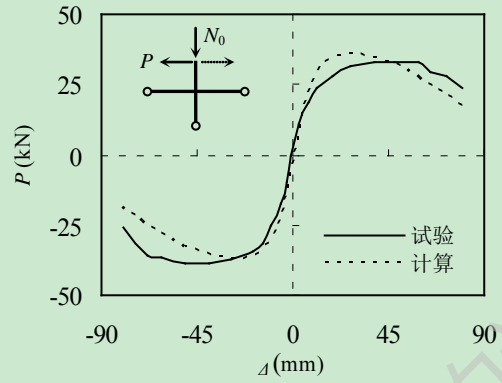


(a) CJ-21

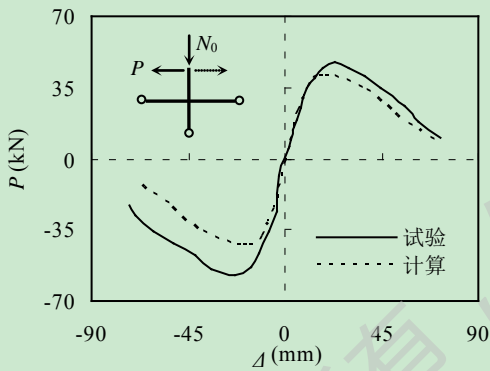
(b) CJ-22



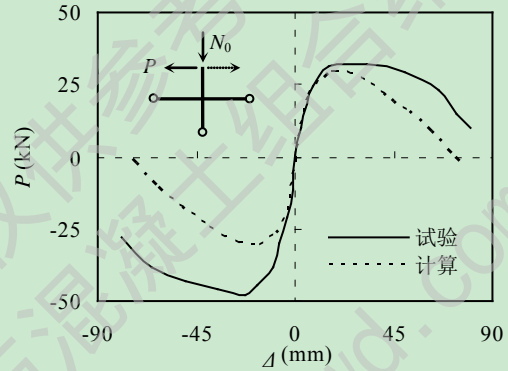
(c) SJ-21



(d) SJ-32



(e) SJ-13



(f) SJ-33

试件基本信息:

CJ-21: 钢管  $D \times t = 140 \times 2.13 \text{ mm}$ , 钢梁  $H150 \times 70 \times 3.53 \times 3.53 \text{ mm}$ , 环板宽 40mm,  $n = 0.05$

CJ-22: 钢管  $D \times t = 140 \times 2.13 \text{ mm}$ , 钢梁  $H150 \times 70 \times 3.53 \times 3.53 \text{ mm}$ , 环板宽 40mm,  $n = 0.3$

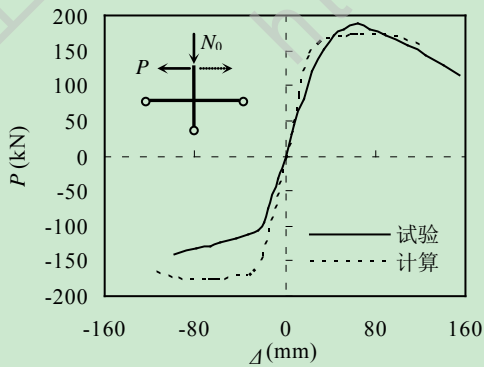
SJ-21: 钢管  $B \times t = 120 \times 3.46 \text{ mm}$ , 钢梁  $H160 \times 80 \times 3.53 \times 3.53 \text{ mm}$ , 环板宽 40mm,  $n = 0.04$

SJ-32: 钢管  $B \times t = 120 \times 3.46 \text{ mm}$ , 钢梁  $H160 \times 80 \times 3.53 \times 3.53 \text{ mm}$ , 环板宽 20mm,  $n = 0.3$

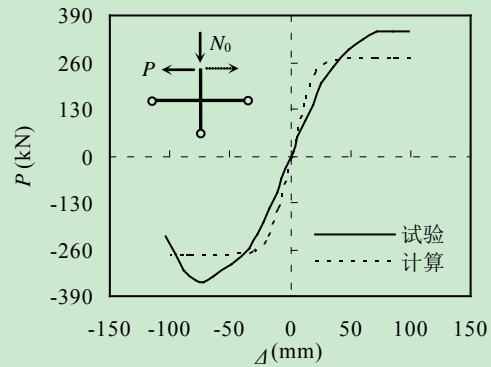
SJ-13: 钢管  $B \times t = 120 \times 3.46 \text{ mm}$ , 钢梁  $H160 \times 80 \times 3.53 \times 3.53 \text{ mm}$ , 环板宽 60mm,  $n = 0.6$

SJ-33: 钢管  $B \times t = 120 \times 3.46 \text{ mm}$ , 钢梁  $H160 \times 80 \times 3.53 \times 3.53 \text{ mm}$ , 环板宽 20mm,  $n = 0.6$

图2.3 钢管混凝土节点的 $P-\Delta$ 曲线实验值与有限元值比较(王文达, 2006<sup>[19]</sup>)

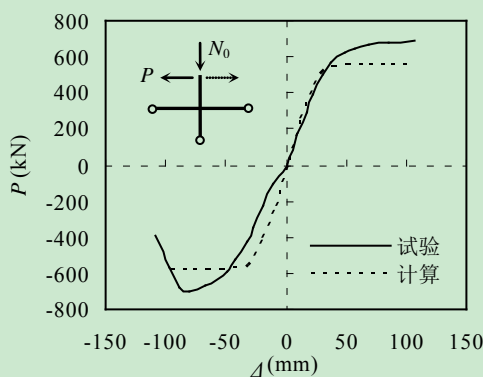


(a) JD-1B



(b) JD-2B





(c) JD-3B

试件基本信息:

JD-1B: 钢管  $D \times t = 500 \times 16 \text{mm}$ , 钢梁  $H350 \times 130 \times 6 \times 10 \text{mm}$  内隔板厚 16mm

JD-2B: 钢管  $D \times t = 500 \times 20 \text{mm}$ , 钢梁  $H450 \times 150 \times 8 \times 12 \text{mm}$  内隔板厚 22mm

JD-3B: 钢管  $D \times t = 500 \times 25 \text{mm}$ , 钢梁  $H500 \times 250 \times 8 \times 16 \text{mm}$  内隔板厚 28mm

图2.4 钢管混凝土节点的 $P-\Delta$ 曲线实验值与有限元值比较(周天华, 2005<sup>[72]</sup>)

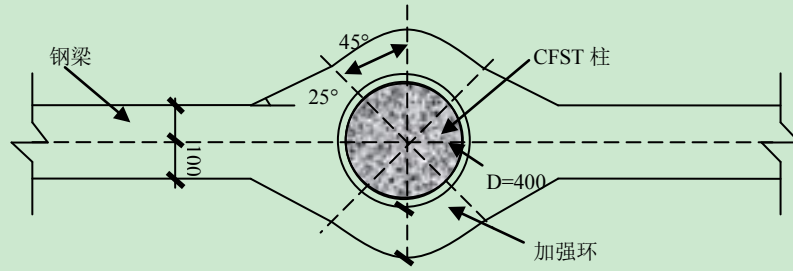
## 2.4 节点受剪承载力的有限元分析

### 2.4.1 典型试件的建立

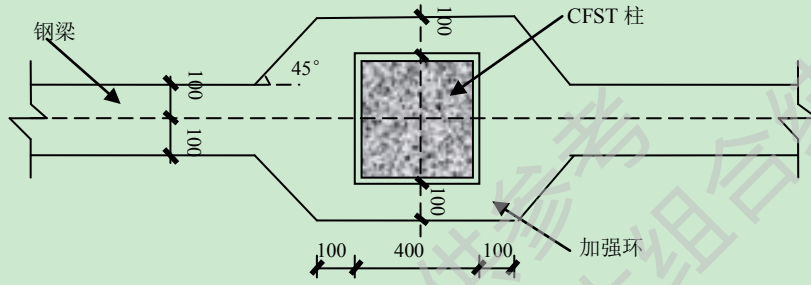
依据《钢管混凝土结构技术规程 DB62/T25-3041-2009》<sup>[68]</sup>, 并参考工程常用参数, 设计了钢管混凝土柱-钢梁加强环式节点, 包括外加强环式节点和内隔板式节点, 其中外加强环式节点又包括圆钢管混凝土外加强环式节点和方钢管混凝土外加强环式节点。在此基础上, 根据节点在受力下反弯点的位置, 截取框架的中柱节点。采用上述的理论模型方法, 分别建立了不同节点形式的钢管混凝土典型试件模型。节点基本信息如表 2.1, 节点示意图如图 2.5。

表 2.1 节点基本信息

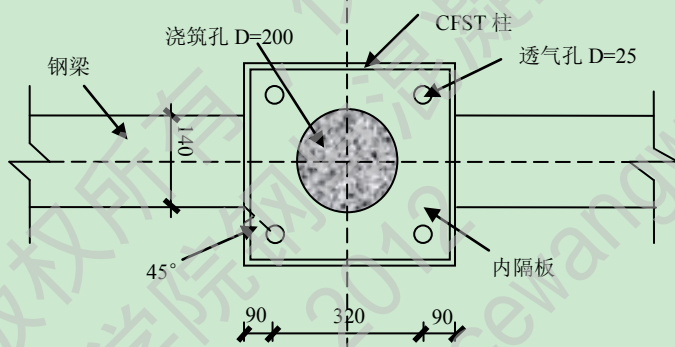
节点形式		层高 (mm)	跨度 (mm)	柱 (mm)	梁 (mm)	环板宽度 (mm)	材料
外加强环 式节点	圆形	3000	6000	400×10	H400×200×8×10	100	C60
	方形						
内隔板式 节点	方形	3000	3300	500×16	I390×140×8×12	---	Q345



(a) 圆钢管混凝土外隔板式节点示意图



(b) 方钢管混凝土外隔板式节点示意图

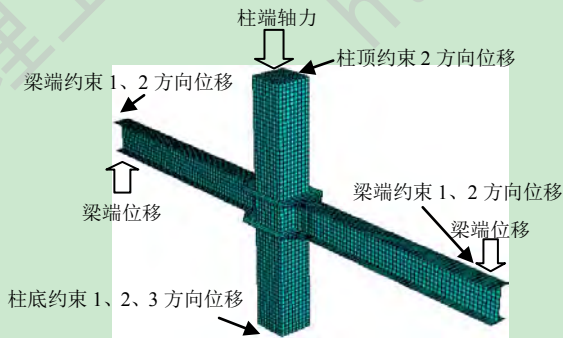


(c) 方钢管混凝土内隔板式节点示意图

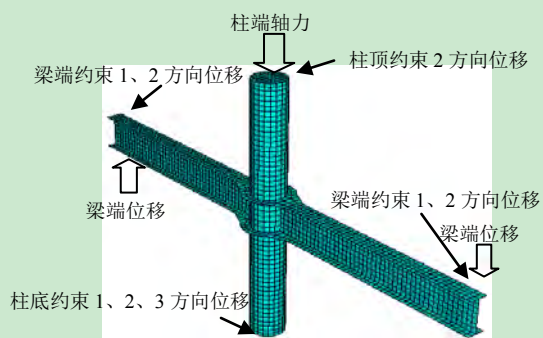
图 2.5 加强环节点示意图

### 2.4.2 节点的剪力-剪切变形曲线

为了明晰节点的抗剪受力过程以及节点微观的应力变化规律，依据前一章节提出的理论模型数值模拟方法和所建立的典型试件，首先进行了单调加载下的受力分析。三种钢管混凝土柱-钢梁节点的网格划分和边界条件如图 2.6。

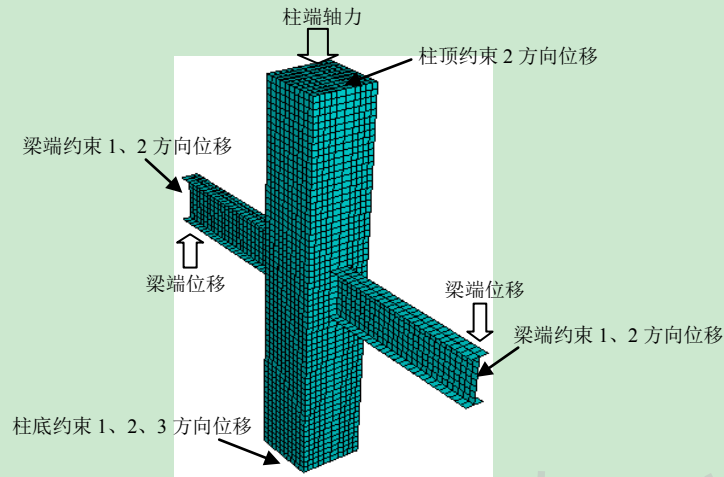


(a) 方钢管混凝土柱外加强环式节点



(b) 圆钢管混凝土柱外加强环式节点





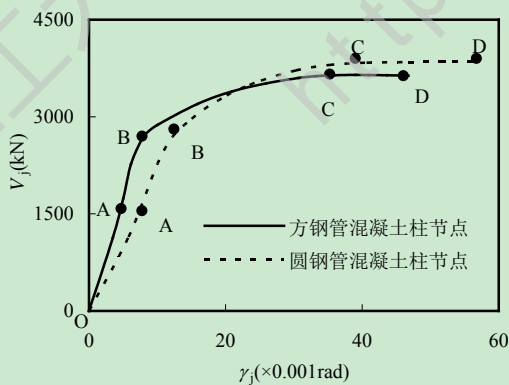
(c) 内隔板式节点

图 2.6 钢管混凝土柱节点的网格和边界条件

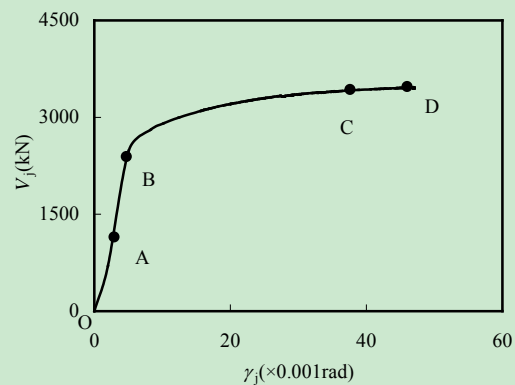
典型圆钢管混凝土外加强环式节点，轴压比为  $n=0.3$ ，轴压比定义为  $n=N_0/N_u$ ，其中  $N_0$  为加在柱顶的轴力， $N_u$  为极限承载力；含钢率为  $\alpha_s=0.108$ ，含钢率定义为  $\alpha_s=A_s/A_c$ ，其中  $A_s$  和  $A_c$  分别为钢管和核心混凝土面积；梁柱线刚度比为  $k_m=0.252$ ，梁柱线刚度比定义为  $k_m = \frac{E_b I_b H}{E_{sc} I_{sc} L}$ ，其中  $E_b I_b$  和  $E_{sc} I_{sc}$  依次为钢梁和柱的组合抗弯刚度， $H$  为层高， $L$

为梁的跨度；核心区高厚比为 1，定义为  $h/D$ ， $h$  为核心区的高度， $D$  为核心区的直径。典型方钢管混凝土外加强环式节点，轴压比为  $n=0.3$ ，含钢率  $\alpha_s=0.108$ ，梁柱线刚度比  $k_m=0.163$ ，核心区高厚比为 1。典型内隔板式节点，轴压比为  $n=0.3$ ，含钢率  $\alpha_s=0.141$ ，梁柱线刚度比  $k_m=0.085$ ，核心区高厚比为 0.78。

加载方式为：第一步在柱端加轴向力，第二步在两梁端加竖向反对称位移，梁左端加向上的位移，梁右端加相等的向下位移。采用上述理论模型进行数值模拟，在单调加载下节点剪力-剪切变形曲线如图 2.6 所示。根据聂建国和徐桂根(2009)<sup>[62]</sup>提出的典型节点剪力-剪切变形曲线，将该曲线抗剪受力过程分为四个阶段：OA 段为协同工作阶段；AB 段为共同工作阶段；BC 段为屈服强化阶段；CD 段为极限变形阶段。



(a) 外加强环式节点



(b) 内隔板式节点

图 2.7 钢管混凝土节点的剪力-剪切变形曲线

由图 2.7 知, 在相同的尺寸和材料下, 圆钢管混凝土节点与方钢管混凝土节点的承载力有不同之处。在协同工作阶段、共同工作阶段以及屈服强化阶段的前段, 方钢管混凝土节点的受力稍大于圆钢管混凝土节点, 然而在极限变形阶段, 圆钢管混凝土节点受剪稍大于方钢管混凝土节点。而对于内隔板式节点, 在协同工作阶段和共同工作阶段, 剪力-剪切变形曲线斜率比方钢管混凝土外加强环式节点稍大, 说明在相同的剪切变形下内隔板式节点的剪力稍大于方钢管混凝土节点, 但进入后期, 其节点剪力比方钢管混凝土节点稍低, 剪切变形相差不大。

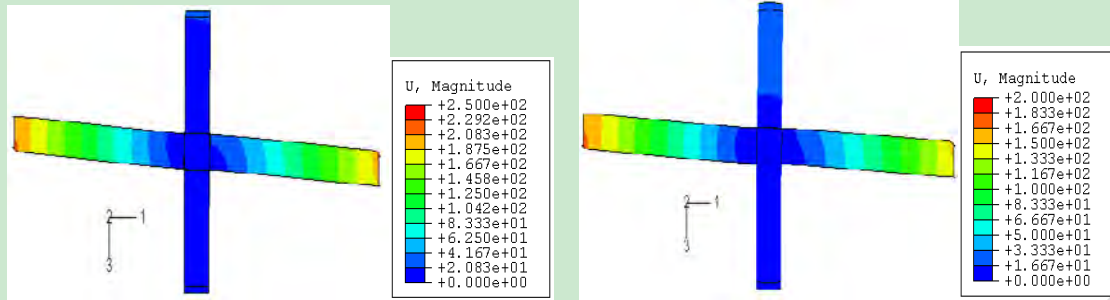
在协同工作阶段, 核心区混凝土还没有达到剪切变形峰值, 由于钢管壁和混凝土能有效的粘结在一起, 它们能作为一个整体协同工作, 两者的工作机制和变形基本一致。这一阶段, 因混凝土的剪切模量较大, 所以如图 2.7 所示曲线, 节点表现出较大的剪切刚度, 曲线基本上成直线上升的趋势, 钢管和混凝土都处在弹性的工作阶段。在共同工作阶段, 由于荷载增加, 核心区混凝土逐步达到剪切变形的峰值, 剪力由核心区混凝土和钢管混凝土柱翼缘共同承担, 但抗剪机制却与前不同, 这时混凝土的剪力传递就变成了斜压杆的机理来传递。随着荷载继续增加, 钢管腹板部分区域相继屈服, 曲线上升的趋势逐渐减慢, 斜率变小。在屈服强化阶段, 由于节点域的钢管腹板已屈服, 它开始进入屈服强化阶段, 因此钢材的抗剪模量大大降低, 随此节点的抗剪刚度也进一步降低。又由于钢管腹板的抗剪强度降低, 使得核心区的斜压杆混凝土承担的剪力增大, 因此节点的剪力有少许增大。在极限变形阶段, 钢管腹板应力发展到抗剪极限强度, 而核心区混凝土的应力也基本或达到极限抗剪强度, 因此节点的剪力几乎不增加, 甚至有下降趋势, 而节点的剪切变形却发展迅速。由于钢材具有较好的变形能力, 而混凝土被包裹在钢管内, 具有较好的约束能力, 所以节点在进入极限变形阶段后, 节点的剪切变形还有很大的空间。

### 2.4.3 节点的应力-应变分布规律

为了分析节点的应力变化规律及节点的变形, 以明晰微观的应力状态和宏观变形, 列出了节点的位移变形图和各部分的 Mises 应力, 如图 2.8-2.15。在分析节点应力变化规律时, 选取了剪力-剪切变形曲线上的三个特征点进行分析: A 点为协同工作阶段的结束点; B 点为共同工作阶段的结束点; C 点为屈服强化阶段的结束点。

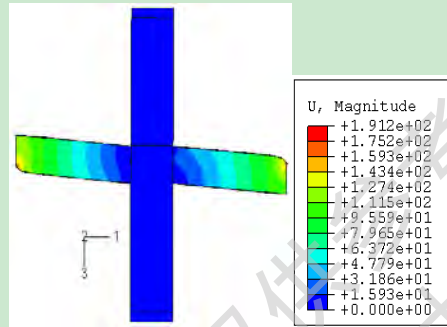
#### (1) 各类节点的变形

图 2.8 列出了节点位移变形示意图, 从图中可看出在柱端轴力和梁端反对称加载下, 节点的最大位移和变形都发生在梁端, 靠近节点域的地方和钢管混凝土柱上几乎上没什么位移变形。这说明节点的变形主要在钢梁上, 节点的最终破坏将发生在梁上, 符合抗震设计“强柱弱梁、强节点”的设计原则。



(a) 方钢管混凝土外加强环式节点

(b) 圆钢管混凝土外加强环式节点



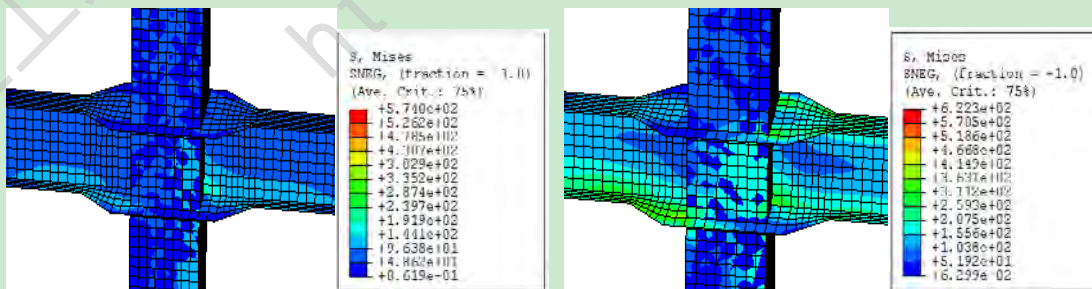
(b) 内隔板式节点

图 2.8 节点的位移变形图

## (2) 方钢管混凝土外加强环式节点应力变化规律

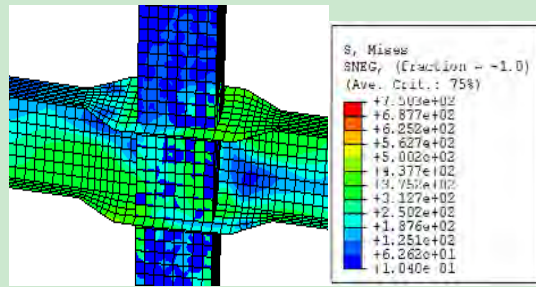
图 2.9 给出了方钢管混凝土外加强环式节点的核心区在加载下的应力变化规律。由前所述，依据典型节点剪力-剪切变形曲线，将抗剪受力全过程分为协同工作、共同工作、屈服强化、极限变形四个阶段。由图可看出，节点域的最大应力大致成反对称分布，最大应力主要分布在节点域及其附近，离节点域稍远处应力较小。应力从 A 点到 C 点逐步增大，到 C 点时，节点域及其附近的钢材大部分已经屈服。

由图 2.9(a)所示，节点域的钢管腹板最大应力达到 191.9MPa 左右，未屈服，节点处在弹性的工作阶段，符合协同工作阶段的特征。由图 2.9(b)可看出，随着荷载的继续增大，节点附近钢管腹板最大应力已达到 363.1MPa 左右，钢材部分已经屈服，符合共同工作阶段的特征。如图 2.9(c)所示，可看出节点域附近处的钢管腹板最大应力达到 437.7MPa 左右，钢材已经进入强化阶段，抗剪强度降低，这符合屈服强化阶段的特征。



(a) 节点核心区应力分布(A 点)

(b) 节点核心区应力分布(B 点)

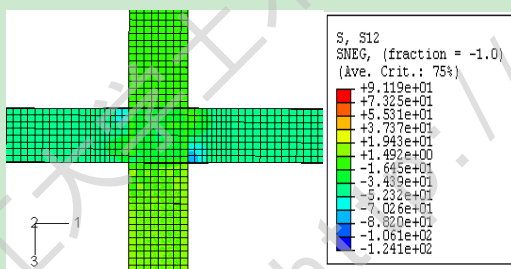


(c) 节点核心区应力分布(C点)

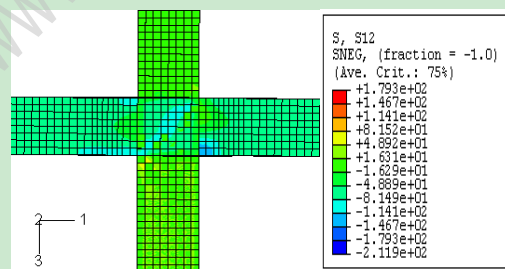
图 2.9 方钢管混凝土节点核心区应力分布图

图 2.10 列出了方钢管混凝土外加强环式节点的节点域和外环板的剪应力的变化规律。图(a)-(c)为节点节点域在三个特征点的剪应力分布，由图可得出节点区的较大应力大致关于 3 轴成反对称分布，最大应力发生在节点区域及其附近，离节点域较远处应力较小。在 A 点处应力还很小，最大应力发生在钢梁与钢管交界处，除了应力局部应力集中地方，最大压应力达到 70.2MPa 左右；在 B 点处，可看出应力继续增大，并且最大应力发展到核心区的钢管上，最大压应力在 114.9MPa 左右；在 C 点处节点变形较大，最大应力发生在钢梁与柱交界和核心区的钢管上，压应力增大到 215.0MPa 左右。

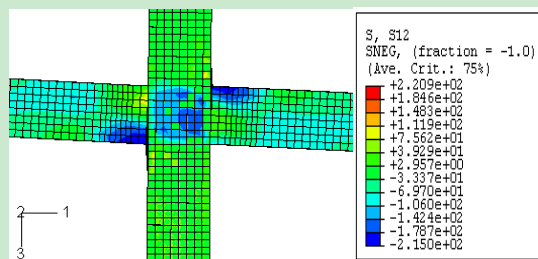
由图 2.10(d)-(f)可得出加强环式节点的外环板剪应力分布规律，应力的分布和节点区一样大致成反对称分布，环板上有受拉区有受压区，最大应力发生在环板与钢梁交接的两侧处，其它地方的应力较小。这是因为节点的受力从梁端传来，经由钢梁然后传到钢梁与环板交接处，最后传到钢管和核心混凝土上，所以钢梁与外环板是一个钢梁与钢管混凝土柱受力的连接纽带，其向左右方向的变形受到柱的约束，从而使其剪应力较大。从图上可以看到环板的剪应力由 A 点到 C 点逐步增大，到最后最大受拉应力达到 220.9MPa，最大受压应力达到 215.0MPa。



(a) 节点域腹板、钢管剪应力分布(A点)

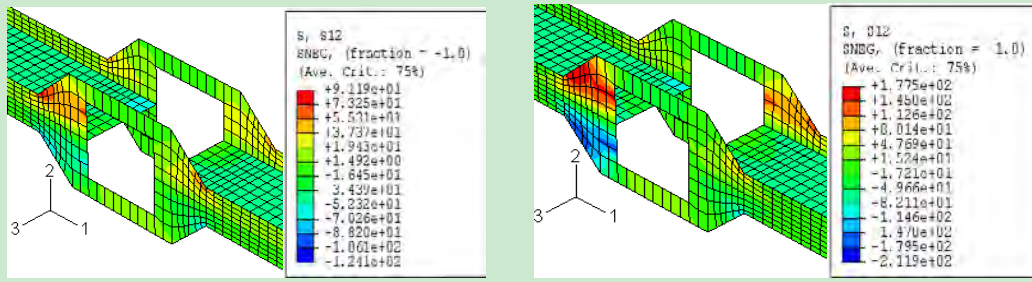


(b) 节点域腹板、钢管剪应力分布(B点)



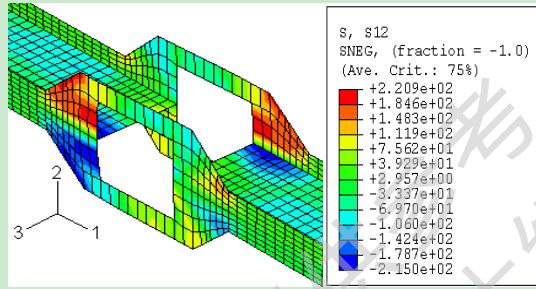
(c) 节点域腹板、钢管剪应力分布(C点)





(d) 外环板剪应力分布(A点)

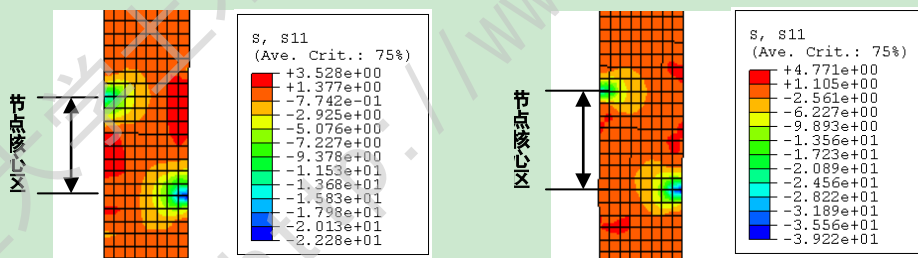
(e) 外环板剪应力分布(B点)



(f) 外环板剪应力分布(C点)

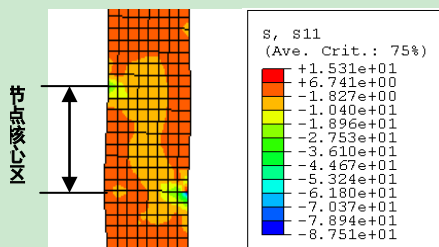
图 2.10 方钢管混凝土节点核心区剪应力分布图

图 2.11(a)-(c)为核心混凝土柱的剪应力变化规律，由图可看出核心区混凝土的第一主应力  $S_{11}$  大致关于 1 轴成反对称分布，最大应力发生在钢梁翼缘与柱交接处，并且在节点核心区及其附近应力较大，离核心区稍远处的应力较小。这是因为柱平面内的变形受到了钢梁的约束，因此梁与柱交接处的混凝土应力比较大。节点核心区域的混凝土在进入共同工作阶段后的剪力传递采用斜压杆模型，从图可看出节点核心区沿 1 轴的最大主应力成带状的分布，剪力主要由两受压翼缘之间的斜压杆区域来承担。剪应力从 A 点到 C 点逐步发展，以至在 C 点处的混凝土柱核心区发生轻微开裂。



(a) 核心区混凝土主应力分布(A点)

(b) 核心区混凝土主应力分布(B点)



(c)核心区混凝土主应力分布(C点)

图 2.11 混凝土柱第一主应力分布图

### (3) 圆钢管混凝土外加强环式节点应力变化规律

图 2.12 给出了圆钢管混凝土外加强环式节点的节点域应力变化过程图。从图中可看出节点的最大应力出现在节点域及其附近，离节点域稍远的地方应力相对较小，应力从 A 点到 C 点成逐步增大的趋势。由图 2.12(a)可看出，除局部地区有应力集中外，节点域附近的最大应力达到 140.6MPa 左右，表明钢材还处于弹性工作阶段，符合协同工作阶段的特征。从图 2.12(b)可看出钢梁腹板、环板均有部分区域达到屈服，最大应力达到 351.8MPa 左右，其抗剪强度降低，符合共同工作阶段特征。由图 2.12(c)得出，随着荷载的继续增大，节点域及其附近的钢材继续屈服，最大应力达到 375.8MPa 左右，大部分的钢材进入强化阶段，其抗剪强度进一步降低，符合屈服强化阶段特征。

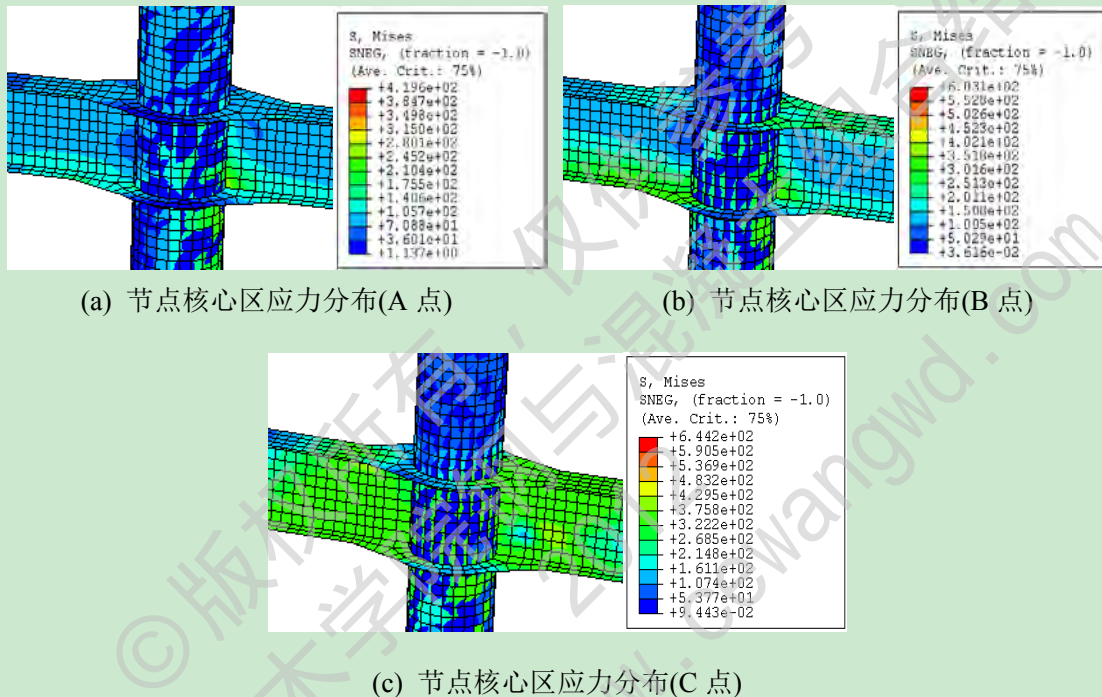
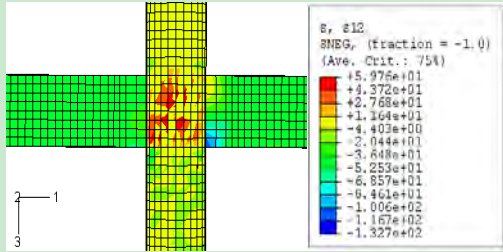


图 2.12 圆钢管混凝土节点核心区应力分布图

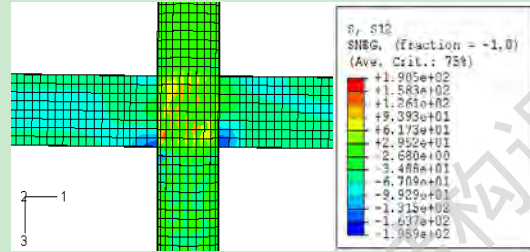
图 2.13 为圆钢管混凝土外加强环式节点的节点域和外环板的剪应力分布规律。从图 (a)-(c)可得出节点域的应力变化规律，由图可得出节点的最大剪应力发生在节点域及其附近，且离节点较远处应力较小。同方钢管混凝土节点一样，从图上可看出节点域处的腹板压应力很大，由此可知在竖向力作用下，竖向剪应力主要由腹板传递给钢管再传至核心混凝土。在 A 点处最大压应力发生在钢梁与钢管交接处，最大拉应力发生在核心区的钢管上，最大压应力为 132.7MPa 左右，最大拉应力为 59.7MPa 左右；在 B 点处应力继续增大，最大拉应力达到 93.9MPa 左右，最大压应力为 163.7MPa 左右；在 C 点处节点核心区的变形迅速增大，最大变形发生在钢梁上，最大拉应力达到 141.5MPa 左右，最大压应力达到 212.3MPa 左右。

图 2.13(d)-(f)为圆钢管混凝土外加强环式节点的外环板剪应力分布图。从图中可看出其与方钢管混凝土节点外环板的应力分布规律一致，最大应力大致成反对称分布，并且在与钢梁交接处的应力相比较其它区域大。外环板的应力从协同工作阶段到屈服强化

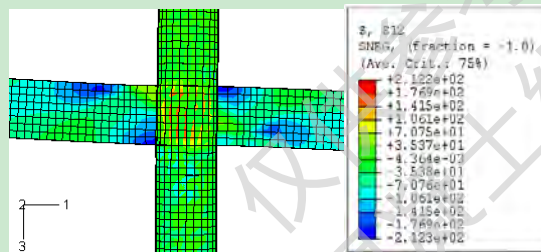
阶段逐渐增大。除去局部应力集中的区域，在协同工作阶段末 A 点，最大拉应力在 43.52MPa 左右，最大压应力在 70.55MPa 左右。在共同工作阶段末 B 点，环板的最大拉应力在 88.15MPa 左右，最大压应力在 114.8MPa 左右。在屈服强化阶段末 C 点，节点域的抗剪承载力几乎不再增加，最大拉应力在 103.9MPa 左右，最大压应力在 141.8MPa。



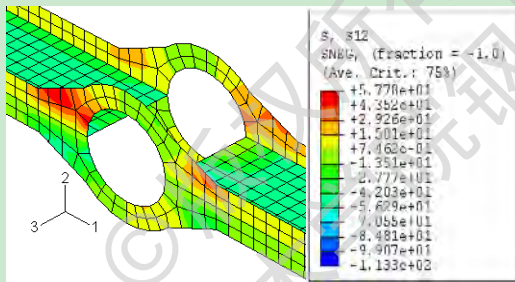
(a) 节点域腹板、钢管剪应力分布(A 点)



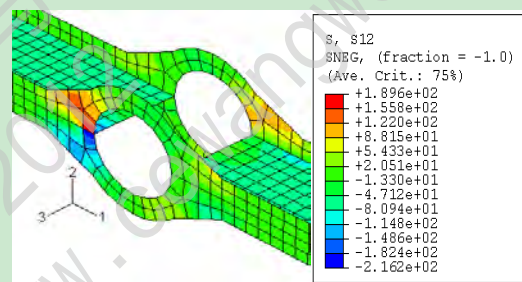
(b) 节点域腹板、钢管剪应力分布(B 点)



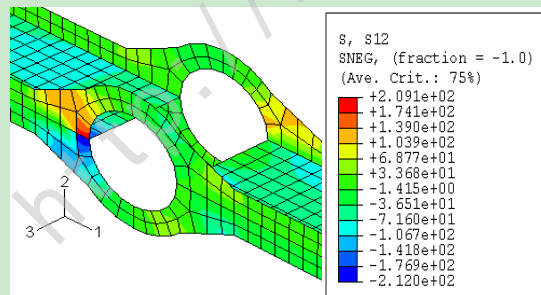
(c) 节点域腹板、钢管剪应力分布(C 点)



(d) 外环板剪应力分布(A 点)



(e) 外环板剪应力分布(B 点)

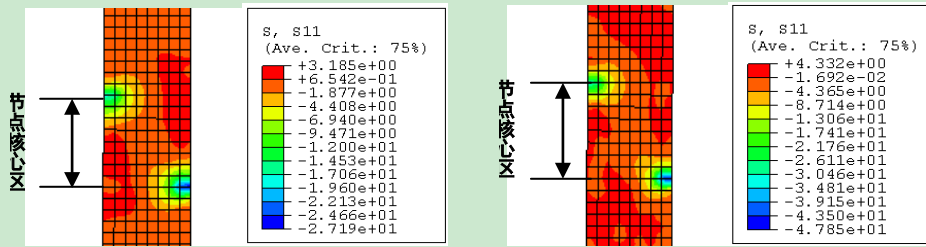


(f) 外环板剪应力分布(C 点)

图 2.13 圆钢管混凝土节点核心区剪应力分布图

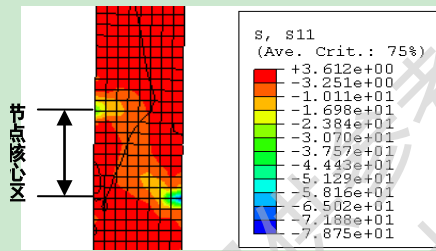
图 2.14(a)-(c)为节点域核心混凝土柱的主应力变化规律，其与方钢管混凝土梁柱节点一样，节点剪力由钢管和核心混凝土共同承担，节点域混凝土的剪力传递在进入共同工作阶段后采用斜压杆模型，从图上可看出混凝土核心区的最大剪应力成带状分布，符合斜压杆模型，相较于方钢管混凝土节点，圆钢管混凝土节点的斜压杆区域没有其发

展充分。最大剪应力发生在上下翼缘与柱交接处的混凝土，应力从 A 点到 C 点逐步增大，直至 C 点混凝土柱发生明显的开裂。



(a)核心区混凝土主应力分布(A 点)

(b)核心区混凝土主应力分布(B 点)

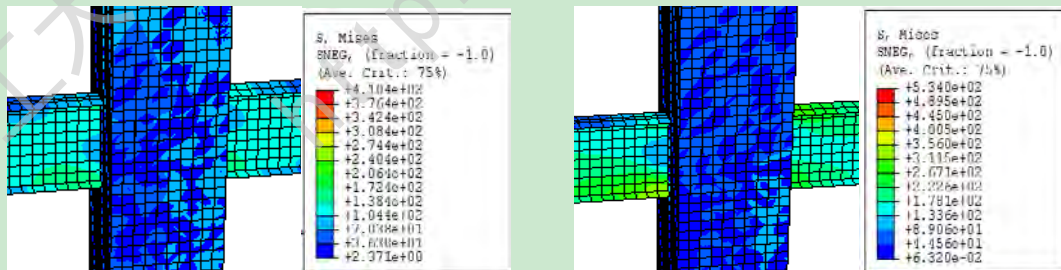


(c)核心区混凝土主应力分布(C 点)

图 2.14 混凝土柱第一主应力分布图

#### (4) 内隔板式节点剪应力变化规律

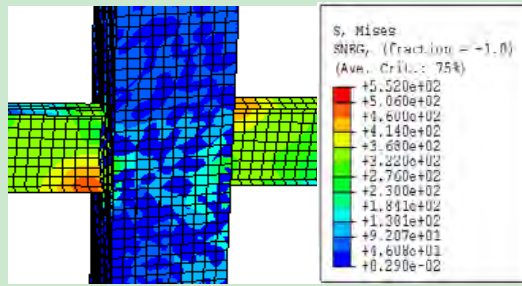
图 2.15 为内隔板式节点在加载下的节点域应力变化过程。从整个图来看，节点域的最大应力发生在钢梁与柱交接处，且钢梁的应力比钢管的应力大，随着加载的进行，节点域的应力逐步增大，以至到最后节点域处的部分钢梁腹板和翼缘已经达到屈服。由图 2.15(a)可得出，除钢梁梁端的局部应力集中区域外，最大应力达到 172.4MPa 左右，钢材还处在弹性阶段，符合协同工作阶段的特征。从图 2.15(b)可看出，节点域的最大应力发生在钢梁上，最大达到 356.0MPa 左右，表明节点域处的部分钢材已达到屈服，符合共同工作阶段的特征。由图 2.14(c)可看出，节点域处的钢梁腹板和翼缘屈服已经很明显，最大应力达到 506.0MPa 左右，其对节点域的抗剪贡献减小，从而导致节点域剪力下降，符合屈服强化阶段的特征。



(a) 节点核心区应力分布(A 点)

(b) 节点核心区应力分布(B 点)

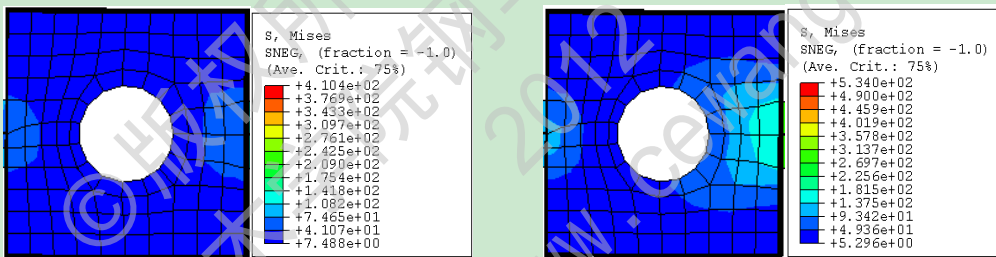




(c) 节点核心区应力分布(C点)

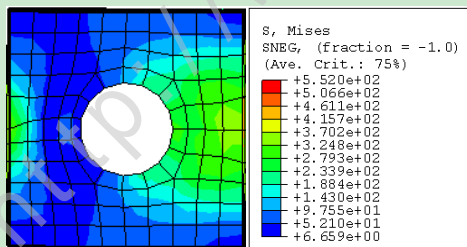
图 2.15 内隔板式节点核心区应力分布图

图 2.16 为内隔板在加载过程中的应力变化图。从图中可看出隔板的应力随着荷载的增加而增大，且最大应力发生在靠近钢梁的地方，其他区域应力较小。由图 2.16(a)可看出，在协同工作阶段隔板受力较钢梁小很多，最大应力在 108.2MPa 左右，节点域的抗剪承载力主要由钢梁和钢管混凝土柱承担，因此隔板对节点抗剪的贡献相对较小。由图 2.16(b)可看出，在进入共同工作阶段后，随着部分钢梁的屈服其对节点域抗剪的贡献相对减小，而混凝土的剪力传递模式也变为斜压杆机理，隔板的应力逐步增大，最大达到 181.5MPa 左右，其对节点抗剪的贡献也随之增大。由图 2.16(c)可看出，随着钢梁的继续屈服，隔板的应力也逐步增大，最大达到 370.2MPa 左右，部分已经屈服，隔板对节点抗剪贡献在其屈服后逐步减小。



(a) 隔板应力分布(A点)

(b) 隔板应力分布(B点)

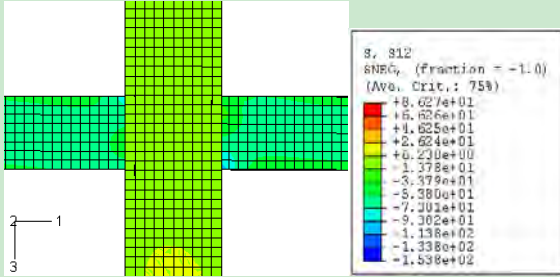


(c) 隔板应力分布(C点)

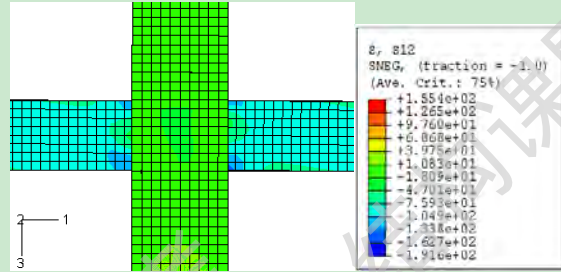
图 2.16 内隔板应力分布图

图 2.17 为节点域腹板、钢管剪应力分布图。从图 2.17(a)-(c)可看出节点域剪应力的变化规律：随着荷载的增加剪应力逐步增加，最大剪应力发生在节点域附近，并且大致成反对称分布，离节点域稍远的区域剪应力稍小。由图(a)可得出，核心区的钢管主要受的是拉应力，钢梁大部分区域为压应力，最大压应力在 73.81MPa 左右，最大拉应力为 6.23MPa 左右。由图(b)可知随着荷载的增加，节点域的剪应力也逐步增加，最大拉应力

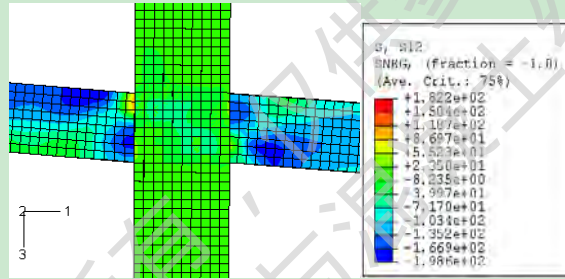
发生在钢管上，达到 39.75MPa 左右，最大压应力发生在钢梁上，达到 104.MPa 左右。从图(c)可看出在屈服强化阶段，钢梁腹板上的剪应力比较大，且明显成反对称分布，最大压应力达到 198.6MPa 左右，节点域的最大拉应力除了局部应力集中外，达到 86.07MPa 左右。



(a) 节点域腹板、钢管剪应力分布(A 点)



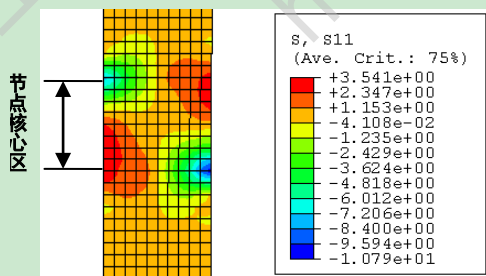
(b) 节点域腹板、钢管剪应力分布(B 点)



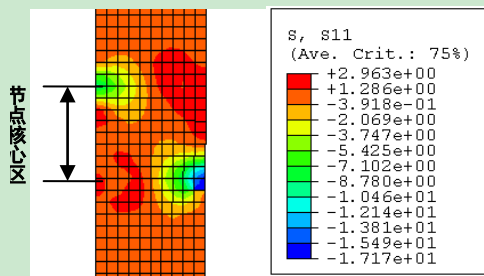
(c) 节点域腹板、钢管剪应力分布(C 点)

图 2.17 内隔板式节点核心区剪应力分布图

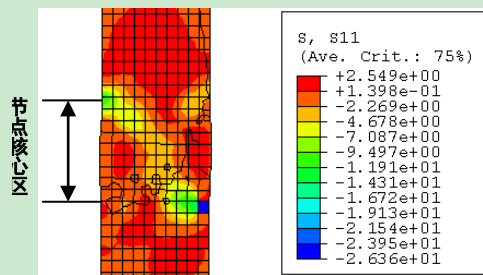
从图 2.18(a)-(c)可得出节点核心区混凝土的剪应力分布规律：随着加载的进行，混凝土的水平方向的剪应力逐步增加，且最大拉压应力大致成反对称分布，当到达屈服强化阶段的末尾时混凝土已经发生微裂缝。由图(a)可看出混凝土柱的最大剪应力发生在钢管混凝土柱与钢梁交接处，除局部应力集中外，最大压应力在 4.818MP 左右。由图(b)可看出核心区混凝土的剪应力随着荷载的增加而增大，最大压应力达到 8.78MPa 左右，且节点域内的混凝土剪应力逐步成带状分布，混凝土剪力传递机理逐步变为斜压杆模型理论。由图(c)可看出节点域混凝土最大剪应力明显成带状分布，这时混凝土主要靠斜压杆来传递剪力，最大压应力已经达到 14.31MPa 左右，混凝土柱内有轻微的裂缝。



(a)核心区混凝土主应力分布(A 点)



(b)核心区混凝土主应力分布(B 点)



(c)核心区混凝土主应力分布(C点)

图 2.18 混凝土柱第一主应力分布图

## 2.5 小结

本章介绍了运用 ABAQUS 有限元程序模拟钢管混凝土梁柱节点的基本方法，主要进行了以下工作：

(1) 介绍了钢管混凝土梁柱节点的受力机理以及其剪力-剪切变形曲线。节点受力包括柱端的剪力、弯矩、轴力和梁端方向的剪力、弯矩，梁端方向的轴力忽略不计。本章参照以前研究人员的研究成果分别列出了节点域剪力和剪切变形的计算方法。

(2) 理清了 ABAQUS 有限元程序建模的过程，包括：材性、单元类型的选择，边界条件和接触的处理，加载方式及网格的划分，方程的求解；

(3) 为了验证本文所建模型的合理性，根据以往的试验和数据，对该模型进行了试验验证，结果证明有限元模型曲线和实验曲线吻合良好；

(4) 对不同类型的钢管混凝土梁柱节点进行单调加载下的有限元分析，包括方钢管混凝土外加强环式节点、圆钢管混凝土外加强环式节点和内隔板式节点。根据所得的结果提出了节点的剪力-剪切变形曲线，分析节点在加载下的应力、应变变化规律，并分析该规律的原因。

## 第三章 钢管混凝土柱加强环节点受剪承载力

本章对钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点的抗剪承载力进行了分析。首先对影响节点剪力-剪切变形曲线的主要因素进行了归纳，然后对这些主要的影响因素进行了参数分析，并在这些结果上分析了参数对剪力-剪切变形曲线有影响的原因，最后对外加强环式节点的抗剪承载力计算方法进行了研究分析，并通过参数分析的结果进行回归得出了抗剪承载力的简化计算公式。

### 3.1 影响节点抗剪的主要因素

钢管混凝土梁柱节点域的剪力传递主要有三部分：一是由梁端方向传来的竖向剪力，它是通过钢梁的腹板传递到焊缝上，然后传给钢管壁，最后剪力由钢管壁传到管内混凝土；第二部分是由钢梁翼缘处传来的水平剪力，它经过翼缘传到加强环再传到钢管上，最后剪力由钢管传到核心混凝土；另一部分是柱端方向传来的水平剪力。

影响钢管混凝土柱-钢梁节点抗剪承载力有很多因素，除了节点形式之外，主要有以下几类：混凝土强度、钢材强度、钢管强度、环板宽度(厚度)、截面含钢率、轴压比、梁柱线刚度比、核心区高径比、柱端弯矩、梁端竖向剪力等。

(1) 混凝土强度、钢材强度以及钢管的厚度都是对抗剪有利的，在一定的程度上增大混凝土强度、提高钢材强度和加大钢管的强度都会提高节点的抗剪能力，当然对于不同的节点型式，节点的抗剪能力也是有差别的。

(2) 环板宽度(厚度)对节点抗剪是有利的，秦庚和王文达(2008)<sup>[73]</sup>提出：环板宽度是影响节点极限承载力的主要因素之一，随着环板宽度减小，节点的承载力就降低。内隔板式节点的隔板厚度在一定程度上也是有利于抗剪的。

(3) 在其他条件不变的情况下，增大截面含钢率可以提高钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力，因此截面含钢率对节点抗剪是有利的。

(4) 徐梦琴和许成祥(2007)<sup>[55]</sup>分析了轴压比对抗剪的影响，认为在一定范围内，柱端的轴向力越大，节点的斜压杆受压面积就越大，这将有利于节点抗剪。

(5) 梁柱线刚度比、核心区高径比的变化是通过截面尺寸来达到的，改变梁柱线刚度比或是核心区高径比都会对节点的抗剪产生一定的影响。

(6) 柱端弯矩和梁端竖向剪力都不利于节点的抗剪，柱端弯矩影响柱截面受压面积和管壁应力的分布，从而影响到节点的抗剪；梁端的竖向剪力在一定程度上会削弱钢管壁和核心混凝土的粘结作用，从而影响到钢管的抗剪作用以及处于套箍作用下的混凝土的抗剪作用。

### 3.2 剪力-剪切变形曲线的参数分析

由前所述,影响钢管混凝土梁柱节点抗剪的因素很多,为了研究节点的抗剪力学性能,下面就几个主要的影响参数进行分析。本章采用 ABAQUS 有限元软件对钢管混凝土中柱节点进行单调加载下的分析,典型试件采用第二章所建立的模型,相较于典型试件再变化一个参数来进行参数分析。参数分析中有限元模型的建立参照前一章节的建模过程。节点有限元试件的各种参数如表 3.1。

表 3.1 参数分析的有限元试件明细表

编号	混凝土 强度 $f_{cu}$ N/mm <sup>2</sup>	钢梁屈服 强度 $f_b$ N/mm <sup>2</sup>	钢管屈服 强度 $f_t$ N/mm <sup>2</sup>	加强环板 宽度 $b$ mm	柱截面含 钢率 $\alpha_s$ —	梁柱线刚 度比 $k_m$ —	柱轴 压比 $n$ —	核心区高 径比 $h/D$ —
S1	60	345	345	100	0.108	0.163	0.3	1
S2	40	345	345	100	0.108	0.168	0.3	1
S3	80	345	345	100	0.108	0.160	0.3	1
S4	60	235	345	100	0.108	0.163	0.3	1
S5	60	390	345	100	0.108	0.163	0.3	1
S6	60	420	345	100	0.108	0.163	0.3	1
S7	60	345	235	100	0.108	0.163	0.3	1
S8	60	345	390	100	0.108	0.163	0.3	1
S9	60	345	420	100	0.108	0.163	0.3	1
S10	60	345	345	60	0.108	0.163	0.3	1
S11	60	345	345	140	0.108	0.163	0.3	1
S12	60	345	345	180	0.108	0.163	0.3	1
S13	60	345	345	100	0.05	0.163	0.3	1
S14	60	345	345	100	0.15	0.163	0.3	1
S15	60	345	345	100	0.20	0.163	0.3	1
S16	60	345	345	100	0.108	0.109	0.3	1
S17	60	345	345	100	0.108	0.217	0.3	1
S18	60	345	345	100	0.108	0.272	0.3	1
S19	60	345	345	100	0.108	0.163	0.4	1
S20	60	345	345	100	0.108	0.163	0.6	1
S21	60	345	345	100	0.108	0.163	0.8	1
S22	60	345	345	100	0.108	0.163	0.3	0.75
S23	60	345	345	100	0.108	0.163	0.3	1.25
S24	60	345	345	100	0.108	0.163	0.3	1.50
C1	60	345	345	100	0.108	0.252	0.3	1



C2	40	345	345	100	0.108	0.261	0.3	1
C3	80	345	345	100	0.108	0.246	0.3	1
C4	60	235	345	100	0.108	0.252	0.3	1
C5	60	390	345	100	0.108	0.252	0.3	1
C6	60	420	345	100	0.108	0.252	0.3	1
C7	60	345	235	100	0.108	0.252	0.3	1
C8	60	345	390	100	0.108	0.252	0.3	1
C9	60	345	420	100	0.108	0.252	0.3	1
C10	60	345	345	60	0.108	0.252	0.3	1
C11	60	345	345	140	0.108	0.252	0.3	1
C12	60	345	345	180	0.108	0.252	0.3	1
C13	60	345	345	100	0.05	0.252	0.3	1
C14	60	345	345	100	0.15	0.252	0.3	1
C15	60	345	345	100	0.20	0.252	0.3	1
C16	60	345	345	100	0.108	0.168	0.3	1
C17	60	345	345	100	0.108	0.336	0.3	1
C18	60	345	345	100	0.108	0.420	0.3	1
C19	60	345	345	100	0.108	0.252	0.4	1
C20	60	345	345	100	0.108	0.252	0.6	1
C21	60	345	345	100	0.108	0.252	0.8	1
C22	60	345	345	100	0.108	0.252	0.3	0.75
C23	60	345	345	100	0.108	0.252	0.3	1.25
C24	60	345	345	100	0.108	0.252	0.3	1.50

注：表内符号“S”代表方钢管混凝土节点，符号“C”代表圆钢管混凝土节点。

### 3.2.1 柱混凝土强度

由图 3.1 可看出，在相同的条件下，不同的混凝土强度对钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力影响不大。对方钢管混凝土节点，随着混凝土强度的增大，节点域的抗剪承载力有一定的增加，但增加幅度不大。并且混凝土强度从 C40 到 C60 比从 C60 到 C80 的抗剪承载力增大幅度大。对圆钢管混凝土节点，其承载力有很小的提高，提高的幅度几乎可以忽略不计。

混凝土和钢材的剪变模量分别按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB50010 和《钢结构设计规范》GB50017 的规定采用，由此可知钢材的剪变模量远远大于混凝土的剪变模量。因此混凝土强度对抗剪承载力影响不大的原因可能是钢材的抗剪刚度比混凝土抗剪刚度大，钢材对节点抗剪刚度的贡献大，从而导致混凝土强度对节点的受剪承载力影响不大。

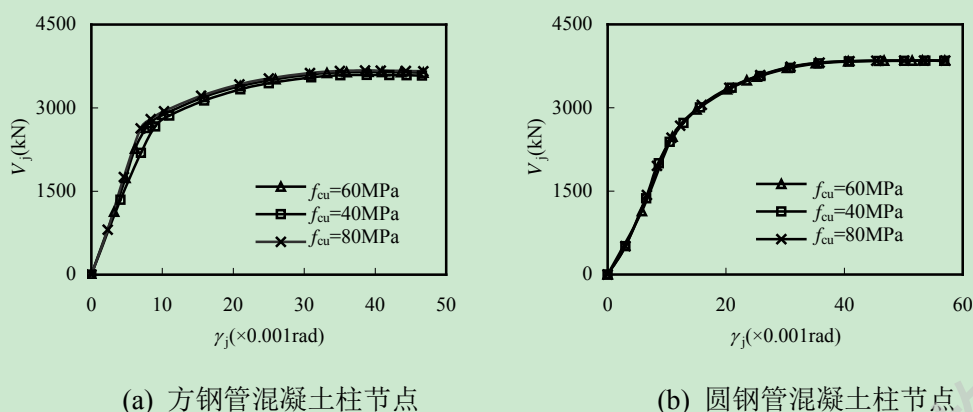


图 3.1 柱混凝土强度对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.2 钢梁强度

由图 3.2 可得出，钢梁的强度对节点的抗剪受力性能的影响比较大，但在协同工作阶段和共同工作阶段影响不明显。从图 3.2(a)知，随着方钢管混凝土节点的钢梁强度从  $f_y=235\text{MPa}$  变化到  $f_y=420\text{MPa}$ ，节点的抗剪承载力逐步增大。并且由钢材 Q235 变化到钢材 Q345 时的剪力增大幅度比较大，此后的增大幅度相对较小。从图 3.3(b)知，圆钢管混凝土节点的抗剪承载力随着钢梁强度的增大而增大。钢材强度从  $f_y=235\text{MPa}$  增大到  $f_y=345\text{MPa}$  时，抗剪承载力变化比较大，但从  $f_y=345\text{MPa}$  到  $f_y=390\text{MPa}$  时承载力变化幅度很小，而从  $f_y=390\text{MPa}$  到  $f_y=420\text{MPa}$  时抗剪承载力增加的非常小，几乎可以忽略不计。

在协同工作阶段和共同工作阶段，钢材强度对抗剪承载力之所以影响不明显是因为在这两个阶段钢材还没达到屈服，处在弹性阶段的钢材抗剪刚度是一定的，在其他条件不变的情况下，节点的抗剪刚度变化也不大，因此抗剪承载力也变化不大。在进入屈服强化阶段后，随着钢材抗剪强度的提高，节点的抗剪承载力也有所提高。

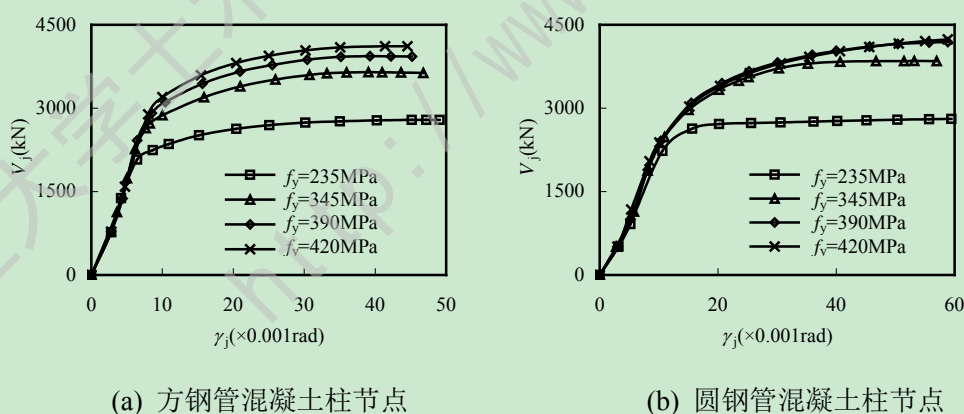


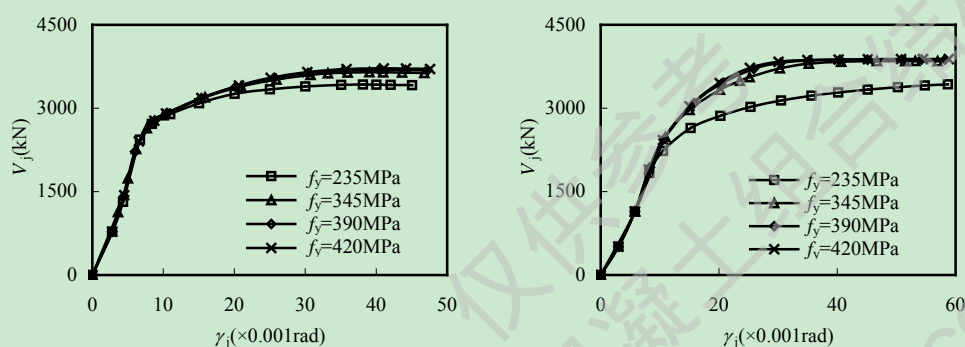
图 3.2 钢梁强度对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.3 柱钢管强度

由图 3.3 可知，钢管强度的变化对钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力有一定的影响，其影响程度相较于钢材强度较小。对于方钢管混凝土节点，钢管强度从  $f_y=235\text{MPa}$  到  $f_y=345\text{MPa}$  时抗剪承载力有一定增加，但从  $f_y=345\text{MPa}$  变化到  $f_y=420\text{MPa}$  时承载力几

乎没有什么增加。对于圆钢管混凝土节点，其剪力-剪切变形曲线的变化趋势和方钢管混凝土节点一样，但相较于前者在钢管强度从 $f_y=235\text{MPa}$ 变化到 $f_y=345\text{MPa}$ 时剪力增大的幅度大一些。

钢管强度对节点抗剪承载力的影响比钢材强度的影响小是因为本文采用的是强柱弱梁模型，节点的最终破坏发生在梁上，钢管混凝土柱-钢梁节点的刚度和承载力主要取决于梁而不是柱。钢管强度从 $f_y=235\text{MPa}$ 变化到 $f_y=345\text{MPa}$ 时，抗剪承载力增大幅度大是因为两者的抗剪强度增加幅度比较大，而钢材强度从 $f_y=345\text{MPa}$ 到 $420\text{MPa}$ 时承载力提高幅度不大是因为其抗剪强度增大幅度不大。



(a) 方钢管混凝土柱节点

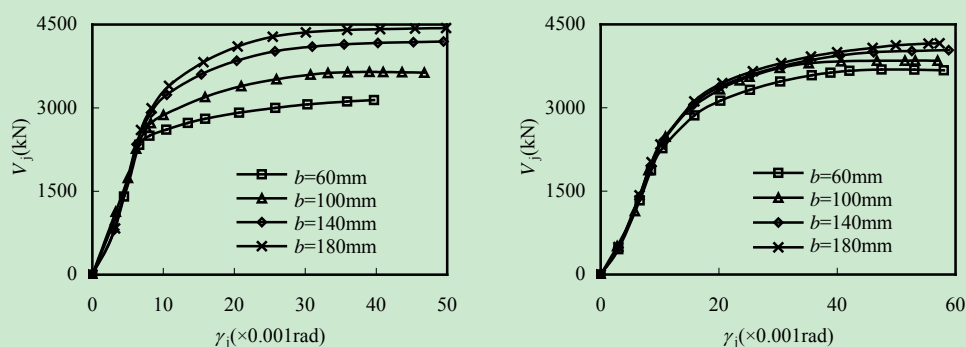
(b) 圆钢管混凝土柱节点

图 3.3 柱钢管强度对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.4 节点环板宽度

在工程上将钢管混凝土柱-钢梁节点设计成外加强环板式就是为了提高节点的承载力，可见环板是有利于节点受力的。根据有限元分析结果，由图 3.4 可看出随着环板宽度增大，节点的抗剪承载力也逐步提高，可见环板宽度的大小也是影响节点抗剪因素之一。对于方钢管混凝土节点，从图 3.4(a)可看出随着环板宽度的增大，节点的抗剪承载力也逐步增大，且增加的幅度较大。对于圆钢管混凝土节点，从图 3.4(b)可看出当环板宽度从 $60\text{mm}$ 到 $100\text{mm}$ 时，节点的抗剪承载力增大幅度比较大。此后随环板宽度增加，抗剪承载力增加幅度比较小。在抗剪受力过程的前三个阶段几乎没什么增大，只在最后的极限变形阶段增加幅度大些。

钢管混凝土柱-钢梁节点梁端的剪力包括两种：梁端竖向剪力和梁端水平剪力。梁端竖向剪力是通过腹板传到钢管，再由钢管传到核心区混凝土上。而梁端水平剪力是通过钢梁翼缘传到加强环，再由加强环传到钢管和核心区混凝土。随着加强环宽度的增大，那么加强环的水平抗剪能力也就增加，随之其对节点域抗剪的贡献也就越有利，因此增大环板宽度可以提高节点的抗剪承载力。



(a) 方钢管混凝土柱节点

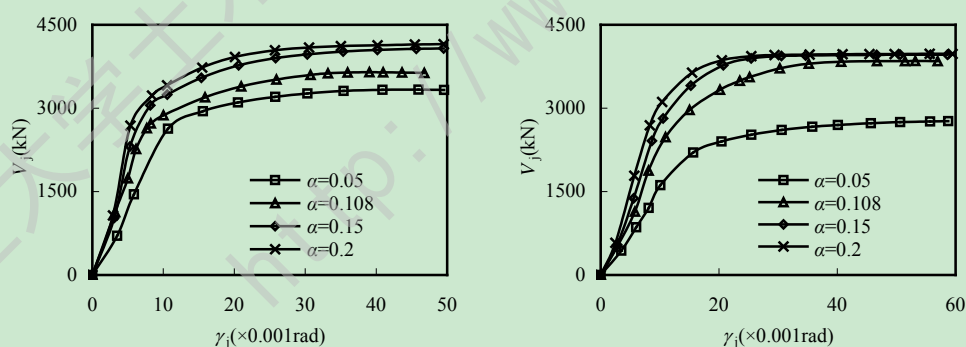
(b) 圆钢管混凝土柱节点

图 3.4 节点环板宽度对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.5 柱截面含钢率

柱截面含钢率的变化实际上就是通过调整柱钢管的厚度来实现含钢率的变化。由图 3.5 可看出，柱的截面含钢率对节点抗剪承载力有较明显的影响，随着截面含钢率的提高，节点的抗剪承载力也逐步提高。对于方钢管混凝土节点，抗剪承载力随含钢率的增加幅度大致一致，在从含钢率为 0.15 到 0.2 时的增加幅度稍小。对圆钢管混凝土节点，含钢率从 0.05 到 0.108 时承载力增大幅度较大，此后的增加幅度降低到很小。并且从图中可看出方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点一样，其前期阶段的剪切刚度随着含钢率的增大而明显增大。

钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力主要是由钢管腹板和核心混凝土提供，增加钢管壁的厚度能提高钢管的刚度，从而提高柱子的刚度和抗剪承载力。但增加钢管壁厚度对节点的延性和强度的储备不利，所以在实际工程中并不是越厚的钢管就越安全，要考虑各方面因素取最合适的值才是最安全的。



(a) 方钢管混凝土柱节点

(b) 圆钢管混凝土柱节点

图 3.5 柱截面含钢率对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.6 柱轴压比

改变节点的轴压比实际上就是通过改变柱上作用的轴力来实现的，如图 3.6 所示，轴压比对节点的抗剪有一定的影响。由图 3.6(a)可得出，方钢管混凝土节点轴压比从 0.3

到 0.4 时节点的抗剪承载力有一定增大,但增大幅度很小。当节点的轴压比从 0.4 到 0.8 时,抗剪承载力却反而减小。同样,从图 3.6(b)可看出圆钢管混凝土节点的轴压比从 0.3 到 0.4 时,节点的受剪承载力有一定增加,增大幅度不大。当节点的轴压比从 0.4 到 0.8 时抗剪承载力逐步降低。由此可得出柱上的轴力在一定的范围内可以增大节点的抗剪承载力,超过这个范围则对节点抗剪产生不利的影响。

钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力与钢管壁的环向应力有关。在一定范围内,随着钢管混凝土柱上的轴力增大,管壁环向应力增大,核心区混凝土的受压面积增大,这是由利于节点抗剪的。当柱上的轴力增大到一定值,使得混凝土某截面上产生裂缝,进而导致混凝土被轴压力压碎,这时混凝土的抗剪承载力降低,从而使得节点域的抗剪承载力也随之降低。

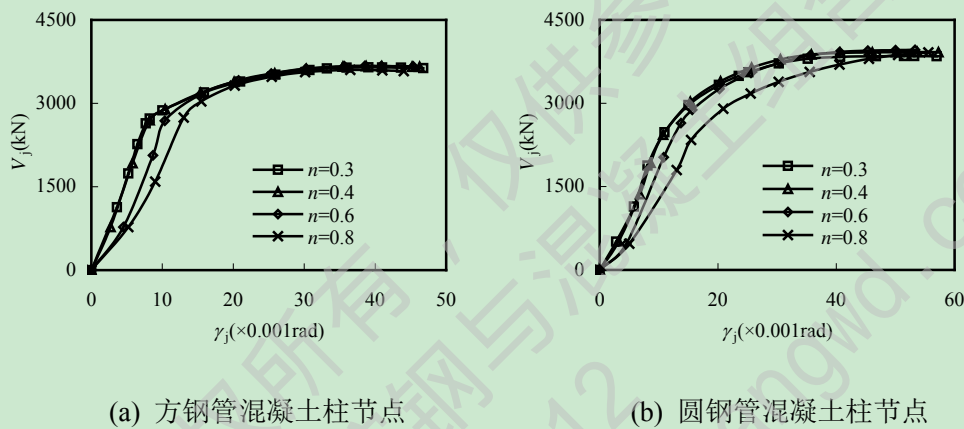


图 3.6 柱轴压比对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.7 梁柱线刚度比

通过改变梁和柱的截面尺寸或是改变梁和柱的长度都可以达到改变梁柱线刚度比的目的,本文采用改变柱的长度来改变梁柱线刚度。分别采用柱长为 2000mm、3000mm、4000mm、5000mm 的数值来分析梁柱线刚度比对节点抗剪承载力的影响。对应与上面所采用的柱长,方钢管混凝土节点的梁柱线刚度比依次为 0.109、0.163、0.217、0.272,圆钢管混凝土节点的梁柱线刚度比依次为 0.168、0.252、0.336、0.420。

如图 3.7 所示,梁柱线刚度比对节点的抗剪承载力有很大的影响,随着线刚度比的增大,节点的抗剪承载力逐步降低。由图 3.7(a)可看出在相同条件下,随着线刚度比的增大,方钢管混凝土节点域的剪切变形减小,抗剪承载力也逐步减小,并且减小的幅度比较大。从图 3.7(b)可得出圆钢管混凝土节点的抗剪承载力同方钢管混凝土节点一样,随着梁柱线刚度比的增大而减小。这是因为增大梁柱线刚度比就相当于增大了钢梁的刚度,而钢梁的刚度增大后就会使得梁对柱的约束更强,从而使得节点的剪切变形更小。因此在同样的剪切变形下,梁柱线刚度比大的节点抗剪承载力越小。



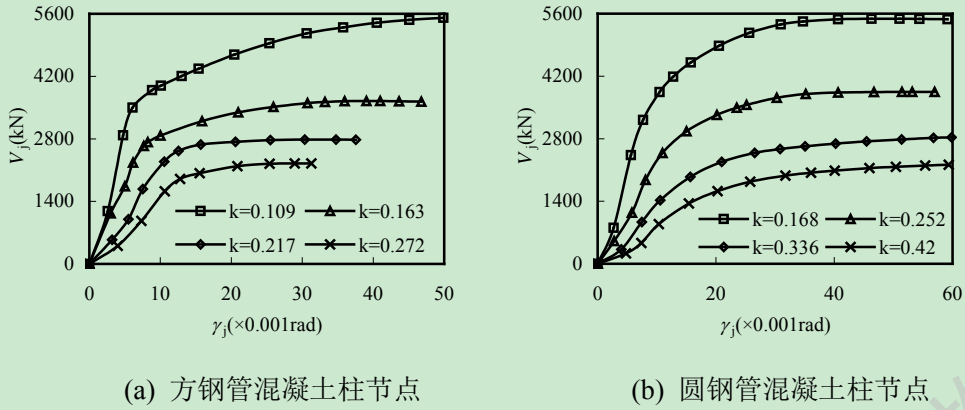


图 3.7 梁柱线刚度比对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.2.8 核心区高径比

根据核心区高径比的定义可知，通过改变核心区的高度或直径可以达到改变高径比的要求。本文采用改变核心区的高度来改变核心区的高径比，分别采用高度为 300mm、400mm、500mm、600mm。相应于上面采用的高度，方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点的高径比依次为 0.75、1.0、1.25、1.5。

从图 3.8 可看出核心区高径比对节点的抗剪承载力有一定的影响，随着高径比的增大，节点的抗剪承载力总体呈增大的趋势。由图 3.8(a)可得方钢管混凝土节点在相同的条件下，抗剪承载力在协同工作阶段和共同工作阶段随着高径比的增大几乎不变，而在后面的两阶段随着高径比的增大而增大，且增大的幅度大致一致。高径比为 0.75 时的节点在加载还没完成的时候梁端就已经屈服破坏，因此曲线较其他三条短些。由图 3.8(b)可知圆钢管混凝土节点的抗剪承载力同样随着核心区高径比的增大而增大，与方钢管混凝土节点不同的是其在后两阶段增大的幅度不一致，从高径比为 0.75 增大到 1 时的抗剪承载力增大幅度较大，后面的增加幅度较小。在抗剪受力过程的前两阶段节点的抗剪承载力几乎不变，是因为钢管和混凝土处在共同工作的情况，材料都处在弹性阶段，虽然增大了节点域的高度，但管壁环向应力几乎没什么变化，因此抗剪承载力几乎没变化。但在进入后期后，混凝土的剪力传递机理变为斜压杆机理，增大核心区的高度也就增大了核心区混凝土斜压杆受压面积，这是有利于节点抗剪的。

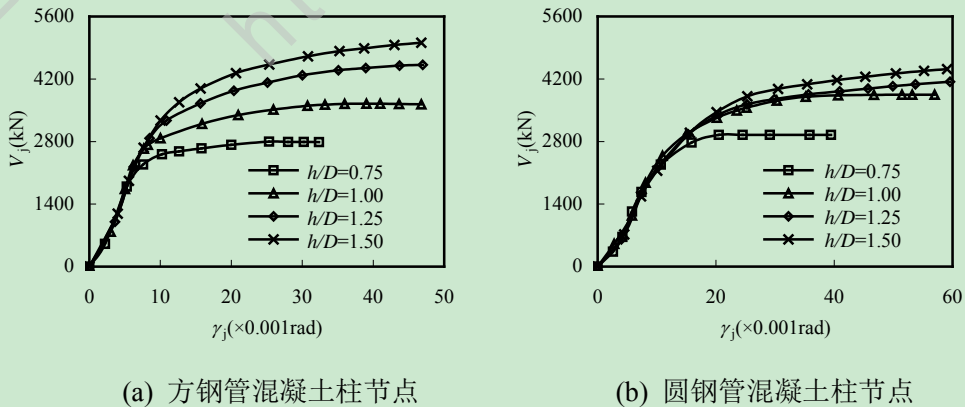


图 3.8 核心区高径比对剪力-剪切变形曲线的影响

### 3.3 钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点抗剪承载力计算方法

节点核心区的剪切屈服是钢管混凝土节点的一种重要的屈服模式，目前国内外的研究人员依据试验和有限元模型结果得出了一些重要的结论，并在此基础上提出了节点的抗剪承载力公式。

张大旭(2000)<sup>[43]</sup>推导了圆钢管混凝土节点的核心区抗剪承载力，其运用力学的方法引入破坏面的概念，提出了在压弯情况下节点核心区的斜截面抗剪承载力。公式将节点的抗剪承载力分成钢管和混凝土两部分考虑：

$$V_{sc} = V_s + V_c$$

$$= \pi t R (0.1 f_y c t g \theta + \sqrt{0.99 f_y^2 - \left(\frac{N}{A_s + (E_c / E_s) A_c}\right)^2 - \frac{0.1 f_y N}{3(A_s + (E_c / E_s) A_c)}}) + 1.5(0.1 + 0.1n) f_c A_c \quad (3.1)$$

其中，式中符号

$V_{sc}$ 、 $V_s$ 、 $V_c$ —节点核心区、钢管和核心区混凝土抗剪承载力

$R$ 、 $t$ 、 $\theta$ —圆钢管半径，管壁厚度、斜截面夹角

$E_c$ 、 $E_s$ 、 $f_y$ —混凝土弹性模量、钢材弹性模量和屈服强度

$A_c$ 、 $A_s$ —核心混凝土截面面积、钢管截面面积

$N$ 、 $n$ —柱顶轴力、轴压比

这是较早提出的圆钢管混凝土节点核心区抗剪承载力公式，它是理论推导的公式，由于其没有考虑加强环的贡献、混凝土和钢管的共同作用及钢梁对节点抗剪的贡献等，所以公式有待于完善。

Nishiyama(2004)<sup>[47]</sup>在日本规范 AIJ 的基础上提出了圆钢管混凝土节点和方钢管混凝土节点的受剪承载力计算方法，其将钢管和核心混凝土对节点的抗剪贡献叠加得到抗剪承载力，下面列出了圆钢管混凝土节点的屈服抗剪承载力公式：

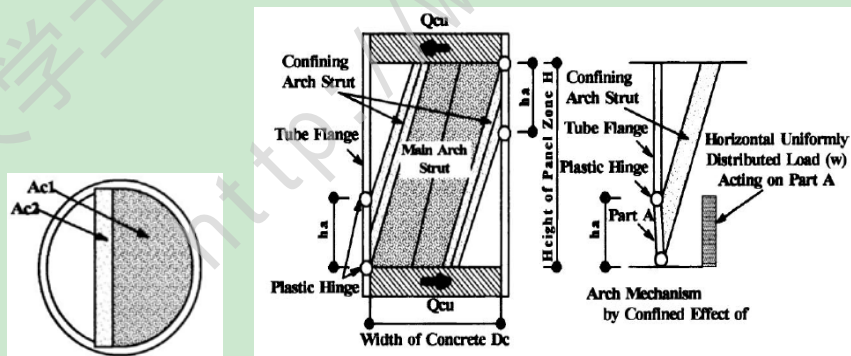


图 3.9 节点斜压杆机理

$$Q_{py} = Q_{psy} + Q_{pcy} \quad (3.2)$$

$$Q_{psy} = A_w \sqrt{\sigma_{syp}^2 - \sigma_{pso}^2} / \sqrt{3} \quad (3.3)$$

$$Q_{pcy} = \beta_c Q_{pcm} \quad (3.4)$$

$$Q_{pcm} = \left( \frac{1}{2} A_{c1} \sin 2\theta_1 + 2B_f h_a \sin^2 \theta_2 \right) \sigma_{cB} \quad (3.5)$$

$$\beta_c = 0.425N / N_{po} - 1.13\sigma_{cB} / \sigma_{syp} + 0.650 \quad (3.6)$$

$$h_a = 2 / [\sin \theta_2 \sqrt{M_{fpc} / (B_f \sigma_{cB})}] \quad (3.7)$$

$$M_{fpc} = 0.02915(D_{sp} - t_{sp})^2 t_{sp} \sigma_{syp} \quad (3.8)$$

式中： $Q_{psy}$  为钢管柱的屈服抗剪承载力， $Q_{pcy}$  为核心混凝土柱的屈服抗剪承载力

$A_w$  为钢管柱腹板面积， $A_w = A_s / 2$ ， $\sigma_{cB}$  为混凝土抗压强度标准值  $f_{ck}$

$\sigma_{ps0}$  为钢管柱的轴向应力， $\sigma_{ps0} = NA_s E_s / [A_s (A_s E_s + A_c E_c)]$

$\beta_c$  为核心区混凝土受剪屈服荷载和极限荷载的比值

$B_f$  为钢管翼缘宽度， $B_f = (D_c + t_{sp}) / \sqrt{2}$ ， $\sigma_{syp}$  为钢材屈服强度

$A_{c1}$  为图中标识面积， $A_{c1} = D_c^2 / [8(\phi - \sin \phi)]$ ，其中  $\phi = 3.4(h / D_c)^{-0.07}$

$\theta_1 = 0.34(h / D_c)^{-0.79}$ ， $\theta_2 = 0.40(h / D_c)^{-0.8} = 1.2\theta_1$

$t_{sp}$  为钢管柱翼缘厚度， $D_{sp}$  为钢管直径

$h$  为节点域混凝土高度， $D_c$  为节点域混凝土宽度

该公式提出了圆钢管混凝土节点的抗剪承载力，其将钢管柱腹板和混凝土的抗剪贡献叠加得到承载力公式。公式由于没有考虑各种影响承载力的因素，经大量计算其抗剪承载力值偏低。

《矩形钢管混凝土结构技术规程》<sup>[74]</sup>给出了带内隔板的矩形钢管混凝土柱与钢梁的刚性焊接节点的抗剪承载力公式。公式中考虑了柱焊缝(柱腹板)、内隔板和核心区混凝土斜压杆对节点抗剪的贡献。

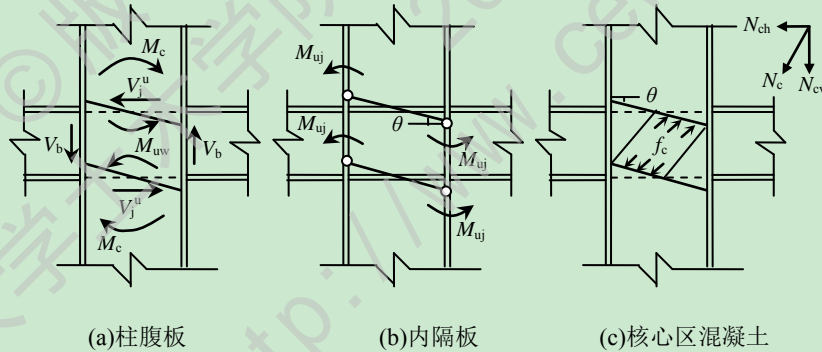


图 3.10 矩形钢管混凝土节点剪切屈服机制

根据节点的剪切屈服机制，由虚功原理得：

$$\begin{aligned} Vh_b \theta &= 2M_c \theta - V_b h_c \theta \\ &= 2N_y h_c \theta + 4M_{uw} \theta + 4M_{uj} \theta + N_{cv} h_c \theta / 2 \end{aligned} \quad (3.9)$$

其中，上式：

$$N_y = \min\left(\frac{\alpha_c h_b f_w}{\sqrt{3}}, \frac{th_b f}{\sqrt{3}}\right) \quad (3.10)$$

$$M_{uw} = h_b^2 t [1 - \cos(\sqrt{3}h_c / h_b)] f / 6 \quad (3.11)$$

$$M_{uj} = b_c t_j^2 f_j / 4 \quad (3.12)$$

$$N_{cv} = 2b_c h_c f_c / [(h_c / h_b)^2 + 4] \quad (3.13)$$

因此，节点的抗剪承载力为：

$$V_u^j = (2N_y h_c + 4M_{uw} + 4M_{uj} + N_{cv} h_c / 2) / h_b \quad (3.14)$$

其中： $M_{uw}$ 、 $M_{uj}$ 、 $N_{cv}$ —柱腹板和内隔板的弯矩贡献、核心区混凝土的抗压承载力

$V$ 、 $V_b$ 、 $M_c$ —节点受剪设计值、梁端剪力设计值、柱端弯矩设计值

$h_b$ 、 $b_c$ 、 $h_c$ —钢梁高度、钢管混凝土柱截面的宽度和高度

$f_w$ 、 $f$ 、 $f_j$ —焊缝、钢管、内隔板钢材的抗拉强度设计值

$t$ 、 $t_j$ 、 $\alpha_c$ —钢管壁厚、内隔板厚、钢管角部有效焊缝厚度

该公式运用理论的方法推导了抗剪承载力，将节点看成一个整体，运用虚功原理并考虑各种因素的影响来分析抗剪承载力，相较于以前把节点分成几个部分来考虑有更进一步的优势和实用性。

聂建国(2007)<sup>[56]</sup>在低周反复荷载试验的基础上，对方钢管混凝土柱节点的抗剪承载力进行了研究，其将节点的抗剪分为三个部分，最后将它们叠加得到了节点域的屈服抗剪承载力和极限抗剪承载力。公式如下：

$$\begin{aligned} V_{jy} &= V_{jwy} + V_{jfy} + V_{jcy} \\ &= \frac{118t_{cf}(d_c - 2t_{cf})}{\sqrt{3}} \times \sqrt{f_{ycws}^2 - \sigma_s^2} + \frac{4M_{y2idcf}}{h_b - t_{bf}} + 0.109(f_{ck})_{eff}(d_c - 2t_{cf})(b_c - 2t_{cf}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} V_{ju} &= V_{jwu} + V_{jfu} + V_{jcu} \\ &= \frac{118t_{cf}(d_c - 2t_{cf})}{\sqrt{3}} \times \sqrt{f_{ucws}^2 - \sigma_s^2} + \frac{4M_{u2idcf}}{h_b - t_{bf}} + 0.13(f_{ck})_{eff}(d_c - 2t_{cf})(b_c - 2t_{cf}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

式中： $V_{jwy}$ 、 $V_{jfy}$ 、 $V_{jcy}$ —钢管腹板屈服剪力、钢管翼缘与外隔板组成的钢板框架的屈服剪力、混凝土压杆屈服抗剪承载力

$V_{jwu}$ 、 $V_{jfu}$ 、 $V_{jcu}$ —钢管腹板极限剪力、钢管翼缘与外隔板组成的钢板框架的极限剪力、混凝土压杆极限抗剪承载力

$f_{ycws}$ 、 $f_{ucws}$ —钢管腹板屈服强度、钢管腹板极限强度

$M_{y2idcf}$ —钢管翼缘与外隔板对节点的屈服弯矩贡献的小值

$M_{u2idcf}$ —钢管翼缘与外隔板对节点的极限弯矩贡献的小值

$t_{cf}$ 、 $t_{bf}$ —钢管壁厚、钢梁翼缘厚度

$d_c$ 、 $h_b$ —钢管宽度、钢梁高度

聂建国(2009)<sup>[62]</sup>推导了方钢管混凝土节点的抗剪承载力，其将节点的抗剪承载力贡献分为三个部分：钢管腹板、钢管翼缘与内隔板或外环板组成的钢板框架、核心区混凝土，将三部分叠加得到了公式，叠加得到的典型方钢管混凝土柱-钢梁节点的剪力-剪切变形曲线如图 3.11。

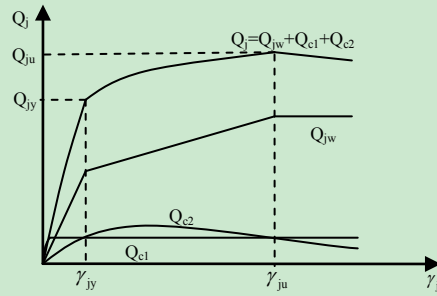


图 3.11 节点剪力-剪切变形叠加曲线

图中符号： $Q_j$ 、 $Q_{jy}$ 、 $Q_{ju}$ —节点域剪力、节点域屈服抗剪承载力、节点域极限抗剪承载力

$Q_{c1}$ 、 $Q_{c2}$ 、 $Q_{jw}$ —混凝土直接抗剪能力、混凝土斜压杆抗剪能力、钢管腹板抗剪能力

$\gamma_j$ 、 $\gamma_{jy}$ 、 $\gamma_{ju}$ —节点域剪切变形、节点域屈服剪切变形、节点域极限剪切变形

此外，周天华、肖万松等都对钢管混凝土节点的抗剪性能进行了研究，并提出了相关的抗剪承载力公式。周天华(2005)<sup>[51]</sup>推导了内隔板式节点的抗剪承载力，它将节点的承载力划分为几个部分，然后叠加得到承载力公式，并考虑了轴压比对节点抗剪承载力的影响。肖万松(2007)<sup>[54]</sup>运用斜压短柱理论分析了钢管混凝土柱-钢梁内隔板式节点域混凝土受剪承载力，应用虚功原理推导出节点域受剪承载力计算公式。

本文将节点域的屈服抗剪承载力作为节点抗剪承载力(以下同此)。现引用公式 3.1 来计算圆钢管混凝土节点的极限抗剪承载力，然后利用核心区屈服抗剪承载力大致为极限抗剪承载力的 0.7 倍<sup>[67]</sup>来计算节点的屈服抗剪承载力。方钢管混凝土节点引用规范公式 3.14 来简化计算本文外加强环式节点的抗剪承载力。为了验证有限元计算结果的合理性，将公式值与有限元计算结果值进行对比，具体计算如表 3.2。

表 3.2 抗剪承载力计算值比较

编号	规范值 <sup>[74]</sup>	有限元值	$V_u^g / V_u^f$	编号	公式值 <sup>[43]</sup>	有限元值	$V_u^g / V_u^f$
S1	2343	2634	0.89	C1	2042	2957	0.69
S2	2074	2568	0.81	C2	1912	2926	0.65
S3	2612	2678	0.97	C3	2171	2983	0.73
S4	2334	2126	1.1	C4	2042	2465	0.83
S5	2347	2915	0.81	C5	2042	2985	0.68
S6	2348	3091	0.76	C6	2042	3020	0.67
S7	1904	2615	0.73	C7	1493	2392	0.62
S8	2528	2681	0.94	C8	2263	3029	0.75
S9	2574	2725	0.94	C9	2410	3073	0.78
S10	2343	2329	1.01	C10	2042	2853	0.72



S11	2343	2989	0.78	C11	2042	3051	0.67
S12	2343	3208	0.73	C12	2042	3117	0.65
S13	1593	2607	0.60	C13	1182	2205	0.54
S14	2842	2833	1.00	C14	2615	3221	0.81
S15	3405	2952	1.15	C15	3266	3419	0.96
S16	2343	3358	0.70	C16	2042	3843	0.53
S17	2343	2217	1.06	C17	2042	1921	1.06
S18	2343	1775	1.32	C18	2042	1317	1.55
S19	2343	2672	0.88	C19	2074	3016	0.69
S20	2343	2607	0.90	C20	2139	2637	0.81
S21	2343	2584	0.91	C21	2205	2327	0.95
S22	2488	2196	1.13	C22	2042	2622	0.78
S23	2215	3101	0.71	C23	2042	3032	0.67
S24	2113	3349	0.63	C24	2042	3114	0.66

注：表内所得抗剪承载力值为屈服抗剪承载力值，单位为 kN； $V_u^g$  代表公式值， $V_u^f$  代表有限元值。

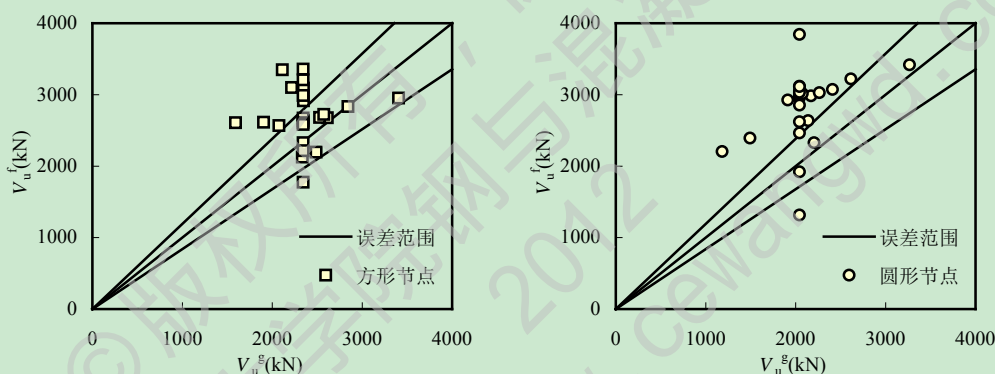


图 3.12 节点抗剪屈服承载力与误差范围

从上表和图 3.12 可得出，方钢管混凝土节点的有限元抗剪承载力值与规范值吻合较好，但也有一些参数在公式里没体现出来，比如环板宽度、梁柱线刚度比、轴压比对节点抗剪的有利影响都没体现在公式里，因此有必要对受剪承载力公式进行更深入的分析研究。对于圆钢管混凝土节点的抗剪承载力，公式值偏于保守，其没有考虑各种因素对节点域抗剪的贡献，因此算出的值会偏小。总体来说，除了个别点外，公式值偏于保守，有限元值偏大。

### 3.4 钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点抗剪承载力简化计算

钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力由于形式的多样以及影响参数复杂，所以以往研究人员提出的抗剪承载力公式很难覆盖住全面的影响因素，因此有必要对受剪承载力进行更深入的分析。通过前面章节的分析，本小节将通过参数回归得到各种因素对节点承载力的影响，从而提出简化后的抗剪承载力公式。

### 3.4.1 节点抗剪承载力简化计算

通过前面的分析，得出钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力与混凝土强度、钢梁强度、钢管强度、环板宽度等有关，下面运用专业绘图软件 origin7.5<sup>[75]</sup>对各种参数进行回归，得到拟合曲线公式，并在此基础上得到节点域屈服抗剪承载力公式。

#### (1)方钢管混凝土节点屈服抗剪承载力

如图 3.13，图中列出了方钢管混凝土节点屈服抗剪承载力与参数之间的数学关系，则节点域的屈服抗剪承载力为：

- a) 屈服抗剪承载力与混凝土强度之间的数学关系

$$V_{y1} = 2461.67 + 2.75f_{cu} \quad (3.17-1)$$

- b) 屈服抗剪承载力与钢梁强度之间的数学关系

$$V_{y2} = 890.58 + 5.18f_b \quad (3.17-2)$$

- c) 屈服抗剪承载力与钢管强度之间的数学关系

$$V_{y3} = 3030.46 - 3.09f_t + 0.0056f_t^2 \quad (3.17-3)$$

- d) 屈服抗剪承载力与环板宽度之间的数学关系

$$V_{y4} = 1892.4 + 7.48b \quad (3.17-4)$$

- e) 屈服抗剪承载力与截面含钢率之间的数学关系

$$V_{y5} = 2444.23 + 2458.84\alpha_s \quad (3.17-5)$$

- f) 屈服抗剪承载力与梁柱线刚度比之间的数学关系

$$V_{y6} = 4474.95 - 9876.24k_m \quad (3.17-6)$$

- g) 屈服抗剪承载力与轴压比之间的数学关系

$$V_{y71} = 2520 + 380n \quad (0.3 \leq n \leq 0.4) \quad (3.17-7)$$

$$V_{y72} = 2928 - 850n + 525n^2 \quad (0.4 < n \leq 0.8) \quad (3.17-8)$$

- h) 屈服抗剪承载力与核心区高厚比之间的数学关系

$$V_{y8} = 1053.3 + 1570.4h/D \quad (3.17-9)$$

整理公式(3.17-1)–公式(3.17-9)，则得到方钢管混凝土柱-钢梁节点的屈服抗剪承载力公式如下：

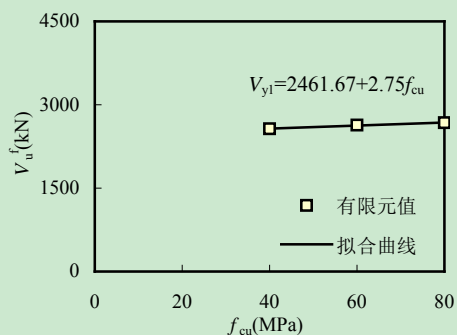
当轴压比  $0.3 \leq n \leq 0.4$  时，

$$V_y^j = 9.013 \times 10^{-4} (22.38 + \beta_1)(0.73 + \beta_2)(3030.46 - 0.31\beta_3 + 0.56\beta_3^2) \times (4.076 + \beta_4)(0.994 + \alpha_s)(0.453 - k_m)(6.632 + n)(0.671 + h/D) \quad (3.18-1)$$

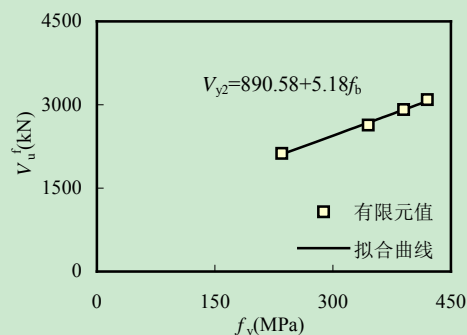
当轴压比  $0.4 < n \leq 0.8$  时，

$$V_y^j = 1.233 \times 10^{-3} (22.38 + \beta_1)(0.73 + \beta_2)(3030.46 - 0.31\beta_3 + 0.56\beta_3^2) \times (4.076 + \beta_4)(0.994 + \alpha_s)(0.453 - k_m)(5.58 - 1.62n + n^2)(0.671 + h/D) \quad (3.18-2)$$

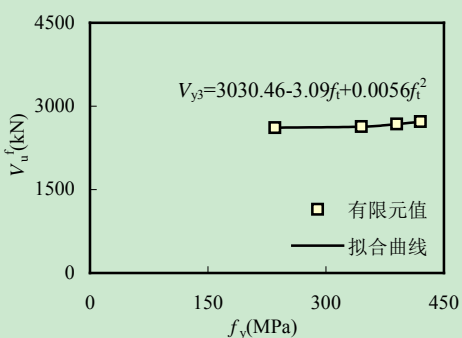
其中： $\beta_1 = f_{cu} / 40$ ， $\beta_2 = f_b / 235$ ， $\beta_3 = f_t / 10$ ， $\beta_4 = b / 60$



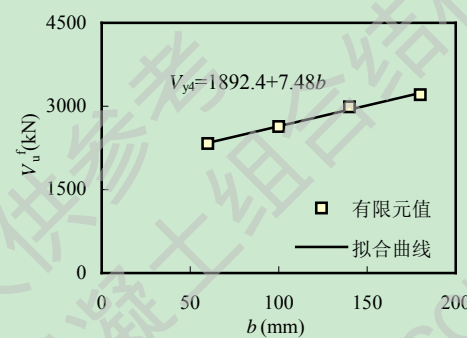
(a) 混凝土强度对抗剪屈服承载力的影响



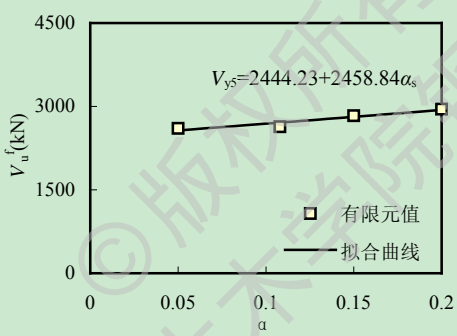
(b) 钢梁强度对抗剪屈服承载力的影响



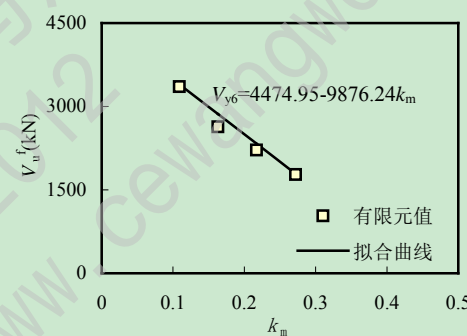
(c) 钢管强度对抗剪屈服承载力的影响



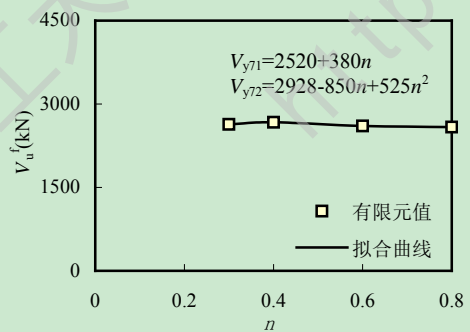
(d) 环板宽度对抗剪屈服承载力的影响



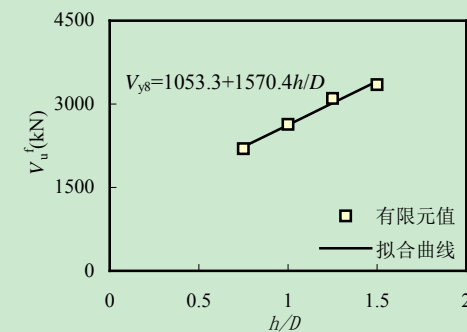
(e) 截面含钢率对抗剪屈服承载力的影响



(f) 梁柱线刚度对抗剪屈服承载力的影响



(g) 轴压对抗剪屈服承载力的影响



(h) 核心区高径对抗剪屈服承载力的影响

图 3.13 方钢管混凝土柱节点

(2)圆钢管混凝土节点屈服抗剪承载力

如图 3.14，图中列出了圆钢管混凝土节点屈服抗剪承载力与参数之间的数学关系，则节点域的屈服抗剪承载力为：

a) 屈服抗剪承载力与混凝土强度之间的数学关系

$$V_{y1} = 2869.83 + 1.425f_{cu} \quad (3.19-1)$$

b) 屈服抗剪承载力与钢梁强度之间的数学关系

$$V_{y2} = 1780.24 + 3.098f_b \quad (3.19-2)$$

c) 屈服抗剪承载力与钢管强度之间的数学关系

$$V_{y3} = 1540.88 + 3.80f_t \quad (3.19-3)$$

d) 屈服抗剪承载力与环板宽度之间的数学关系

$$V_{y4} = 2728.7 + 2.215b \quad (3.19-4)$$

e) 屈服抗剪承载力与截面含钢率之间的数学关系

$$V_{y5} = 1929.28 + 8042.64\alpha_s \quad (3.19-5)$$

f) 屈服抗剪承载力与梁柱线刚度比之间的数学关系

$$V_{y6} = 5524.4 - 10254.76k_m \quad (3.19-6)$$

g) 屈服抗剪承载力与轴压比之间的数学关系

$$V_{y71} = 2780 + 590n \quad (0.3 \leq n \leq 0.4) \quad (3.19-7)$$

$$V_{y72} = 3693.5 - 1722.5n \quad (0.4 < n \leq 0.8) \quad (3.19-8)$$

h) 屈服抗剪承载力与核心区高厚比之间的数学关系

$$V_{y8} = 2233.3 + 620.4h/D \quad (3.19-9)$$

整理公式(3.19-1)–公式(3.19-9)，则得到圆钢管混凝土柱-钢梁节点的屈服抗剪承载力公式如下：

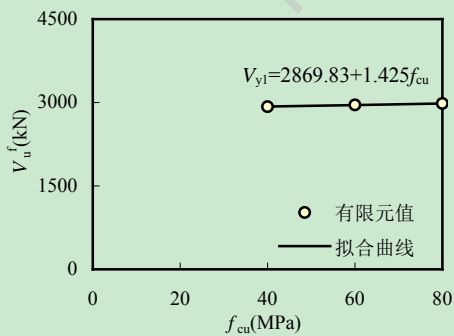
当轴压比  $0.3 \leq n \leq 0.4$  时，

$$V_y^j = 8.50 \times 10^{-2} (50.35 + \beta_1)(2.445 + \beta_2)(1.726 + \beta_3)(20.53 + \beta_4)(0.24 + \alpha_s) \times (0.54 - k_m)(4.71 + n)(3.6 + h/D) \quad (3.20-1)$$

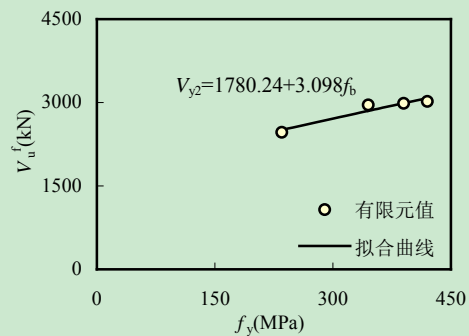
当轴压比  $0.4 < n \leq 0.8$  时，

$$V_y^j = 2.611 \times 10^{-1} (50.35 + \beta_1)(2.445 + \beta_2)(1.726 + \beta_3)(20.53 + \beta_4)(0.24 + \alpha_s) \times (0.54 - k_m)(2.14 - n)(3.6 + h/D) \quad (3.20-2)$$

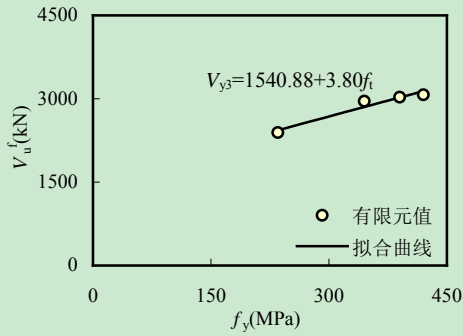
其中： $\beta_1 = f_{cu} / 40$ ， $\beta_2 = f_b / 235$ ， $\beta_3 = f_t / 235$ ， $\beta_4 = b / 60$



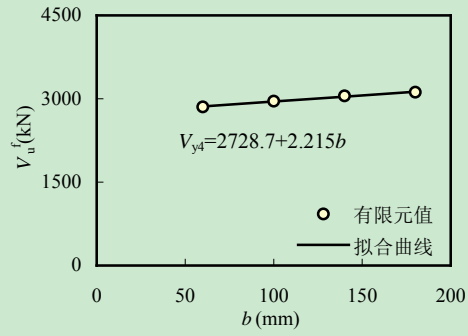
(a) 混凝土强度对抗剪屈服承载力的影响



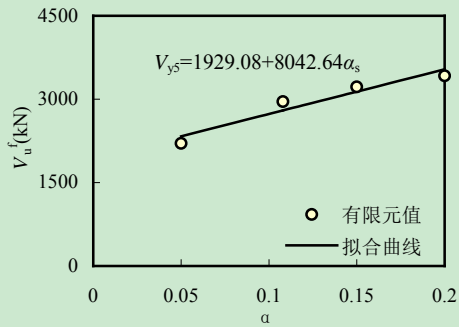
(b) 钢梁强度对抗剪屈服承载力的影响



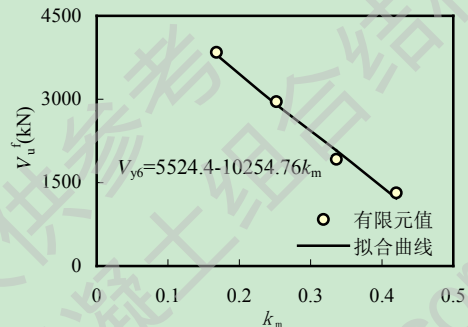
(c) 钢管强度对抗剪屈服承载力的影响



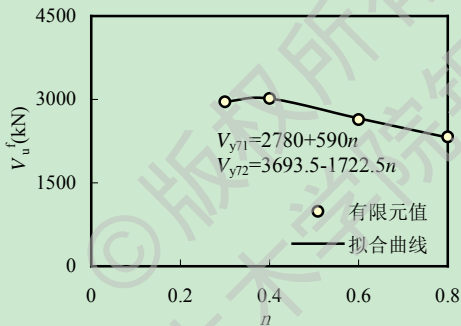
(d) 环板宽度对抗剪屈服承载力的影响



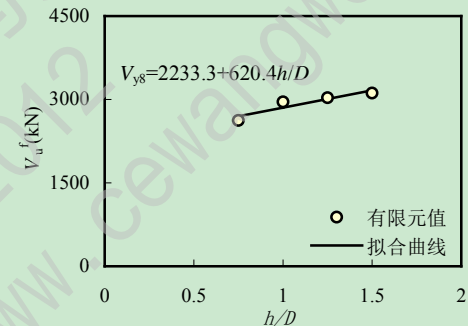
(e) 截面含钢率对抗剪屈服承载力的影响



(f) 梁柱线刚度对抗剪屈服承载力的影响



(g) 轴压对抗剪屈服承载力的影响



(h) 核心区高径对抗剪屈服承载力的影响

图 3.14 圆钢管混凝土柱节点

其中,  $V_y^j$  (kN)为节点屈服抗剪承载力,  $f_{cu}$  ( $N/mm^2$ )为混凝土的抗压强度,  $f_b$  ( $N/mm^2$ )为钢梁屈服强度,  $f_t$  ( $N/mm^2$ )为钢管屈服强度,  $b$  (mm)为外环板宽度,  $\alpha_s$ 为柱截面含钢率,  $k_m$ 梁柱线刚度比,  $n$ 为轴压比,  $h/D$ 为核心区高厚比。

该公式的适用范围为: 混凝土强度在  $40N/mm^2 \sim 80 N/mm^2$  间、钢材屈服强度在  $235 N/mm^2 \sim 420 N/mm^2$  间、环板宽度在  $60mm \sim 180mm$  间、截面含钢率在  $0.05 \sim 0.2$  间、轴压比在  $0.3 \sim 0.8$  间、核心区高径比在  $0.75 \sim 1.5$  之间。

### 3.4.2 简化计算方法与有限元值比较

为了验证本文所提出的简化抗剪公式的准确性, 下面就简化计算方法所计算的值与有限元的计算值进行比较, 所得结果值列于表 3.3 中。从下表可知本文所回归出的简化



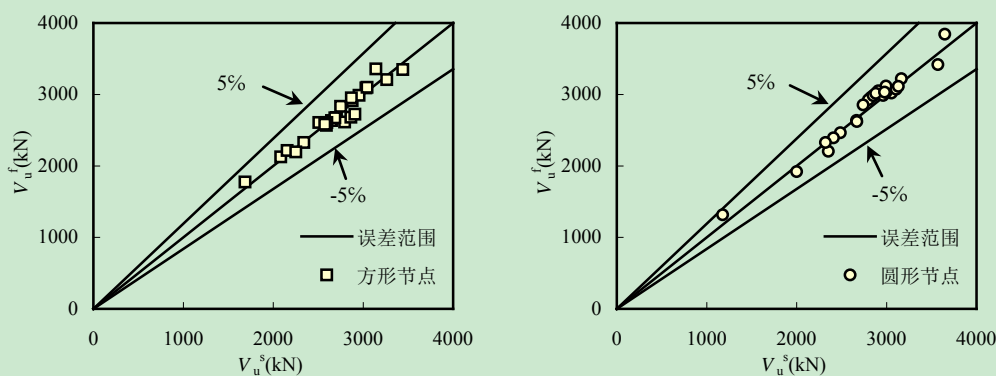
公式值与有限元计算值吻合良好，其中有些节点的抗剪简化值与有限元值相差稍微大，两者的最小的比值为 0.893，而最大的比值为 1.069，从而得出本文所提出的简化公式值相较于有限元值偏于保守安全，因此有较好的适用性。又从图 3.15 可看出本文的简化计算值和有限元值的偏差在合理的误差范围内，且在总体上简化公式值偏于安全，因此得出回归得到的节点抗剪屈服承载力简化计算公式有较好的精确性。

表 3.3 简化计算值与有限元值比较

编号	简化值	有限元值	$V_u^s / V_u^f$	编号	简化值	有限元值	$V_u^s / V_u^f$
S1	2648	2634	1.005	C1	2824	2957	0.955
S2	2592	2568	1.009	C2	2797	2926	0.956
S3	2703	2678	1.009	C3	2851	2983	0.956
S4	2084	2126	0.980	C4	2486	2465	1.008
S5	2878	2915	0.987	C5	2962	2985	0.992
S6	3032	3091	0.981	C6	3054	3020	1.011
S7	2795	2615	1.069	C7	2410	2392	1.007
S8	2863	2681	1.068	C8	2993	3029	0.988
S9	2908	2725	1.067	C9	3106	3073	1.011
S10	2340	2329	1.005	C10	2739	2853	0.960
S11	2955	2989	0.989	C11	2909	3051	0.953
S12	3262	3208	1.017	C12	2993	3117	0.960
S13	2508	2607	0.962	C13	2353	2205	1.067
S14	2749	2833	0.970	C14	3164	3221	0.982
S15	2869	2952	0.972	C15	3570	3419	1.044
S16	3141	3358	0.935	C16	3647	3843	0.949
S17	2155	2217	0.972	C17	2000	1921	1.041
S18	1687	1775	0.950	C18	1177	1317	0.893
S19	2686	2672	1.005	C19	2880	3016	0.955
S20	2597	2607	0.996	C20	2666	2637	1.022
S21	2574	2584	0.996	C21	2320	2327	0.997
S22	2252	2196	1.025	C22	2670	2622	1.018
S23	3044	3101	0.982	C23	2977	3032	0.982
S24	3440	3349	1.027	C24	3131	3114	1.005

注：表内所得抗剪承载力值为屈服抗剪承载力值，单位为 kN；

$V_u^s$  代表简化计算值， $V_u^f$  代表有限元值。



(a) 方钢管混凝土柱节点

(b) 圆钢管混凝土柱节点

图 3.15 节点抗剪屈服承载力与误差范围

### 3.5 小结

本章运用有限元软件 ABAQUS 对平面钢管混凝土节点的受剪承载力进行了分析，主要从以下几个方面进行了介绍：

(1) 对影响平面钢管混凝土节点的一些参数进行了分析，这些参数包括：混凝土强度、钢梁强度、钢管强度、环板宽度、截面含钢率、轴压比、梁柱线刚度、核心区高径比。最后得出的结论是：除了轴压比和梁柱线刚度比之外，其他参数对节点的抗剪都是起着有利的作用；轴压比在一定的范围内对抗剪起有利作用，超过这个范围起不利的作用；梁柱线刚度比对节点的抗剪起不利的作用，承载力随着线刚度的增大而降低。

(2) 对以往钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点的抗剪承载力计算方法进行了简单的归纳，然后将规范公式计算值与本文有限元值进行了比较，结果证明规范公式值偏于保守，有限元值偏大。

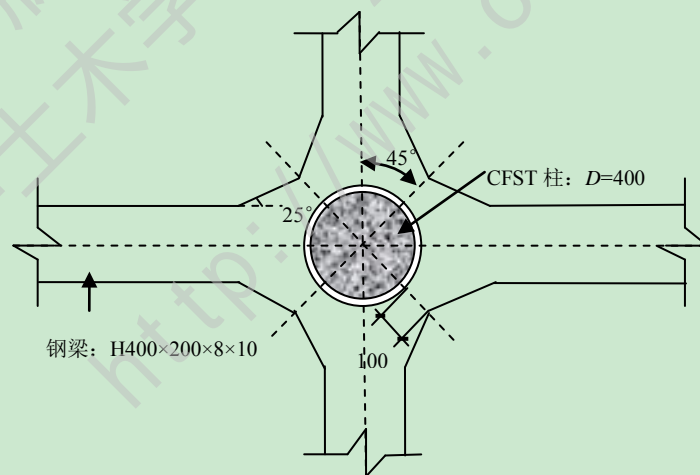
(3) 基于本文对节点参数分析的结果上，对钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点抗剪承载力的简化计算进行了分析。首先通过专业绘图软件 origin7.5 对节点的屈服抗剪承载力进行了回归，得出了回归公式，再经过整合得到了节点域的屈服受剪承载力公式和其适用范围。最后将回归得到的简化计算公式值与有限元计算值进行了对比，结果证明该公式具有较好的准确性。

## 第四章 钢管混凝土空间中柱节点受剪承载力初探

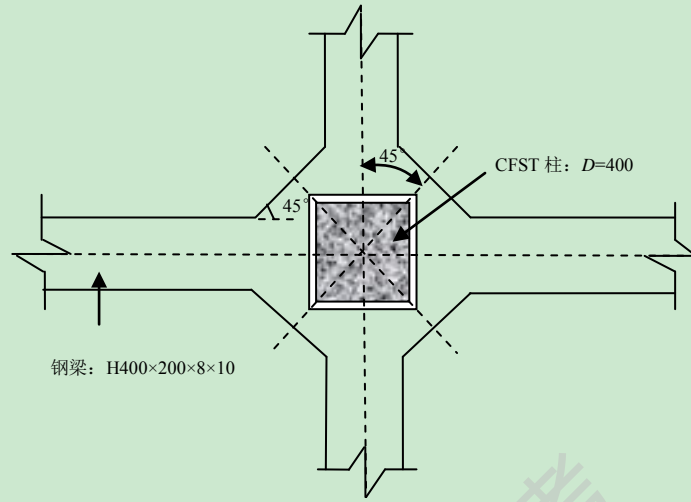
本章对空间钢管混凝土柱-钢梁外加强环式节点的抗剪承载力进行了探讨。首先根据规范建立了典型的空间有限元节点，将有限元的加载方式分为三种加载方法：平面内梁端加载、平面内-平面外梁端依次加载、平面内平面外梁端同时加载。在此基础上提出了空间节点的剪力-梁端位移曲线，并比较了三种加载方式下抗剪承载力和应力等值线分布的不同。最后简单对影响节点抗剪的几个因素进行了参数分析，得出了参数对节点剪力-梁端位移曲线的影响规律。

### 4.1 空间节点有限元模型的建立

前面的章节分析了平面内的钢管混凝土节点，但实际工程中除了处于建筑物周边的节点外，还有大多数节点处于建筑物的中间，因此有必要对空间节点进行分析。根据规程规定，建立了如图 4.1 的钢管混凝土空间外加强环式中柱节点，包括方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点。依据框架在受力情况下反弯点的位置，取跨度为 6m，柱高为 3m，轴压比为 0.3，含钢率为 0.108。本章采用大型有限元软件 ABAQUS 对空间中柱节点的抗剪受力性能进行分析，加载方式为：在柱端加恒定轴力，然后再在梁端加竖向反对称荷载。将梁端加载分为几种不同的情况：平面内(外)加载、平面内及平面外依次加载、平面内和平面外同时加载，然后对它们进行对比分析。



(a)圆钢管混凝土梁柱空间节点



(b)方钢管混凝土梁柱空间节点

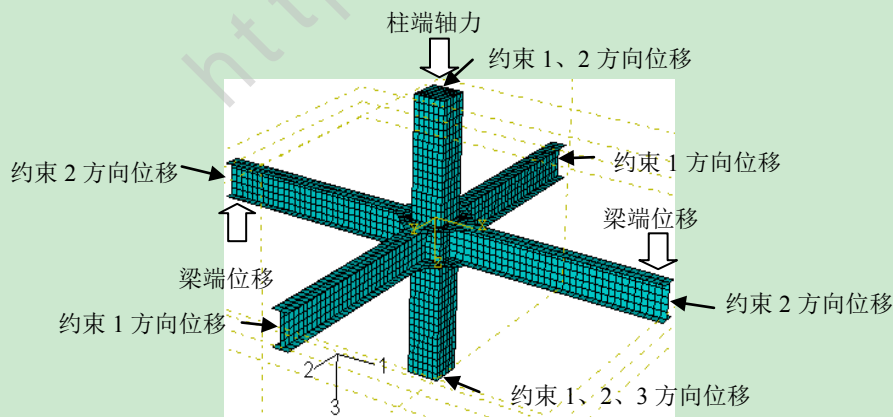
图 4.1 钢管混凝土空间中柱节点

## 4.2 不同加载方式下节点受剪承载力分析

为了分析钢管混凝土空间中柱节点的受剪力学性能，将节点的受力的情况分为几种不同的加载方式，分别分析其在对应加载方式下的受剪情况。然后通过比较这几种不同加载方式下节点的抗剪承载力，分析节点的最不利受力情况，给工程上提供一定的设计依据。

### 4.2.1 平面内(外)梁端加载

因为空间节点是对称的，平面内和平面外梁端加载的受力情况是一样的，所以选取平面内梁端加载来分析节点的受剪情况。节点的边界条件和网格划分如图 4.2 所示，柱底约束柱底中线 1、2、3 方向的线位移，柱顶约束柱顶中线 1、2 方向的线位移，平面内左右钢梁约束 2 方向的线位移，平面外前后钢梁约束 1 方向的线位移。加载方式为先在柱顶加柱端恒定轴力，然后再平面内左右钢梁上加竖向反对称位移。



(a) 方钢管混凝土梁柱空间节点

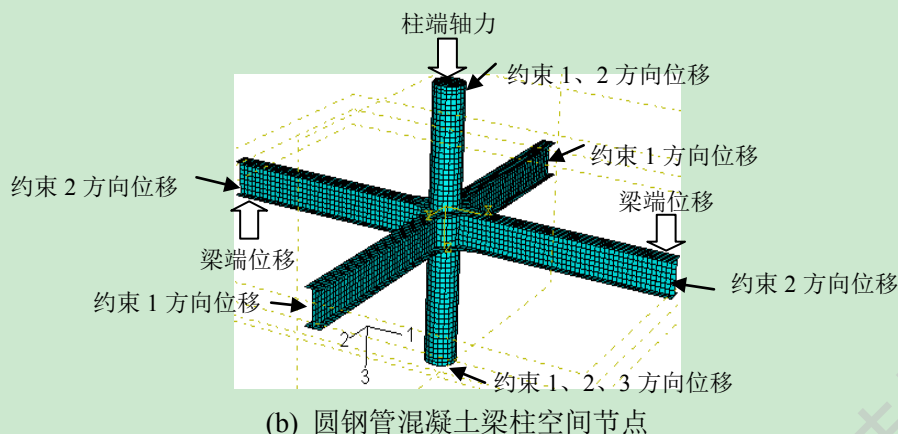


图 4.2 空间节点网格及边界条件示意图

空间节点随梁端加载剪力的变化情况，本文运用节点剪力-梁端位移曲线来表示，如图 4.3 所示。从图中可看出空间节点在相同尺寸和条件下，剪力随加载的进行，曲线的变化趋势和剪力-剪切变形曲线的变化趋势相差不大。由图可得出节点剪力-梁端位移曲线大致经历了四个阶段：弹性阶段、弹塑性阶段、强化阶段以及极限变形阶段。在弹性段和弹塑性段的初期方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点的剪力相差不大，几乎没什么差别，但在进入后期时两者的剪力就相差很大，圆钢管混凝土节点相较于方钢管混凝土节点后进入强化阶段。在进入强化阶段后，圆钢管混凝土的抗剪承载力随着加载的增大几乎不增加，到最后进入极限变形阶段，承载力迅速下降。而方钢管混凝土节点在进入强化阶段后节点的剪力有一定的增加，而且有一个很长的过程才达到极限变形阶段，在进入极限变形阶段后抗剪承载力开始下降。综合上面的情况可得出，在单向梁端加载下，圆钢管混凝土节点的最受剪大承载力与方钢管混凝土节点相差不多，前者的变形比后者的变形迅速。

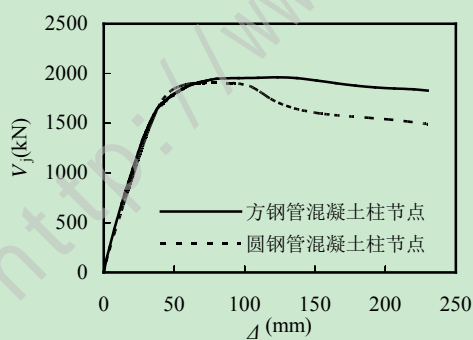


图 4.3 空间节点剪力-梁端位移曲线

#### 4.2.2 平面内和平面外依次对梁端加载

基于在不同加载情况下空间节点的抗剪受力性能的不同性，现将平面内梁端加载改为平面内和平面外依次加载，然后分别提出平面内和平面外的剪力-梁端位移曲线。具体的做法是先将 ABAQUS 软件里的分析步由两步改为三步：第一步在柱端加恒定的轴



力；第二步在左右梁端加竖向反对称位移；第三步在平面外的前后梁端加竖向反对称位移。然后在历史输出里面设置分别提出平面内在第二及第三步分析步中结果和平面外在第三分析步中的结果，节点的边界条件不变，同上所述。

图 4.4 列出了节点在平面内和平面外依次加载情况下的剪力-梁端位移曲线。从图中可得出圆钢管混凝土节点和方钢管混凝土节点一样，平面内的抗剪承载力比平面外的抗剪承载力要大，说明先加载的一端对后加载的一端有影响，后加载的一端抗剪承载力远远小于先加载的一端，这是因为先加载的一端导致节点域的抗剪承载力大大降低，其对后加载的节点域抗剪承载力有削弱的作用。对于平面内承载力，本文提出了有限元分析结果中的第二步和第三步的数据，从图中可看出当节点由平面内梁端加载到梁端位移到达 230mm 时，节点平面内梁端位移不再增加，但节点的抗剪承载力却随着另一梁端的加载下而逐渐降低，说明平面外在第三步中的加载对平面内的抗剪承载力有削弱的作用，并且从图中可看出方钢管混凝土节点降低的幅度比圆钢管混凝土节点的降低的幅度大。对于平面外承载力，由图可看出方钢管混凝土节点的承载力比圆钢管混凝土节点的承载力大很多，说明从而导致圆钢管混凝土节点平面外的抗剪承载力相较于方钢管混凝土节点平面外的抗剪承载力小很多。

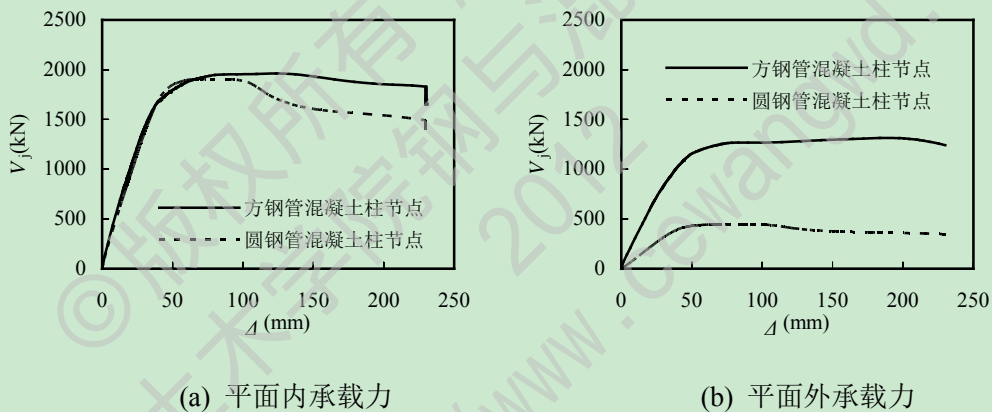


图 4.4 空间节点剪力-梁端位移曲线

#### 4.2.3 平面内和平面外同时加载

最后一种加载方式就是将梁端加载变为平面内和平面外同时加载。具体的加载方式是先在柱顶加恒定轴力，然后在四个梁端同时加上竖向反对称位移。因为节点的几何尺寸和加载都对称，所以平面内和平面外的受力和变形情况是一样的，在这只提出平面内(平面外)的受力与位移。节点的边界条件同上。

图 4.5 列出了方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点在平面内及平面外共同加载情况下的节点剪力-梁端位移曲线。由图可得出在弹性阶段和弹塑性阶段两者的抗剪承载力相差不多，几乎没什么差别，但在进入后期阶段时两者的受力情况就不一样了。圆钢管混凝土节点相较于方钢管混凝土节点后进入强化阶段，在进入强化阶段后不久圆钢管混凝土节点就进入极限变形阶段，节点的承载力迅速降低，降低到一定程度后节点的承

载力降低的幅度又变小，曲线变得稍微平缓。方钢管混凝土节点在双向梁端加载下，其在进入强化阶段后经历一个比较长的过程，这期间节点的抗剪承载力有所增加，但增大幅度不大，其比圆钢管混凝土节点后进入极限变形阶段，在进入极限变形阶段后节点的抗剪承载力急速降低，最后抗剪承载力降低到比圆钢管混凝土节点的抗剪承载力小。

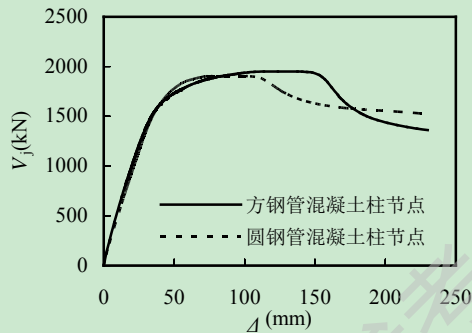


图 4.5 空间节点剪力-梁端位移曲线

#### 4.2.4 几种加载方式受剪承载力的对比分析

工程中钢管混凝土节点的受力复杂而且多变，为了研究节点在梁端加载下的最不利抗剪受力情况，基于前面的分析，本小节将从曲线和应力分布两个大的方面来比较空间节点在几种不同加载情况下的抗剪受力。

##### (1) 剪力-梁端位移曲线的比较

图 4.6 列出了方钢管混凝土节点平面内和平面外在不同加载下的剪力-梁端位移曲线。从图 4.6(a)可看出空间节点的平面内受剪承载力随不同梁端加载的不同变化趋势，对于平面内加载和平面内-平面外依次加载，两者的剪力-梁端位移曲线在梁端位移到达 230mm 之前是重合的，但在梁端位移到达 230mm 后，平面内-平面外依次加载情况下的抗剪承载力随另一梁端加载降低，这是由于另一梁端加载造成对平面内抗剪承载力的削弱，从而导致平面内承载力有所降低。对于平面内平面外同时加载，从图中可看出其曲线变化的趋势在前面的阶段和上面两种加载下的曲线相差不多，但在进入后期的极限变形阶段时，平面内平面外同时加载情况下的抗剪承载力随着梁端位移的增大而急速降低，表明其破坏程度比前两者大。

图 4.6(b)为空间方钢管混凝土节点在平面外的承载力，由于在平面内加载时的平面外承载力为零，所以这里没有列出平面内加载下的平面外承载力。并且在平面内-平面外同时加载情况下的节点模型是关于力和尺寸都对称的，所以平面内和平面承载力是相同的，这里的平面外承载力曲线和平面内承载力曲线一致。从图中可看出平面内平面外同时加载下的平面外承载力比同时加载情况下的平面外承载力大，并且在前期阶段相差幅度较大，而在后期阶段相差的幅度较小。

综合以上节点在平面内和平面外的承载力，可看出在梁端加载都达到 230mm 时，平面内-平面外依次加载下的平面外抗剪承载力最小，这表明由于平面内先加载对平面

外承载力的削弱，导致平面外加载时平面外的抗剪承载力大幅度降低，甚至降低到比同时加载情况下的承载力要小。因此，相较于几种加载情况，双向加载的平面内-平面外依次加载的情况为节点的最不利受力情况。

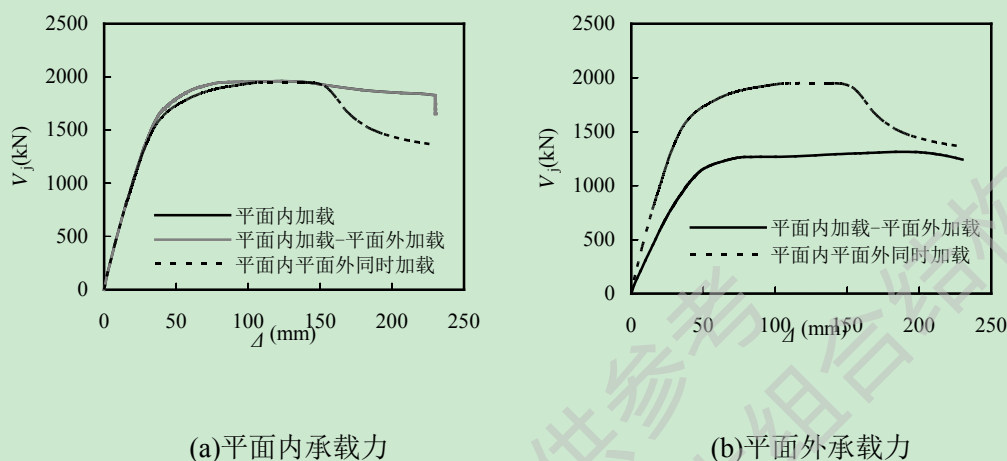


图 4.6 空间方钢管混凝土柱节点承载力比较

图 4.7 列出了圆钢管混凝土节点平面内和平面外在不同加载下的剪力-梁端位移曲线。由图 4.7(a)可看出节点在不同加载情况下的平面内承载力变化情况，同空间方钢管混凝土节点一样，空间圆钢管混凝土节点在平面内加载和平面内-平面外依次加载情况下的平面内承载力在梁端位移达到 230mm 之前是重合的，而在位移达到 230mm 后，依次加载情况下的平面内承载力继续有所降低，但是位移不再增加。对于平面内平面外同时加载，从图中可看出其曲线的变化趋势和前两种加载下的曲线大致吻合，相较于方钢管混凝土节点的不同之处是圆钢管混凝土节点的两条曲线趋势相差无几，而方钢管混凝土节点在平面内平面外同时加载下的曲线到后期时急剧下降，其曲线和前两种加载方法的曲线有了较大的差别。

从图 4.7(b)中可得出圆钢管混凝土节点平面外承载力的变化规律，同样这里只取了双向加载情况下的曲线，因为在单向加载下的另一方向的承载力为零。并且平面内平面外同时加载情况下的模型是对称的，曲线取与平面内曲线一致。从图中可看出两种双向加载情况下的抗剪承载力是相差很大的，且两条曲线在进入后期时变化比较稳定平缓，而方钢管混凝土节点在同时加载情况下的平面外承载力曲线在进入后期变化比较剧烈，下降较明显。同空间方钢管混凝土节点一样，平面内-平面外依次加载下的平面外承载力最小，这也是由于平面内加载对平面外承载力的削弱作用导致的。

综合以上对圆钢管混凝土节点平面内和平面外承载力的分析，可看出平面内-平面外依次加载情况下的抗剪承载力最低，并且其承载力相较于空间方钢管混凝土节点的承载力更小，说明其受平面内先加载的削弱程度更大。因此，通过比较得到平面内-平面外依次加载的情况为节点的最不利受力情况。

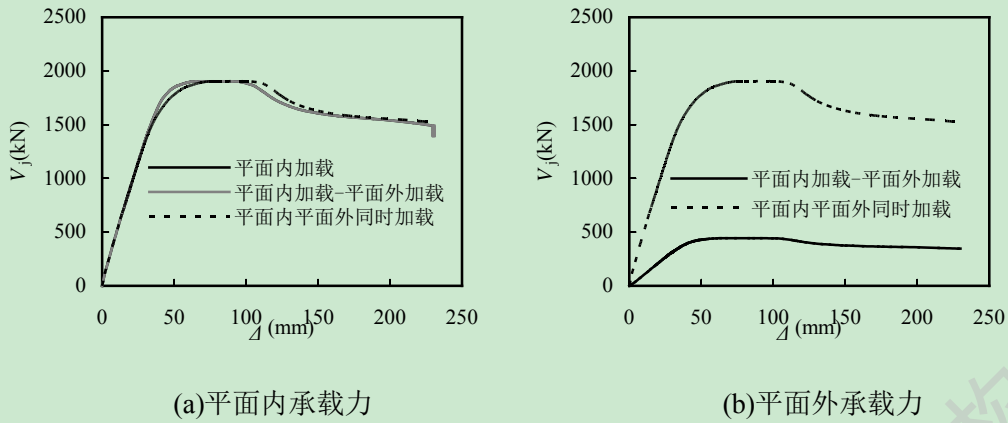


图 4.7 空间圆钢管混凝土柱节点承载力比较

(2)混凝土柱应力分布的比较

图 4.8 列出了在加载结束后的方形混凝土柱的轴向应力 S33 的分布图。从图中可看出在环板与柱交接处的应力分布比较密，应力变化复杂，其他区域的应力等值线比较稀疏，并且柱上的应力全部是受压应力。由图 4.8(a)可知在平面内梁端加载下，应力等值线的分布在环板与柱交接处较密集，除去局部地区的应力集中，最小应力为 $-0.056f_c'$ ，最大应力为 $-0.431f_c'$ ，其中 $f_c'=41\text{MPa}$ (后面同值)。由图 4.8(b)可看出在平面内-平面外梁端依次加载的情况下，混凝土柱的应力等值线分布大概成反对称分布，最大压应力达到 $-0.595f_c'$ ，最小压应力值为 $-0.039f_c'$ ，由图 4.8(c)可得出在平面内平面外同时加载的情况下，混凝土柱的应力等值线在节点域处分布较密集，且大致成反对称分布，最大压应力为 $-0.398f_c'$ ，最小应力为 $-0.058f_c'$ 。综合上面的分析，可知在平面内-平面外依次加载下的最大应力值相较于其他两种加载方法最大。

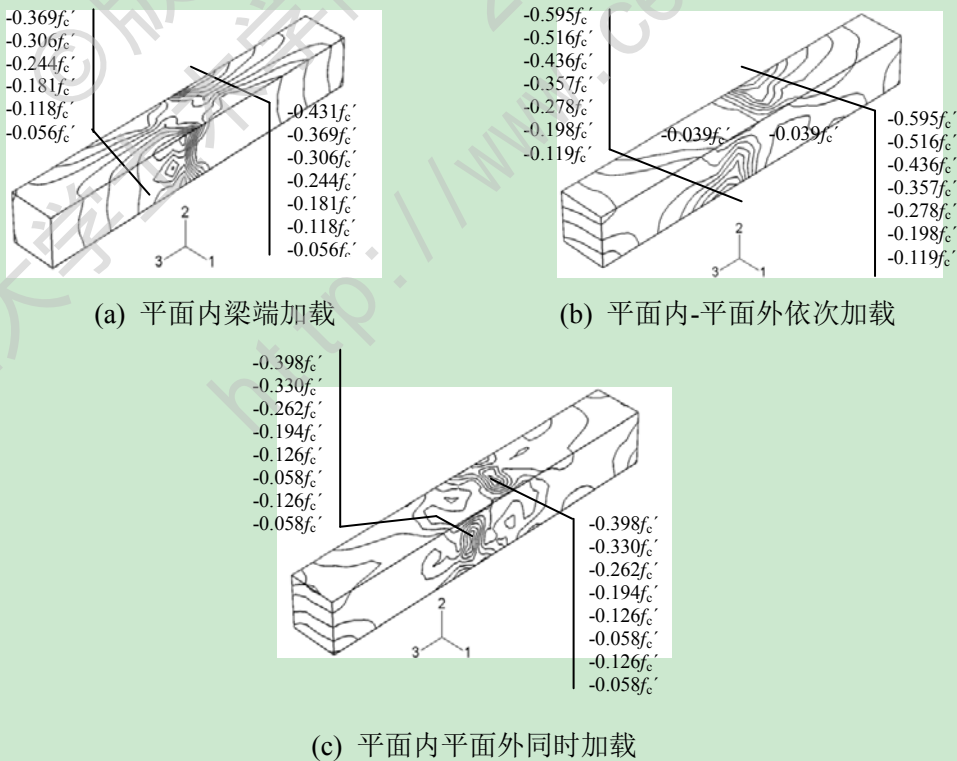
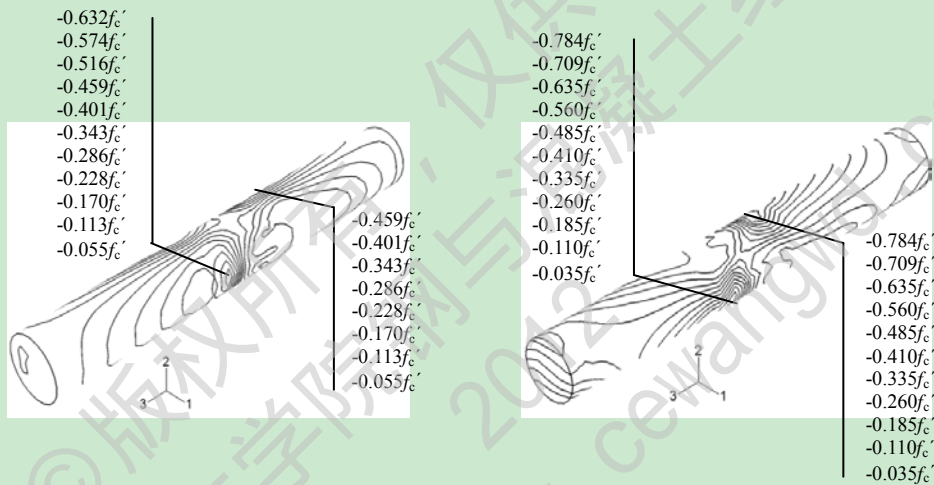


图 4.8 空间方钢管混凝土节点混凝土柱轴向应力分布比较

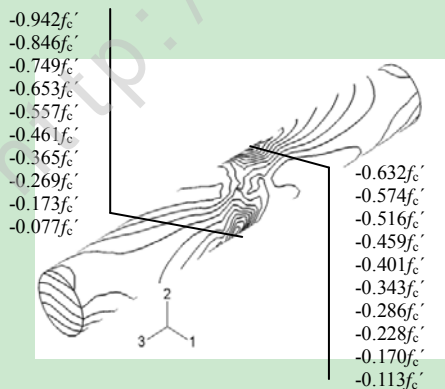


图 4.9 列出了圆钢管混凝土柱在加载结束后的应力 S33 的分布图。从图中可看出圆钢管混凝土柱的应力等值线分布较方钢管混凝土柱分布规律些，线型不如方形混凝土柱的等值线那么凌乱，并且在环板与柱交接处的区域分布比较密。由图 4.9(a)可知在平面内梁端加载下，混凝土柱的应力分布大致成对称分布，最大应力值达到 $-0.632f_c'$ ，最小应力值为 $-0.055f_c'$ 。由图 4.9(b)可看出在平面内-平面外梁端依次加载的情况下，混凝土的应力等值线大致成反对称分布，且等值线在节点域处分布较密，最大应力值为 $-0.784f_c'$ ，最小应力值为 $-0.035f_c'$ 。由图 4.9(c)可知在平面内平面外梁端共同加载下，应力等值线分布较密，且线型大致成反对称分布，在环板与柱交接处有局部的应力集中的区域，节点的最大应力值达到 $-0.942f_c'$ ，最小应力值为 $-0.077f_c'$ 。综合上面的分析，可得出空间节点在平面内平面外梁端同时加载的情况下的最大应力值最大，表明其受压的作用最大。



(a) 平面内梁端加载

(b) 平面内-平面外梁端依次加载



(c) 平面内平面外梁端同时加载

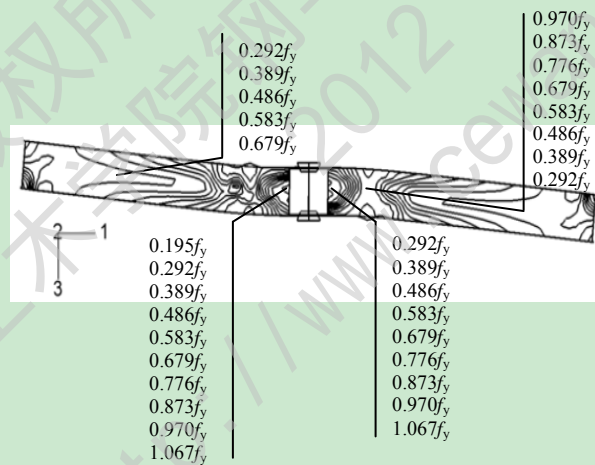
图 4.9 空间圆钢管混凝土节点混凝土柱轴向应力分布比较



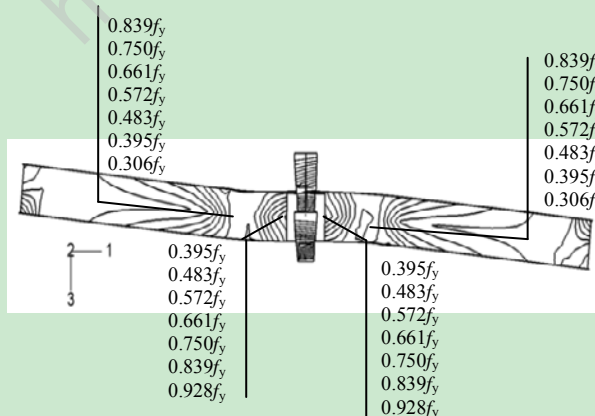
### (3) 钢梁应力分布的比较

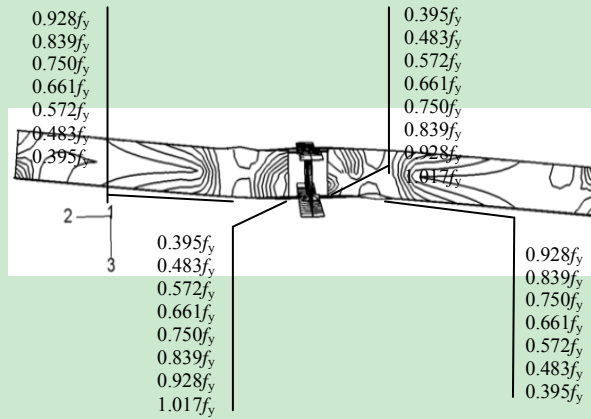
图 4.10 列出了在加载结束后空间方钢管混凝土节点的钢梁腹板 Mises 应力分布图。图中分别给出了腹板节点域附近处的应力值和离节点域稍远一点的区域的应力值，从图中可看出应力等值线大致成反对称分布，且在节点域附近处分布较密，离节点域稍远处分布较稀疏。由 4.10(a) 可知在平面内梁端加载下，平面内的腹板应力等值线分布复杂多变，节点域附近处的最大应力值达到  $1.067f_y$ ，离节点域稍远处的腹板最大应力值达到  $0.970f_y$ ，其中  $f_y=345\text{MPa}$ (后面同值)，别且在环板与钢梁交接处的翼缘已经鼓曲。图 4.10(b) 分别给出了在平面内-平面外梁端依次加载下的平面内和平面外的钢梁腹板应力分布图，从图中可看出其应力等值线分布较规律。对于平面内的腹板应力分布，从图可看出节点域附近处的最大应力值达到  $0.928f_y$ ，离节点域稍远的腹板应力值最大达到  $0.839f_y$ ，对于平面外的腹板应力分布，从图中可知其节点域附近处的最大应力为  $1.017f_y$ ，离节点域稍远处的最大应力值为  $0.928f_y$ ，且平面外的钢梁在环板与梁交接处发生鼓曲。由图 4.10(c) 可看出在平面内平面外梁端同时加载下，应力等值线分布较前两种加载方式稀疏一些，节点域附近处的最大应力为  $1.104f_y$ ，离节点域稍远处的最大应力值为  $0.918f_y$ ，加载结束后环板与梁交接处的翼缘已经发生鼓曲。

综上所述，可知在加载结束后，钢梁腹板部分区域已经屈服，离节点域近的地方应力越大，离节点域稍远的区域应力逐步减小，并且最大的应力值发生在平面内-平面外梁端依次加载情况下的平面外的腹板上。

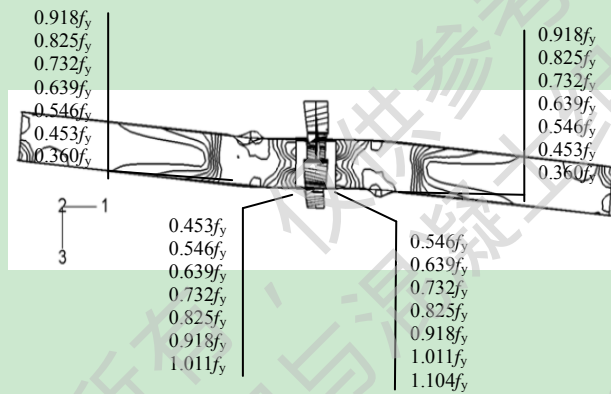


(a) 平面内梁端加载





(b) 平面内-平面外梁端依次加载

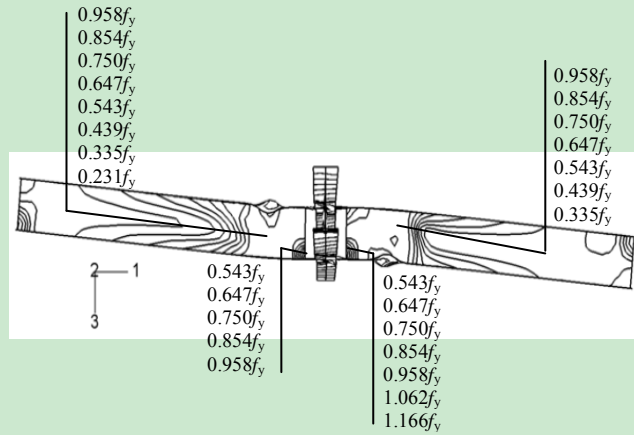


(c) 平面内平面外梁端同时加载

图 4.10 空间方钢管混凝土节点钢梁应力分布比较

图 4.11 列出了空间圆钢管混凝土节点的钢梁腹板 Mises 应力图。图中分别给出了加载结束后节点域附近处和离节点域稍远处的应力等值线图，从图中可看出离节点域越近应力值越大，离节点域越远应力越小，并且应力等值线分布较规律，其相较于方钢管混凝土节点的钢梁腹板应力等值线分布较稀疏，线型大致成反对称分布。由图 4.11(a)可知在平面内梁端加载下，钢梁腹板的最大应力值发生在环板与钢梁交接处，其应力值最大达到  $1.149f_y$ ，从图中可清楚的看见环板与梁交接处的区域已经发生鼓曲屈服，离节点域稍远处的区域最大值达到  $0.941f_y$ ，且离节点域越远应力值越小。图 4.11(b)分别给出了在平面内-平面外梁端依次加载情况下平面内和平面外的腹板应力图，从图中可看出离节点域近的地方应力值越大，离节点域稍远的区域应力值逐渐减小。平面内和平面外的最大应力值都发生在环板与钢梁交接处，且其最大值都为  $1.138f_y$ ，离节点域稍远区域最大的应力值都为  $0.935f_y$ ，不同的是平面外的最大应力值的范围相较于平面内的范围要大，其在环板与梁交接处的鼓曲区域面积范围也比平面内的鼓曲面积大。由图 4.11(c)可得出空间节点在平面内平面外梁端同时加载情况下的钢梁腹板应力图，从图中可看出最大应力值也是发生在节点域附近的环板与梁交接处，其值最大达到  $1.166f_y$ ，这部分区域的梁翼缘已经鼓曲屈服，离节点域稍远区域的应力值最大达到  $0.958f_y$ ，且离节点域越远的区



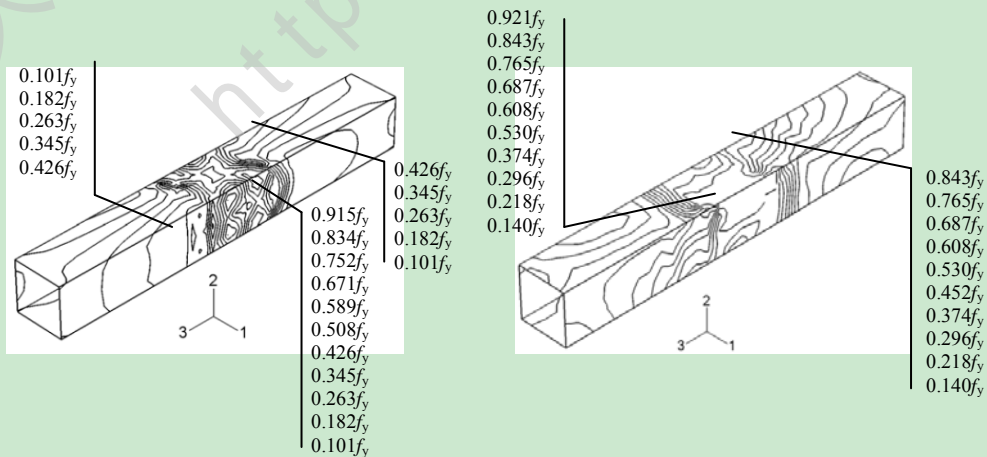


(c) 平面内平面外梁端同时加载

图 4.11 空间圆钢管混凝土节点钢梁应力分布比较

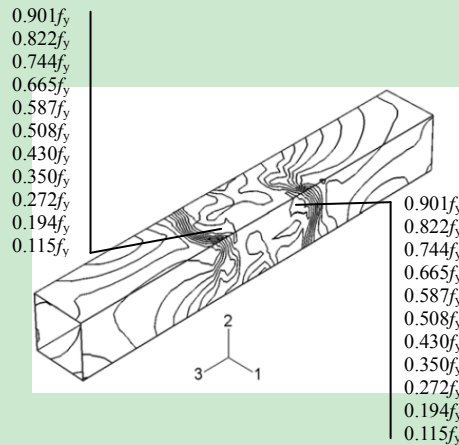
#### (4) 钢管应力分布的比较

图 4.12 列出了空间方钢管的 Mises 应力等值线分布图。从图中可看出在环板与柱交接处，由于钢梁对柱的约束作用使该部分区域产生应力集中的影响，从而导致该部分区域的应力等值线非常密集，线型复杂多变，离节点域越远的地方应力等值线分布越稀疏。由图 4.12(a)可得出在平面内梁端加载下，钢管在节点域的应力等值线分布特别密集，应力变化非常复杂，而其他区域则分布很稀疏。从图中可看出节点域的最大应力值达到  $0.915f_y$ ，钢材还没有达到屈服状态，离节点域稍远的地方应力值依次递减。由图 4.12(b)可看出在平面内-平面外梁端依次加载下，钢管的应力等值线分布较为规律，相对于平面内加载的分布较为稀疏，且线型大致成反对称分布。从图中可看出钢管的最大应力发生在环板与柱交接处，最大值达到  $0.921f_y$ ，钢材也没达到屈服状态，离节点域稍远的地方应力逐步减小。由图 4.12(c)可得出钢管在平面内平面外梁端同时加载的情况下的规律，从图中可看出在环板与柱交接处的钢管应力等值线分布特别密集，且线型大致成反对称分布，钢管的最大应力值发生在环板与柱交接的地方，其值最大达到  $0.901f_y$ ，离节点域越远的地方应力值越小。



(a) 平面内梁端加载

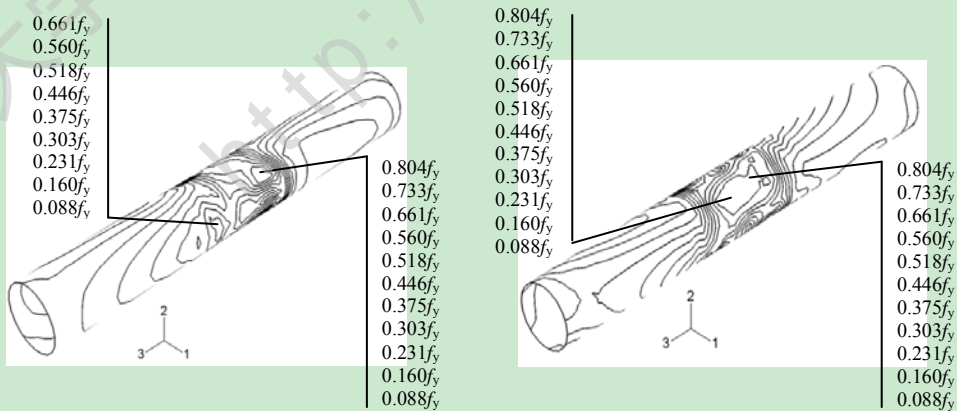
(b) 平面内-平面外梁端依次加载



(c) 平面内平面外梁端同时加载

图 4.12 空间方钢管混凝土节点钢管应力分布比较

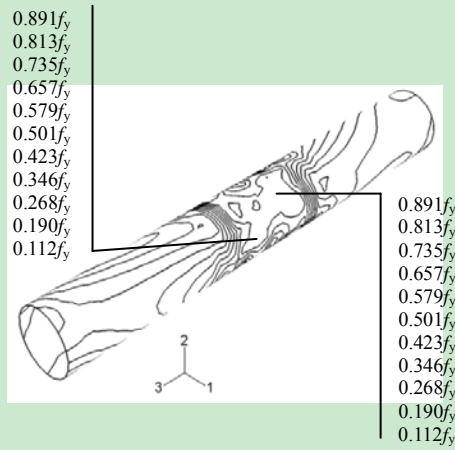
图 4.13 列出了空间圆钢管混凝土节点在加载结束后的钢管 Mises 应力分布图，从图中可看出圆钢管混凝土节点的应力等值线分布比方钢管混凝土节点分布稀疏一些，在环板与柱交接的地方等值线分布较密集，其他区域则相对稀疏。由图 4.13(a)可知在平面内梁端加载的情况下，节点域处的应力等值线分布复杂多变，其最大应力值发生在与钢梁翼缘平齐的钢管截面上，应力值最大达到  $0.804f_y$ ，离节点中心稍远的区域应力逐渐减小。由图 4.13(b)可得出在平面内-平面外梁端依次加载的情况下，钢管的应力等值线分布较为规律，大致成反对称分布。节点的最大应力值发生在节点域中心，相对于平面内梁端加载其最大应力值范围从环板与梁交接处扩大到节点域中心的大部分区域，最大应力值为  $0.804f_y$ ，其他区域的应力则依次减小。由图 4.13(c)可知在平面内平面外同时加载下，钢管应力等值线分布相对于前两种加载情况稍微稀疏一些，线型大致成反对称分布，最大应力值发生在节点域中心，应力最大值为  $0.891f_y$ ，且其最大值分布范围几乎占据了整个节点域中心，离节点域稍远的地方应力逐步减小。



(a) 平面内梁端加载

(b) 平面内-平面外梁端依次加载



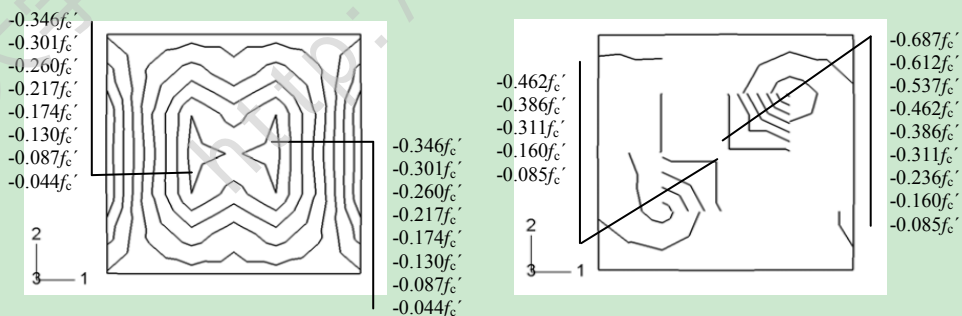


(c) 平面内平面外梁端同时加载

图 4.13 空间圆钢管混凝土节点钢管应力分布比较

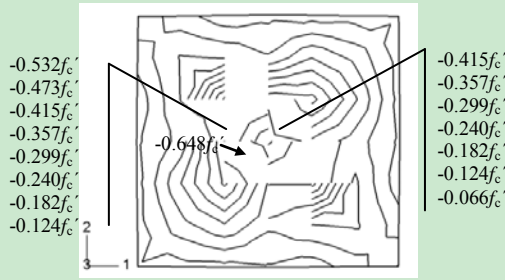
(5)节点核心区应力分布的比较

图 4.14 列出了方钢管混凝土节点核心区混凝土柱截面的轴向应力  $S_{33}$  的分布图，从图中可看出核心区截面的应力等值线分布较为规律，线型不是很密集，且离矩形中心越近应力值越大，离截面边缘越近应力值越小。由图 4.14(a)可看出在平面内梁端加载下，核心区混凝土截面的应力等值线分布非常规律，大致成对称分布，线型的稀密分布比较均匀，截面的最大应力发生在节点域中心，最大值达到 $-0.346f_c'$ ，离截面中心越远的地方应力值越小。由图 4.14(b)可看出在平面内-平面外梁端依次加载的情况下，核心区混凝土截面分布大致关于斜对角成对称分布，左边的最大应力值达到 $-0.462f_c'$ ，右边的最大应力值为 $-0.687f_c'$ ，从图中可知离截面中心越近应力值越大，离截面中心越远应力值越小。由图 4.14(c)可得知在平面内平面外梁端同时加载下，核心区混凝土截面的应力等值线分布关于斜对角线成对称分布，从图中可看出最大应力发生在核心区中心处，其值最大达到 $-0.648f_c'$ ，离节点域中心处稍远处的应力值逐步递减，直到在靠近混凝土柱壁处，其值达到最小，最小应力值为 $-0.066f_c'$ 。



(a) 平面内梁端加载

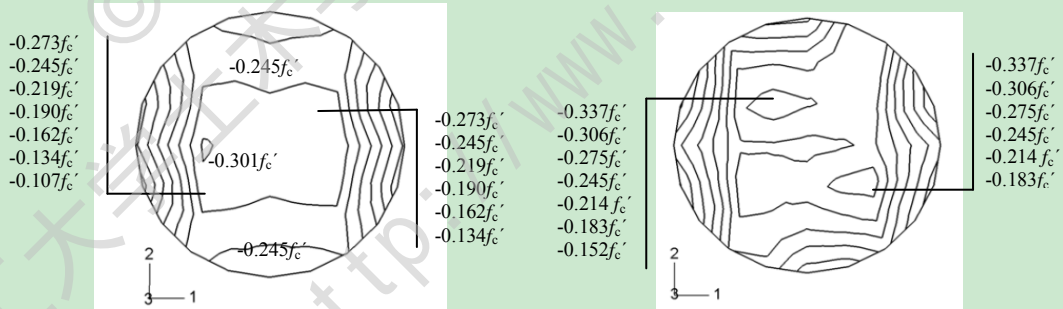
(b) 平面内-平面外梁端依次加载



(c) 平面内平面外梁端同时加载

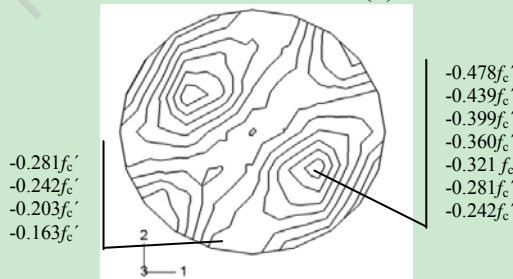
图 4.14 空间方钢管混凝土节点核心区应力分布比较

图 4.15 列出了空间圆钢管混凝土节点域核心区混凝土截面的轴向应力  $S_{33}$  的分布图。从图中可看出核心区截面的应力等值线分布较规律，线型的稀疏分布较均匀，离截面中心越近应力值越大，离截面中心稍远应力值逐步减小。由图 4.15(a)可知在平面内左右梁端加载下，核心区混凝土截面的应力等值线关于 2 轴成对称分布，从图中可看出左右边的应力等值线分布较上下边的应力等值线分布密集，应力的最大值发生在截面中心附近处，应力值最大达到  $-0.301f'_c$ ，离截面中心稍远处混凝土的应力值逐步降低，最小应力值达到  $-0.107f'_c$ 。由图 4.15(b)可得出在平面内-平面外梁端同时加载下，应力等值线的分布大致关于 1 轴成对称分布，其同平面内梁端加载一样，左右边的应力等值线分布较密集，最大应力值发生在截面中心附近，其值最大达到  $-0.337f'_c$ ，离截面中心越远的地方应力值越小，应力值最小达到  $-0.152f'_c$ 。由图 4.15(c)可知在平面内平面外同时加载的情况下，其应力等值线较前两种加载方式要密集复杂，且核心区混凝土截面的应力等值线关于斜对角线成对称分布，从图中看出截面的应力等值线有大部分是成环形分布的，应力的最大值发生在环形曲线的中心，其值为  $-0.478f'_c$ ，应力的最小值发生在圆形混凝土柱壁附近处，其值为  $-0.163f'_c$ 。



(a) 平面内梁端加载

(b) 平面内-平面外梁端依次加载



(c) 平面内平面外梁端同时加载

图 4.15 空间圆钢管混凝土节点核心区应力分布比较

### 4.3 受剪承载力影响因素的分析

前面分析了空间节点在单调加载下节点的抗剪受力状态，由有限元分析结果知节点在平面内到平面外依次加载的情况下为节点抗剪的最不利受力情况。为了进一步明晰其受剪性能，下面基于一些参数对空间节点抗剪的影响做了一些分析，本小节以平面内加载的情况分析参数对节点抗剪的影响。

#### 4.3.1 柱混凝土强度

图 4.8 列出了混凝土强度对空间节点剪力-梁端位移曲线的影响规律图。从图中可看出混凝土强度对节点剪力-梁端位移曲线的影响几乎没有，随着混凝土强度的增加，节点的抗剪承载力在进入后期阶段略有增大。混凝土强度对承载力影响不大是因为其对节点的抗剪贡献相比较于钢管强度和钢梁强度的贡献要小，在加上有平面外钢梁对钢管混凝土柱的约束作用，使得大部分承载力都由钢梁承担了，因此其对抗剪承载力的影响更小。这说明混凝土强度对空间钢管混凝土节点的抗剪承载力起着有力的作用，但其对承载力的影响不是很明显。

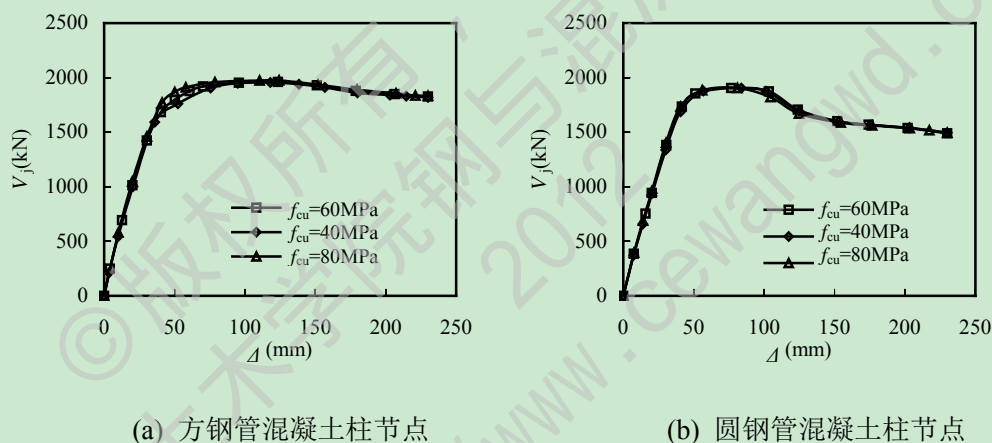
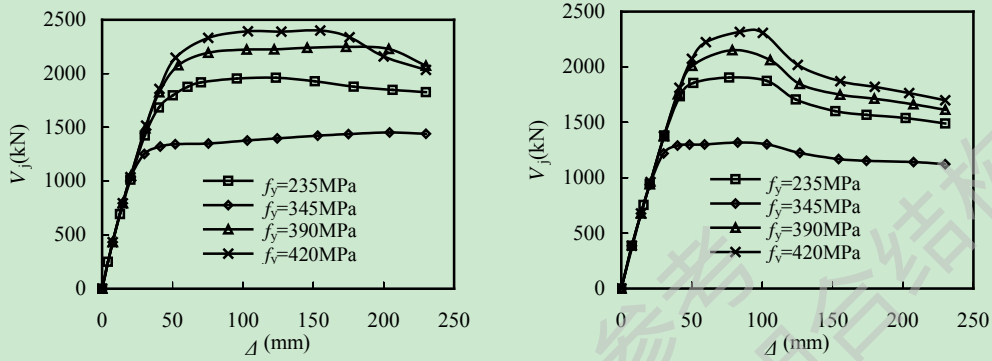


图 4.8 柱混凝土强度对承载力的影响

#### 4.3.2 钢梁强度

图 4.9 列出了钢梁强度对空间节点剪力-梁端位移曲线的影响规律图。从图中可看出钢梁强度对节点剪力-梁端位移曲线的影响较大，随着钢梁强度的增大，节点的抗剪承载力在前期阶段没什么变化，但在进入屈服强化阶段后节点的抗剪承载力逐步增大。由图 4.9(a)可得出方钢管混凝土节点的抗剪承载力随钢梁强度由  $f_y=235\text{MPa}$  到  $f_y=345\text{MPa}$  时的变化幅度最大，钢梁强度从  $f_y=345\text{MPa}$  到  $f_y=420\text{MPa}$  时的承载力变化幅度相对小一些。当钢梁的强度为  $f_y=420\text{MPa}$  时，节点在进入后期阶段的承载力降低到比钢梁强度为  $f_y=390\text{MPa}$  时的承载力低。由图 4.9(b)可看出圆钢管混凝土节点的承载力随钢梁强度的变化比较规律，曲线基本上成平行增大的趋势，钢梁强度由  $f_y=235\text{MPa}$  到  $f_y=345\text{MPa}$  时的增加幅度最大，后面的承载力变化幅度相对小一些。

空间节点的抗剪承载力随钢梁强度的增加而增大，这是因为本文采用的是梁端加载的加载方式，提出的是节点域剪力与梁端位移的关系，当钢梁的强度增大，相应的就需要更大的力来使梁端的位移达到某一个值，从而使得节点域的剪力就越大。这说明钢梁强度对节点域的抗剪起着有利的作用。

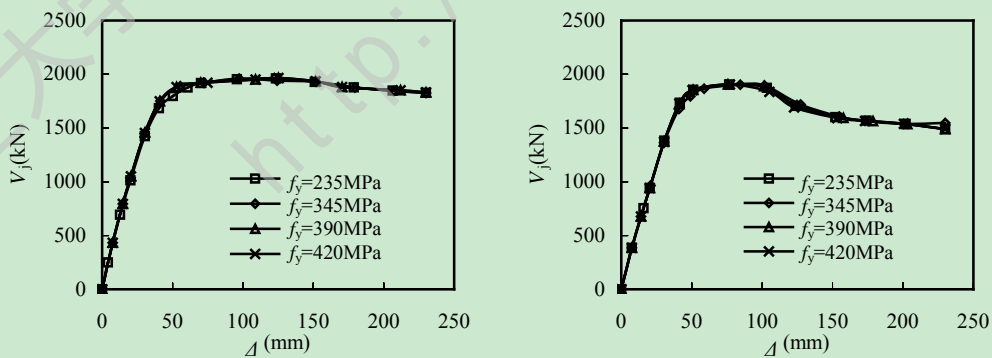


(a) 方钢管混凝土柱节点 (b) 圆钢管混凝土柱节点

图 4.9 钢梁强度对承载力的影响

### 4.3.3 柱钢管强度

图 4.10 列出了钢管强度对空间节点剪力-梁端位移曲线的影响规律图。从图中可看出方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点一样，钢管强度对节点的剪力-梁端位移曲线影响不大，节点的承载力几乎没有增加。这是由于空间钢管混凝土节点有两个方向的钢梁，它在传递梁端方向传来的剪力时与平面的钢管混凝土节点有不同的地方。平面节点是从梁端传到环板再传递到钢管以及核心混凝土上，而空间节点在梁端剪力传递到环板处时，节点的变形会受到平面外钢梁的约束，因此平面外钢梁对节点域抗剪有贡献作用，这导致钢管对抗剪的贡献能力减小。因此钢管强度对节点域的抗剪是有利的，但是其贡献很小。



(a) 方钢管混凝土柱节点 (b) 圆钢管混凝土柱节点

图 4.10 柱钢管强度对承载力的影响

### 4.3.4 柱轴压比

图 4.11 列出了轴压比对空间节点剪力-梁端位移曲线的影响规律图。从图中可看出空间方钢管混凝土节点与空间圆钢管混凝土节点一样，轴压比对节点域承载力的影响很小，从轴压比  $n=0.3$  变化到  $n=0.4$  时，节点的受剪承载力有微小的增大，但从轴压比  $n=0.4$  变化到  $n=0.8$  时，节点域的承载力却有微小的降低。这种曲线的变化情况和平面节点中轴压比的影响是一致的，因为在一定范围内增大柱上的轴力，就使得钢管的管壁环向应力增大，从而增大核心混凝土的受压面积，这是有利于抗剪的，但超过这个范围就使得柱上轴力过大而导致混凝土开裂，从而对抗剪造成不利的影响。相较于平面节点不同的是空间节点的轴压比对承载力的影响不是很明显，几乎没有变化幅度，这也是由于平面外钢梁对平面内钢梁的约束，使得其对节点的抗剪提供了一部分的贡献，从而将混凝土抗剪的贡献减小。因此，轴压比在一定范围内对空间节点的抗剪是有利的，超过这个范围对节点的抗剪不利，并且轴压比的影响相较于平面节点的影响不是很明显。

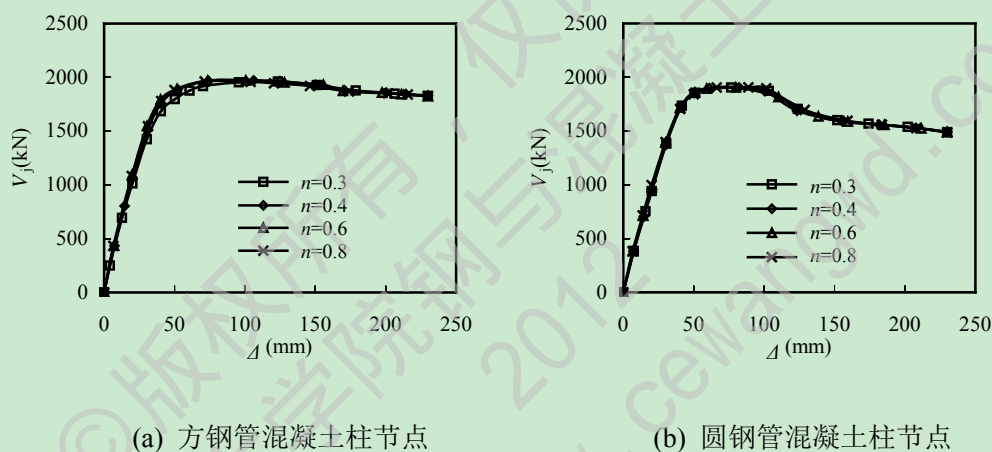


图 4.11 柱轴压比对承载力的影响

## 4.4 小结

本章运用有限元软件 ABAQUS 对外加强环式的空间钢管混凝土节点进行了抗剪受力分析，主要进行了一下工作：

(1) 建立了外加强环式的空间钢管混凝土节点，确定了其边界条件以及三种梁端加载方式，这三种加载方式包括一种单向加载方式和两种双向加载方式。在此基础上，分析了节点在这三种加载方式下的抗剪受力，提出了节点的剪力-梁端位移曲线，并比较了空间方钢管混凝土节点和空间圆钢管混凝土节点抗剪受力的差别。

(2) 在前面的基础上，比较了三种梁端加载方式下的剪力-梁端位移曲线和应力等值线分布。通过对结果的比较，空间方钢管混凝土节点和空间圆钢管混凝土节点一样，平面内-平面外梁端依次加载为节点的最不利加载方式，最后对三种加载方式下的应力等值线分布规律进行了分析。



(3) 选取了平面内梁端加载方式，分别对方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点进行了参数分析，这些参数包括：混凝土强度、钢梁强度、钢管强度和轴压比。最后得出的结论是：混凝土强度、钢梁强度、钢管强度都对空间节点的抗剪起着有利的作用，轴压比在一定的范围内对抗剪起有利的作用，超过这个范围反而起不利的作用。

## 结论与展望

### 结论

基于前人对钢管混凝土节点抗剪承载力的研究上, 本文运用有限元软件 ABAQUS 对钢管混凝土节点的受剪机理与受剪承载力进行了有限元分析。本文主要进行的工作以及得出的结论如下:

(1) 选用钢管混凝土加强环式节点建立了三维有限元模型, 包括外加强环式节点和内隔板式节点, 通过大量的实验验证, 证明该模型的合理性。在模型合理的基础上, 分析了节点在梁端反对称加载下的全过程受力机理, 并提出了节点的剪力-剪切变形曲线。有限元结果证明节点的剪力-剪切变形曲线符合抗剪四阶段: 协同工作阶段、共同工作阶段、屈服强化阶段以及极限变形阶段。通过对节点应力分布规律的分析得出除了局部应力集中的区域外, 钢管混凝土节点的钢材最大应力发生在节点域附近, 包括靠近节点域的部分腹板、部分钢管、环板以及内隔板。而核心混凝土的应力分布在进入屈服强化阶段后逐步表现为斜压杆分布来抗剪, 到最后的极限变形阶段核心混凝土已出现开裂。

(2) 基于前面典型试件的有限元分析, 对影响钢管混凝土节点抗剪承载力的参数进行分析, 并分析了剪力-剪切变形曲线产生变化的原因, 这些参数包括: 混凝土强度、钢材强度、钢管强度、环板宽度、截面含钢率、轴压比、梁柱线刚度比、核心区高径比。在此基础上对节点的抗剪承载力计算方法进行了归纳, 并将公式值与有限元值进行了比较, 结果证明了有限元值的合理性。最后对 8 个参数进行了回归, 得到了方钢管混凝土节点和圆钢管混凝土节点的抗剪承载力简化计算公式和公式的适用范围, 通过简化计算值与有限元值的比较, 结果证明简化公式值与有限元值吻合良好。

(3) 在分析了平面节点抗剪受力的基础上, 本文对空间钢管混凝土节点抗剪进行了简单的分析。选取了三种梁端加载方式, 分别对空间方钢管混凝土节点和空间圆钢管混凝土节点进行了在这三种梁端加载方式下的抗剪受力分析, 提出节点的剪力-梁端位移曲线。在此基础上, 比较了这三种加载方式下的抗剪承载力和应力等值线分布, 得出了平面内-平面外梁端依次加载是空间节点的最不利加载方式, 因为其平面外的抗剪承载力由于平面内加载的削弱而降低许多。最后简单对影响空间节点抗剪承载力的一些参数进行了分析, 得出了它们影响节点抗剪的某些规律, 这些参数包括: 混凝土强度、钢梁强度、钢管强度和轴压比。

### 展望

基于本文对钢管混凝土节点抗剪承载力的分析, 作者认为可以继续深入开展以下几

个方面的研究工作:

(1) 其他钢管混凝土柱-钢梁节点形式抗剪力学性能的研究

钢管混凝土柱-钢梁节点的种类比较繁多, 本文只是对外加强环式节点的抗剪承载力进行了研究分析。在实际工程中钢管混凝土节点由于形式的多种多样以及受力的复杂多变, 至今没有比较规范且适用范围广泛的抗剪承载力公式, 因此有必要对其他节点形式进行分析研究, 最后归纳出一个比较通用且安全的抗剪承载力公式

(2) 在低周反复荷载下钢管混凝土柱-钢梁节点的抗剪承载力研究

节点的受力形式比较复杂, 本文研究的是单调加载下的受剪承载力, 对于在往复荷载下节点的受剪特性以及变形性能还有待于深入的研究。并且已有对低周反复荷载下的节点的研究, 还缺乏对影响节点抗剪的参数分析, 不够系统全面, 所以这里有必要对在往复荷载下的钢管混凝土节点进行抗剪受力和变形性能的分析研究。

(3) 空间钢管混凝土柱-钢梁节点抗剪力学性能的深入研究

实际钢管混凝土结构中, 空间钢管混凝土节点所占比例是很大的, 然以往对节点的研究很少有涉及到空间钢管混凝土节点, 对于空间钢管混凝土节点的抗剪力学性能和变形性能我们还缺乏对其深入的研究。本文对外加强环式的空间钢管混凝土节点的抗剪受力进行了初步探讨, 后面还有必要对其进行更系统更深入的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 聂建国, 刘明, 叶列平. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 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.
- [4] 容柏生. 高层建筑中的钢管混凝土柱及其节点[J]. 广东土木与建筑, 2002, 1: 3-8.
- [5] 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.
- [6] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 苏恒强, 蔡健, 姚大鑫等. 钢管混凝土加强环式节点的实验研究[J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(1): 80-84.
- [8] 陈鹃, 王湛, 袁继雄. 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): 43-53.
- [9] 梅力彪, 周云, 阴毅. 穿心暗牛腿钢管混凝土柱单梁节点空间非线性的有限元分析[J]. 工业建筑, 2004, 34(9): 81-83.
- [10] Shin K J, Kim Y J, Oh Y S, et al. Behavior of welded CFT column to H-beam connections with external stiffeners. Engineering Structures[J]. 2004, 26(13):1877-1887.
- [11] 闫月梅, 杜晓魏. 钢管混凝土柱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.
- [12] 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.
- [13] 刘飞鹏. 新型方钢管混凝土柱-钢梁锚定式刚接节点的承载力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2005.
- [14] 王来, 王铁成, 邓芄. 方钢管混凝土框架内隔板节点抗震性能的实验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2005, 25(1): 76-80.
- [15] 金刚, 丁洁民, 陈建斌. 方钢管混凝土结构内隔板式节点实验研究[J]. 结构工程师, 2005, 21(4): 75-80.
- [16] 袁继雄, 王湛, 荣垂强等. 钢梁-钢管混凝土柱穿心节点力学性能研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(11): 17-21.
- [17] 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实验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(11): 21-24.
- [18] 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实验研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(9): 81-84.
- [19] 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

- 程学报, 2006, 39(9): 17-25.
- [20] Choi S M, Yun Y S, Kim J H. Experimental study on seismic performance of concrete filled tubular square column-to-beam connections with combined cross diaphragm [J]. *Steel and Composite Structures*, 2006b, 6(4):303-317.
- [21] 曲慧, 陶忠, 韩林海. CFST 柱-RC 梁钢筋环绕式节点抗震性能实验[J]. *工业建筑*, 2006, 36(11): 27-32.
- [22] 王先铁, 郝际平, 王丰平等. 锚定式方钢管混凝土柱与钢梁节点抗震性能实验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2007, 27(5): 95-102.
- [23] 聂建国, 秦凯. 方钢管混凝土柱内隔板式节点骨架曲线的确定方法[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(4): 1-7.
- [24] 方小丹, 黄圣钧, 李少云等. RC 梁-圆钢管混凝土柱节点环梁承载力设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(5): 20-33.
- [25] 季静, 吴爱明, 王燕珺等. 新型穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点实验及分析[J]. *华南理工大学学报*, 2008, 36(3): 114-120.
- [26] 江俊毅, 吴倩芸. 钢管混凝土柱劲性环梁节点的有限元分析[J]. *工业技术*, 2008.
- [27] 王砾瑶, 张勇, 边永丰. 钢管混凝土柱与钢梁隔板贯通式节点抗震性能研究[J]. *建筑结构学报(增刊)*, 2009.
- [28] 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[J]. *钢结构*, 2009, 24(1): 15-20.
- [29] 许凤美, 徐梦琴, 许成祥等. 外加强环式圆钢管混凝土柱-钢梁框架节点有限元分析[J]. *长江大学学报*, 2009, 6(4): 98-100.
- [30] Nie J G, Qin K, Cai C S. Seismic behavior of composite connections-flexural capacity analysis [J]. *Journal of constructional Steel Research*, 2009, 65(5):1112-1120.
- [31] 李成玉, 郭耀杰, 罗冽. 翼缘削弱对钢管混凝土外加强环节点受力性能的改善[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(12): 21-27.
- [32] 杨芳, 季韬, 戴益华. 钢管混凝土柱-钢筋混凝土环梁节点设计方法[J]. *福建工程学院学报*, 2010, 8(1): 5-8.
- [33] 杨群, 刘小兵. 空间钢管混凝土节点与空钢管节点应力集中分析[J]. *湖南工程学院学报*, 2010, 20(4): 70-73.
- [34] 尧国皇, 陈宣言, 林松. 新型钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的有限元分析[J]. *特种结构*, 2010, 27(6): 34-38.
- [35] Park S H, Choi S M, Kim Y S, et al. Hysteresis behavior of concrete filled square steel tube column-to-beam partially restrained composite connections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(7):943-953.
- [36] 李彦鹏, 徐建超. 钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点的有限元分析[J]. *佳木斯大学学报*, 2011,



29(1): 8-13.

- [37] 王文达, 秦庚, 张鹏鹏. 钢管混凝土柱-钢梁外环板节点抗弯承载力计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 29-34.
- [38] 丁永君, 尚奎杰, 万方贵等. 矩形钢管混凝土柱-H 型钢梁节点抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 93-99.
- [39] Fukumoto T, Sawamoto Y. CFT beam-column connection with high strength materials [C]. Proceedings of the International Conference on Composite Construction-Conventional and Innovative Insbruck, Austria, 16-18 September, 1997:463-468.
- [40] Fujimoto T, Inai E, Kai M, et al. Behavior beam-to-column connection of CFT column system [C]. The 12<sup>th</sup> WCEE, 2000, 2197:1-8.
- [41] Koester B D, Yura J A, Jirsa J O. Behavior of moment connections between concrete-filled steel tube columns and wide flange steel beams subjected to seismic to loads [C]. The 12<sup>th</sup> WCEE, 2000, 1759:1-7.
- [42] Chiew S P, Lie S T, Dai C W. Moment resistance of steel I-beam to CFT column connections [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2001, 127(10):1164-1172.
- [43] 张大旭. 钢管混凝土梁柱节点动力性能理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学硕士学位论文, 2000.
- [44] 张大旭, 张素梅. 钢管混凝土柱与梁节点抗剪承载力[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(3): 35-39.
- [45] 季静, 陈庆军, 韩小雷. 穿心暗牛腿钢管混凝土柱节点的模型试验研究[J]. 华南理工大学学报, 2001, 29(7): 70-73.
- [46] Nishiyama I, Morino S, Sakino K, et al. Summary of research on concrete-filled structural steel tube column system carried out under the US-Japan cooperative research program on composite and hybrid structures [R]. BRI Research Paper No.147, Building Research Institute, Japan, 2002.
- [47] Nishiyama I, Fujimoto T, Fukumoto T, et al. Inelastic force-deformation response of joint shear panels in beam-column moment connections to concrete-filled tubes [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2004, 130(2):244-252.
- [48] 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, 59:405-426.
- [49] 张重阳. 高层钢管混凝土结构梁柱节点设计方法研究[D]. 南京: 东南大学硕士学位论文, 2004.
- [50] Fukumoto T, Morita K. Elastoplastic behavior of panel zone in steel beam-to-concrete filled steel tube column moment connections [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2005, 131(12):1841-1853.
- [51] 周天华, 聂少锋, 卢林枫等. 带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点设计研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(5): 23-30.
- [52] 周威, 刘耀璐. 矩形截面钢管混凝土柱框架节点域承载力分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2005,

- 11(4): 274-278.
- [53] 范晓燕, 张重阳, 蒋世林等. 高层钢管混凝土结构梁柱节点抗剪承载力计算方法探讨[J]. 工业建筑, 2006, 36(12): 76-80.
- [54] 肖万松, 周湘, 夏蕊芳等. 矩形钢管混凝土节点域受剪承载力计算[J]. 华中科技大学学报, 2007, 24(2): 56-59.
- [55] 徐梦琴, 许成祥. 钢管混凝土梁柱节点抗剪承载力分析[J]. 长江大学学报, 2007, 4(4): 122-124.
- [56] 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.
- [57] Cheng C T, Chan C F, Chung L L. Seismic behavior of steel beams and CFT column moment-resisting connections with floor slabs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(11):1479-1493.
- [58] 李志南, 王彦, 董炳辉. 钢管混凝土环梁节点的研究[J]. 甘肃科技, 2008, 24(1): 119-120.
- [59] 魏琏, 王志远, 王森等. 钢管混凝土柱-RC 环梁节点计算方法的研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(3): 29-33.
- [60] 高春彦, 刘之峰, 李斌. 矩形钢管混凝土内隔板式节点抗剪承载力研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(4): 355-358.
- [61] 傅剑平, 方长建, 黄宗瑜等. 钢管混凝土斜柱抗剪环-环梁节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 34-41.
- [62] 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, 2009, 49(6) : 782-786.
- [63] 曾恒, 黄慧萱, 吴波. 钢管混凝土-RC 环梁节点的研究综述[J]. 四川建筑, 2009, 29: 203-204.
- [64] 秦庚. 钢管混凝土柱-钢梁环板节点力学性能与设计方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学硕士学位论文, 2009.
- [65] 何益斌, 黄频, 冷巧娟等. 方钢管混凝土柱穿心高强螺栓-端板节点抗剪承载力研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 83-86.
- [66] 刘晓刚, 樊健生, 陶慕轩等. 钢管混凝土柱-钢梁节点核心区受剪承载力计算对比研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 85-92.
- [67] Li W, Han L H. Seismic performance of CFST column to steel beam joint with RC slab:Joint model [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 73:66-79.
- [68] 甘肃省工程建设标准 DB62/T25-3041-2009. 钢管混凝土结构技术规程[S]. 兰州: 2009.
- [69] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [70] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M].北京: 机械工业出版社, 2009.
- [71] 杜培源.方钢管混凝土柱-工字钢梁节点性能研究[D].南京: 南京工业大学硕士学位论文, 2006.
- [72] 周天华, 郭彦利, 卢林枫等. 方钢管混凝土柱-钢梁节点的非线性有限元分析[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 283-287.
- [73] 秦庚, 王文达. 钢管混凝土环板节点设计的关键问题探讨[J]. 华中科技大学学报, 2008, 25(4): 321-324.

[74] 中国工程建设标准化协会标准 CECS 159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程, 北京: 2004.

[75] 周建平. Origin 实用教程(7.5 版)[M]. 西安交通大学出版社, 2005.

兰州理工大学土木学院钢与混凝土组合结构课题组  
© 版权所有, 仅供参考  
2012  
<http://www.cewangwd.com>

## 致 谢

时光荏苒如白驹过隙，三年的硕士学习生涯即将结束。在这期间无论是生活上还是学习上我都受益匪浅，回首前两年的求学历程，我对那些在学习及生活中引导我和帮助我的老师、朋友、同学和父母表示深切的感激。

首先要感谢我的导师王文达教授和史艳莉副教授，本论文是在他们的悉心指导下完成的。王老师和史老师渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的工作作风以及平易近人的人格魅力都对我的人生观和价值观产生了深远的影响。本论文从选题到指导再到完成，每一步都倾注了导师的大量心血。在此，谨向王老师和史老师表示崇高的敬意和衷心的感谢。

其次要感谢我的父母，他们含辛茹苦的把我养育成人，在生活上给了我无微不至的关怀，论文的顺利完成与他们的无私奉献息息相关。再次要感谢那些在生活上和学习上给了我许多帮助的朋友和同学，在论文初期，本课题组的郭智峰、张鹏鹏、邹爱华、王凤、周小燕、王景玄、付博啸、夏磊等给了我许多帮助，还有师弟师妹们给我的关心和帮助，这使我在生活中得到了关怀，在学习中走了很少的弯路。在此，我衷心地感谢他们，愿我们的同窗之谊永远长存。

本文得到甘肃省高等学校基本科研业务费专项(编号: 0904ZTB147)和兰州理工大学科研发展基金项目的资助，特此感谢。

谢 娜

2012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] 史艳莉, 谢娜, 王文达, 张鹏鹏. 钢管混凝土柱-钢梁环板节点抗剪性能数值模拟. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3):183-187



## 附录 B 攻读硕士学位期间参加的科研项目

- [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”, 主要参加人, 2009.11-2012.12。
- [2] 兰州理工大学科研发展基金: “钢管混凝土组合框架基于性能的抗震设计理论与试验研究”, 主要参加人, 2011.1-2013.12。