

学校代号 10731

学 号 062081402034

分 类 号 TU398

密 级 公开



## 硕士学位论文

# 矩形钢管混凝土构件复合受力时 力学性能与设计方法研究

学位申请人姓名 陈宇超

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 王文达副教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 钢与混凝土组合结构

论文提交日期 2009年5月20日

学校代号：10731

学 号：062081402034

密 级：公开

兰州理工大学硕士学位论文

矩形钢管混凝土构件复合受力时力学  
性能与设计方法研究

学位申请人姓名 陈宇超

导师姓名及职称 王文达副教授

培 养 单 位 土木工程学院

专 业 名 称 结构工程

论文提交日期 2009年5月20日

论文答辩日期 2009年6月3日

答辩委员会主席 马国纲教授级高工

Research on Mechanical Performance and Design Method of concrete-filled  
rectangular steel tube subjected to complexed force

by

CHEN Yuchao

B.E.(Shenyang Jian Zhu University)2006

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

Associate Professor Wang Wenda

May,2009

# 兰州理工大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

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

作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

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

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract.....	II
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 钢管混凝土的特点及发展 .....	1
1.2 钢管混凝土相关问题的研究现状 .....	2
1.2.1 轴心受压构件.....	3
1.2.2 偏压构件 .....	4
1.2.3 纯弯、纯剪、纯扭构件 .....	5
1.2.4 压弯、弯扭、压弯剪与压弯剪扭构件.....	5
1.3 矩形钢管混凝土构件复合受力问题.....	6
1.4 本文的主要研究工作 .....	6
<b>第 2 章 矩形钢管混凝土构件简单受力下力学性能</b> .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 有限元建模.....	8
2.2.1 材料模型 .....	8
2.2.2 模型单元 .....	10
2.2.3 接触模型，荷载及边界条件 .....	10
2.2.4 单元划分及模型求解 .....	11
2.3 矩形钢管混凝土双向压弯构件力学性能分析 .....	11
2.3.1 有限元建模 .....	11
2.3.2 钢管与混凝土相互作用力和破坏模态.....	16
2.3.3 参数分析 .....	17
2.3.4 分析结果总结.....	22
2.4 矩形钢管混凝土纯扭构件力学性能分析 .....	23
2.4.1 有限元模型 .....	23
2.4.2 破坏模态 .....	25
2.4.3 参数分析 .....	26
2.4.4 实用计算方法.....	28
2.5 矩形钢管混凝土构件纯剪力学性能分析 .....	30
2.5.1 有限元模型 .....	30
2.5.2 破坏模态 .....	33
2.5.3 参数分析 .....	33

2.5.4 实用计算方法.....	36
2.6 本章小结 .....	38
<b>第 3 章 矩形钢管混凝土构件复合受力下的力学性能</b> .....	<b>39</b>
3.1 矩形钢管混凝土压扭、弯扭构件力学性能分析 .....	39
3.1.1 压扭构件有限元模型 .....	39
3.1.2 弯扭构件有限元模型 .....	44
3.1.3 破坏模态 .....	47
3.1.4 参数分析 .....	47
3.1.5 实用计算方法.....	58
3.2 矩形钢管混凝土压弯扭、压弯剪构件有限元分析 .....	60
3.2.1 有限元模型 .....	60
3.2.2 参数分析 .....	63
3.2.3 压弯扭实用计算方法 .....	65
3.2.4 压弯剪实用计算方法 .....	67
3.3 本章小结 .....	68
<b>结论与展望</b> .....	<b>69</b>
<b>参 考 文 献</b> .....	<b>71</b>
<b>致 谢</b> .....	<b>76</b>
<b>附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文</b> .....	<b>77</b>

## 摘 要

矩形截面是钢管混凝土的一种常见截面形式。以往学者对钢管混凝土力学性能研究主要集中于圆形截面和方形截面形式上,对矩形截面钢管混凝土构件力学性能研究相对较少。本文对矩形截面钢管混凝土构件在,双向压弯、纯扭、纯剪、压扭、弯扭、压弯扭、压弯剪受力下力学性能和实用计算方法进行了分析。

具体进行了以下几个方面的工作:

(1) 建立了钢管混凝土实验构件双向压弯理论模型并进行模拟,模拟结果与实验吻合良好。对矩形截面钢管混凝土构件进行了参数分析,得到了各主要参数对矩形钢管混凝土构件双向压弯力学性能的影响规律。

(2) 采用有限元软件 ABAQUS 对实验后的钢管混凝土纯扭、纯剪构件进行了理论模拟,模拟结果与实验吻合良好。有限元分析了矩形钢管混凝土纯扭、纯剪构件在不同参数下极限承载力的变化规律,得到了在本文参数变化范围内的矩形钢管混凝土构件纯扭、纯剪极限承载力计算方法。

(3) 有限元模拟了钢管混凝土构件压扭、弯扭实验,模拟结果与实验结果吻合良好。分析了各主要参数对矩形钢管混凝土构件压扭、弯扭极限承载力的影响规律,结合本文得到的矩形钢管混凝土构件纯扭、纯剪极限承载力计算公式,得到了本文参数分析范围内的矩形钢管混凝土构件压扭、弯扭承载力计算方法。

(4) 对钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪实验进行了理论模拟,模拟结果与实验结果吻合良好。分析了各主要参数对矩形钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪极限承载力的影响规律,结合本文所分析的矩形钢管混凝土双向压弯力学性能、得到的压扭及弯扭极限承载力计算方法,探讨了矩形钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪极限承载力计算方法。

关键词: 矩形钢管混凝土, 双向压弯, 纯扭, 纯剪, 力学性能, 设计方法, 复合受力

## Abstract

The concrete-filled rectangular steel tubular member is one of the section type of concrete-filled steel tubular(CFST) structures. The concrete-filled circular and square steel tubular members were researched much more than the rectangular CFST members. This paper study the performance and design approach of the concrete-filled rectangular steel tubular members under the bi-direction eccentric compression, torsion, shear, combined compression and torsion, combined bending and torsion, combined compression, bending and torsion, and combined compression, bending and shear.

The main work can be summarized as follows:

(1) A finite element model on concrete-filled rectangular steel tube was developed. The theoretical results are in good agreement with the experimental results. Parametric analysis are performed on concrete-filled rectangular steel tube under the bi-eccentric loading.

(2) The concrete-filled rectangular steel tubular members were simulated under pure torsion and pure shear loading based on the FE model using ABAQUS. The theoretical results are matched well with experimental results. A practical design approach of ultimate strength for concrete-filled rectangular steel tubular members were given under pure torsion and pure shear loading based on a large scale parameter study.

(3) The concrete-filled rectangular steel tubular members performance were simulated under combined compression and torsion and combined bending and torsion based on the FE model. The FEM results are matched well with the experimental results. Parametric Analysis on concrete-filled rectangular steel tubular members were performed under the combined compression and torsion and combined bending and torsion, respectively. A design interactive equation for concrete-filled rectangular steel tubular members under combined compression and torsion and combined bending and torsion were proposed, respectively.

(4) The concrete-filled rectangular steel tubular members performance were simulated under combined compression, bending and torsion and combined compression, bending and shearing based on the FE model. Some experimental results were verified the FEM results, and they are matched well each other. Parametric Analysis on concrete-filled rectangular steel tubular members were performed under the combined loading. The simple interactive equation for concrete-filled rectangular steel tubular members under combined compression, bending and torsion and combined compression, bending and shearing were proposed, respectively.



**Key word:** rectangular concrete-filled steel tube; bi-eccentric loading; pure-torsion; pure-shear; mechanical properties; design method; composite force

©版权所有，仅供参考  
兰州理工大学土木学院组合结构课题组  
2009

©版权所有，仅供参考  
兰州理工大学土木学院组合结构课题组  
2009

# 第 1 章 绪论

## 1.1 钢管混凝土的特点及发展

每种建筑材料都有其自身突出的特点及优势，在建筑结构中发挥它们的特点。钢管混凝土也不例外，为了更好地运用它，对钢管混凝土的特点及发展要有一定的了解，以下介绍了钢管混凝土 5 个主要的特点和其发展。

### 1 承载力高

钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用，即钢管对核心混凝土的约束作用，使得核心混凝土处于复杂应力状态之下，混凝土在钢管的包裹中三向受压，可延缓核心混凝土纵向开裂，从而使混凝土强度得到了提高，塑性和韧性性能得到改善。同时，由于混凝土存在，可以延缓或避免钢管过早发生局部屈曲。两种材料互相弥补了彼此弱点，并且发挥了彼此长处，从而使钢管混凝土具有较高承载能力，而钢管混凝土的极限承载力并不等于钢管和混凝土单独极限承载力的简单叠加(韩林海，2007)<sup>[1]</sup>。

### 2 塑性和韧性好

钢材塑性和韧性比混凝土好，与混凝土结合共同受力，改善了混凝土性能，使得钢管混凝土构件破坏前，使构件具有较大塑性变形能力(钟善桐，1994<sup>[2]</sup>)。

郭兰慧和张素梅(2004)<sup>[3]</sup>采用有限元法分析了方钢管填充混凝土后构件屈曲性能，实验表明钢管内部混凝土的存在能够有效的延缓钢管的屈曲；钢管在纯弯受力状态下，有混凝土支撑时的弹性抗弯承载力是无混凝土支撑时钢板弹性抗弯承载力的 2.48 倍。

### 3 施工方便

钢管混凝土在施工过程中钢管可以充当其核心混凝土浇注模板，这与钢筋混凝土结构相比施工时更为简洁、方便，可以省去支模工序。与钢结构相比钢管混凝土中可根据实际情况采用焊接钢管、冷弯钢管或无缝钢管，由于混凝土的存在，钢管混凝土中钢管更为广泛的采用薄壁钢管，焊缝少，焊缝对接简便，易校正，易于制作是其优点。

### 4 耐火性能较好

钢管混凝土由于组成的钢管和混凝土之间具有相互贡献、协同互补和共同工作的特点，使得这种结构具有较好的耐火性能及火灾后的可修复性<sup>[1]</sup>。

### 5 经济效果好

Webb 和 Peyton(1990)<sup>[4]</sup>通过分析,给出了(多)高层建筑中采用不同类型的柱时与钢筋混凝土柱综合造价的比较情况。钢管混凝土是一种组合构件,在保持自重及承载力相同的条件下,与普通混凝土相比构件截面可缩减 50%,而与钢结构相比可节约钢材 50%,其还有在施工中减少模板用量,节省相应开支的经济效果。

对钢管混凝土的应用开始很早,它是在劲性混凝土和螺旋式配筋混凝土的基础上演变而来的,早期的应用没有考虑钢管和其核心混凝土之间的共同工作。对钢管混凝土较为深入的力学性能研究始于 20 世纪六七十年代,当时研究者已经注意到钢管和混凝土的组合作用,20 世纪八十年代,钢管混凝土的抗震性能和耐火极限相应的得到了研究,近些年随着科学技术的不断发展,对钢管混凝土力学性能的深入研究变得更加广泛。很多研究人员如:韩林海,尧国皇等在其著作及论文上都有详细综述,这里不再详加论述。

## 1.2 钢管混凝土相关问题的研究现状

世界一些国制定了钢管混凝土构件设计规范,如:欧洲规范 Eurocode4(BS NE 1994-1-1, 2004)<sup>[5]</sup>、英国标准 BS5400(BS5400-5, 2005)<sup>[6]</sup>、美国规程 ACI318-05(2005)<sup>[7]</sup>和 ANSI/AISC360-05(2005)<sup>[8]</sup>、日本规程 AIJ(1997)<sup>[9]</sup>等。

我国目前由国家建材总局、中国工程建设标准化协会、国家经济贸易委员会和解放军总后勤部颁布发行有关钢管混凝土结构设计规程有:JCJ01-89(1989)<sup>[10]</sup>、CECS28:90(1992)<sup>[11]</sup>、DL5085/T-1999(1999)<sup>[12]</sup>、GJB4142-2000(2001)<sup>[13]</sup>。一些较新的钢管混凝土设计规程如:中国工程建设标准化协会的《矩形钢管混凝土结构技术规程 CESC159:2004》(2004)<sup>[14]</sup>、福建省工程建设标准《钢管混凝土结构技术规程 DBJ13-51-2003》(2003)<sup>[15]</sup>和《钢-混凝土混凝土混合结构技术规程 DBJ13-61-2004》(2004)<sup>[16]</sup>、天津市工程建设标准《天津市钢结构住宅设计规程 DB29-57-2003》(2003)<sup>[17]</sup>、上海市工程建设规范《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程 DG/TJ08-015-2004》(2004)<sup>[18]</sup>。

工程中钢管混凝土构件应用的基本形式主要以:圆形截面、方形截面、矩形截面居多,三种截面形式如图 1.1 所示。对于圆形截面形式的钢管混凝土已经有

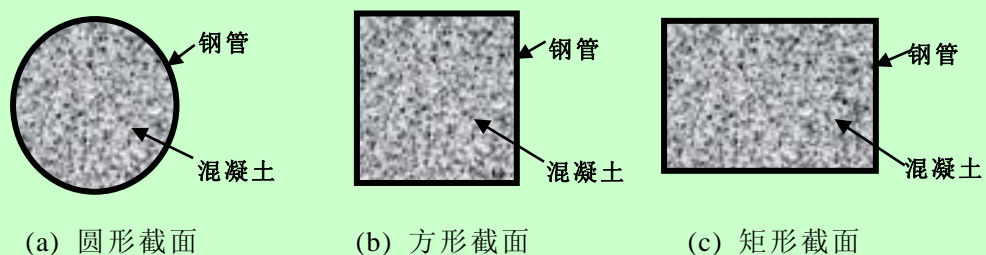


图 1.1 典型的钢管混凝土构件截面形式

很多研究者进行过在静力下简单受力和复合受力力学性能研究,并得到了承载力计算公式和实用计算方法。对于方形截面形式钢管混凝土静力下单一受力性能,已有研究者进行过研究,并得到承载力计算公式,方形截面钢管混凝土构件在复合受力情况下力学性能的研究相对较少,得到的方形钢管混凝土复合受力极限承载力计算方法与实验数据验证较少。相对方形截面钢管混凝土,矩形钢管混凝土复合受力下的力学性能研究和实用计算方法的归纳则更少。一些研究者在实验和有限元模拟的基础上对矩形钢管混凝土静力下轴心受压、偏压、纯扭、纯剪、纯弯承载力进行了分析,而对矩形钢管混凝土复合受力下力学性能研究和承载计算方法还没有相关报道。所以对钢管混凝土在复合受力时力学性能分析和得到承载力计算方法是必要的。

目前钢管混凝土的力学性能研究已经有了一定规模的实验研究成果与理论分析结论,韩林海(2007)<sup>[1]</sup>已对 2006 年以前钢管混凝土轴压、压弯、纯剪、纯弯、纯扭等构件的研究成果进行了系统归纳,故本文只对 2006 年之后的钢管混凝土相关研究的成果进行归纳。

### 1.2.1 轴心受压构件

Young 和 Ellobody(2006)<sup>[19]</sup>进行了混凝土内填到高强冷成型钢管中的一些实验研究。高强冷弯钢管的屈服强度和抗拉强度在 536~961MPa 之间,混凝土圆柱体抗压强度为 40~80MPa 之间、径厚比在 25.7~55.8 之间变化等不同参数下的轴压承载能力。

丁发兴和余志武(2006a)<sup>[20]</sup>应用连续介质力学理论,建立圆钢管套箍混凝土受压计算模型,建立圆钢管套箍混凝土组合弹性模量理论计算公式和组合应力-应变关系曲线理论表达式。

丁发兴和余志武(2006b)<sup>[21]</sup>根据钢管混凝土轴压短柱弹塑性全过程分析理论,在试验验证的基础上,对钢管混凝土轴压短柱受力机理进行数值仿真。

Ellobody 和 Young(2006)<sup>[22]</sup>进行了混凝土强度等级变化从 30MPa~110MPa,径厚比变化从 15~80 的圆形截面钢管混凝土轴心受压构件进行了力学性能分析,并得到了计算模型。

Ellobody 和 Young(2006)<sup>[23]</sup>进行了冷弯高强钢管混凝土的轴压力学性能进行了非线性有限元的研究。有限元分析结果同美国、澳大利亚、新西兰规范中公式对比。

Gupta 等(2006)<sup>[24]</sup>进行了钢管混凝土承重构件在往复集中荷载作用下的力学性能研究。进行了 81 个试件的实验研究和数值计算研究。

Guo 等(2007)<sup>[25]</sup>研究了 24 个方钢管混凝土和空钢管构件在轴心受压时不同的钢管长度和壁厚的比值对其力学性能的影响,并在 ABAQUS 中进行了模拟。



余志武和贺飒飒(2006)<sup>[26]</sup>基于《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068-2001),利用一次二阶矩阵法对圆钢管混凝土轴压短柱的极限承载力进行了可靠度分析。

钟善桐和徐国林(2006)<sup>[27]</sup>介绍了离心法生产的各种截面空心钢管混凝土构件轴心受压时的工作性能。对于多边形和方形截面构件,根据等效圆截面的欧拉临界应力的比较,导得多边形和方形截面构件的轴压稳定系数,以及空心多边形和方形截面构件的轴压稳定系数。

Tao 和 Han(2007)<sup>[28]</sup>进行了 18 个钢管混凝土轴压实验,实验研究了钢管中贯通加约束条、内焊约束条和纵向加肋对钢管混凝土承载力和局部屈曲的影响。

Yu 等(2007)<sup>[29]</sup>进行了 17 个钢管混凝土构件的实验,分析了构件中核心混凝土为自密实混凝土(SCC)和普通混凝土(NC)在集中荷载下的破坏情况,进行了四种测量轴向变形的方法对比,进行了,分析了混凝土强度、初始缺陷、不同加载路径等对荷载-变形关系的影响。

郭兰慧和张素梅(2007)<sup>[30]</sup>运用数值分析方法对矩形高强混凝土截面长宽比进行了研究,得到了截面长宽比变化对构件承载力的影响。

尧国皇等(2007)<sup>[31]</sup>运用有限元软件 ABAQUS 对轴心受压型钢-钢管混凝土柱荷载-变形关系曲线进行了研究。

黄福云和陈宝春(2008)<sup>[32]</sup>进行了 9 个钢管混凝土试件和 3 个空钢管的实验研究,分析了钢管混凝土在有初应力作用时,轴压构件的受力性能并与 ANSYS 有限元软件计算结果对比,给出初应力的适用范围。

### 1.2.2 偏压构件

Liu(2006)<sup>[33]</sup>进行了矩形钢管混凝土偏心受压时的实验和理论研究。进行了数值模拟,模拟计算结果和实验结果对比。

Xiong 和 Zha(2006)<sup>[34]</sup>研究了圆形和方形截面钢管混凝土构件压弯在预应力作用下力学性能,进行 ABAQUS 数值分析,数值分析结果得到了实验的验证。

Lu 等(2006)<sup>[35]</sup>分析了方形钢管混凝土偏压构件的基本力学性能,得到了弯矩-轴力-曲率( $M-N-\Phi$ )的关系,给出了基于倒塌理论方钢管混凝土偏压承载力的简化分析方法。

刘界鹏和张素梅(2006)<sup>[36]</sup>在纤维模型法基础上,建立了能够考虑矩形钢管混凝土双向偏压构件截面变形轴扭转的计算方法,分析了双向偏心荷载对矩形钢管混凝土轴向承载力及跨中截面变形扭转的影响。

田华等(2007)<sup>[37]</sup>对方形和矩形钢管高强混凝土双向压弯构件受力时截面形式、材料本构关系、材料加卸载作用的影响、残余应力进行了分析,同时考虑两种典型加载路径对双向压弯构件荷载-变形关系的影响。最后给出了简化计算公

式。

余志武和丁发兴(2008)<sup>[38]</sup>文献对 8 根钢管自密实混凝土偏压柱的力学性能进行了实验, 并采用纤维模型法及有限元法进行了分析, 提出一种圆钢管混凝土偏压柱承载力计算公式。

### 1.2.3 纯弯、纯剪、纯扭构件

Han 等(2006)<sup>[39]</sup>对钢管混凝土弯曲行为进行了分析。分析结果和现有规程进行了对比。

Han 等(2007)<sup>[40]</sup>研究了钢管混凝土纯扭构件, 分析了圆形和方形截面。运用非线性有限元软件 ABAQUS 进行模拟分析, 模拟与实验结果吻合良好。

于清和陶忠等(2008)<sup>[41]</sup>用 ABAQUS 有限元软件分析了钢管混凝土纯弯构件的荷载-变形关系及钢管和混凝土之间的相互作用, 有限元模拟得到了实验的验证, 探讨了钢管混凝土纯弯构件承载能力实用计算方法。

### 1.2.4 压弯、弯扭、压弯剪与压弯剪扭构件

矩形钢管混凝土构件在压弯、弯扭、压弯扭和压弯剪扭时的力学性能分析和实验研究较少, 以下是对其相关文献的综述。

韩林海(1994)<sup>[42]</sup>考虑不同加载路径对钢管混凝土压扭构件进行了有限元全过程分析, 对钢管混凝土压扭构件的工作机理进行了研究。分析结果表明: 理论计算结果和实验结果吻合良好。

韩林海和钟善桐(1994)<sup>[43]</sup>进行了钢管混凝土压扭、弯扭构件进行全过程分析, 推导了钢管混凝土压扭和弯扭构件承载力相关方程。

韩林海和钟善桐(1994)<sup>[44]</sup>考虑不同加载路径, 对钢管混凝土弯扭构件进行了理论分析。为了验证理论分析结果的正确性, 进行了 12 个弯扭构件的实验。

韩林海和钟善桐(1995)<sup>[45]</sup>考虑不同加载路径对钢管混凝土压弯扭构件进行了有限元全过程分析, 为了验证理论分析方法的正确性, 进行了 12 个压弯扭构件的实验。

Han 等(2007)<sup>[46]</sup>分析了方管薄壁混凝土在复杂受力状(如: 压扭、弯扭、压弯扭)时的力学性能。运用有限元 ABAQUS 计算分析模型与实验对比。提出了相应的计算公式。

袁伟斌和金伟良(2007)<sup>[47]</sup>分析了复杂应力状态下钢材与混凝土的应力-应变关系, 理论分析得到了实验结果的验证。

尧国皇等(2007)<sup>[48]</sup>推导了钢管混凝土偏压扭短柱极限承载力的计算公式。

查晓雄和钟善桐(1997)<sup>[49]</sup>把钢管混凝土当作一种组合材料, 从理论上用有限元法分析了钢管初应力对钢管混凝土压弯和压弯扭构件工作性能的影响。

### 1.3 矩形钢管混凝土构件复合受力问题

钢管混凝土力学性能的问题提出很早,但对其深入的研究较与普通混凝土和钢结构比还是较晚,对其力学性能研究的方向也主要集中在圆形截面、方形截面形式上,相较矩形截面形式的研究则较少。近些年来钢管混凝土构件在工程中应用逐渐广泛,如单层、多层厂房柱(哈尔滨建成机械厂大容器车间、宝钢抹电炉废铁车间等)设备支架柱、桥柱(湖北荆门热电厂锅炉,国内跨度最大的钢管混凝土拱桥-丫髻沙大桥,万县长江公路大桥  $L=420\text{m}$ ,等)还有地铁站承重柱(北京地铁等),变电塔和高层、超高层建筑(如台北 101 大厦,武汉证券大厦,杭州瑞丰国际商务大厦等)。矩形截面钢管混凝土构件由于和梁的节点连接处理方便,强轴方向的抗弯刚度大,抗弯性能好等优点,使其在钢管混凝土研究领域占据了重要的部分。矩形钢管混凝土构件作为边柱、角柱时,或承受非柱轴心荷载时,往往受力为双向压弯或更加复杂的情况,而对矩形截面钢管混凝土复合受力力学性能的研究还不完善。为完善对矩形钢管混凝土柱构件复合受力时力学性能与设计方法的研究进一份力,使其能更好的在实际工程中应用。

### 1.4 本文的主要研究工作

要使钢管混凝土结构在工程中广泛应用,就需要对钢管混凝土构件的力学性能更为深入的研究,对其各种截面形式荷载下的极限承载力给出实用计算方法。本文在阅读大量的钢管混凝土相关文献后,对本文的研究内容,借鉴部分研究者的研究方法,利用了相关的一些研究成果,对本课题进行了较为深入的研究探讨。

本文采用有限元软件 ABAQUS<sup>[50]</sup>对矩形截面钢管混凝土构件进行了复合受力力学性能全过程数值模拟,分析不同参数情况下矩形钢管混凝土构件复合受力时的荷载-位移关系曲线,探讨不同复合受力加载情况下极限承载力模态,得到了简化计算方法。具体工作如下:

- 1.建立了钢管混凝土已有实验构件双向偏压理论模型,模拟结果与实验吻合良好。对矩形截面钢管混凝土构件进行了参数分析,得到了各主要参数对矩形钢管混凝土构件双向压弯力学性能的影响规律。

- 2.采用有限元软件 ABAQUS 对实验后的钢管混凝土纯扭、纯剪构件进行了理论模拟,模拟结果与实验吻合良好。有限元分析了矩形钢管混凝土纯扭、纯剪构件在不同参数下极限承载力的变化规律,得到了在本文参数变化范围内的矩形钢管混凝土构件纯扭、纯剪极限承载力计算方法。

- 3.有限元模拟了钢管混凝土构件压扭、弯扭实验,模拟结果与实验结果吻合良好。分析了各主要参数对矩形钢管混凝土构件压扭、弯扭极限承载力的影响规



律，结合本文得到的矩形钢管混凝土构件纯扭、纯剪极限承载力计算公式，得到了本文参数分析范围内的矩形钢管混凝土构件压扭、弯扭承载力计算方法。

4.对钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪实验进行了理论模拟，模拟结果与实验结果吻合良好。分析了各主要参数对矩形钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪极限承载力的影响规律，结合本文所分析的矩形钢管混凝土双向压弯力学性能、得到的压扭及弯扭极限承载力计算方法，探讨了矩形钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪极限承载力计算方法。

## 第 2 章 矩形钢管混凝土构件简单受力下力学性能

### 2.1 引言

矩形钢管混凝土单一受力下力学性能研究为本章的主要内容。本章以有限元 ABAQUS 模拟为主，介绍了本文有限元运用的材料模型、单元模型及边界条件。分析了矩形钢管混凝土双向压弯构件的力学性能，对矩形钢管混凝土构件纯扭及纯剪构件进行了大量的参数分析，得到了各主要参数对矩形钢管混凝土构件纯扭、纯剪极限承载力的影响规律，在此基础上，本章对矩形钢管混凝土构件双向压弯力学性能进行了讨论，给出了矩形钢管混凝土构件纯扭和纯剪极限承载力实用计算方法公式。

### 2.2 有限元建模

本文分析的有限元模型全部使用 ABAQUS 软件模拟。ABAQUS 是一套基于有限元法的工程模拟软件，可以解决简单的线性问题及复杂的非线性问题。有着丰富的单元库，可以模拟大多数实际实体模型；ABAQUS 也包含大量的材料的数据库，包括金属、复合材料，钢筋混凝土、以及地质材料，如土壤和岩石等。ABAQUS 不仅能解决结果分析问题，而且能够模拟和研究热传导，土力学等多种问题。软件提供给操作者方便的操作系统，可以人机交互建模，也可以使用命令流建模，而且模型之间的组装，拆分，嵌入，边界耦合等问题处理时相当方便，容易使实用者理解。非线性分析中 ABAQUS 能自动选择适合的荷载增量步与收敛准则，方便技术人员操作，提高了效率。

#### 2.2.1 材料模型

本文模型主要用到三种材料模型，分别是钢材材料，混凝土材料，和刚度大的弹性材料。以下具体介绍这三种材料模型：

##### 1 钢材材料模型

本文钢管混凝土中钢管采用钢材材料模型，有限元计算中钢材的材性定义为弹塑性模型，弹塑性模型本文又分为低碳钢采用二次塑流模型和高强钢采用线性强化模型，如图 2.1 所示。

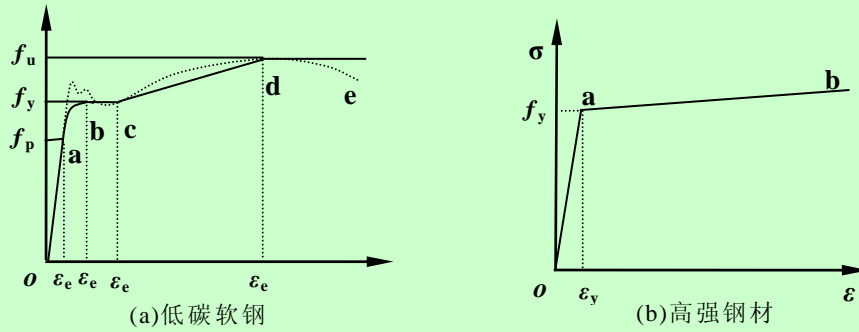


图 2.1 低碳钢与高强钢材本构关系曲线

图 2.1(a)所示，图中虚线曲线为钢材实际的应力-应变关系曲线，实线为简化的应力-应变曲线，其中， $f_p$ 、 $f_y$  和  $f_u$  分别为钢材的比例极限、屈服极限和抗拉强度极限。图 2.1(b)所示的双线性模型，及分为弹性段和强化段，其中强化段的模量可取值为  $0.01E_s$ ， $E_s$  为钢材的弹性模量，(韩林海，2007<sup>[1]</sup>)。钢材的弹性模量定义为 206000MPa，泊松比为 0.3。

## 2 混凝土材料模型

本文核心混凝土采用混凝土材料模型。混凝土受压时本文采用公式(2.1)韩林海(2007)<sup>[1]</sup>和刘威(2005)<sup>[51]</sup>提出的核心混凝土单轴受压应力-应变关系模型。

$$y = \begin{cases} 2 \cdot x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (2.1)$$

式中个参数由式(2.2)和(2.3)计算得到

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0}; \quad \sigma_0 = f'_c, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800 \cdot \xi^{0.2} \cdot 10^{-6} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5 \cdot f'_c) \cdot 10^{-6}$$

$$\eta = \begin{cases} 2 & \text{(圆形钢管混凝土)} \\ 1.6 + 1.5/x & \text{(方、矩形钢管混凝土)} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \cdot 10^{-5})^{[0.25 + (\varepsilon - 0.5)^7]} \cdot (f'_c)^{0.5} \cdot 0.5 \geq 0.12 & \text{(圆形钢管混凝土)} \\ (f'_c)^{0.1} & \text{(方、矩形钢管混凝土)} \\ 1.2\sqrt{1 + \xi} & \end{cases}$$

混凝土的弹性模量按式  $E_c = 4730(f_c)^{0.5}$  ( $f_c$  为核心混凝土圆柱体抗压强度，单位 MPa)计算，泊松比取 0.2。混凝土受拉时，需定义混凝土受拉软化性能，ABAQUS 中提供了三种定义混凝土受拉软化性能的方法：第一种是采用混凝土应力-裂缝关系；第二种是采用混凝土受拉的应力-应变关系；第三种是采用破坏能量准则来考虑混凝土受拉软化性能。本文采用第三种方法考虑混凝土受拉破坏。 $G_f$  和  $\sigma_{t0}$  分别是混凝土的断裂能(每单位面积内产生一条连续裂缝所需的能量

值)和破坏应力。其中,当  $f_c=20\text{MPa}$  时,破坏能  $G_f=40\text{N/m}$ ;当  $f_c=40\text{MPa}$  时,破坏能  $G_f=120\text{N/m}$ ,中间数值线性插值求得(Hillerborg 等, 1976<sup>[52]</sup>)。破坏应力由式  $\sigma_{t0}=0.26\cdot(1.5f_{ck})^{2/3}$  计算得到(沈聚敏等, 1993<sup>[53]</sup>)。

### 3 刚度大的弹性材料

本文在有限元模拟中用到的加载板采用刚度大的弹性材料。使用加载板的目的是避免对构件加载时产生应力集中。其弹性模量取为  $10^{12}\text{MPa}$ ,泊松比取为 0.0001。

## 2.2.2 模型单元

本文模型单元选取为两种,一种为实体单元,本文实体单元 ABAQUS 中采用 C3D8 单元(8 节点缩减积分格式的三维实体单元),这种单元精度稍低,但可以缩减单元的自由度,节省计算时间。第二种是壳单元,本文壳单元 ABAQUS 中采用 S4R 单元(4 节点缩减积分格式壳单元),为满足精度要求,壳单元厚度方向采用 7 个积分点的 Simpson 积分。

为了使有限元计算简便节省时间对于轴压及单向偏压构件的有限元建模分析,选取 1/8 或 1/2 模型建立,模拟时约束其对称边界已达到模拟全模型的效果。如对矩形钢管混凝土单向偏压构件,本文模型建立为 1/2 模型图 2.2 所示。

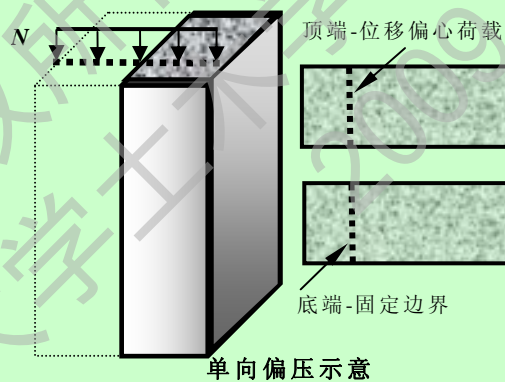


图 2.2 钢管混凝土单向偏压荷载及边界条件

## 2.2.3 接触模型, 荷载及边界条件

本文定义的接触主要有钢管和混凝土之间的法向接触和切向接触。对于钢管和混凝土接触界面法向采用硬接触,对于钢管与混凝土界面切向模型,有两种定义方法:第一种是使用界面单元来模拟钢管与混凝土之间的摩擦力,将界面摩擦系数定为 0.25,第二种是用弹簧单元来模拟接触界面。本文采用第一种库伦摩擦模型,来模拟钢管与混凝土界面之间的接触。

本文对分析构件荷载施加的方式主要有两种,第一种为位移加载(BC),这种加载方式是本文矩形钢管混凝土构件单一受力时的主要加载方式,位移加载可以使模型有限元计算收敛更为容易。第二种是力加载(Load),这种加载方式主要运

用到本文对矩形钢管混凝土构件复合受力时的有限元计算。

边界条件是约束构件位移或变形已达到所要模拟构件在现实环境中的基本要求。本文对构件的约束主要有轴向位移约束和转角约束。对构件施加那种约束要考虑到构件建立的实际情况,如模型为原模型的 1/2,边界条件在其对称轴上就要约束其对称边界条件和底端固定边界条件。

### 2.2.4 单元划分及模型求解

根据要分析构件部位的重要程度,及构件尺寸,采用试验网格的方法来确定网格密度。对于要重点分析提取数据的部位,可以切割后适当加密划分,但划分原则为划分的单元三向尺寸差别不应过大。对不同材料单元体组合后划分网格时,应尽量保持它们接触位置网格的一致性,避免错动不利于有限元计算分析。模型分析步,根据所要分析构件的加载方式订立分析步,例如对矩形钢管混凝土压弯扭构件的研究,就需要订立 3 个分析步。分析步的设立是求解模型的重要步骤。分析步设定完成后进行有限元求解。

## 2.3 矩形钢管混凝土双向偏压构件力学性能分析

### 2.3.1 有限元建模

#### 1 单元类型

矩形钢管混凝土双向压弯模型混凝土、加载板模型都采用 C3D8 实体单元,钢管采用 S4R 壳体单元。加载板两块,分别定义在构件的两端。

#### 2 材料模型

本节核心混凝土、钢管、加载板材性均采用 2.2.1 节材料模型。

#### 3 接触模型

钢管和混凝土之间接触,切向考虑库伦摩擦,定义摩擦系数为 0.25,法向采用硬接触 Hard,混凝土和加载板之间只考虑库伦摩擦,系数取为 0.25。

#### 4 荷载施加及边界条件

双向压弯荷载施加参数通过荷载偏心率  $e$  及荷载偏心角  $\theta$  确定,荷载施加方法为位移荷载施加,荷载直接加到加载板上,通过加载板传递给构件,钢管与混凝土同加载板之间考虑 Tie 约束。构件的边界条件如图 2.3 所示,构件顶端与底部都采用交接点约束其中位移施加端约束 U1 和 U2,另一端约束 U1、U2、U3。

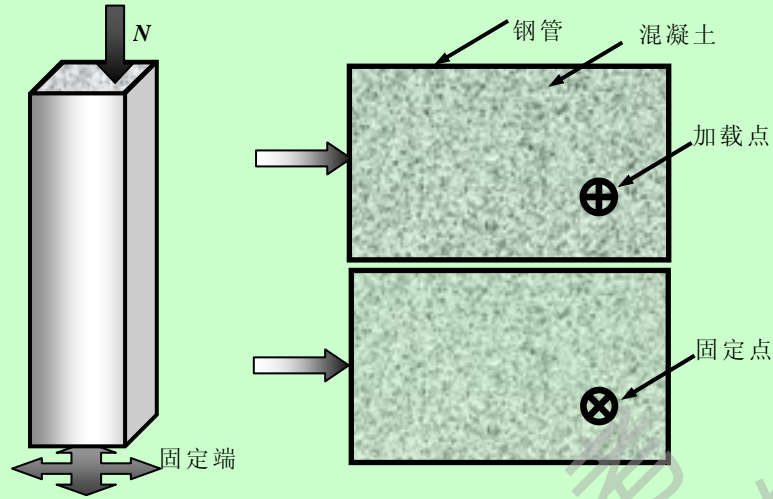
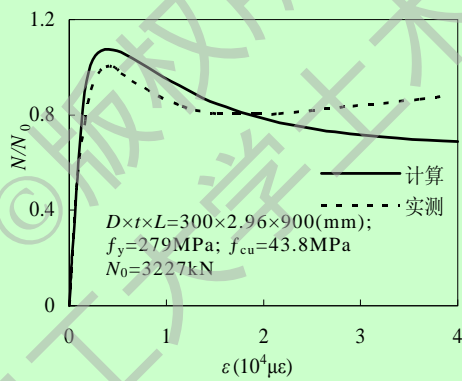


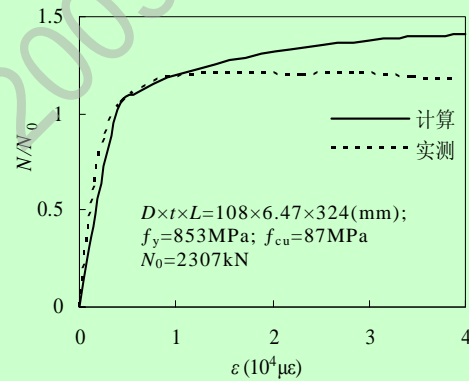
图 2.3 矩形钢管混凝土双向偏压荷载及边界条件

本文分别对文献 Nishiyama 等(2002)<sup>[54]</sup>、韩林海(2007)<sup>[1]</sup>、陈刚花和李斌(2006)<sup>[55]</sup>、尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>的圆形、方形及矩形钢管混凝土轴压、压弯(及双向压弯)试件进行了数值模拟。

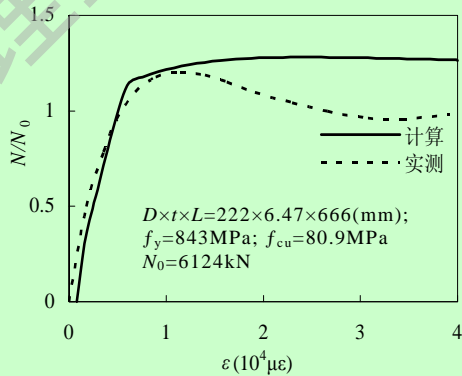
图 2.4 和 2.5 为有限元数值分析的圆形截面、方形截面钢管混凝土轴压及偏压实验得到结果，从中可以看出本文建立的模型计算结果和实验结果曲线对比  $N-\varepsilon$  和  $N-u_m$  关系基本吻合。通过 ABAQUS 数值模拟和实验对比结果，可以看出由本文建立的钢管混凝土有限元模型可以进行双向偏压矩形钢管混凝土的有限元分析。



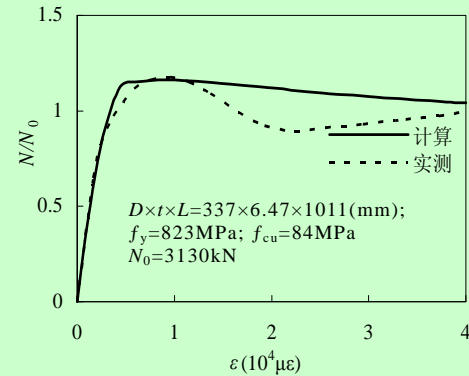
(a1) 圆形截面轴压



(a2) 圆形截面轴压

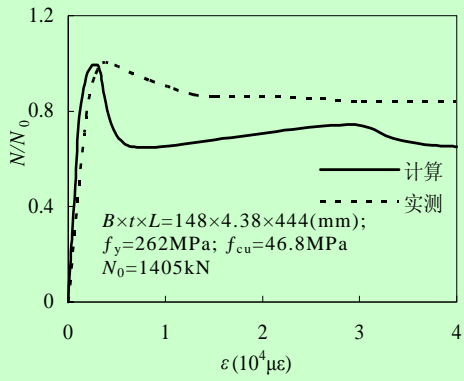


(a3) 圆形截面轴压

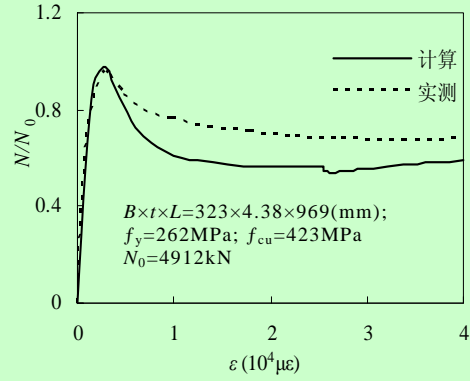


(a4) 圆形截面轴压

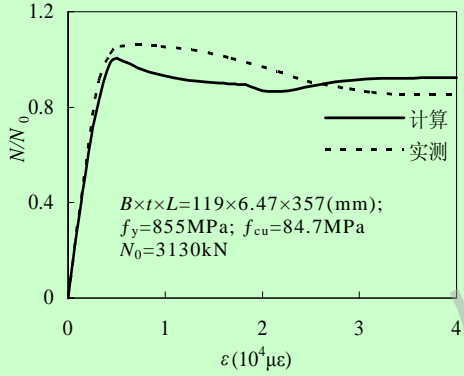




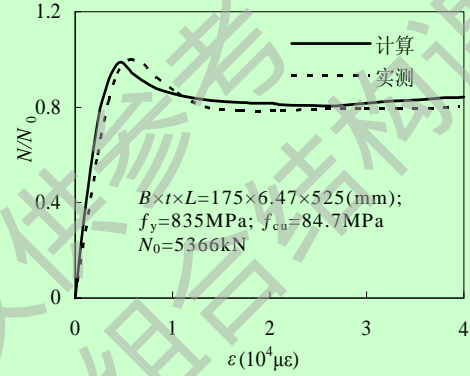
(b1) 方形截面轴压



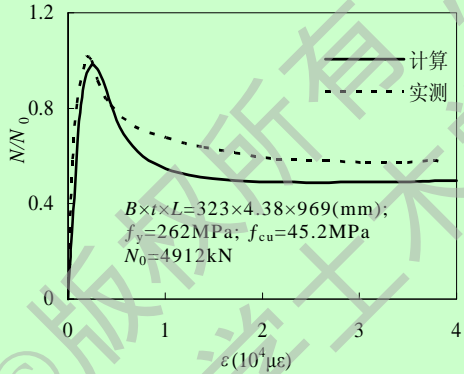
(b2) 方形截面轴压



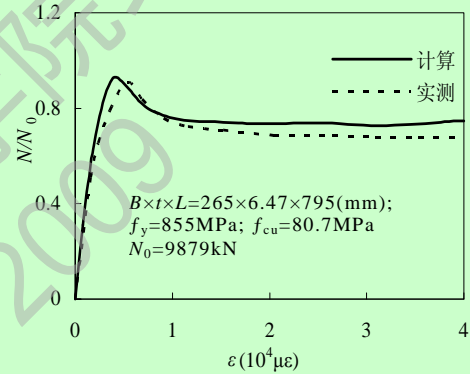
(b3) 方形截面轴压



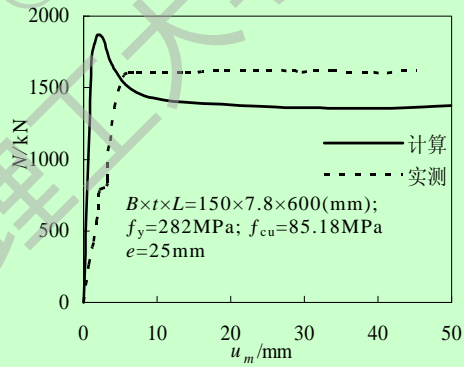
(b4) 方形截面轴压



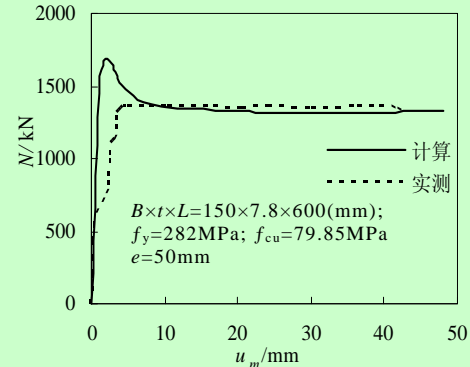
(b5) 方形截面轴压



(b6) 方形截面轴压



(c1) FGZ3



(c2) FGZ4

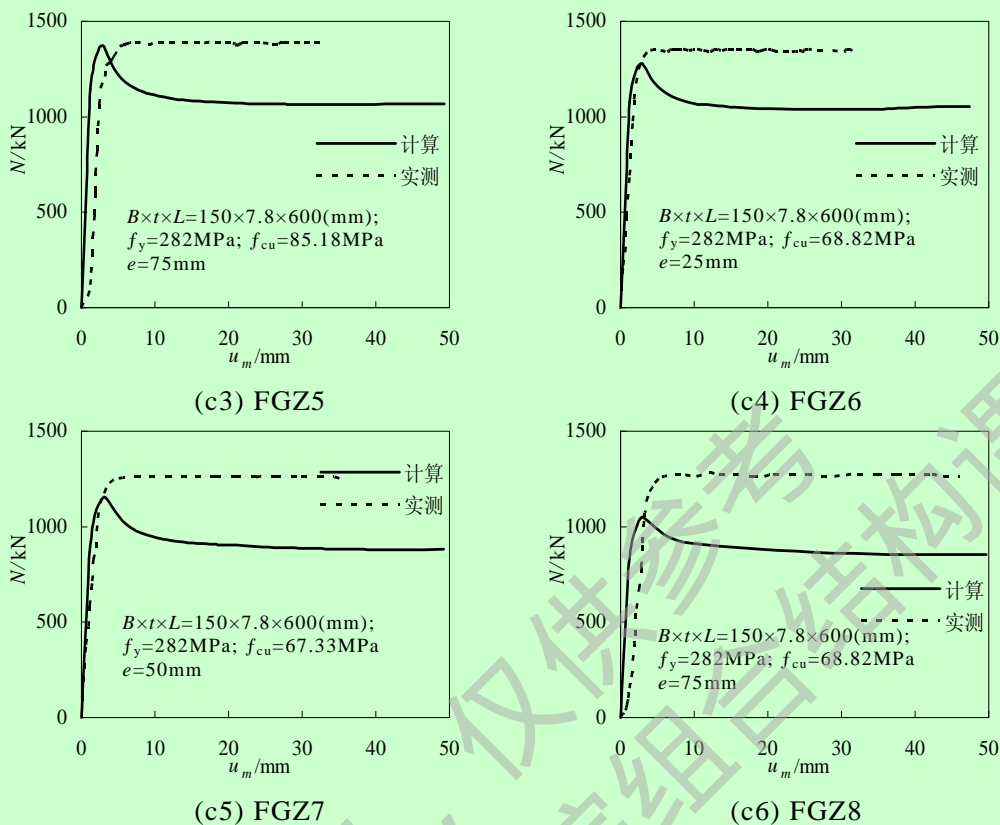
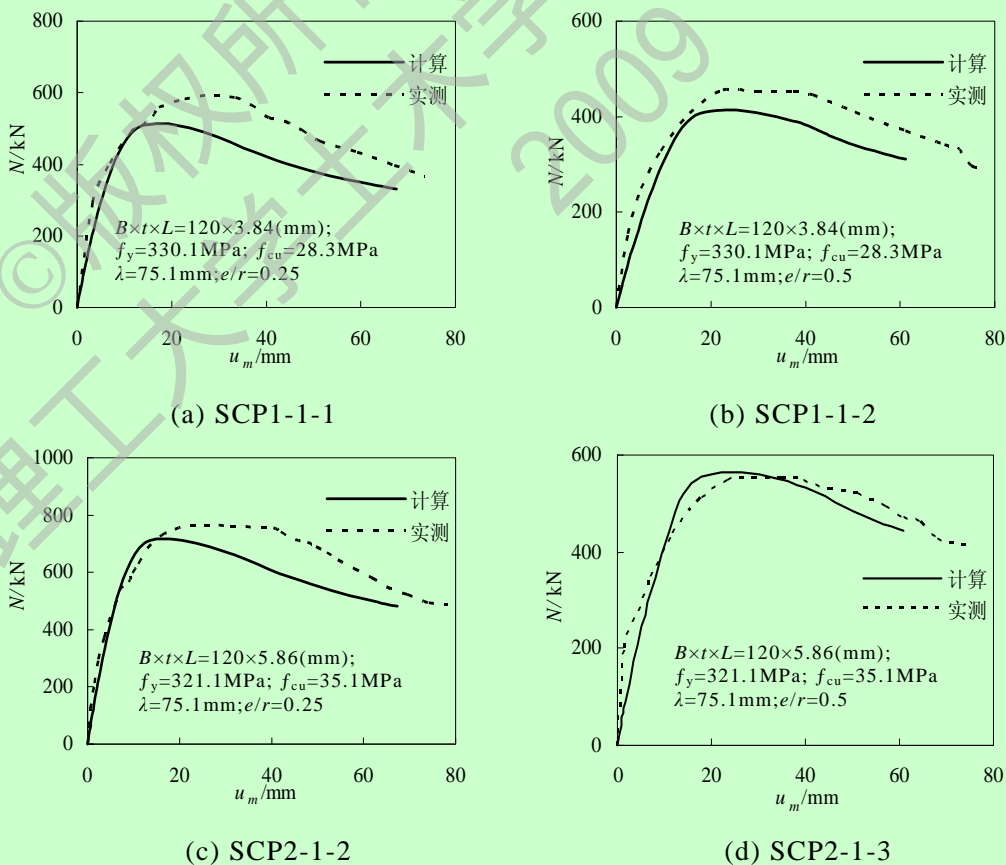
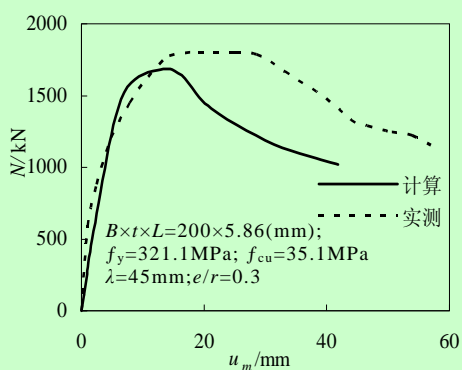


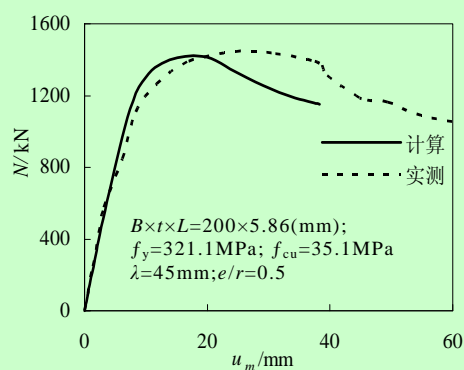
图 2.4 圆形及方形截面钢管混凝土轴压 ABAQUS 计算  $N-\varepsilon$  关系和实验结果比较







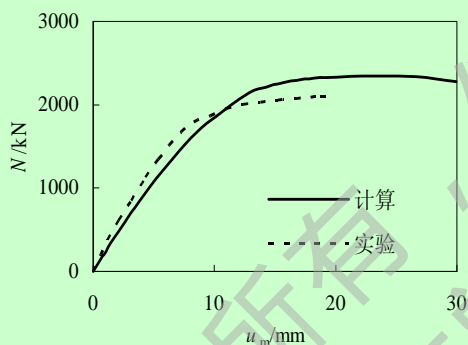
(e) SCP2-3-2



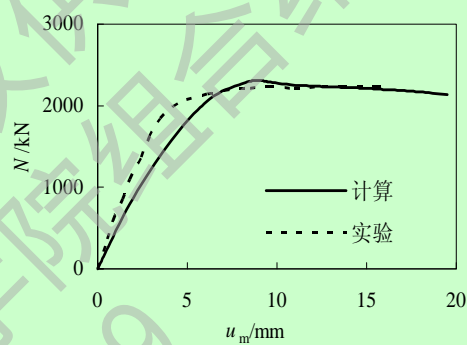
(f) SCP2-3-3

图 2.5 方形钢管混凝土单向偏心受压 ABAQUS 计算  $N-u_m$  关系和实验结果比较

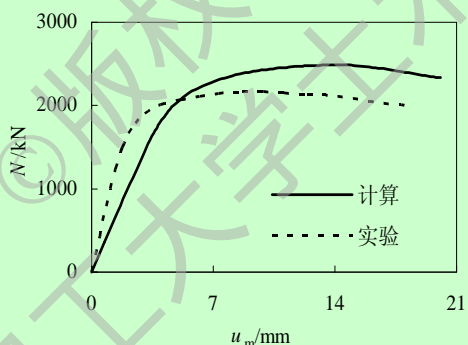
图 2.6 为 ABAQUS 有限元模拟方形钢管混凝土双向偏压实验得到的数值分析结果与实验分析结果韩林海(2007)<sup>[1]</sup>的  $N-u_m$  曲线对比。表 2.1 给出了数值模拟实验试件的参数。



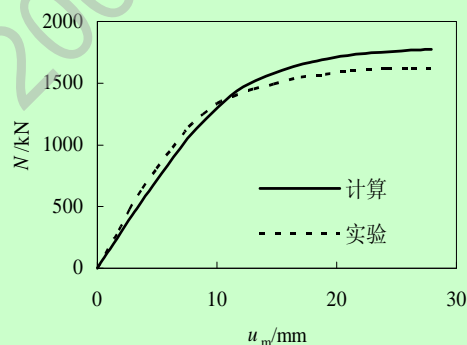
(a) SHC-1



(b) SHC-2



(c) SHC-3



(d) SHC-4

图 2.6 方形钢管混凝土双向偏心受压构件理论计算和实验  $N-u_m$  关系比较

表 2.1 方钢管混凝土双向压弯构件汇总表(韩林海, 2007<sup>[1]</sup>)

试件编号	$B \times t$ (mm)	$e$ (mm)	$\theta$ (°)	$L$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_{cu}$ (MPa)
(a) SHC-1	202.9×10.01	38	30	3050	319	52.7
(b) SHC-2	203.5×10.03	38	30	2130	313	44.2
(c) SHC-3	203.1×9.88	38	45	2130	317	46.6
(d) SHC-4	202.65×9.78	64	45	3050	317	43

### 2.3.2 钢管与混凝土相互作用力和破坏模式

图 2.7 给出矩形截面钢管混凝土压弯构件中截面 A 点、B 点、C 点和 D 点处钢管对混凝土的约束 ( $p$ )~中截面挠度( $u_m$ )的关系曲线。

从图 2.7 可以看出矩形截面钢管混凝土双向压弯受力过程中钢管和混凝土之间的相互作用力的变化, 图(a)为偏心角  $\theta=60^\circ$ , 图(b)为偏心角  $\theta=0^\circ$ 。图(a)截面的角点 A、D 处接触力随着作用力的增大而增大, B、C 截面短边和长边中点的接触力变化不大且数值较小。图(b)截面和图(a)类似在角点处的钢管混凝土混凝土接触力最大, 截面边缘的中点接触力较小且变化不大。这表明矩形钢管混凝土双向偏压过程中构件的角部(如果是钢板焊接则在焊接处)的受力最为集中。

图 2.8 给出了有限元计算的矩形截面钢管混凝土双向压弯构件弯曲破坏模式, 为了更直观的反映矩形截面钢管混凝土双向压弯构件的破坏模式, 数据提取时已将钢管、混凝土、加载板分别提取。

从图 2.8(b)看出矩形钢管混凝土中混凝土受到偏心受压时弯曲, 弯曲时构件跨中挠度最大, 两端角点处力最大。反力变化从构件的两端逐渐向构件的中间发展, 由于双向压弯构件受力为偏心使得构件两端受力时传递到中心的截面力不均匀, 导致构件中间受力集中区域向内凹曲, 截面内力为压力, 其周边区域压力逐渐减小并转向为拉力, 构件此部分向外凸出。从图 2.8(b)和(c)可以看出钢管混凝土中钢管和混凝土变形一致, 受力集中位置也相同, 说明钢管和混凝土在模拟中接触良好。

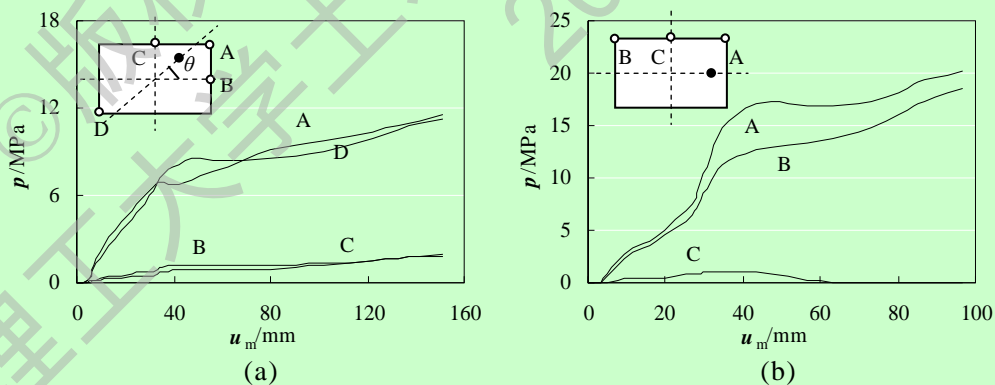
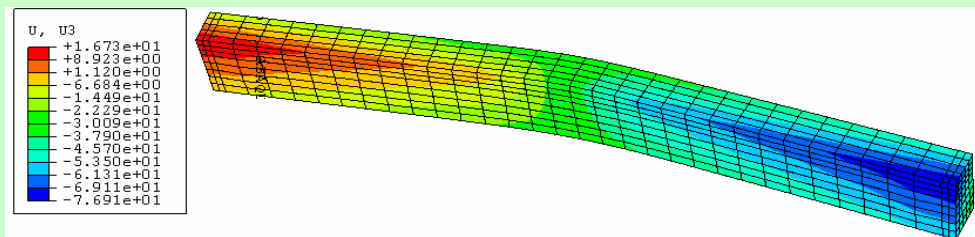


图 2.7 矩形截面钢管混凝土双向压弯钢管与混凝土接触力



(a) 整体构件

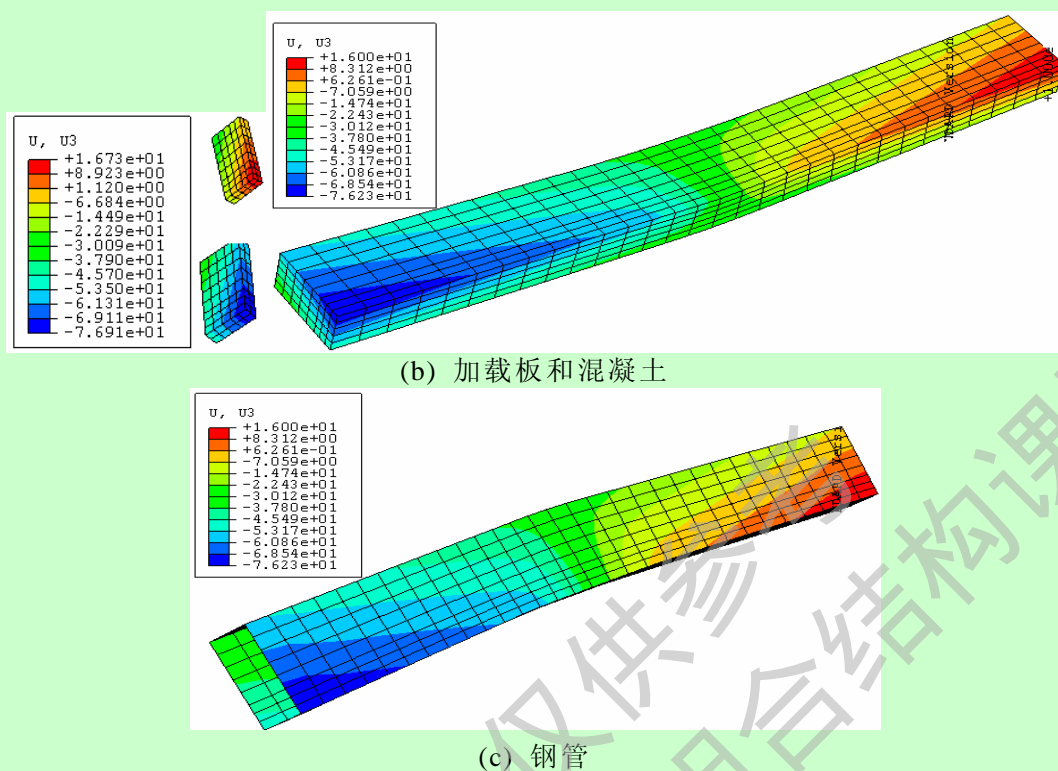


图 2.8 矩形截面钢管混凝土构件(Q345, C60,  $\alpha=0.1$ )

### 2.3.3 参数分析

通过对圆形截面和方形截面实验轴压和单向及双向偏压的 ABAQUS 模拟可以看出, 得到模拟曲线(轴压、单向、双向压弯)总体上与实验结果曲线吻合良好。建模方法可以用来进行矩形截面钢管混凝土构件双向压弯模型建立。

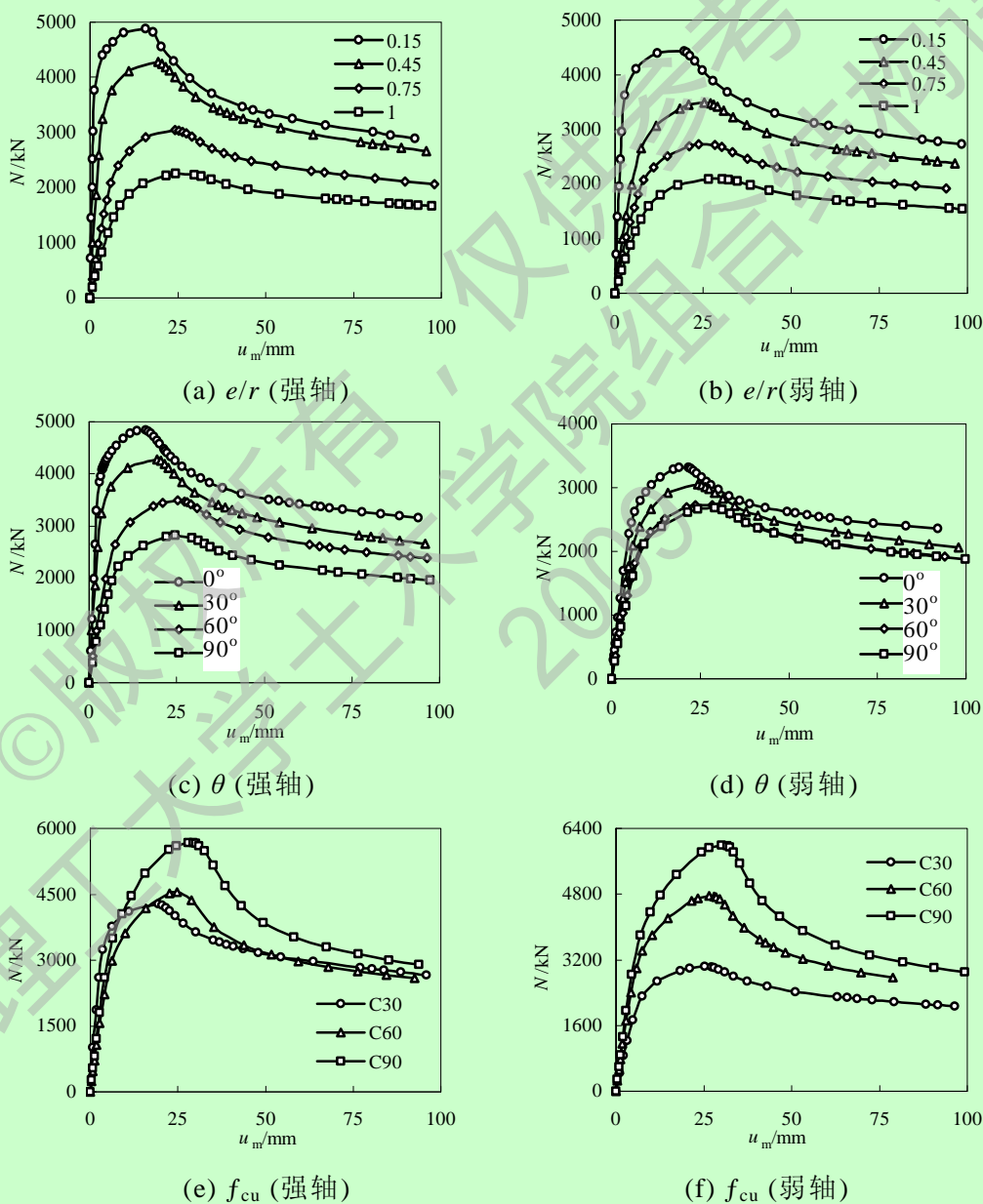
为明晰各主要参数对矩形钢管混凝土双向压弯构件力学性能的影响规律, 有必要采用前述理论模型进行更大参数范围内的理论分析。分析的参数有荷载偏心率  $e/r$ , 荷载偏心角  $\theta$ , 含钢率  $\alpha$ , 钢材强度  $f_y$ , 混凝土强度  $f_{cu}$ , 长细比  $\lambda$ 。参数分析的典型构件基本参数为: 截面长宽比  $\beta=1.5$  ( $\beta=D/B$ , 其中,  $D$  为截面长边尺寸,  $B$  为短边尺寸), 含钢率  $\alpha=0.1$ 。  $f_y=235\text{MPa}$  钢材, C30 混凝土, 构件计算长度  $L=3600\text{mm}$ 。

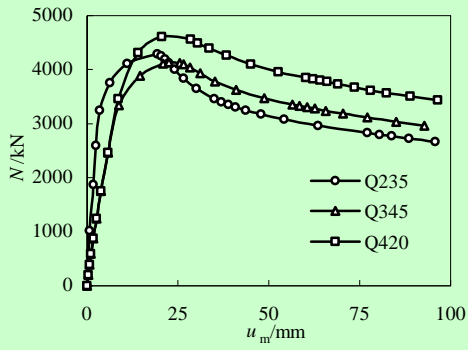
参数分析的变化范围为:

- 1) 材料参数: 钢材屈服强度  $f_y=235\text{MPa}$ 、 $345\text{MPa}$ 、 $420\text{MPa}$ ; 混凝土强度  $f_{cu}=30\text{MPa}$ 、 $60\text{MPa}$ 、 $90\text{MPa}$ 。
- 2) 几何参数: 截面高宽比  $\beta=1$ 、 $1.25$ 、 $1.5$ 、 $1.75$ 、 $2$ ; 截面含钢率  $\alpha=0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.15$ 、 $0.2$ ; 构件长细比  $\lambda=30$ 、 $60$ 、 $90$ ; 荷载偏心率  $e/r=0.15$ 、 $0.45$ 、 $0.75$ 、 $1$ ; 荷载偏心角  $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 。

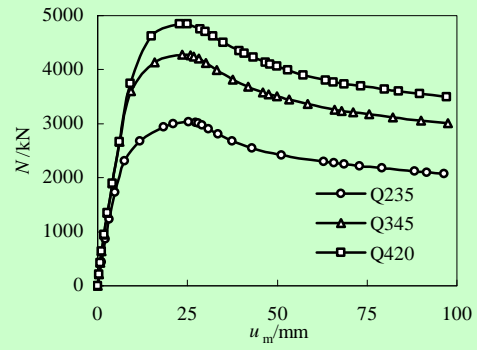
对矩形截面进行了强轴和弱轴区域的划分, 划分界限以截面对角线为界, 靠近长边的区域为弱轴区域, 靠近短边的区域为强轴区域, 截面被两条对角线划分为 2 个强轴区域和 2 个弱轴区域。

本文共计算 472 个钢管混凝土构件的有限元模型其中包括实验验证模型及矩形钢管混凝土参数分析模型。各参数计算区分了强轴和弱轴，图 2.9 给出了部分参数分析 ABAQUS 计算结果。为明晰矩形截面钢管混凝土双向偏压模拟过程中所进行的参数分析分别对各参数进行了归纳并以列表的形式总结，如表 2.2 和表 2.3。分别列出了  $\beta=1.25$  和  $\beta=2$  情况下钢材强度  $f_y$ 、混凝土强度  $f_{cu}$ 、含钢率  $\alpha$ 、长细比  $\lambda$ 、荷载偏心率  $e/r$ 、荷载偏角  $\theta$  对矩形钢管混凝土荷载变形曲线的影响，并区分了参数对强轴和弱轴方向的影响关系。

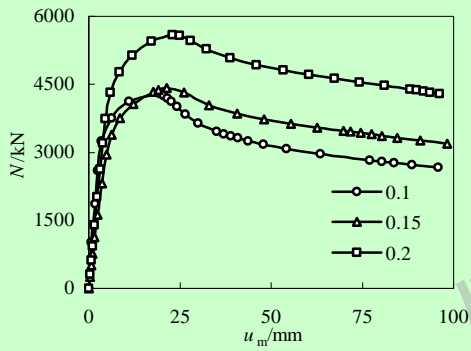




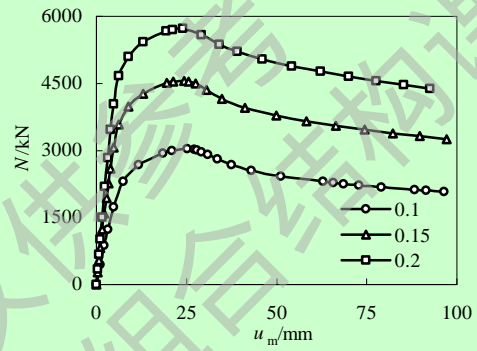
(g)  $f_y$  (强轴)



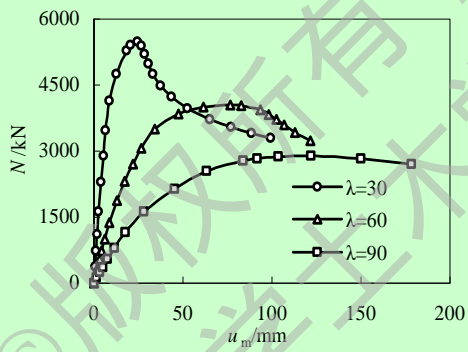
(h)  $f_y$  (弱轴)



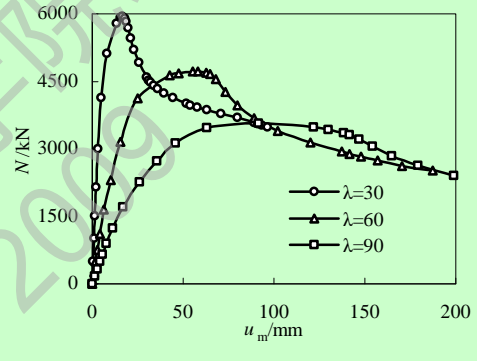
(i)  $\alpha$  (强轴)



(j)  $\alpha$  (弱轴)

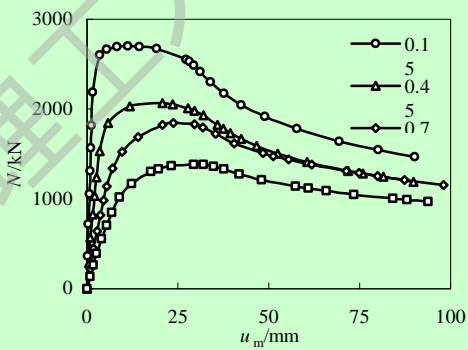


(k)  $\lambda$  (强轴)

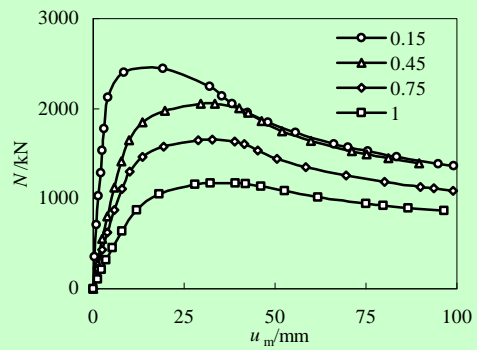


(l)  $\lambda$  (弱轴)

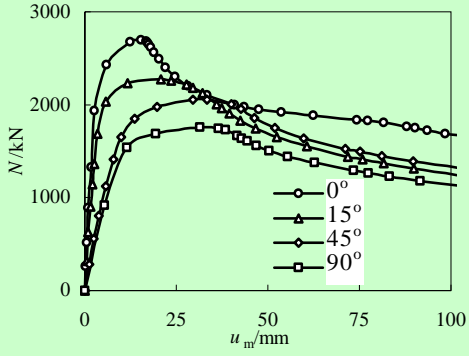
(1) 矩形钢管混凝土双向压弯构件( $\beta=1.25$ )



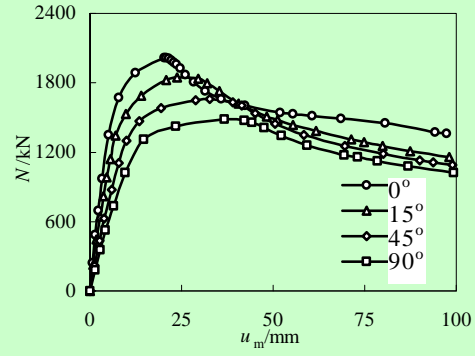
(A)  $e/r$  (强轴)



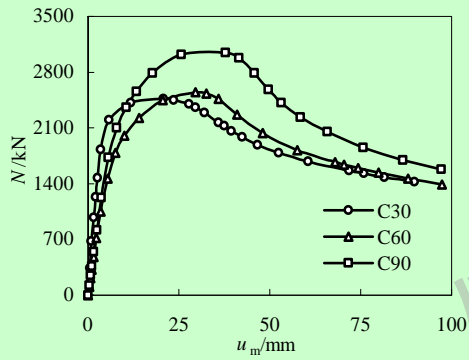
(B)  $e/r$  (弱轴)



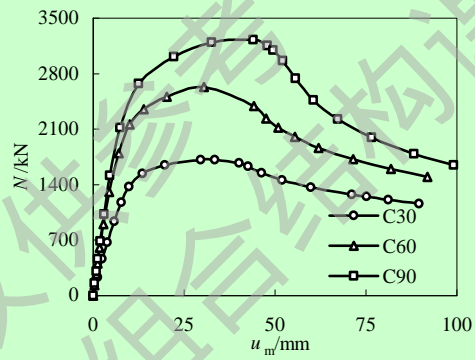
(C)  $\theta$  (强轴)



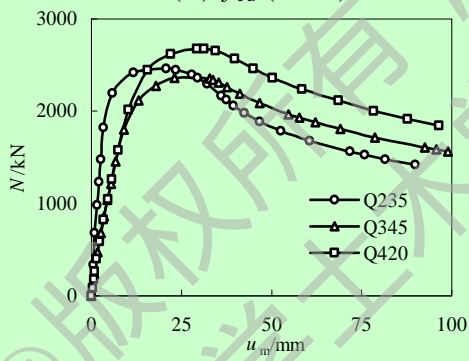
(D)  $\theta$  (弱轴)



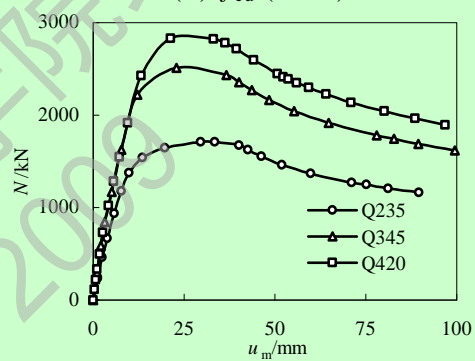
(E)  $f_{cu}$  (强轴)



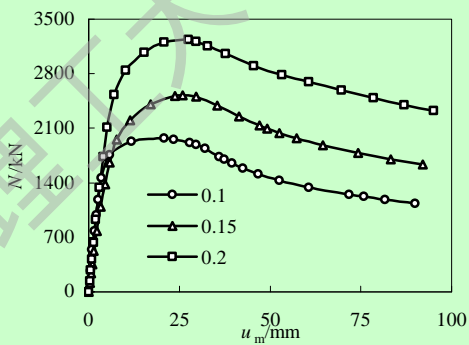
(F)  $f_{cu}$  (弱轴)



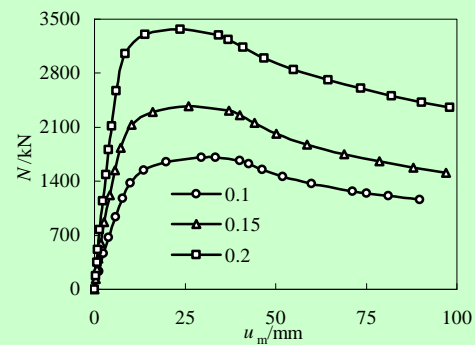
(G)  $f_y$  (强轴)



(H)  $f_y$  (弱轴)

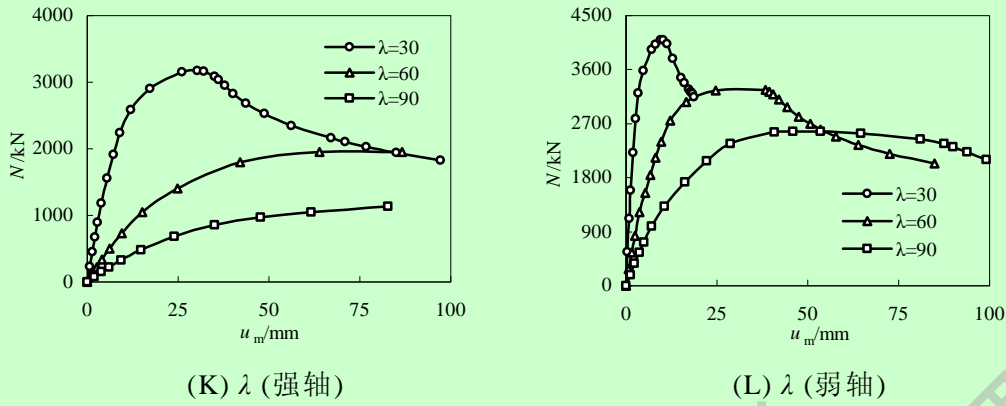


(I)  $\alpha$  (强轴)



(J)  $\alpha$  (弱轴)





(K)  $\lambda$  (强轴) (L)  $\lambda$  (弱轴)  
 (2) 矩形钢管混凝土双向压弯构件 ( $\beta=2$ )

图 2.9 各参数对矩形钢管混凝土双向压弯构件  $N-u_m$  关系的影响

表 2.2 不同参数比对  $D:B=1.25$

图号	不变量(mm, MPa)	变量
a、b	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, \theta=60^\circ, L=3600$	$e/r$
c、d	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, L=3600$	$\theta$
e	$f_y=235, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=30^\circ, L=3600$	$f_{cu}$ (强轴)
f	$f_y=235, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=60^\circ, L=3600$	$f_{cu}$ (弱轴)
g	$f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=30^\circ, L=3600$	$f_y$ (强轴)
h	$f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=60^\circ, L=3600$	$f_y$ (弱轴)
i	$f_y=235, f_{cu}=30, e/r=0.45, \theta=30^\circ, L=3600$	$\alpha$ (强轴)
j	$f_y=235, f_{cu}=30, e/r=0.45, \theta=60^\circ, L=3600$	$\alpha$ (弱轴)
k	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=30^\circ$	$\lambda$ (强轴)
l	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=60^\circ$	$\lambda$ (弱轴)

表 2.3 不同参数比对  $D:B=2$

图号	不变量(mm, MPa)	变量
A、B	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, \theta=45^\circ, L=3600$	$e/r$
C、D	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, L=3600$	$\theta$
E	$f_y=235, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=15^\circ, L=3600$	$f_{cu}$ (强轴)
F	$f_y=235, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=45^\circ, L=3600$	$f_{cu}$ (弱轴)
G	$f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=15^\circ, L=3600$	$f_y$ (强轴)
H	$f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=45^\circ, L=3600$	$f_y$ (弱轴)
I	$f_y=235, f_{cu}=30, e/r=0.45, \theta=15^\circ, L=3600$	$\alpha$ (强轴)
J	$f_y=235, f_{cu}=30, e/r=0.45, \theta=45^\circ, L=3600$	$\alpha$ (弱轴)
K	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=15^\circ$	$\lambda$ (强轴)
L	$f_y=235, f_{cu}=30, \alpha=0.1, e/r=0.45, \theta=45^\circ$	$\lambda$ (弱轴)

### 2.3.4 分析结果总结

通过大量的参数分析，可以对影响对矩形钢管混凝土双向压弯力学性能的主要参数做如下总结：

#### (1) 荷载偏心率( $e/r$ )

图 2.9 中(a)、(b)给出了荷载偏心率  $e/r$  对矩形钢管混凝土极限承载力的影响，可以看出随着  $e/r$  的增加，构件的强轴和弱轴方向的极限承载力都下降，构件的初始刚度下降。总体上荷载偏心率  $e/r$  主要影响曲线的数值，对曲线的形状影响不大。

#### (2) 荷载偏心角( $\theta$ )

从图 2.9 中(c)、(d)给出了荷载偏心角  $\theta$  对矩形钢管混凝土极限承载力的影响，可以看出随着  $\theta$  的增大，构件的强轴和弱轴方向的极限承载力都下降，初始刚度都下降，但弱轴方向的极限承载力下降较小。总体上荷载偏心角  $\theta$  主要影响曲线的数值，对曲线的形状影响不大。

#### (3) 混凝土强度( $f_{cu}$ )

从图 2.9 中(e)、(f)给出了混凝土强度  $f_{cu}$  对矩形钢管混凝土极限承载力的影响，可以看出随着  $f_{cu}$  的增加，构件的强轴和弱轴方向的极限承载力都增大，初始刚度变化不大，但构件强轴方向的极限承载力增加比弱轴方向小。总体上混凝土强度  $f_{cu}$  主要影响曲线的数值，对曲线的形状影响不大。

#### (4) 钢材强度( $f_y$ )

从图 2.9 中(g)、(h)给出了钢材强度  $f_y$  对矩形钢管混凝土极限承载力的影响，可以看出随着  $f_y$  的增加，对构件的强轴方向的极限承载力和初始刚度影响不大，对弱轴方向构件极限承载力影响大，对弱轴方向构件的初始刚度影响不大。

#### (5) 含钢率( $\alpha$ )

从图 2.9 中(i)、(j)给出了含钢率  $\alpha$  对矩形钢管混凝土极限承载力的影响，可以看出随着  $\alpha$  的增加，构件的强轴和弱轴方向的极限承载力都增大，初始刚度强轴方向变化不大，弱轴方向略有减小。总体上含钢率  $\alpha$  主要影响曲线的数值，对曲线的形状影响不大。

#### (6) 长细比( $\lambda$ )

从图 2.9 中(k)、(l)给出了长细比  $\lambda$  对矩形钢管混凝土极限承载力的影响，可以看出随着  $\lambda$  的增加，构件的强轴和弱轴方向的极限承载力都减小，初始刚度都下降，曲线峰值点越来越不明显，构件的极限值越发不明显。总体上长细比  $\lambda$  对曲线的数值和形状影响都较大。

此外构件的截面尺寸也对其承载力有较大影响，高宽比越大，荷载进入弱轴区域的几率就越大，对构件的不利影响也会随之增加，使得构件的极限承载力降



低如图 2.9 中(a)和(A)所示, 其他参数相同条件下截面尺寸较合理的  $\beta=1.25$  的构件比  $\beta=1.75$  的构件极限承载力高。所以合理分配构件的高宽比, 对充分利用构件的极限承载力会很有益。

基于本节的理论模型和参数分析结果, 可初步得出以下结论:

(1) 混凝土强度  $f_{cu}$ 、钢材强度  $f_y$ 、含钢率  $\alpha$  的提高使矩形钢管混凝土双向压弯构件承载力提高。荷载偏心率  $e/r$ 、荷载偏心角  $\theta$  及长细比  $\lambda$  的增大矩形钢管混凝土的极限承载力降低。

(2) 不同参数变化对强轴区域和弱轴区域的影响有区别, 分析时需分别研究。

(3) 本节中矩形钢管混凝土双向压弯构件参数分析模型的计算结果为进一步回归分析得到其实用计算公式提供了参考。

## 2.4 矩形钢管混凝土纯扭构件力学性能分析

### 2.4.1 有限元模型

#### 1 单元类型

矩形钢管混凝土纯扭模型中混凝土、钢管和加载板模型都采用 C3D8 实体单元。加载板一块, 定义在构件的荷载施加端。

#### 2 材料模型

与矩形钢管混凝土双向压弯相似, 采用本文 2.2.1 节材料模型。

#### 3 接触模型

钢管和混凝土之间的接触与双向偏压不同, 切向考虑库伦摩擦, 取摩擦系数为 0.6, 法向考虑大刚度接触单元来模拟, 计算时接触刚度取为  $1000\text{N/mm}^{[57]}$ 。采用 Couple 耦合加载板和加载板几何中心点。

#### 4 荷载施加及边界条件

对 3 单元接触中加载板的耦合点施加扭矩  $T$ , 对构件的非荷载施加端的钢管和混凝土约束 U1、U2、U3 三个方向的位移。如图 2.10 所示。

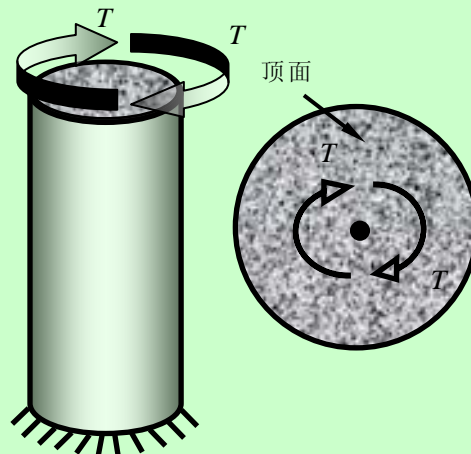


图 2.10 钢管混凝土受扭构件示意图

## 5 单元划分

采用 4 节点单元对模型进行有限元网格划分，划分密度通过试验网格确定。对构件棱角处进行单元切割后划分，保证单元划分均匀，钢管，混凝土和加载板的单元网格对应，无错动。划分的单元三向尺寸差别不应过大。

为了分析矩形截面钢管混凝土扭转问题，本章利用 ABAQUS 有限元软件对已有实验的圆形截面及方形截面钢管混凝土纯扭构件荷载-变形关系曲线进行了模拟对比，并将有限元计算结果和实验结果进行了比较，表 2.4 给出了本文所要模拟纯扭试件的数据。从下图 2.11 数值曲线模拟与实验结果对比，可以看出 ABAQUS 模拟钢管混凝土构件纯扭实验  $T-\theta$  曲线趋势基本吻合。

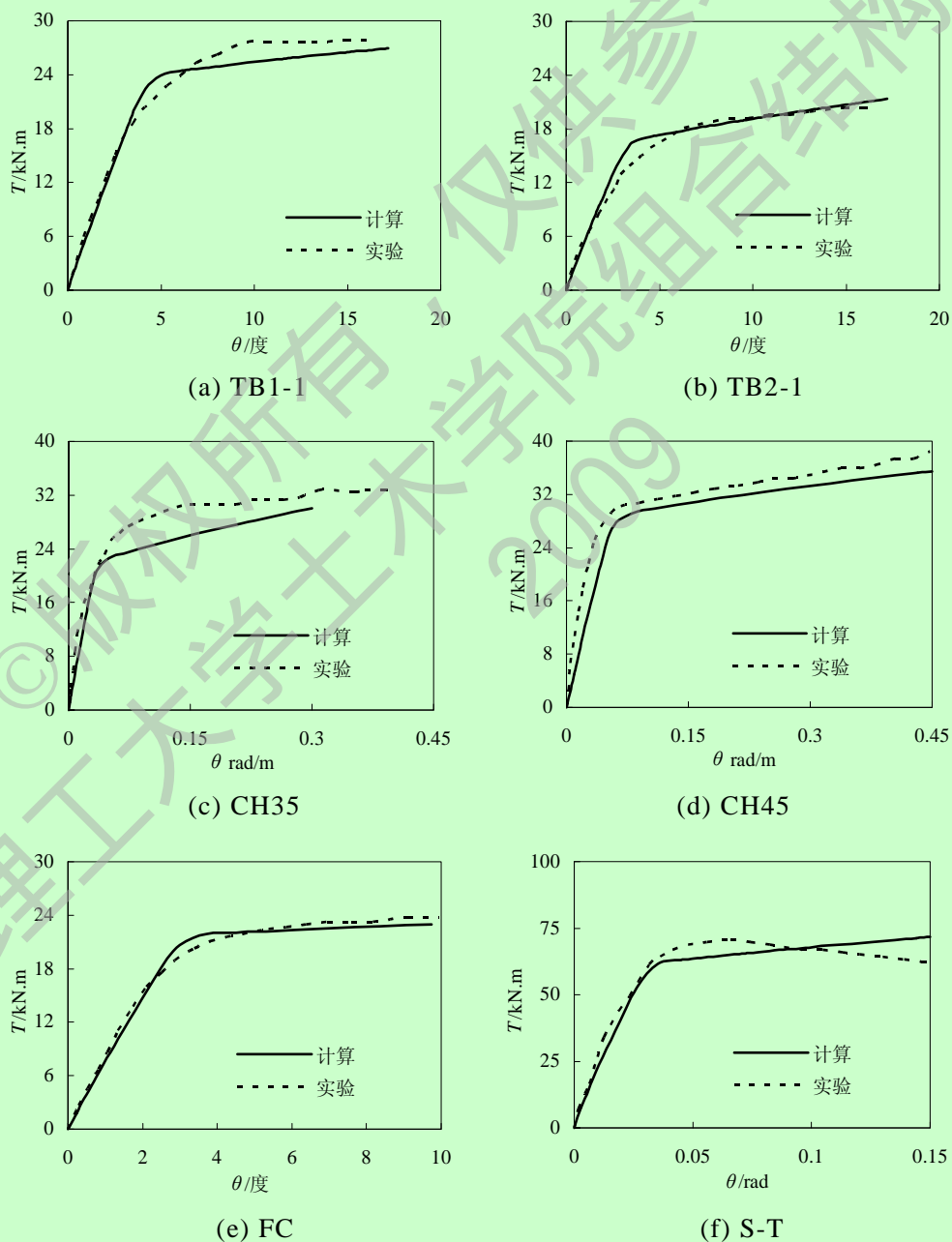


图 2.11 圆形、方形截面钢管混凝土纯扭计算与实验对比曲线

表 2.4 圆形、方形截面纯扭实验试件汇总表

试件编号	$D(B) \times t \times L(\text{mm})$	$f_y$ (MPa)	$f_{cu}$ (MPa)	出处
TB1-1	133×4.5×2000	324.34	30.4	韩林海和钟善铜 (1995a) <sup>[45]</sup>
TB2-1	130×3×2000	324.34	30.4	
CH35	139.8×3.5×1000	322.9	36.3	Beck 和 Kiyomiya (2003) <sup>[57]</sup>
CH45	139.8×4.5×1000	348.2	31.8	
FC	123.5×4.5×1590	274	25.6	Kitada 和 Nakai (1991) <sup>[60]</sup>
S-T	200×4.5×1620	261.4	39	陈逸玮 (2003) <sup>[59]</sup>

### 2.4.2 破坏模态

图 2.12 分别给出了矩形钢管混凝土与矩形空钢管在受纯扭时钢管的典型破坏模态对比。可见空钢管和钢管混凝土破坏时候有明显的区别，空钢管破坏时钢管边缘明显翘曲，而钢管混凝土中钢管则没明显翘曲。

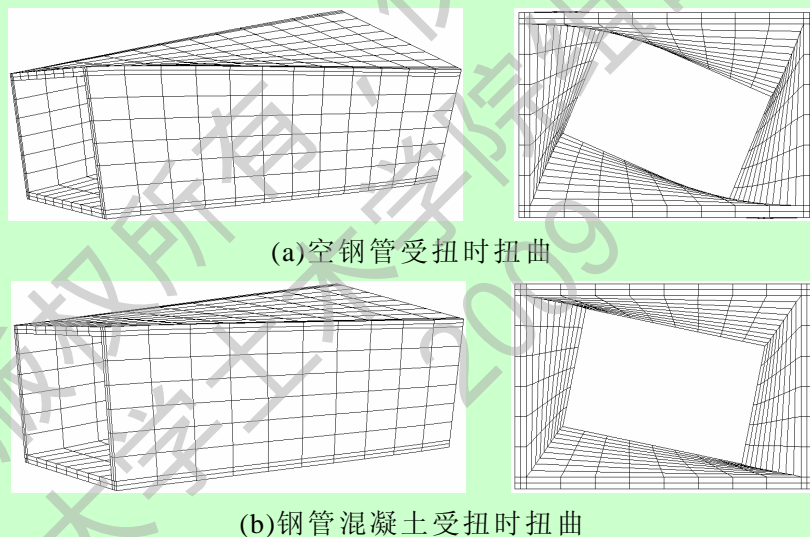


图 2.12 钢管混凝土扭转前后变形有限元网格示意图

图 2.13 中可以看出矩形截面钢管混凝土纯扭构件表现出良好的塑性和稳定性，且钢管没有明显屈曲现象。从应力图 2.13 中看出随着含钢率的提高钢管混凝土中核心混凝土的应力逐渐向构件的中心集中，说明含钢率的提高对钢管混凝土的核心混凝土的约束作用增加，矩形钢管的棱角处应力扩散也随着含钢率的增加而增加。在相同变形情况下及扭转角为 0.2 弧度时，含钢率从 0.1 变化到 0.2 时，混凝土和钢管的应力呈减小趋势即构件的承载力提高。

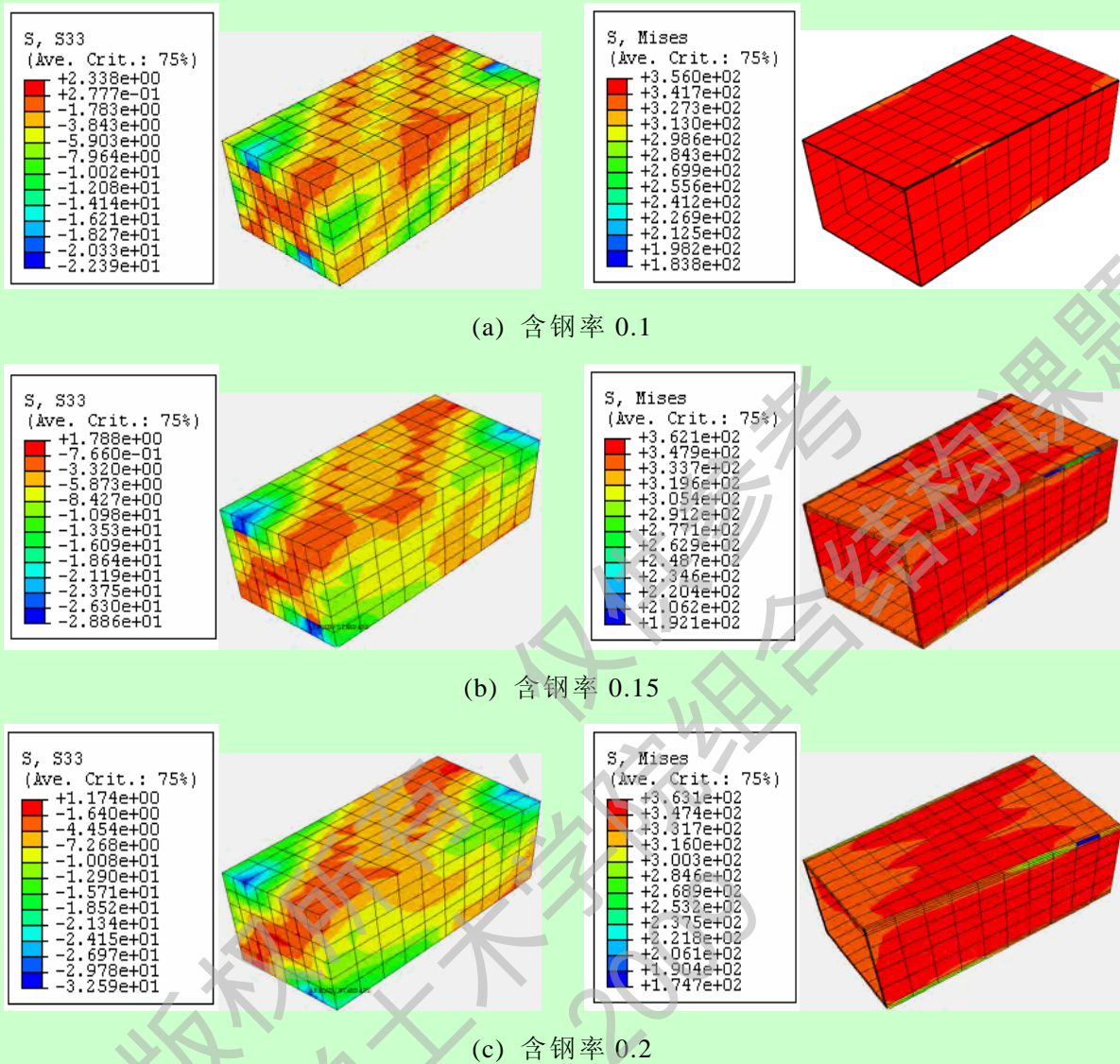


图 2.13 矩形钢管混凝土纯扭破坏应力

### 2.4.3 参数分析

在经过以上圆形截面及方形截面钢管混凝土纯扭算例验证和对矩形截面抗扭破坏模态探讨后本文进行了大量的参数分析。参数分析算例的基本条件为：截面高宽比  $\beta=1.5(\beta=D/B, B=400\text{mm})$ ，含钢率  $\alpha=0.1$ ，钢材屈服强度  $f_y=345\text{MPa}$ ，混凝土强度  $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $L=1155\text{mm}$ 。参数分析变化范围如下：

1) 材料参数：钢材屈服强度  $f_y=235\text{MPa}$ 、 $345\text{MPa}$ 、 $390\text{MPa}$ ；混凝土强度  $f_{cu}=30\text{MPa}$ 、 $60\text{MPa}$ 、 $90\text{MPa}$ 。

2) 几何参数：截面高宽比  $\beta=1$ 、 $1.5$ 、 $2$ ；截面含钢率  $\alpha=0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.15$ 、 $0.2$ ；构件长细比  $\lambda=20$ 、 $40$ 、 $60$ 。

分析结果表明，总体上矩形截面钢管混凝土柱抗扭承载力随钢材强度  $f_y$ 、混凝土强度  $f_{cu}$ 、含钢率  $\alpha$ 、及截面高宽比  $\beta$  的增大而提高。下面就上述参数影响规律进行具体分析。

(1) 截面高宽比( $\beta$ )

图 2.14(a)给出了截面高宽比参数  $\beta$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $\beta$  的提高, 构件的抗扭承载力也在提高, 初始刚度也明显提高。极限承载力提高的程度与  $\beta$  的变化不成比例。总体上截面高宽比  $\beta$  主要影响曲线的数值, 对曲线的形状影响不大。

(2) 混凝土强度( $f_{cu}$ )

图 2.14(b)给出了混凝土强度参数  $f_{cu}$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $f_{cu}$  提高, 构件抗扭承载力提高, 初始刚度无明显变化, 极限承载力数值变化不大。总体上混凝土强度  $f_{cu}$  对曲线的数值及曲线的形状影响不大。

(3) 钢材强度( $f_y$ )

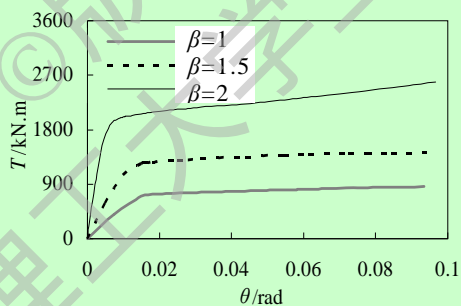
图 2.14(c)给出了钢材强度参数  $f_y$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $f_y$  提高, 构件抗扭承载力提高, 初始刚度无明显变化。总体上钢材强度  $f_y$  主要影响曲线的数值, 对曲线的形状影响不大。

(4) 含钢率( $\alpha$ )

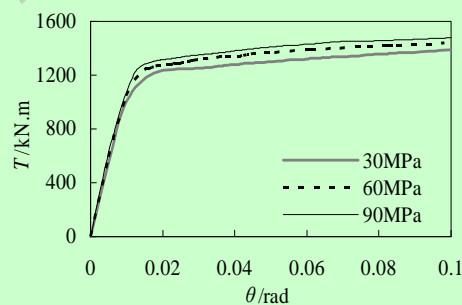
图 2.14(d)给出了含钢率参数  $\alpha$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $\alpha$  提高, 构件抗扭承载力提高, 初始刚度提高且提高程度逐渐减小。极限承载力提高的数值基本相等。总体上含钢率  $\alpha$  主要对曲线的数值有影响, 对曲线的形状影响不大。

(5) 长细比( $\lambda$ )

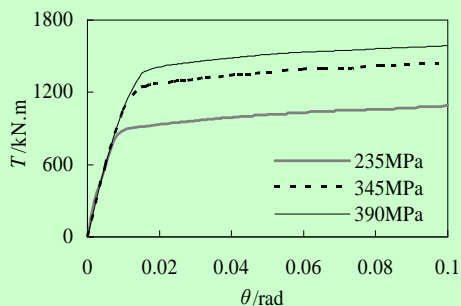
图 2.14(e)给出了长细比参数  $\lambda$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可随着  $\lambda$  的提高, 构件的抗扭承载力极限基本相等, 构件的初始刚度降低。总体上长细比  $\lambda$  主要影响曲线的形状, 对曲线的数值影响较小。



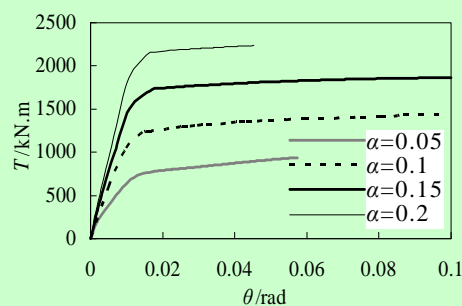
(a) 截面高宽比( $\beta$ )



(b) 混凝土强度( $f_{cu}$ )



(c) 钢材强度( $f_y$ )



(d) 含钢率( $\alpha$ )



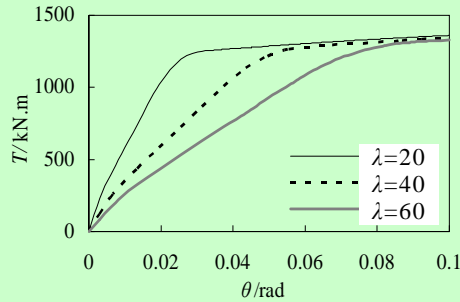

 (e) 长细比( $\lambda$ )

图 2.14 参数对矩形钢管混凝土构件纯扭承载力影响曲线图

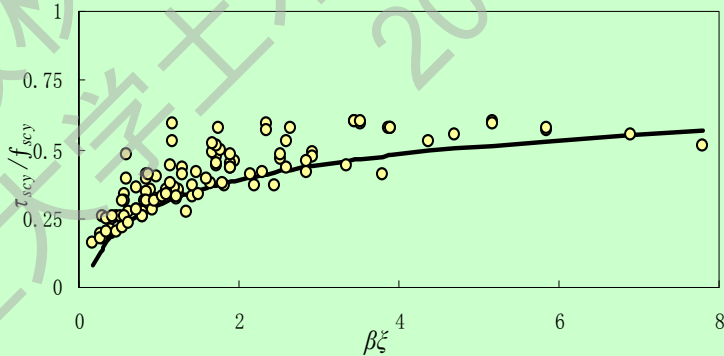
#### 2.4.4 实用计算方法

为更明确矩形钢管混凝土抗扭极限承载力,本文进行了 111 个矩形钢管混凝土的数值分析如图 2.15。

通过大量参数分析后,参考了韩林海(2007)<sup>[1]</sup>,韩林海和钟善桐(1995)<sup>[45]</sup>,取  $\gamma_{scy}=10000\mu\epsilon$  对应的钢管混凝土最大平均剪应力为获取抗扭屈服极限指标  $\tau_{scy}$ 。根据以上定义可以得到  $\tau_{scy}/f_{scy}-\xi$  关系。公式中  $f_{scy}$  为钢管混凝土轴压强度承载力指标可参考《钢管混凝土结构技术规程》(2003)<sup>[15]</sup>得到。

经上述分析得到矩形钢管混凝土组合抗扭屈服极限指标  $\tau_{scy}$  的计算公式如下:

$$\tau_{scy} = \left[ 0.31 \ln(\beta\xi) + \frac{0.3}{X_{scy}} \right] \cdot f_{scy} \quad (2.2)$$


 图 2.15 矩形钢管混凝土  $\tau_{scy}/f_{scy}-\beta\xi$  关系

计算公式中  $\beta=1$  时与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>给出的结果对比分析得到,两公式均方差为 0.076, 如下图 2.16 所示。

$C_{uc}$  为本文计算结果,  $Y_{uc}$  为尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>计算结果。公式中  $X_{scy}$  为计算参数: 当  $\beta=1$  时,  $X_{scy}=0.79$ ; 当  $\beta=1.5$  时,  $X_{scy}=0.86$ ; 当  $\beta=2$  时,  $X_{scy}=1.2$ 。中间数值用插值法求得。

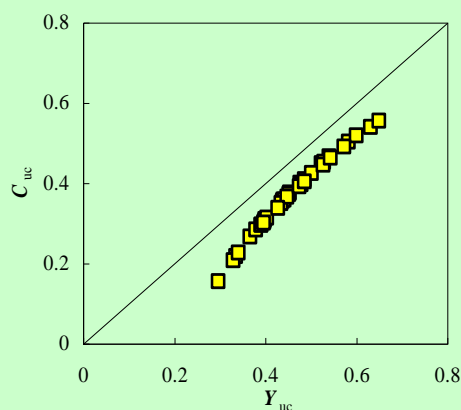


图 2.16 本文计算  $\tau_{scy}$  与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>公式计算结果对比

本节通过以上参数分析，得到了矩形钢管混凝土组合抗扭屈服极限  $\tau_{scy}$ 。对分析理论模型进行了参数分析，考虑钢管混凝土组合抗扭承载力  $T_u$  与  $\tau_{scy}$  和钢管混凝土抗扭截面模量  $W_{scy}$  及约束效应系数  $\zeta$  的关系，并令矩形截面钢管混凝土抗扭强度承载力计算系数的形式为  $\gamma_u = T_u / (\tau_{scy} \cdot W_{scy})$ ，则可以得出  $\gamma_u$ - $\zeta$  之间的关系，如图 2.17：

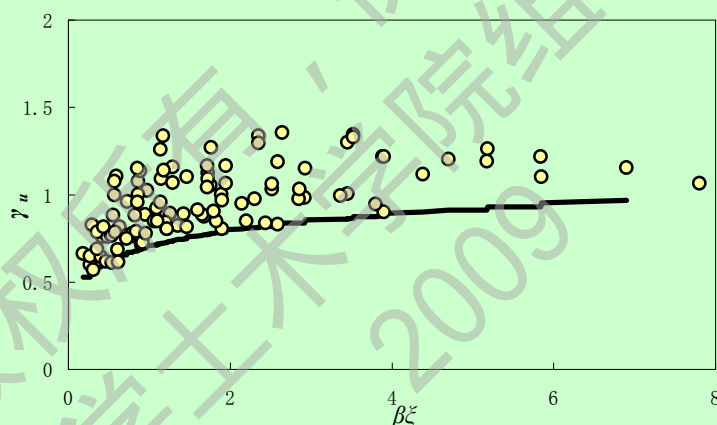


图 2.17 矩形钢管混凝土  $\gamma_u$ - $\beta\zeta$  关系

得到  $\gamma_u$ - $\zeta$  关系公式，经归纳得到公式(2.3)：

$$\gamma_u = 0.3 \ln(\beta\zeta) + \frac{0.7}{X_u} \quad (2.3)$$

公式中  $X_u$  为计算参数：当  $\beta=1$  时， $X_u=0.778$ ；当  $\beta=1.5$  时， $X_u=0.84$ ；当  $\beta=2$  时， $X_u=0.93$ ；中间数值用插值法求得。基于上述研究可以得到矩形截面钢管混凝土抗扭承载力计算公式如下：

$$T_u = \gamma_u W_{scy} \tau_{scy} \quad (2.4)$$

当  $\beta=1$  时，与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>给出的公式计算结果比较，均方差为 0.12。图 2.18 中  $T_c$  为本文计算结果， $T_y$  为尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>中纯扭构件极限承载力计算结果。

公式适用范围：混凝土强度 C30~C60；钢材强度 Q235~Q390；截面高宽比

$\beta=1\sim 2$ ; 含钢率  $\alpha=0.05\sim 0.2$ ; 长细比  $\lambda=20\sim 60$ 。

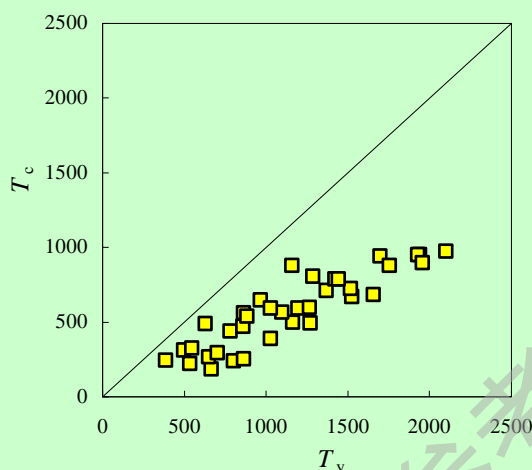


图 2.18 本文计算  $T_u$  与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>公式计算结果对比

## 2.5 矩形钢管混凝土构件纯剪力学性能分析

### 2.5.1 有限元模型

#### 1 单元模型

矩形钢管混凝土纯剪模型中混凝土、钢管和加载板模型同上节介绍的纯扭模型一样采用 C3D8 实体单元。加载板两块，定义在构件的两端。

#### 2 材料模型

矩形钢管混凝土抗剪构件材料模型与 2.2.1 节介绍的模型相同。

#### 3 接触模型

钢管和混凝土之间的接触与纯扭构件分析相同，切向考虑库伦摩擦，法向考虑大刚度接触单元来模拟，这里不再详述。

#### 4 荷载施加及边界条件

对加载板施加竖向位移荷载(BC)，荷载定义到加载板的边缘，对构件的非荷载施加端的钢管和混凝土约束  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  三个方向的位移。如图 2.19 所示。

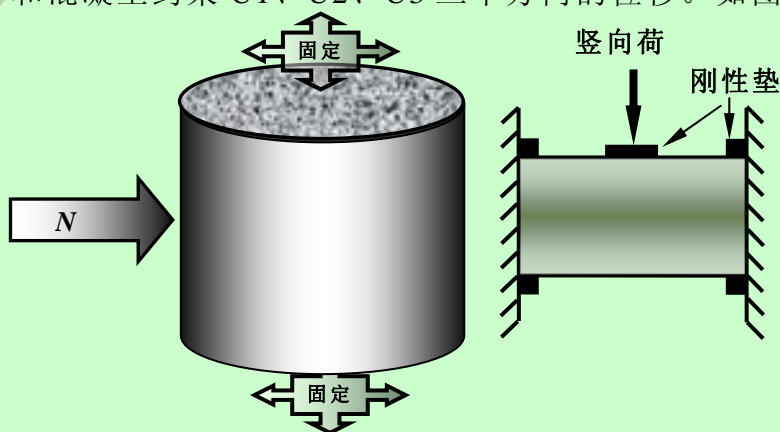


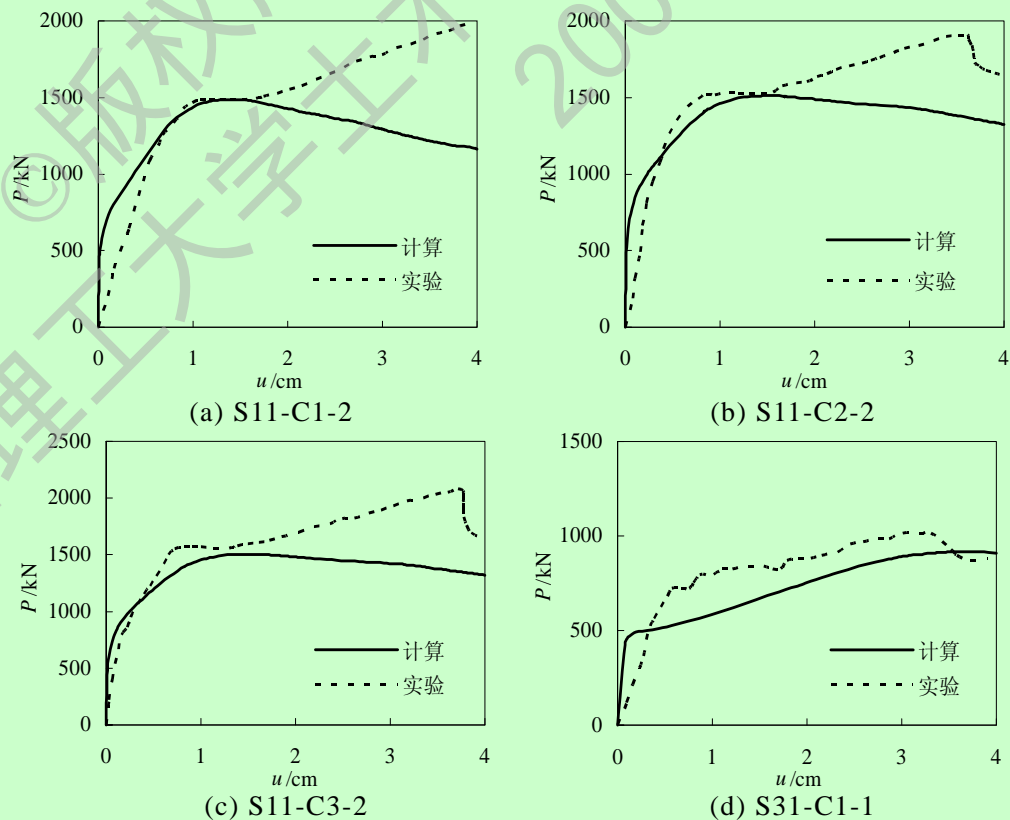
图 2.19 钢管混凝土纯剪受力构件示意图



本章采用 ABAQUS 软件对徐春丽(2004)<sup>[60]</sup>文献中的 8 个实验钢管混凝土纯剪构件进行了模拟，并绘得到了荷载变形曲线。将有限元模拟钢管混凝土纯剪  $P-u$  曲线和得到的真实实验  $P-u$  曲线进行了对比，然后建立矩形截面钢管混凝土纯剪受力下有限元模型并进行了纯剪受力的全程数值模拟，分析了影响矩形钢管混凝土抗剪承载能力的主要参数。

图 2.20 是采用 ABAQUS 模拟得到的  $P-u$  曲线图与实验结果对比。表 2.5 徐春丽(2004)<sup>[60]</sup>给出了实验构件的尺寸及具体参数。图 2.21 给出了圆钢管混凝土构件纯剪受力有限元分析结果。从图 2.20 可以看出构件实验值与数值模拟值吻合良好，实验  $P-u$  曲线初始刚度比有限元分析得到的  $P-u$  曲线小，塑性段曲线基本无下降，而是到进入塑性段上升一段后突变下降，而有限元分析得到的  $P-u$  曲线则是缓慢平缓的下降，或是进入塑性段后曲线平缓延伸。

分析上述曲线的不同特征其原因有以下几个：首先，纯剪实验的边界条件很难控制，特别是在很大横向剪力作用在构件上时，支座处很难达到理想的纯剪边界要求，所以实验的边界条件不足以影响其初始刚度减弱，其次横向剪力加载无法准确的施加到构件的某一个指定区域受剪，总会产生圣维南效应，影响剪力施加时构件的变形效果，最后，有限元中分析中材料“失效”是不会同实验中材料“失效”一样产生脆断，而使构件突然失去承载能力。这些不同处是有限元与实验之间的可容许差别，可以忽略。所以本文建立的钢管混凝土构件抗剪模型的力学性能分析。



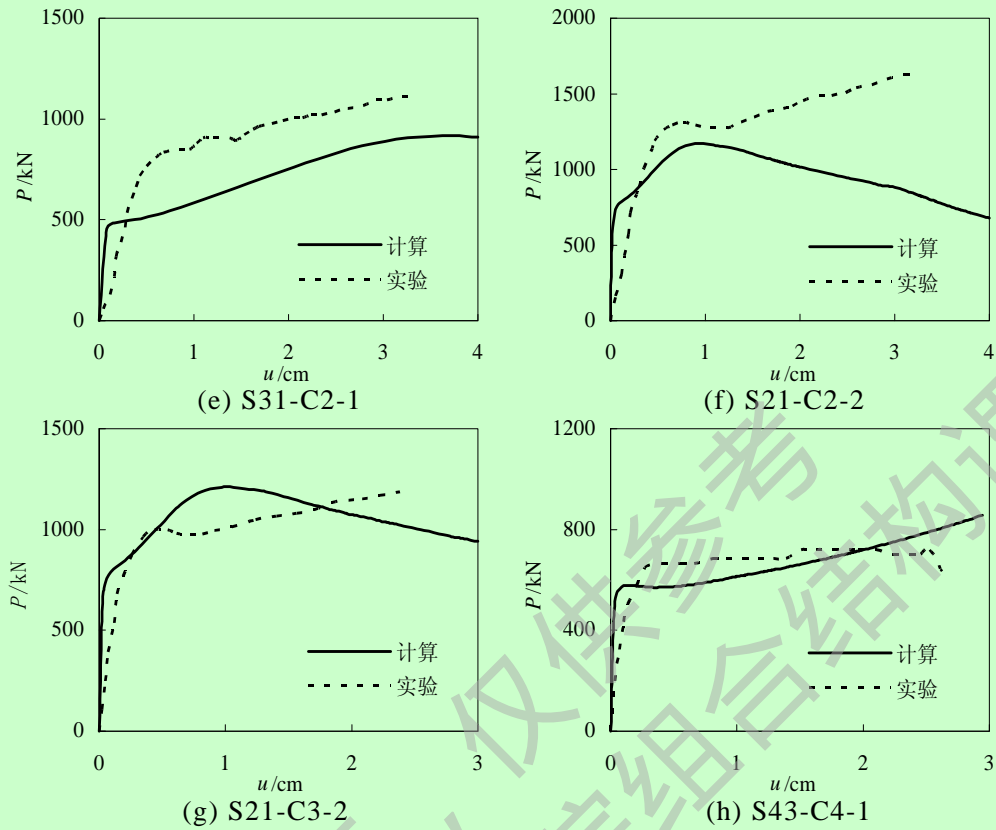


图 2.20 圆形钢管混凝土纯剪构件理论与实验曲线对比(徐春丽, 2004<sup>[51]</sup>)

表 2.5 圆钢管混凝土剪切试件一览表(徐春丽, 2004<sup>[60]</sup>)

序号	试件编号	$D$ (mm)	$t$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_{cu}$ (Mpa)	$m$
1	S11-C1-2	160	5.5	377	38.7	0.14
2	S11-C2-2	160	5.5	377	48.4	0.14
3	S11-C3-2	160	5.5	377	44	0.14
4	S31-C1-1	165	3	408	38.7	0.4
5	S31-C2-1	165	3	408	48.4	0.4
6	S21-C2-2	166	4.4	345	48.4	0.14
7	S21-C3-2	166	4.4	345	44	0.14
8	S43-C4-1	161	6.5	445	30	0.5

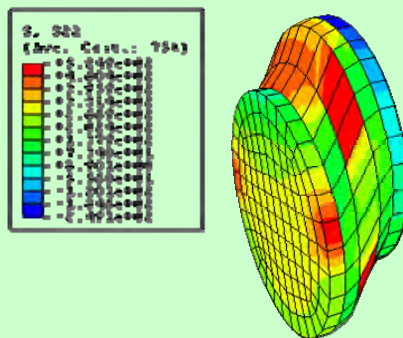


图 2.21 ABAQUS 模拟圆钢管混凝土构件

## 2.5.2 破坏模态

图 2.22 为矩形钢管混凝土纯剪受力下有限元分析得到的应力分布图。从图(a)中可以看出在矩形钢管混凝土强轴方向受剪时角点的应力分布较其他位置集中，非受剪面比受剪面应力大，构件屈服时非受剪面向外凸起，图(b)为弱轴方向矩形钢管混凝土受剪，同样可以看到角点处应力集中，弱轴方向受剪时注意仍为强轴方向剪应力大于受剪面，即弱轴方向。图(a)和(b)对比可以看出强轴或弱轴方向受剪时，非受剪面均向外凸起，但弱轴方向非受剪面凸起明显，并且强轴非受剪面的屈服应力大于弱轴非受剪面的屈服应力。

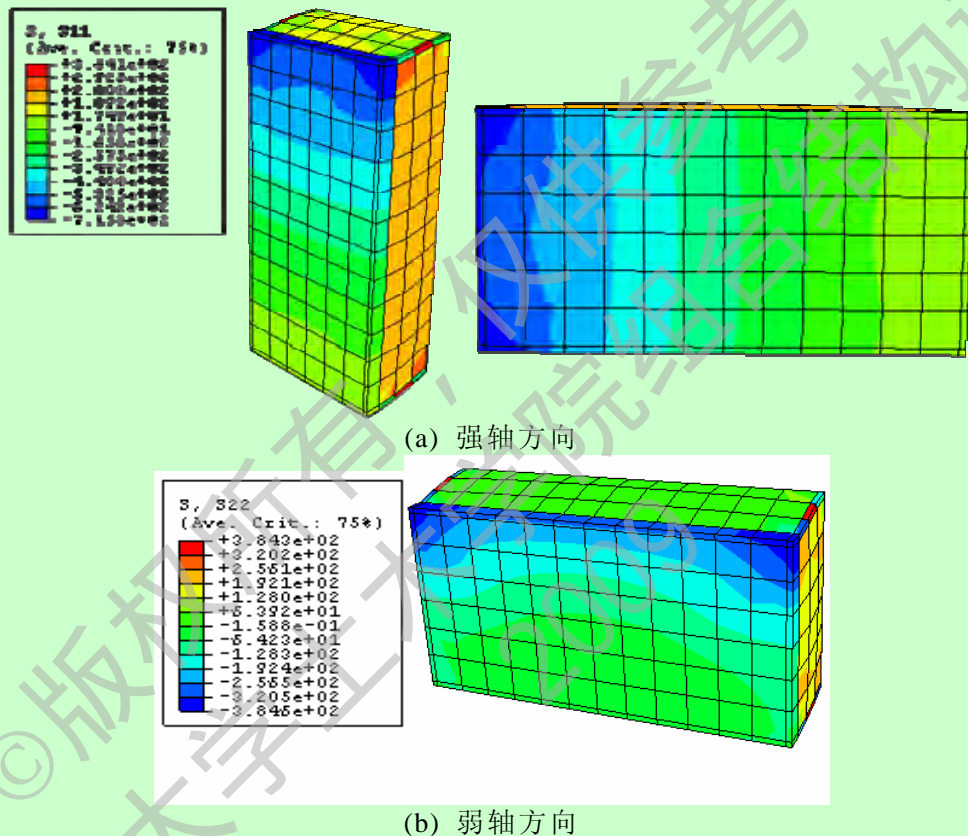


图 2.22 矩形截面  $D:B=2$ 、 $f_y=345\text{MPa}$ 、 $f_{cu}=60\text{MPa}$ 、 $\alpha=0.1$

## 2.5.3 参数分析

通过对圆形截面和方形截面钢管混凝土纯剪算例验证还有矩形截面抗剪破坏模态探讨后本文进行了大量的参数分析。参数分析典型算例的基本条件为：截面高宽比  $\beta=1.5(\beta=D/B, B=400\text{mm})$ ，含钢率  $\alpha=0.1$ ，钢材屈服强度  $f_y=345\text{MPa}$ ，混凝土强度  $f_{cu}=60\text{MPa}$ 。当剪跨比  $m \leq 0.2$  时钢管混凝土构件破坏为剪切破坏，当剪跨比  $0.2 < m \leq 4$  时钢管混凝土构件破坏为弯剪破坏，当剪跨比  $m > 4$  时钢管混凝土构件破坏为弯曲破坏(韩林海, 2007<sup>[11]</sup>)，所以本文取剪跨比  $m=0.2(m=L/D$  或  $L/B)$ 。

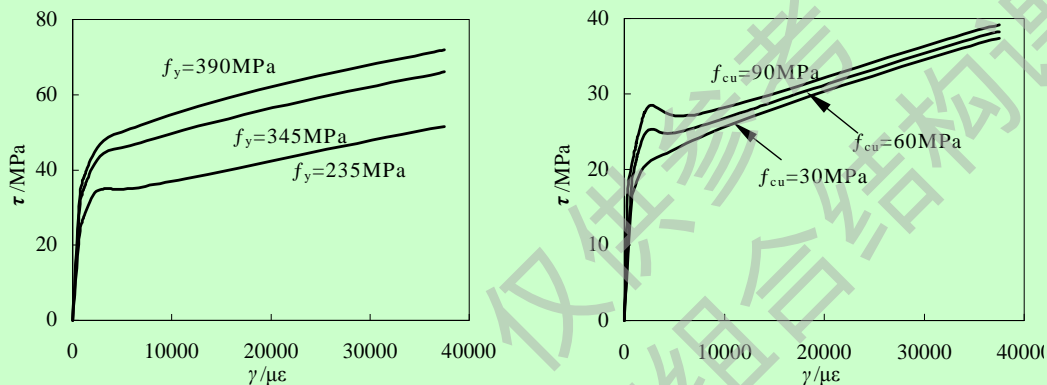
参数分析的范围如下：1)材料参数：钢材屈服强度强度  $f_y=235\text{MPa}$ 、 $345\text{MPa}$ 、 $390\text{MPa}$ ；混凝土强度  $f_{cu}=30\text{MPa}$ 、 $60\text{MPa}$ 、 $90\text{MPa}$ 。2)几何参数：截面高宽比  $\beta=1$ 、

1.5、2；含钢率  $\alpha=0.05$ 、0.1、0.15、0.2。

分析结果表明，矩形截面钢管混凝土柱抗剪承载力随钢材强度  $f_y$  混凝土强度  $f_{cu}$  含钢率  $\alpha$  及截面高宽比  $\beta$  的增大而提高。下述具体参数分析影响规律。

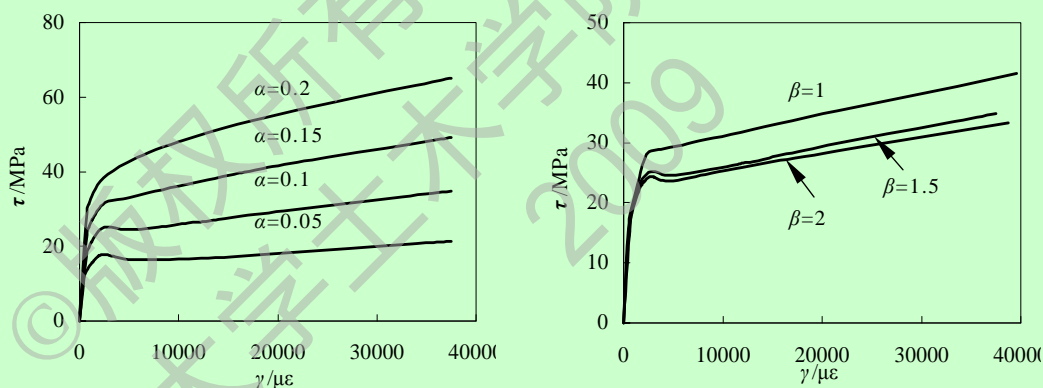
### (1) 钢材强度( $f_y$ )

图 2.23(a)给出了钢材强度参数  $f_y$  对  $\tau$ - $\gamma$  关系的影响规律。可见随着  $f_y$  提高，构件抗剪承载力提高，初始刚度无明显变化。总体上钢材强度  $f_y$  主要影响曲线的数值，对曲线的形状影响不大。



(a) 钢材强度  $f_y$

(b) 混凝土强度  $f_{cu}$



(c) 含钢率  $\alpha$

(d) 截面高宽比  $\beta$

图 2.23 参数对矩形钢管混凝土抗剪强度影响

### (2) 混凝土强度( $f_{cu}$ )

图 2.23(b)给出了混凝土强度参数  $f_{cu}$  对  $\tau$ - $\gamma$  关系的影响规律。可见随着  $f_{cu}$  提高，构件抗剪承载力提高，初始刚度无明显变化，构件屈服段变化不大。总体上混凝土强度  $f_{cu}$  对曲线的数值影响不大，对曲线形状有影响。

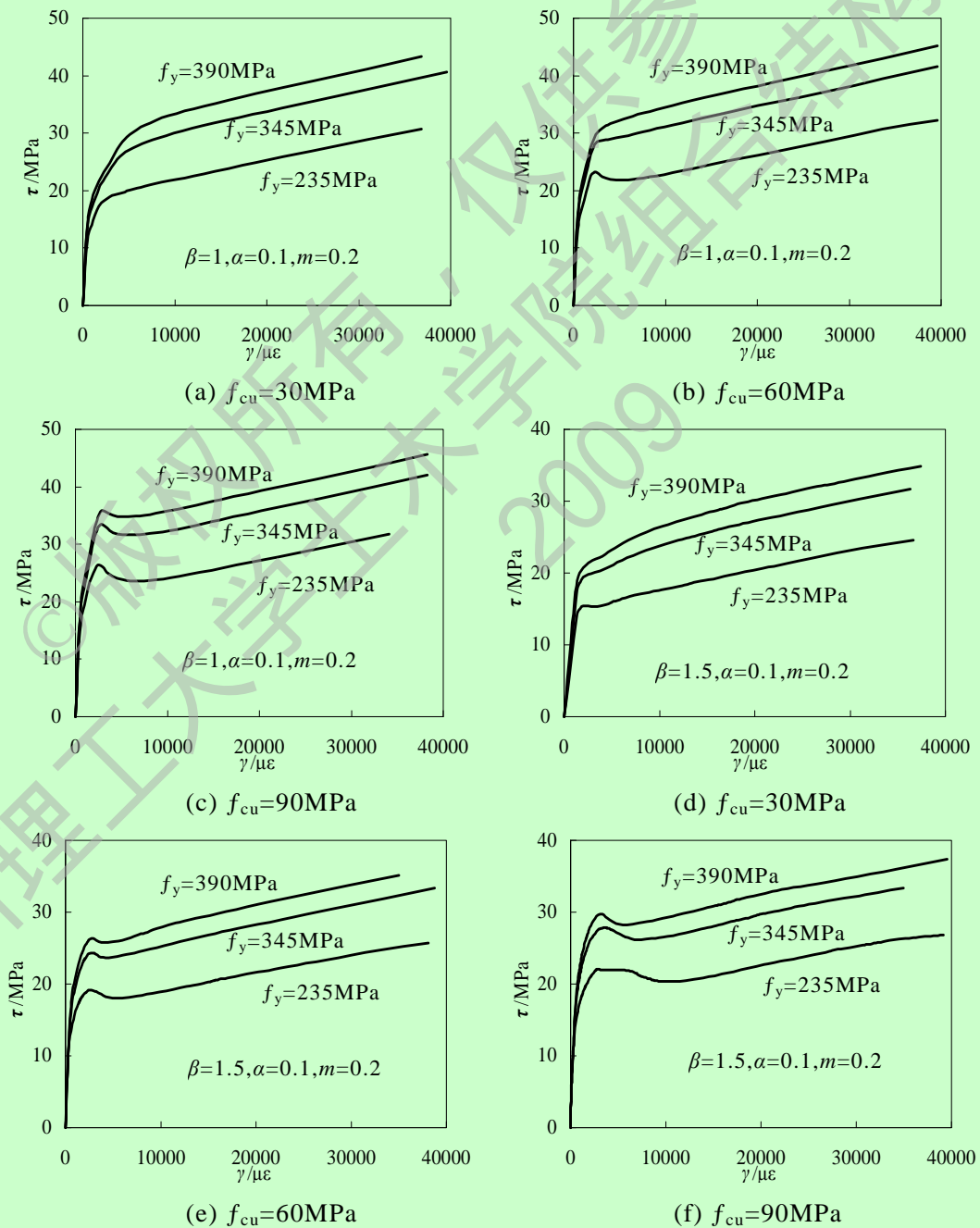
### (3) 含钢率( $\alpha$ )

图 2.23(c)给出了含钢率参数  $\alpha$  对  $\tau$ - $\gamma$  关系的影响规律。可见随着  $\alpha$  提高，构件抗剪承载力提高，初始刚度无明显变化。总体上含钢率  $\alpha$  主要对曲线的数值有影响，对曲线的形状影响不大。

(4) 截面高宽比( $\beta$ )

图 2.23(d)给出了截面高宽比参数  $\beta$  对  $\tau$ - $\gamma$  关系的影响规律。可见随着  $\beta$  的提高, 构件的抗剪承载力降低, 初始刚度变化不大。极限承载力降低的程度与  $\beta$  的变化不成比例。总体上截面高宽比  $\beta$  主要影响曲线的数值, 对曲线的形状影响不大。图 2.23(d)随着高宽比  $\beta$  ( $\beta=D/B$ )的增大, 构件抗剪能力有所下降, 这主要是因为构件截面  $D$  与  $B$  相差过大导致钢管长边  $D$  或短边  $B$  对混凝土的约束效用降低。从图 2.22 抗剪破坏模态, 可以看到强轴方向受剪时截面  $D$  边中心凸起, 而弱轴受剪时  $B$  边凸起。

对 108 个矩形钢管混凝土纯剪构件的数值分析, 图 2.24 给出了更多参数分析曲线。



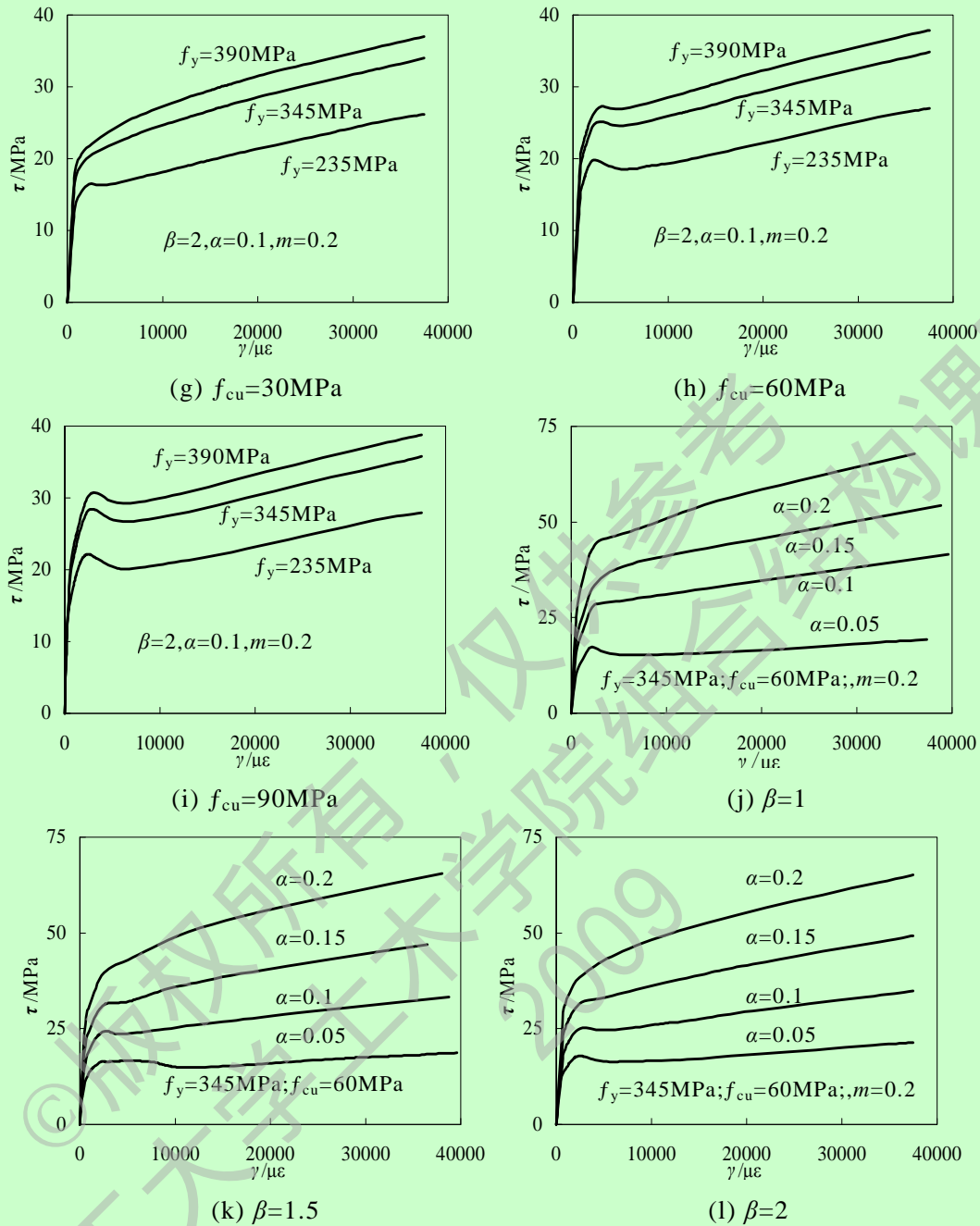


图 2.24 矩形截面钢管混凝土强轴抗剪参数分析曲线

### 2.5.4 实用计算方法

本节通过以上模型校验及对矩形钢管混凝土抗剪承载力数参数分析,得到矩形钢管混凝土抗剪承载力计算系数表达式如下:

对于矩形截面钢管混凝土强轴方向(图 2.25a)得到

$$\gamma_v = 0.2 \ln(\beta \xi) + \frac{0.7}{X_v} \quad (2.4)$$

公式中  $X_v$  为计算参数:当  $\beta=1$  时,  $X_v=0.82$ ; 当  $\beta=1.5$  时,  $X_v=0.96$ ; 当  $\beta=2$  时,  $X_v=1.03$ , 中间数值用插值法求得。



对于矩形截面钢管混凝土弱轴方向(图 2.25b)得到

$$\gamma_v = -0.012(\beta\xi)^2 + 0.1(\beta\xi) + \frac{0.5}{X_v} \quad (2.5)$$

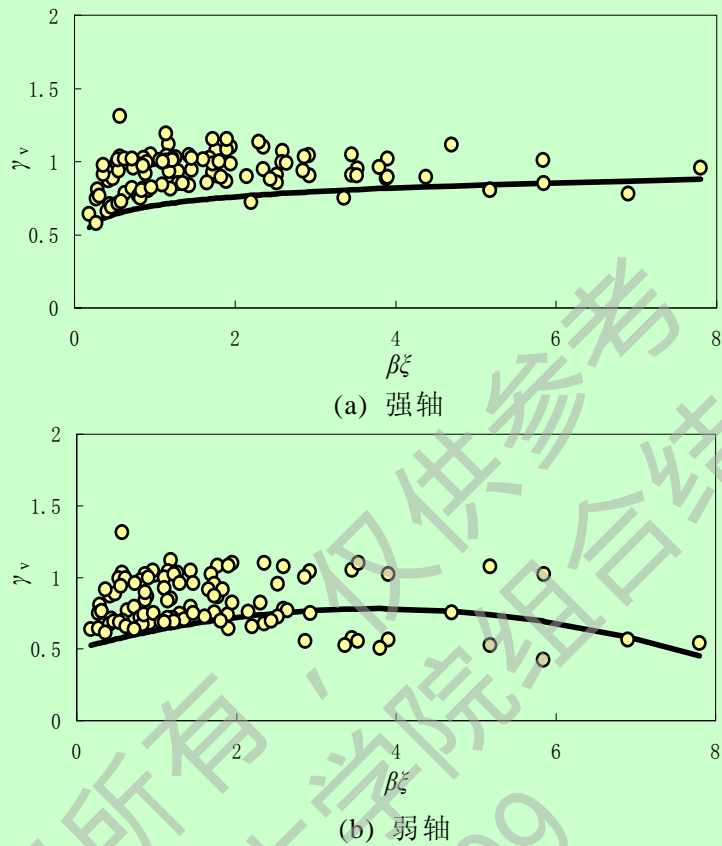


图 2.25 矩形截面钢管混凝土  $\gamma_v$ - $\beta\xi$  关系曲线

公式中  $X_v$  为计算参数：当  $\beta=1$  时， $X_v=0.714$ ；当  $\beta=1.5$  时， $X_v=0.91$ ；当  $\beta=2$  时， $X_v=1.43$ ，中间数值用插值法求得。

综合以上结论得到矩形截面钢管混凝土抗剪承载力计算公式如下：

$$V_u = \gamma_v A_{sc} \tau_{scy} \quad (2.6)$$

取  $\beta=1$  的情况与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>中提出的相关公式校验，图 2.26 给出了对比结果，本文公式计算结果与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>计算结果均方差为 0.09。

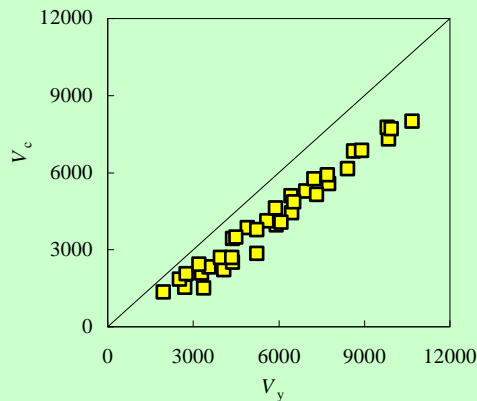


图 2.26 本文计算  $V_u$  与尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>公式计算结果对比

公式适用范围：混凝土 C30~C60；钢材 Q235~Q390；截面高宽比  $\beta=1\sim 2$ ；含钢率  $\alpha=0.05\sim 0.2$ ；剪跨比为 0.2。

## 2.6 本章小结

通过本章以上的研究，可以得到如下结论：

(1) 采用 ABAQUS 有限元法对钢管混凝土压弯构件、纯扭及纯剪构件进行了计算，数值模拟得到的计算结果与实验结果进行了对比，总体上，理论计算结果和实验结果吻合良好。本文有限元数值分析模型可进行矩形钢管混凝土双向压弯构件、纯扭及纯剪构件的力学性能分析。

(2) 采用有限元法分析了不同参数下矩形钢管混凝土压弯、纯扭、纯剪构件的力学性能，并将不同参数下数值计算结果进行了对比，较为深入的对矩形钢管混凝土进行了工作机理研究。

(3) 通过对矩形钢管混凝土的参数分析，得到了矩形钢管混凝土纯扭及纯剪极限承载力简化计算公式。

## 第 3 章 矩形钢管混凝土构件复合受力下的力学性能

实际建筑物中其承重构件多处处在复合受力状态下,而非单一力作用,例如地震作用,风荷载,可能来自各个方向,建筑物的造型对建筑承重构件造成的偏心受压等等,这就使构件的受力情况研究更为复杂,为使研究成果更符合实际情况,得到的简化计算公式更贴近于真实,本章将对钢管混凝土构件的几种简单受力分析叠加,得到近似于实际受力时的情况,并分析其极限承载力。本文研究构件为矩形截面钢管混凝土构件,其形式为柱。柱构件多为建筑物的主要承重构件,并和基础相连,相连部位附近的受力情况多为复杂受力。为更好的明晰矩形截面钢管混凝土在实际运用中的性能,对其理论分析是必要的前提,是取得较多且较精确的试验结果的一种简单方法。在取得大量数据后加以总结归纳,得到简化计算方法,是本文的目的。

为更好使用 ABAQUS 有限元软件模拟矩形钢管混凝土复合受力过程,本文对已有实验行了有限元模拟分析,并与实验结果进行比较,然后建立矩形钢管混凝土模型并对不同参数下构件的力学性能进行了分析,最后给出矩形截面钢管混凝土构件压扭、弯扭、压弯扭、压弯剪承载力简化计算方法。

### 3.1 矩形钢管混凝土压扭、弯扭构件力学性能分析

#### 3.1.1 压扭构件有限元模型

##### (1)单元类型、材料模型和接触模型

矩形钢管混凝土压扭模型中混凝土、钢管和加载板单元模型与 2.2.1 节介绍的材料模型相同。

混凝土和钢管、加载板和钢管、加载板和混凝土之间的接触 2.3.1 节介绍的相同。

##### (2)荷载及边界条件

由于压扭受力分析为复合受力,本文只对一种荷载施加路径进行分析,荷载施加时采用分部加载,首先对构件施加轴力  $N$ ,采用(Load)施加,荷载施加定义在加载板上。然后对构件施加扭矩  $T$ ,采用(BC)施加,荷载施加定义在加载板的中心点,此点和加载板耦合。

矩形钢管混凝土压扭构件建模为整体模型,对构件非荷载施加端的钢管和混凝土约束  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  三个方向的位移。如图 3.1 所示。

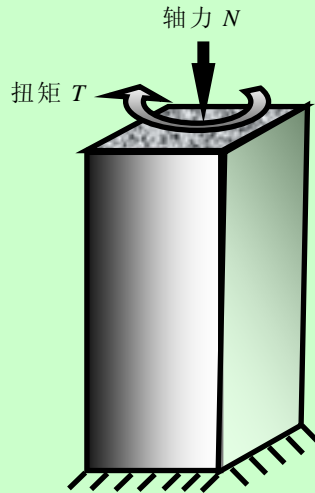
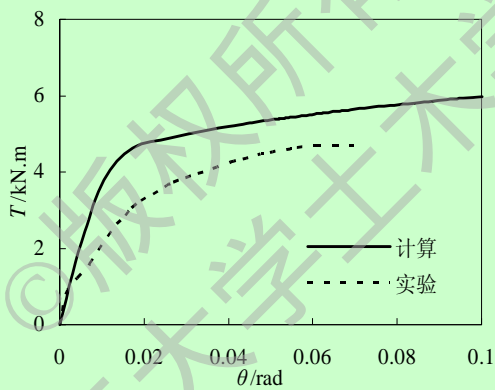
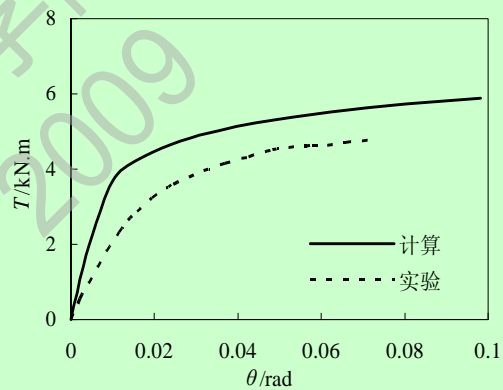


图 3.1 矩形钢管混凝土压扭构件边界条件

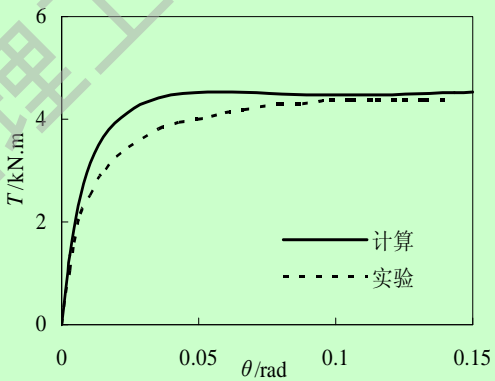
本节通过对 24 个钢管混凝土压扭构件实验研究的有限元模拟，来验证本节建立的钢管混凝土压扭构件的可用性及准确性。图 3.2 和图 3.3 为本文有限元数值计算和实验结果对比，表 3.1 和表 3.2 分别给出了圆形及方形截面钢管混凝土压扭实验参数。从图 3.2 和图 3.3 中可以看出有限元计算无论是数值还是曲线的形状都与实验结果基本吻合，所以本文建立的钢管混凝土压扭构件模型可以用来进行矩形钢管混凝土压扭构件的力学性能研究。



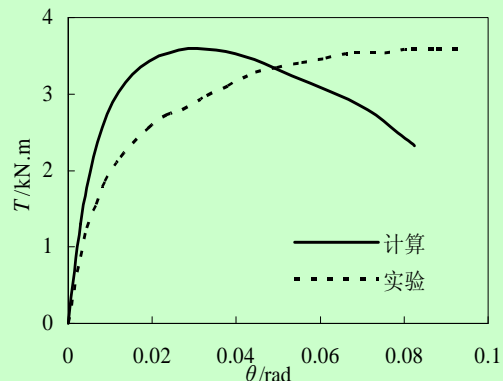
(a) CS2-102



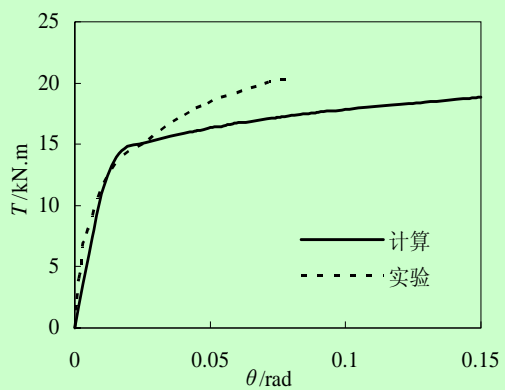
(b) CS3-102



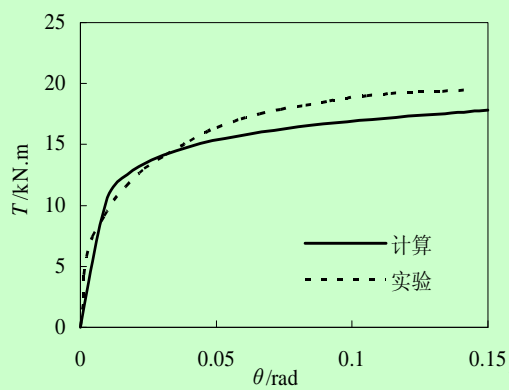
(c) CS4-102



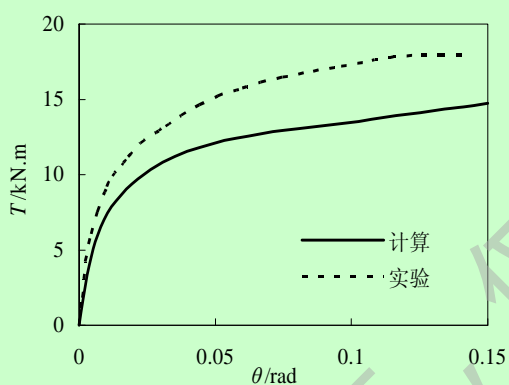
(d) CS5-102



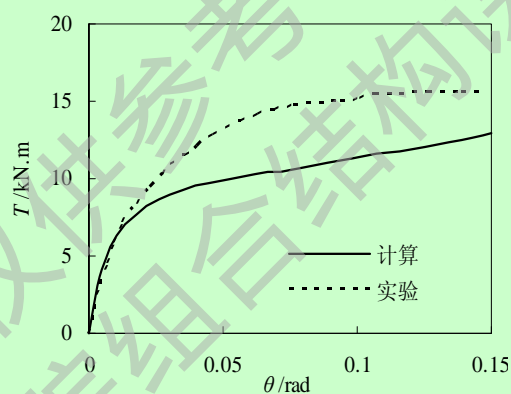
(e) CS2-114



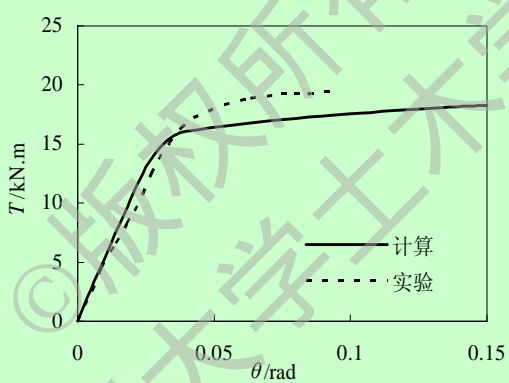
(f) CS3-114



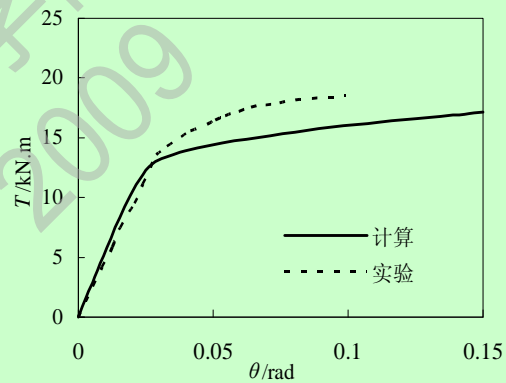
(g) CS4-114



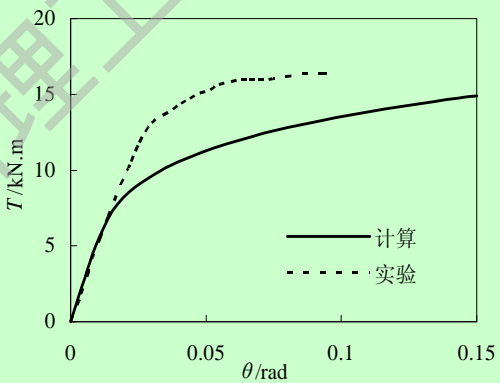
(h) CS5-114



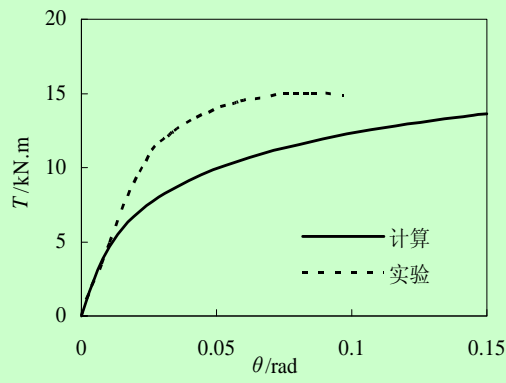
(i) CSS2



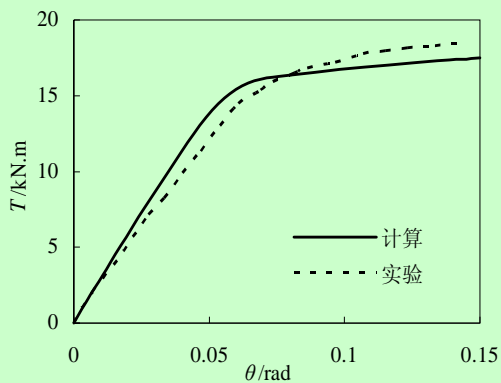
(j) CSS3



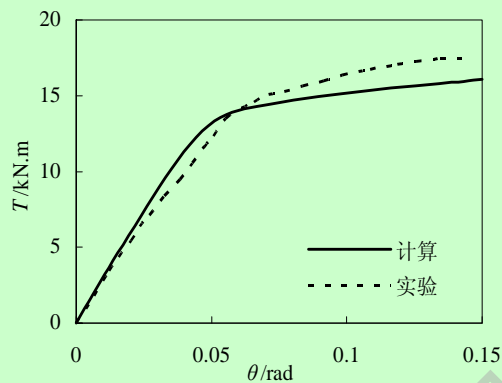
(k) CSS4



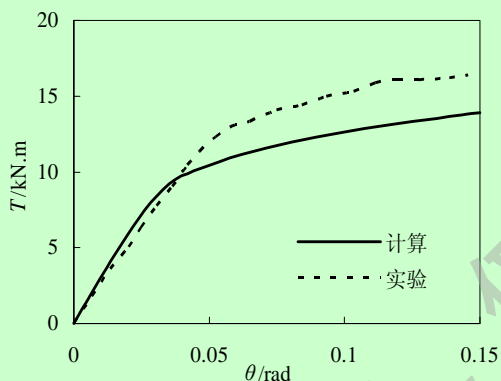
(l) CSS5



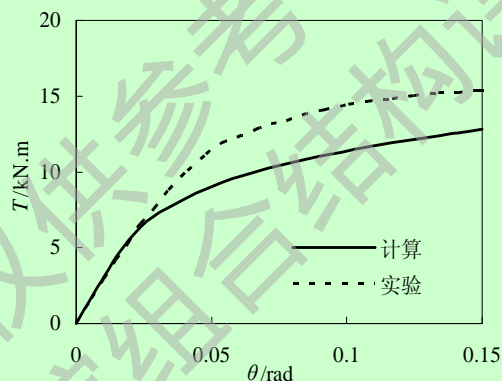
(m) CSM2



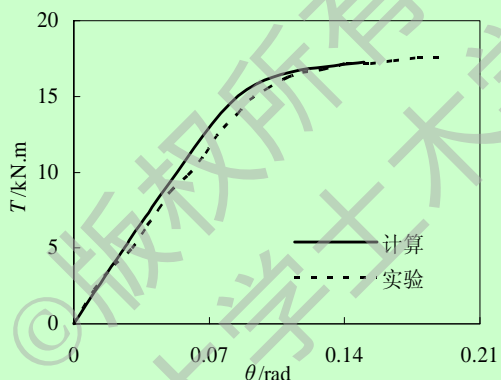
(n) CSM3



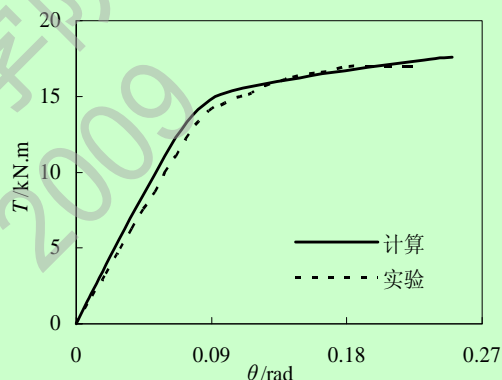
(o) CSM4



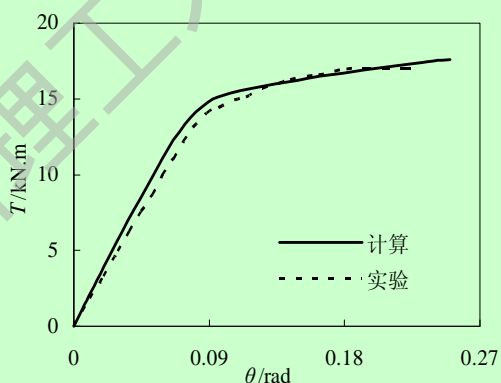
(p) CSM5



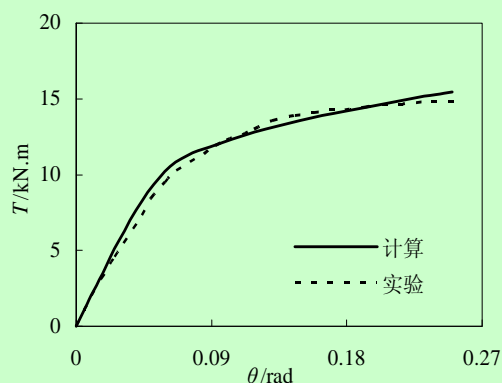
(q) CSL2



(r) CSL3



(s) CSL4



(t) CSL5



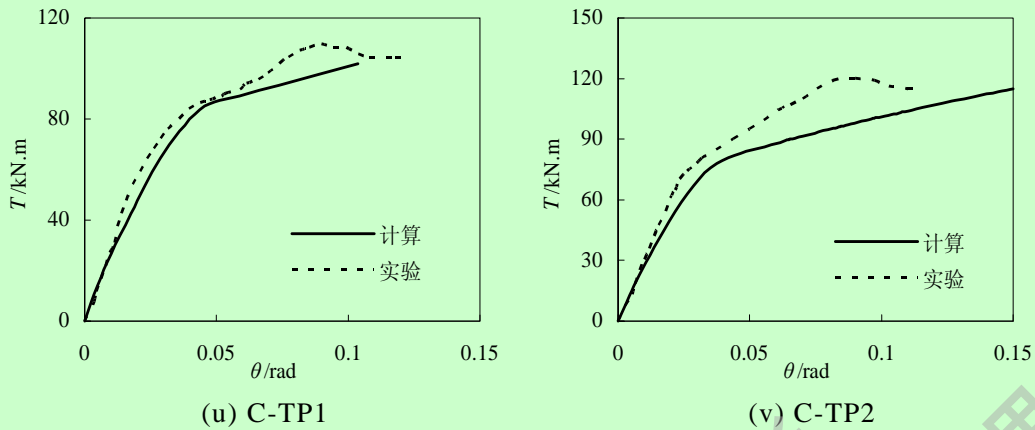


图 3.2 圆形钢管混凝土压扭有限元计算与实验曲线比较

表 3.1 圆形截面钢管混凝土压扭构件汇总表

序号	试件编号	$D \times t \times L$ (mm)	$f_{cu}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$n$	数据来源
1	CS2-102	102.4×1.6×406	32.9	242.3	0.25	徐积善和宫安 (1991) <sup>[61]</sup>
2	CS3-102	102.4×1.6×406	32.9	242.3	0.5	
3	CS4-102	102.4×1.6×406	32.9	242.3	0.75	
4	CS5-102	102.4×1.6×406	32.9	242.3	0.85	
5	CS2-144	114×4.5×387	27.4	280	0.25	宫安(1989) <sup>[62]</sup>
6	CS3-144	114×4.5×387	27.4	280	0.5	
7	CS4-144	114×4.5×387	27.4	280	0.75	
8	CS5-144	114×4.5×387	27.4	280	0.85	
9	CSS2	114×4.5×800	21.9	301.9	0.25	周竟(1990) <sup>[63]</sup>
10	CSS3	114×4.5×800	21.9	301.9	0.5	
11	CSS4	114×4.5×800	21.9	301.9	0.75	
12	CSS5	114×4.5×800	21.9	301.9	0.85	
13	CSM2	114×4.5×1480	20.9	301.9	0.25	
14	CSM3	114×4.5×1480	20.9	301.9	0.5	
15	CSM4	114×4.5×1480	20.9	301.9	0.75	
16	CSM5	114×4.5×1480	20.9	301.9	0.85	
17	CSL2	114×4.5×2280	21.9	301.9	0.25	陈逸玮(2003) <sup>[59]</sup>
18	CSL3	114×4.5×2280	21.9	301.9	0.5	
19	CSL4	114×4.5×2280	21.9	301.9	0.75	
20	CSL5	114×4.5×2280	21.9	301.9	0.85	
21	C-TP1	216.3×4.5×1620	39	345.8	0.2	
22	C-TP2	216.3×4.5×1620	39	354.8	0.4	

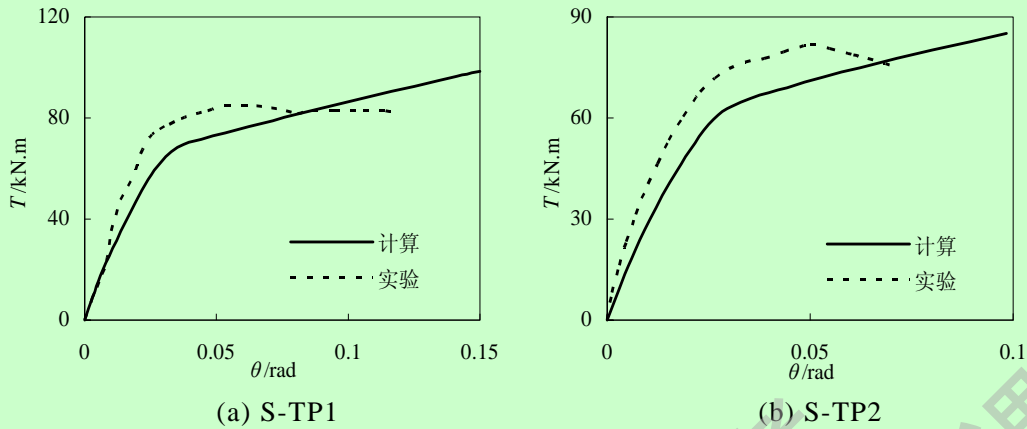


图 3.3 方形钢管混凝土压扭有限元计算与实验曲线比较

表 3.2 方形截面钢管混凝土压扭构件汇总表

序号	试件编号	$D \times t \times L$ (mm)	$f_{cu}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$n$	数据来源
1	S-TP1	200×4.5×1620	39	261.4	0.2	陈逸玮(2003) <sup>[59]</sup>
2	S-TP2	200×4.5×1620	39	261.4	0.4	

### 3.1.2 弯扭构件有限元模型

#### 1 单元模型、材料模型和单元接触

矩形钢管混凝土弯扭模型中混凝土、钢管和加载板单元模型和混凝土和钢管、加载板和钢管、加载板和混凝土之间的接触与矩形钢管混凝土压扭构件相同。

#### 2 荷载施加及边界条件

弯扭受力分析为复合受力，本文对一种荷载加载路径进行分析，荷载施加采用分部加载，首先对构件施加弯矩  $M$ ，采用(Load)施加，荷载施加定义在加载板上的点，此点和加载板耦合。然后对构件施加扭矩  $T$ ，采用(BC)施加，荷载施加定义在加载板的中心点，此点和加载板耦合。如图 3.4 所示。

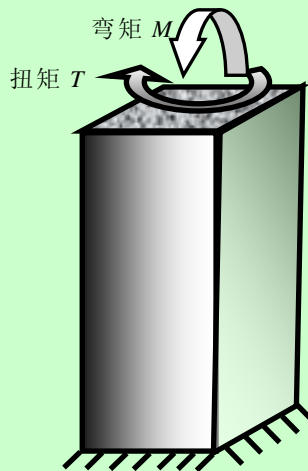
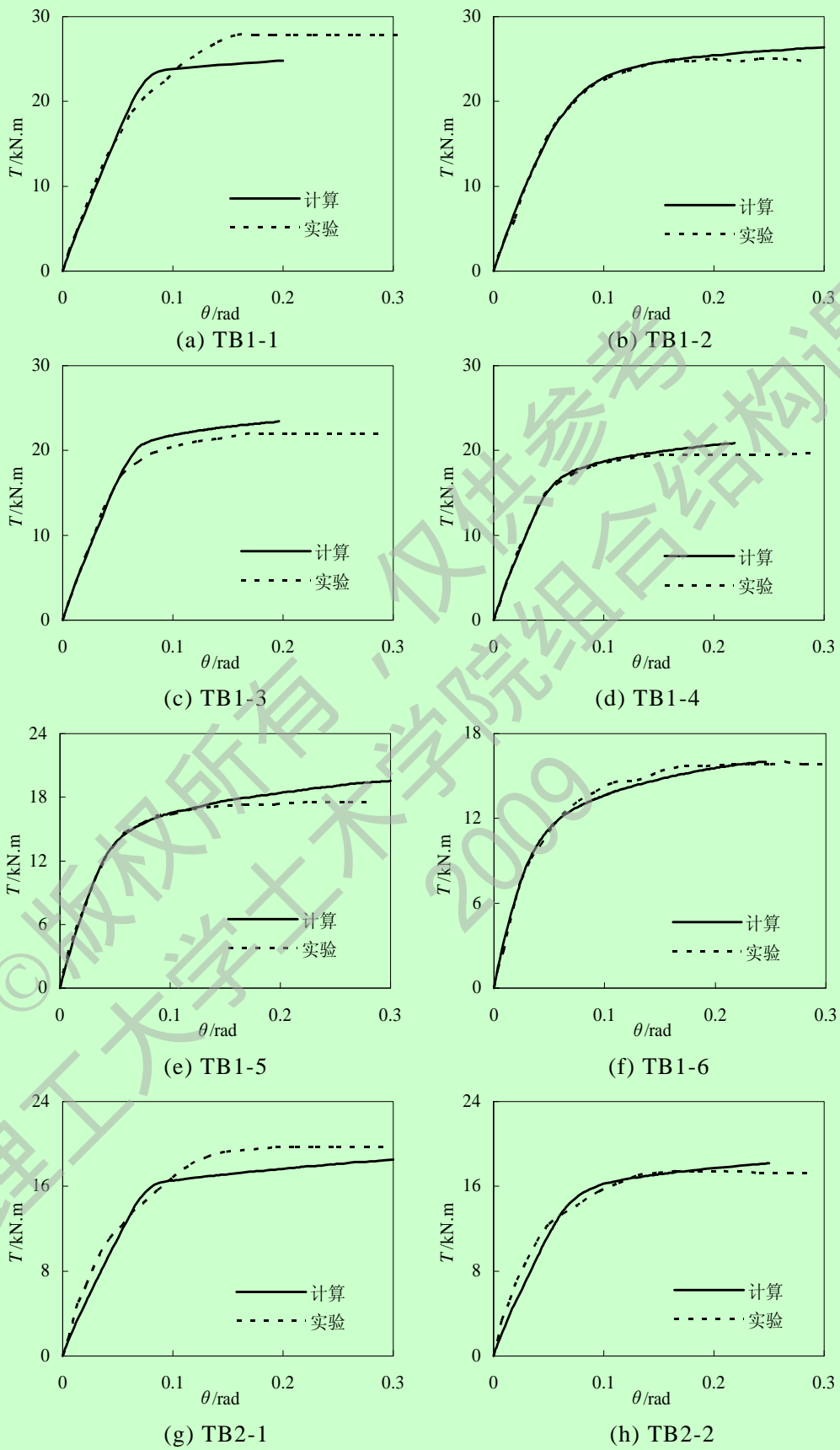


图 3.4 矩形钢管混凝土压扭构件荷载及边界条件

对 12 个钢管混凝土弯扭构件实验研究的有限元模拟，验证本节建立的钢管

混凝土弯扭构件模型。图 3.5 为本文有限元数值计算和实验结果对比。



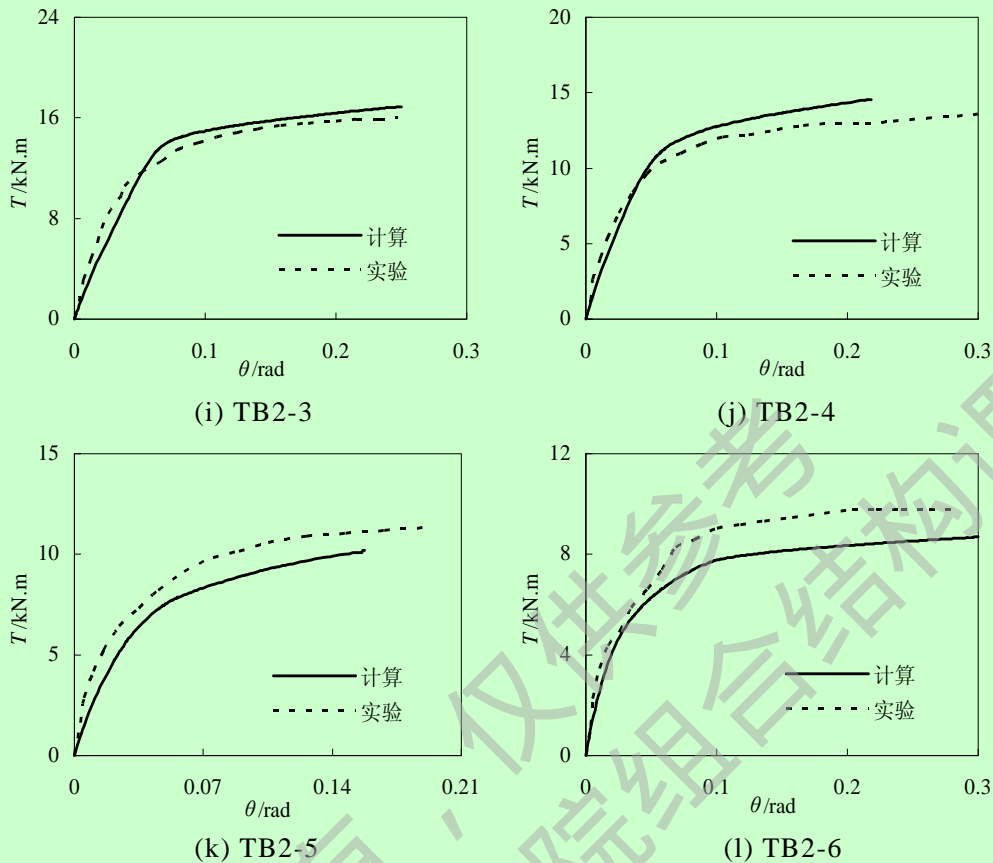


图 3.5 钢管混凝土弯扭有限元计算曲线与实验曲线的比较

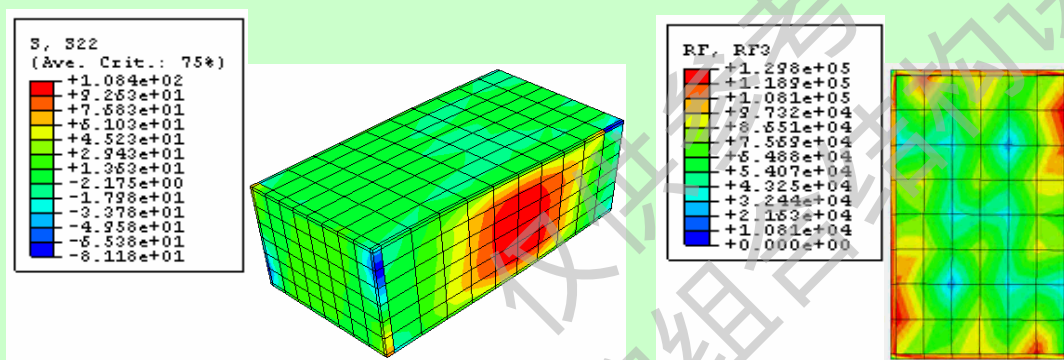
表 3.3 给出了圆形截面钢管混凝土弯扭实验参数。从图 3.5 中可以看出有限元计算结果无论是数值大小还是曲线的形状及构件的初始刚度都与实验结果基本吻合。

 表 3.3 圆形钢管混凝土弯扭试件汇总表(韩林海和钟善桐, 1994a)<sup>[64]</sup>

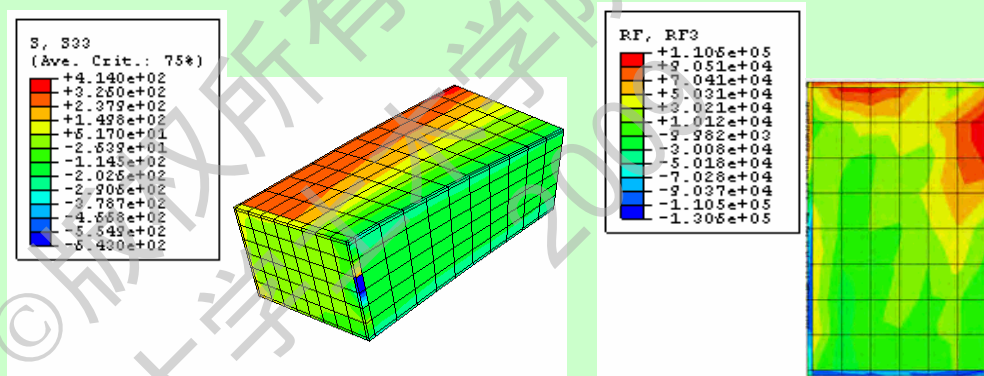
序号	试件编号	$D \times t \times L$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_{cu}$ (MPa)	压扭比 $m_0 = M/T$
1	TB1-1	133×4.5×2000	324.34	30.4	0
2	TB1-2	133×4.5×2000	324.34	30.4	0.3
3	TB1-3	133×4.5×2000	324.34	30.4	0.6
4	TB1-4	133×4.5×2000	324.34	30.4	0.9
5	TB1-5	133×4.5×2000	324.34	30.4	1.2
6	TB1-6	133×4.5×2000	324.34	30.4	1.5
7	TB2-1	130×3×2000	324.34	30.4	0
8	TB2-2	130×3×2000	324.34	30.4	0.3
9	TB2-3	130×3×2000	324.34	30.4	0.6
10	TB2-4	130×3×2000	324.34	30.4	0.9
11	TB2-5	130×3×2000	324.34	30.4	1.2
12	TB2-6	130×3×2000	324.34	30.4	1.5

### 3.1.3 破坏模式

图 3.6 给出了矩形钢管混凝土构件压扭和弯扭受力时构件变形情况。从图 3.6(a)可以看出矩形钢管混凝土压扭构件屈服变形时与纯扭变形相似，在钢管的边缘处变形最大且变形趋势成对角对称，构件轴向受到压力作用产生径向变形向外凸出，短边方向变化明显。从图 3.6(b)可以看出矩形钢管混凝土弯扭构件屈服变形与压弯构件相似，构件受到弯矩  $M$  作用使得构件在扭矩  $T$  作用下产生了附加弯矩效果，即受拉一侧拉力增大，受压一侧压力增大，使得构件极限承载力降低，从图中明显可以看出弯扭构件屈服变形是不对称的。



(a) 压扭构件



(b) 弯扭构件

图 3.6 矩形截面钢管混凝土压扭、弯扭构件

### 3.1.4 参数分析

#### 1 压扭构件参数分析

经过模型校验后，进行参数分析，建立矩形钢管混凝土压扭构件模型。参数分析典型算例基本条件为：截面高宽比  $\beta=1.5(\beta=D/B, B=400\text{mm})$ ，含钢率  $\alpha=0.1$ ，钢材屈服强度  $f_y=345\text{MPa}$ ，混凝土强度  $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $L=1155\text{mm}$ ，其长细比  $\lambda \leq 10$  (分别从强轴和弱轴方向考虑)，所以分析时  $\varphi=1$ 。分析参数的变化范围如下：

- 1) 材料参数：钢材屈服强度  $f_y=235\text{MPa}$ 、 $345\text{MPa}$ 、 $390\text{MPa}$ ；混凝土强度  $f_{cu}=30\text{MPa}$ 、 $60\text{MPa}$ 、 $90\text{MPa}$ 。
- 2) 几何参数：截面高宽比  $\beta=1$ 、 $1.5$ 、 $2$ ；截面含钢率  $\alpha=0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.15$ 、 $0.2$ ，

构件长细比  $\lambda=20、40、60$ 。

3) 轴压比:  $N/N_u=0.2、0.4、0.6、0.8$

分析中对于钢管混凝土的轴压承载力  $N_u$  采用《钢管混凝土结构技术规程》(2003)<sup>[15]</sup>给出的公式计算, 既公式(3.1)。

$$N_u = \varphi \cdot f_{scy} \cdot A_{sc} \quad (3.1)$$

式中:

$\varphi$ : 轴心受力构件稳定系数;

$N_u$ : 钢管混凝土轴心受压构件的强度承载力;

$A_{sc}$ : 钢管混凝土构件组合截面面积;

对于矩形钢管混凝土:

$$f_{scy} = (1.18 + 0.85\xi) \cdot f_{ck} \quad (3.2)$$

式中:  $\xi = \alpha \frac{f_y}{f_{ck}}$  为钢管混凝土约束效应系数;  $f_{ck}$  为混凝土轴心抗压强度标准值;  $f_y$  为钢材屈服强度, 构件的长细比按下式计算:

对于矩形截面绕强轴弯曲:  $\lambda = 2\sqrt{3}L_0 / D$

对于矩形截面绕弱轴弯曲:  $\lambda = 2\sqrt{3}L_0 / B$

式中:  $L_0$  为构件的计算长度;  $D$  和  $B$  分别为矩形钢管长边和短边边长。

图 3.7 给出了几何参数与材料参数相同条件下, 不同轴压比  $N/N_u$  对矩形钢管混凝土  $T-\theta$  关系曲线的影响。图 3.8 给出了在轴压比  $N/N_u$  相同的情况下, 不同参数  $f_y$ 、 $f_{cu}$ 、 $\alpha$  和  $\lambda$  对矩形钢管混凝土  $T-\theta$  关系曲线的影响。

将各主要参数对矩形钢管混凝土压扭力学性能的影响进行归纳如下:

(1) 轴压比( $N/N_u$ )

图 3.7 中各图给出了在材料参数及几何参数相同的条件下, 轴压比  $N/N_u$  对矩形钢管混凝土压扭  $T-\theta$  关系曲线的影响, 总体上各个构件的压-扭极限承载力都随着  $N/N_u$  的增加而降低。

特别是轴压比  $N/N_u$  从 0.4 变化到 0.8 时曲线值及其形状变化明显, 轴压比  $N/N_u$  对构件的初始刚度无明显影响。轴压比对几何参数长细比  $\lambda$  只影响曲线数值, 对曲线的形状影响不大。

(2) 钢材强度( $f_y$ )

图 3.8(a)、(b)给出了钢材强度参数  $f_y$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $f_y$  提高, 构件压扭承载力提高, 初始刚度无明显变化。总体上钢材强度  $f_y$  主要影响曲线的数值, 对曲线形状影响不大。

(3) 混凝土强度( $f_{cu}$ )

图 3.8(c)、(d)给出了混凝土强度参数  $f_{cu}$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $f_{cu}$  提高, 构件压扭承载力有所提高, 初始刚度无明显变化, 构件屈服段变化不大。



总体上混凝土强度  $f_{cu}$  对曲线的数值和曲线形状影响不大。

(4) 含钢率( $\alpha$ )

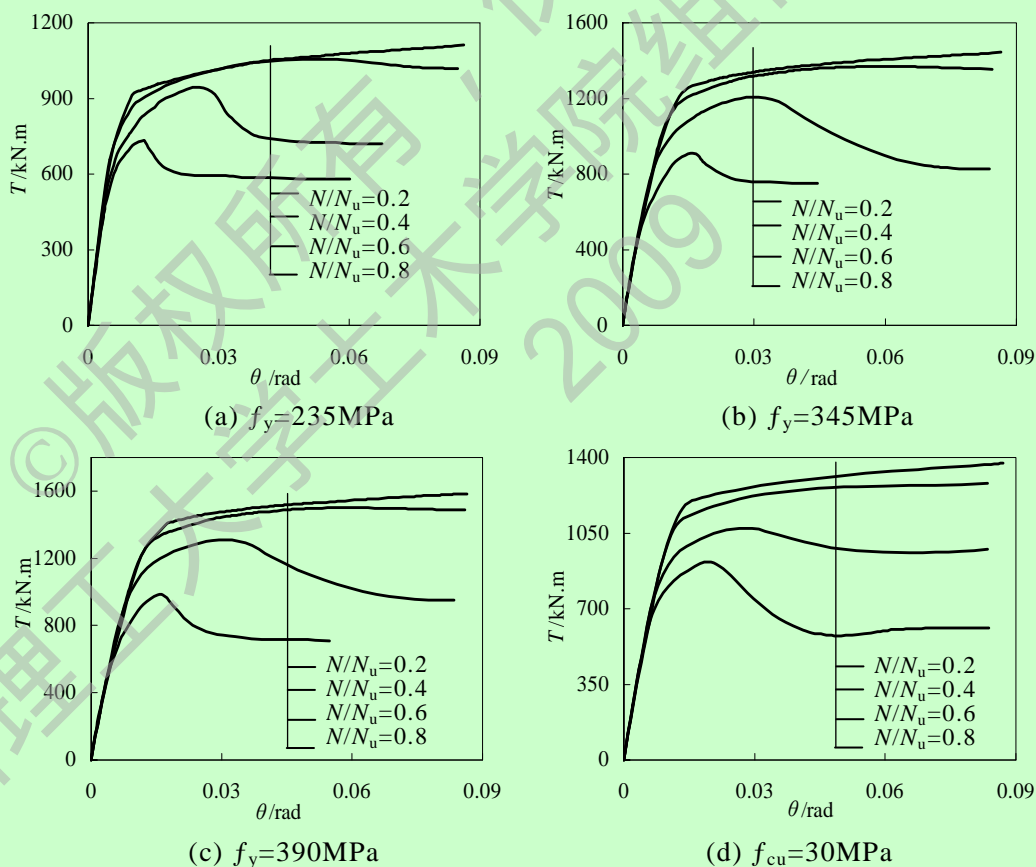
图 3.8(e)、(f)给出了含钢率参数  $\alpha$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $\alpha$  提高, 构件压扭承载力提高, 初始刚度无明显变化。总体上含钢率  $\alpha$  主要对曲线的数值有影响, 对曲线形状影响不大。

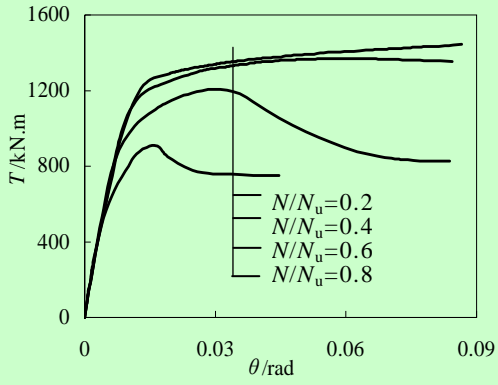
(5) 长细比( $\lambda$ )

图 3.8(g)、(h)给出了长细比参数  $\lambda$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可随着  $\lambda$  的提高, 构件的压扭承载力极限提高, 构件的初始刚度降低。总体上长细比  $\lambda$  对曲线的形状及曲线的数值都有影响。

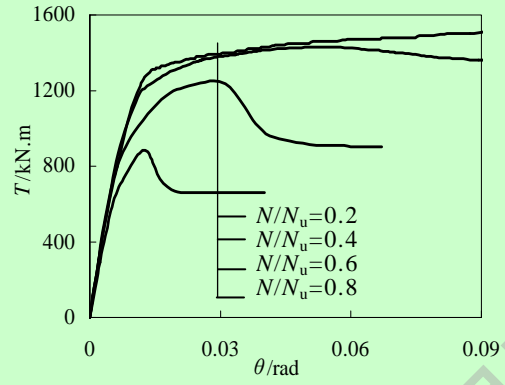
(6) 截面高宽比( $\beta$ )

图 3.8(i)、(j)给出了截面高宽比参数  $\beta$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着  $\beta$  的提高, 构件的压扭承载力提高, 初始刚度增加。总体上截面高宽比  $\beta$  主要影响曲线的数值, 对曲线形状也有一定影响。

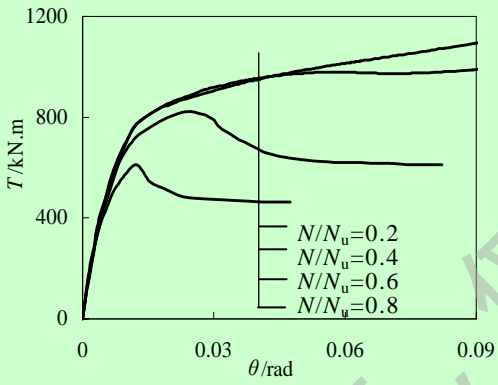




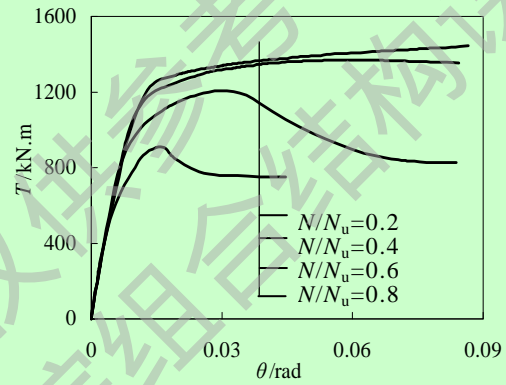
(e)  $f_{cu}=60\text{MPa}$



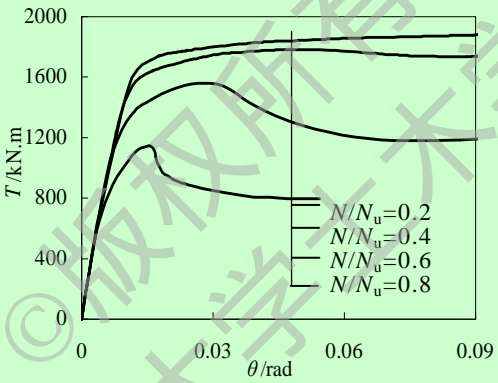
(f)  $f_{cu}=90\text{MPa}$



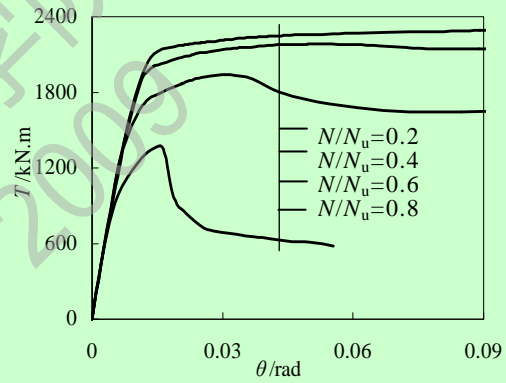
(g)  $\alpha=0.05$



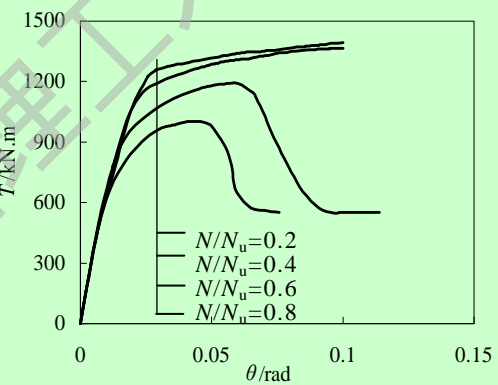
(h)  $\alpha=0.1$



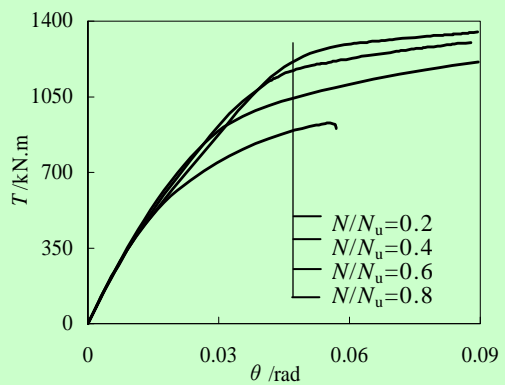
(i)  $\alpha=0.15$



(j)  $\alpha=0.2$



(k)  $\lambda=20$



(l)  $\lambda=40$

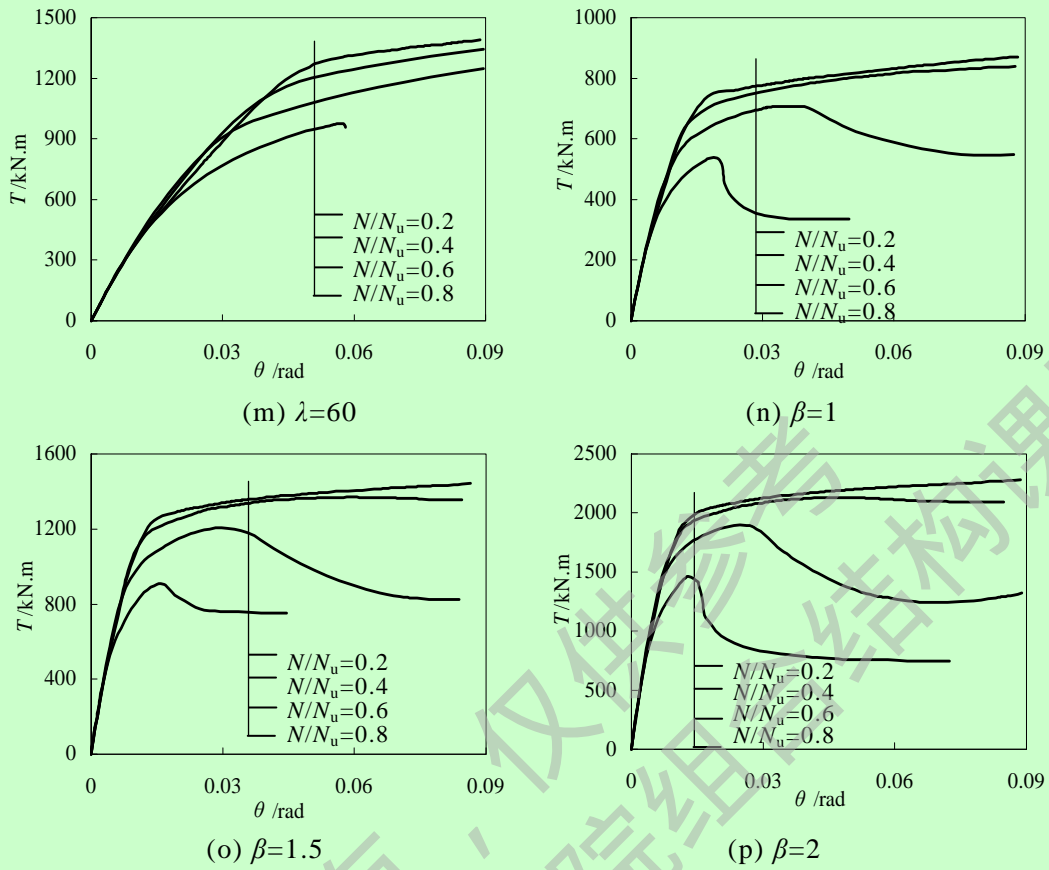
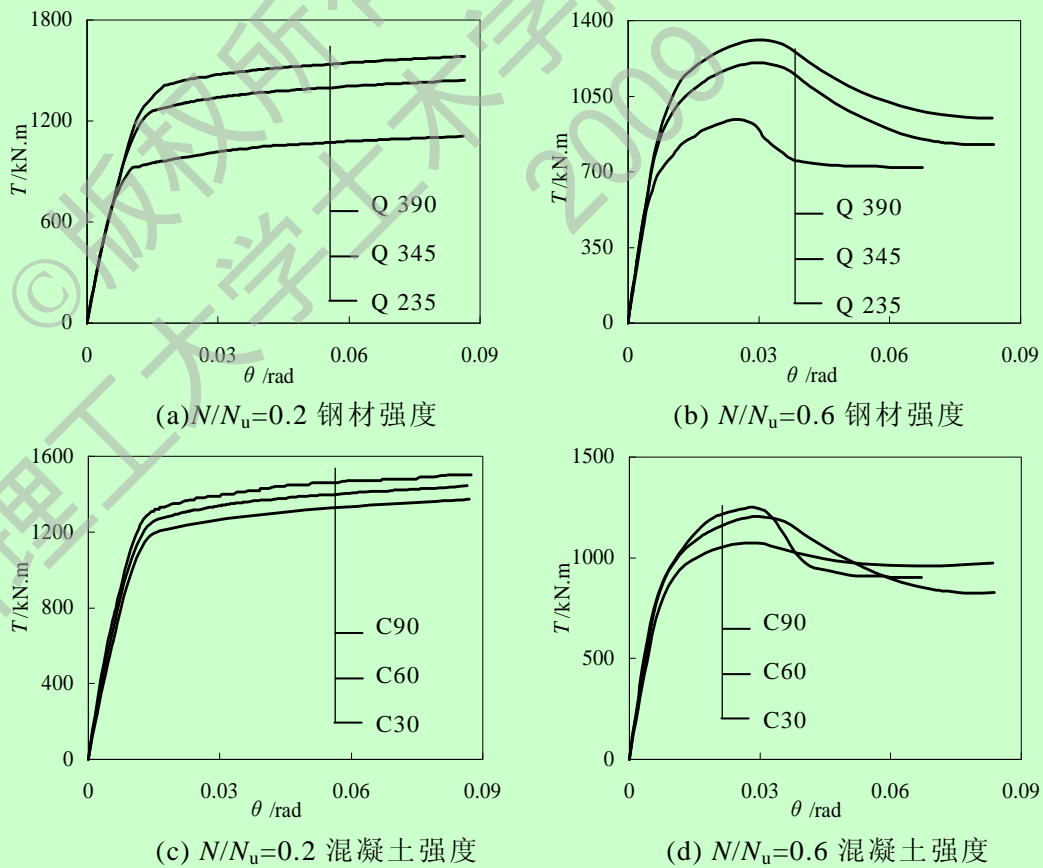


图 3.7 各参数对矩形钢管混凝土压扭承载力的影响



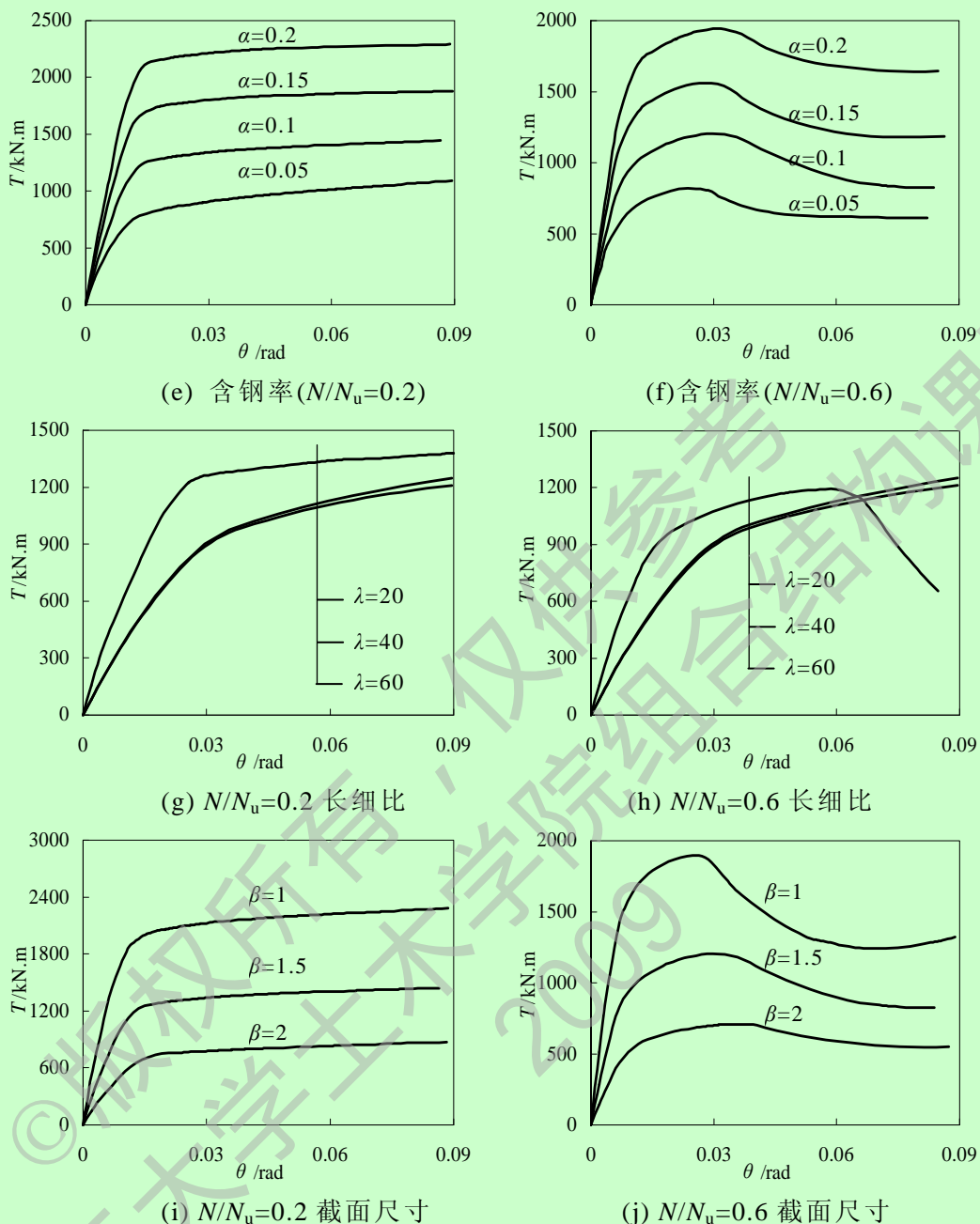


图 3.8  $N/N_u$  对矩形钢管混凝土压扭承载力的影响

表 3.4 矩形钢管混凝土压扭参数分析汇总表

基本参数	变量
$\beta=1; f_{cu}=60\text{MPa}; \lambda=10; \alpha=0.1$	$f_y=235; 345; 390\text{MPa}$
$\beta=1.5; f_y=345; \text{MPa}; \lambda=10; \alpha=0.1$	$f_{cu}=30; 60; 90\text{MPa}$
$\beta=1.5; f_y=345\text{MPa}; f_{cu}=60\text{MPa}; \lambda=10$	$\alpha=0.05; \alpha=0.1; \alpha=0.15; \alpha=0.2$
$\beta=1.5; f_{cu}=60\text{MPa}; f_y=345\text{MPa}; \alpha=0.1$	$\lambda=20; 40; 60$
$\lambda=10; f_{cu}=60\text{MPa}; f_y=345\text{MPa}; \alpha=0.1$	$\beta=1, 1.5, 2$

## 2 弯扭构件参数分析

通过算例验证圆形及方形截面钢管混凝土弯扭构件有限元模型后。参数分析典型算例基本条件为：截面高宽比  $\beta=1.5(\beta=D/B, B=400\text{mm})$ ，含钢率  $\alpha=0.1$ ，钢材屈服强度  $f_y=345\text{MPa}$ ，混凝土强度  $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $L=1155\text{mm}$ ，其长细比  $\lambda \leq 10$  (分别从强轴和弱轴方向考虑)，所以分析时  $\varphi=1$ 。分析参数的变化范围如下：

1) 材料参数：钢材屈服强度  $f_y=235\text{MPa}$ 、 $345\text{MPa}$ 、 $390\text{MPa}$ ；混凝土强度  $f_{cu}=30\text{MPa}$ 、 $60\text{MPa}$ 、 $90\text{MPa}$ 。

2) 几何参数：截面高宽比  $\beta=1$ 、 $1.5$ 、 $2$ ；截面含钢率  $\alpha=0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.15$ 、 $0.2$ ，构件长细比  $\lambda=20$ 、 $40$ 、 $60$ 。

3) 弯矩比  $M/M_u=0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ 。

参数分析时对于钢管混凝土抗弯承载力  $M_u$  采用《钢管混凝土结构技术规程》(2003)<sup>[15]</sup>给出的公式计算，既公式(3.3)。

$$M_u = \gamma_m \cdot W_{sc} \cdot f_{scy} \quad (3.3)$$

式中： $M_u$ ：为构件的极限弯矩； $\gamma_m$ ：为构件截面抗弯塑性发展系数； $W_{sc}$ ：为钢管混凝土构件截面抗弯模量；

对于矩形截面钢管混凝土  $\gamma_m=1.04+0.48\ln(\zeta+0.1)$  当绕强轴弯曲时： $W_{sc}=D^2B/6$ ；当绕弱轴弯曲时： $W_{sc}=B^2D/6$ 。公式系数  $\gamma_m$  中的  $\zeta$  和  $f_{scy}$  与分析矩形截面钢管混凝土压扭时计算轴压承载力  $N_u$  的参数相同，这里不再重复。

(1) 弯矩比  $M/M_u$ (钢材强度  $f_y$ )

图 3.9(a)、(b)、(c)和图 3.10(a)、(b)、(c)给出了相同钢材强度下弯矩比  $M/M_u$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着轴压比  $M/M_u$  提高，构件压扭承载力降低，曲线初始刚度无明显变化。总体上轴压比  $M/M_u$  主要影响曲线的数值，对曲线形状影响较小。

(2) 弯矩比  $M/M_u$ (混凝土强度  $f_{cu}$ )

图 3.9(d)、(e)、(f)和图 3.10(d)、(e)、(f)给出了相同混凝土强度下弯矩比  $M/M_u$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着轴压比  $M/M_u$  提高，构件弯扭承载力降低，曲线初始刚度无明显变化。总体上轴压比  $M/M_u$  对曲线的数值和曲线的形状影响不大。

(3) 弯矩比  $M/M_u$ (含钢率  $\alpha$ )

图 3.9(g)、(h)、(i)、(j)和图 3.10(g)、(h)、(i)、(j)给出了相同含钢率下弯矩比  $M/M_u$  对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着弯矩比  $M/M_u$  提高，构件弯扭承载力降低，曲线初始刚度无明显变化。总体上弯矩比  $M/M_u$  主要影响曲线的数值，对曲线形状影响不大。

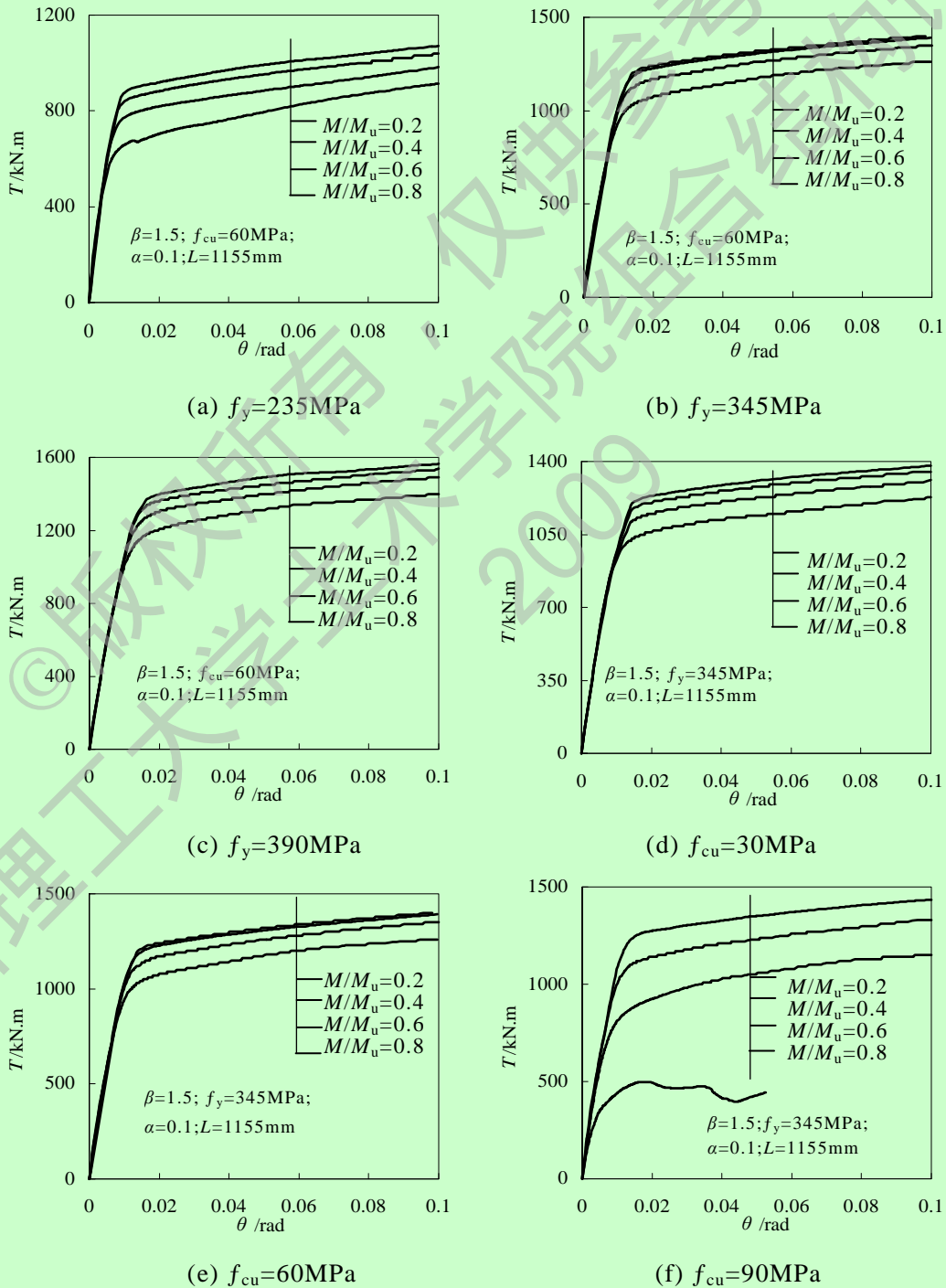
(4) 弯矩比  $M/M_u$ (长细比  $\lambda$ )

图 3.9(k)、(l)、(m)和图 3.10(k)、(l)、(m)给出了相同长细比下弯矩比  $M/M_u$

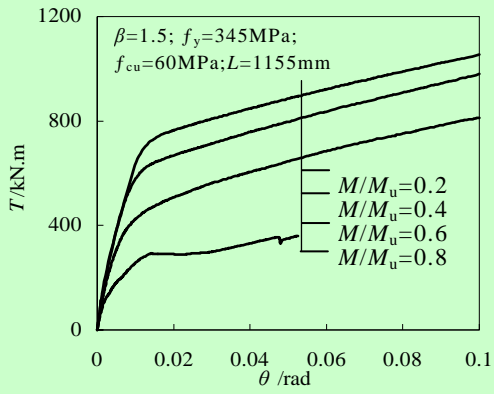
对  $T-\theta$  关系的影响规律。可见随着弯矩比  $M/M_u$  提高, 构件弯扭承载力降低, 曲线初始刚度随长细比的增加而降低。总体上弯矩比  $M/M_u$  主要影响曲线的数值, 对曲线的塑性段形状影响较小。

(5) 弯矩比  $M/M_u$  (截面高宽比  $\beta$ )

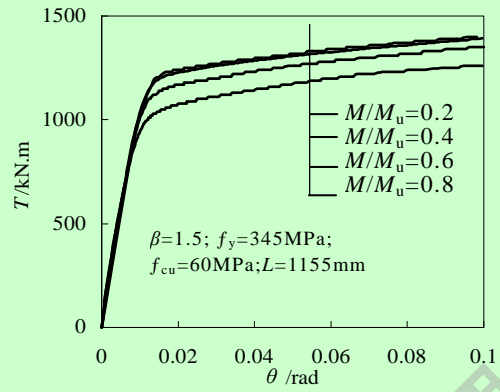
图 3.9(n)、(o)、(p) 和图 3.10(n)、(o)、(p) 给出了相同截面高宽比下弯矩比  $M/M_u$  对  $T-\theta$  关系影响规律。随着弯矩比  $M/M_u$  提高, 构件弯扭承载力降低曲线初始刚度无明显变化。总体上弯矩比  $M/M_u$  主要影响曲线的数值, 对曲线的形状影响不大。



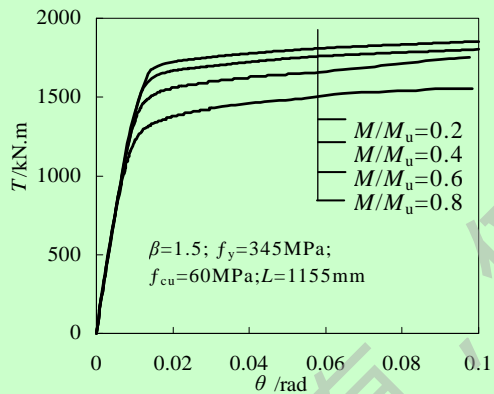




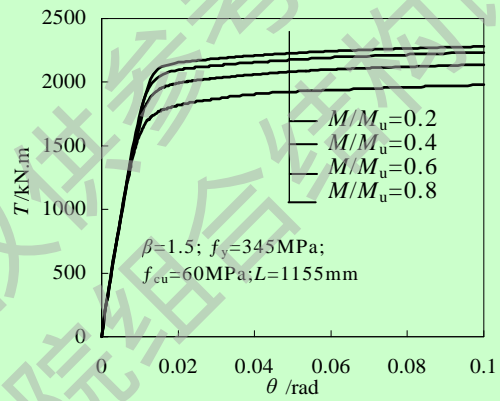
(g)  $\alpha=0.05$



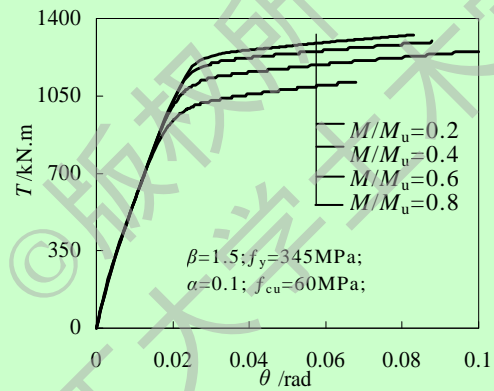
(h)  $\alpha=0.1$



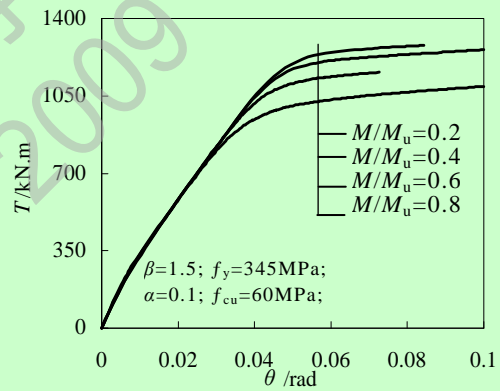
(i)  $\alpha=0.15$



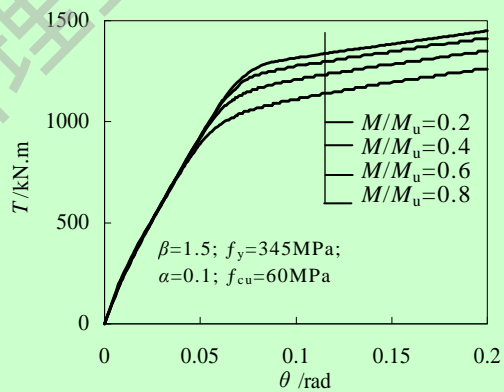
(j)  $\alpha=0.2$



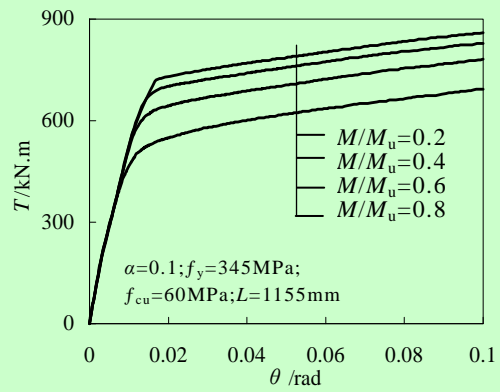
(k)  $\lambda=20$



(l)  $\lambda=40$



(m)  $\lambda=60$



(n)  $\beta=1$

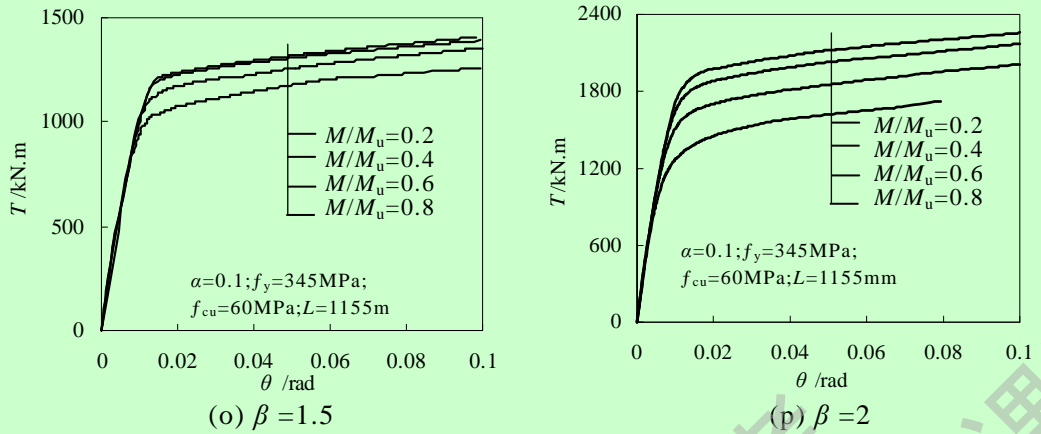
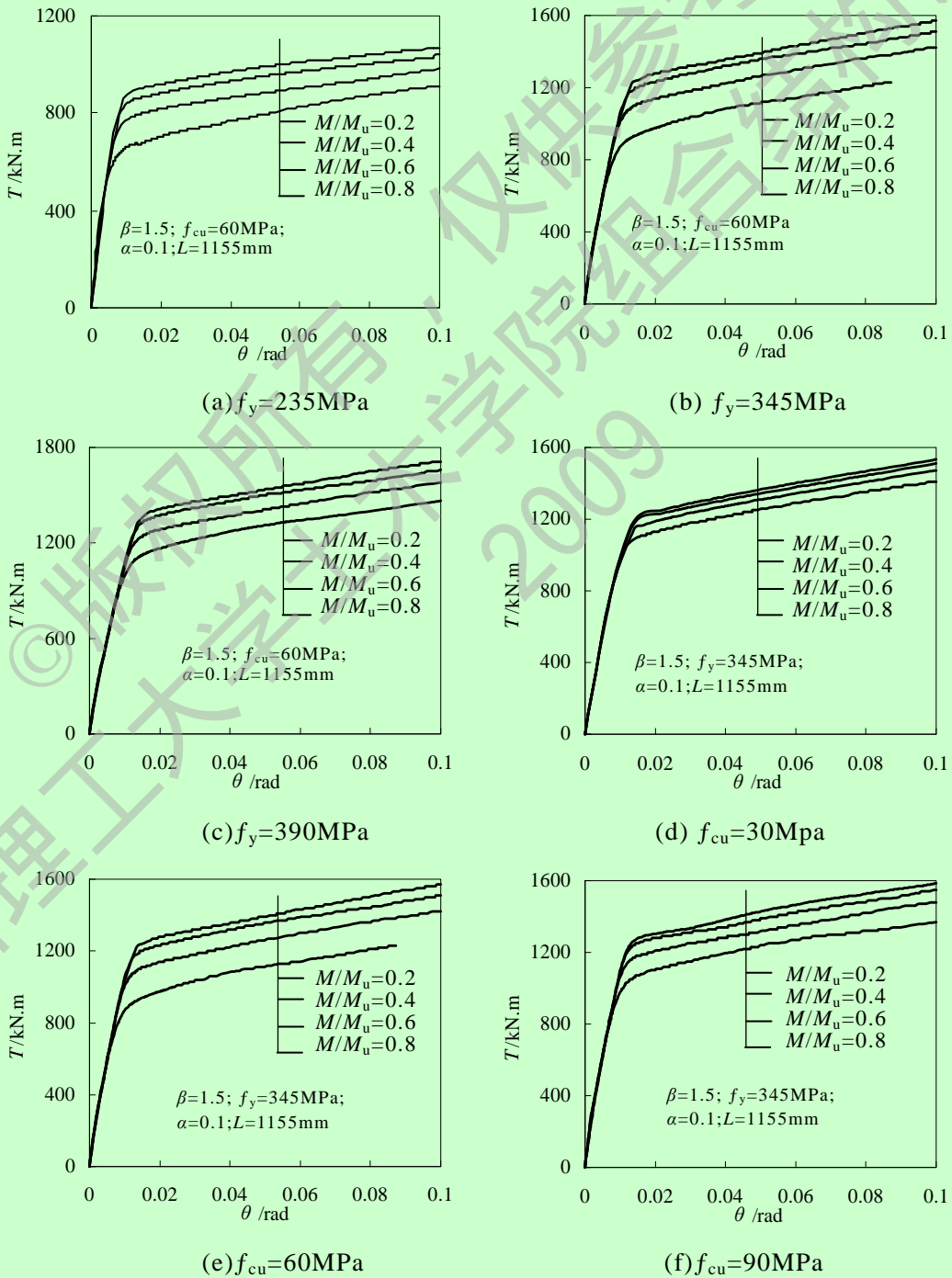
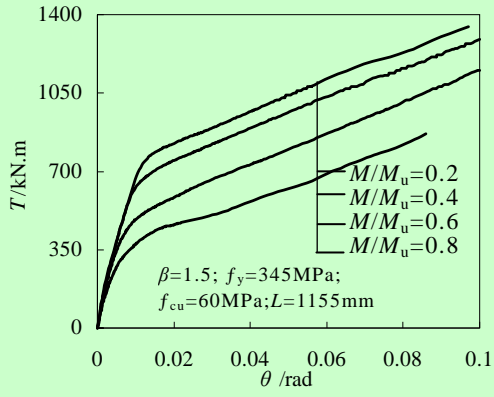
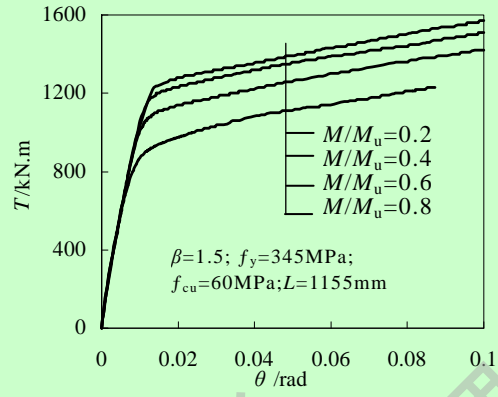


图 3.9  $M/M_u$  对矩形钢管混凝土构件弯-扭(强轴)承载力的影响

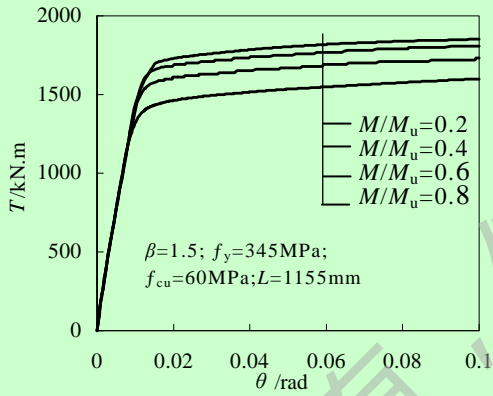




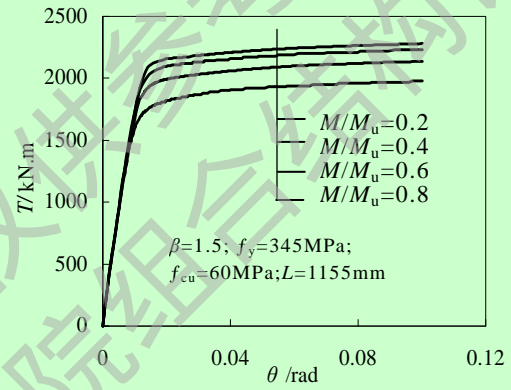
(g)  $\alpha=0.05$



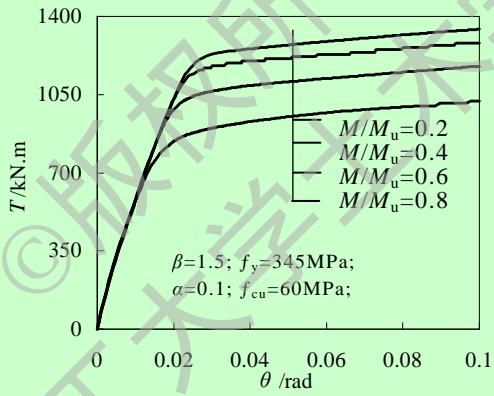
(h)  $\alpha=0.1$



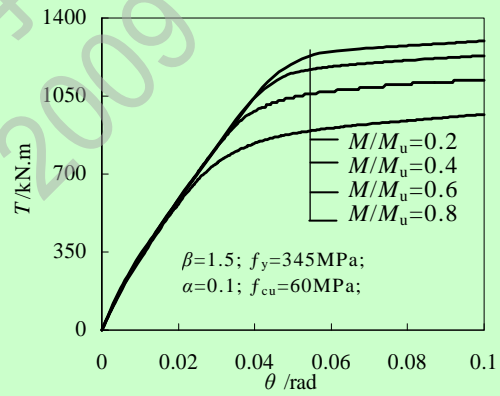
(i)  $\alpha=0.15$



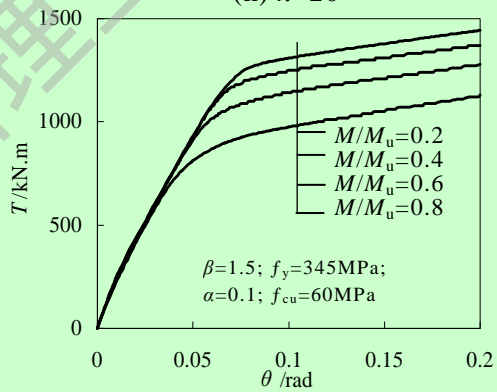
(j)  $\alpha=0.2$



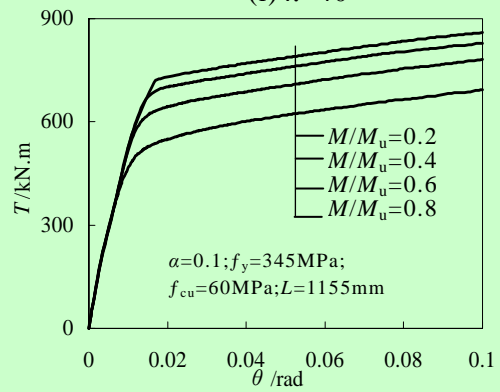
(k)  $\lambda=20$



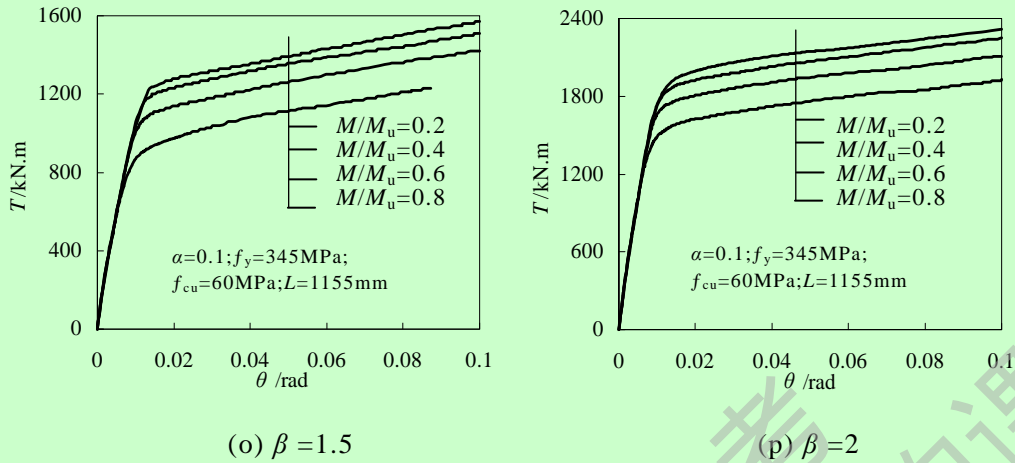
(l)  $\lambda=40$



(m)  $\lambda=60$



(n)  $\beta=1$


 图 3.10  $M/M_u$  对矩形钢管混凝土构件弯-扭(弱轴)承载力的影响

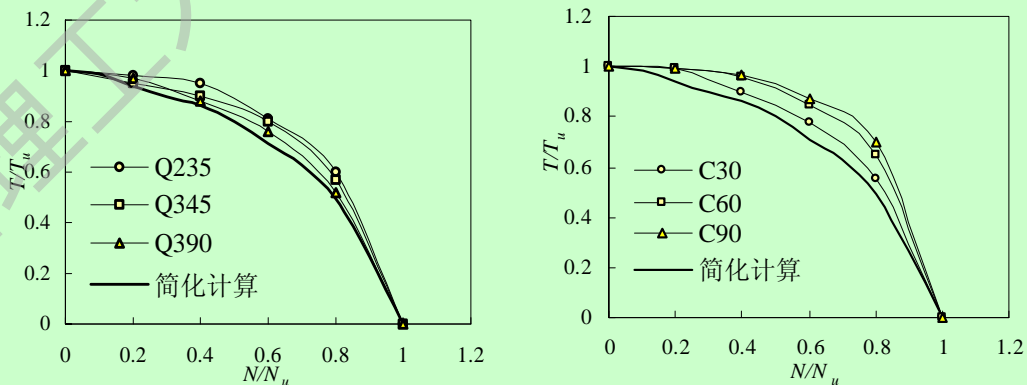
### 3.1.5 实用计算方法

#### 1 矩形钢管混凝土压扭构件极限承载力相关方程

通过大量的参数分析，参考韩林海(2007)<sup>[11]</sup>和尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>，本文给出了矩形截面钢管混凝土构件压扭极限承载力相关简化计算公式，表达式如下：

$$\left(\frac{N}{N_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.4)$$

上式中  $N$  为构件实际轴向压力， $T$  为构件实际扭矩， $N_u$  和  $T_u$  分别为钢管混凝土轴压强度和纯扭构件的极限承载力，分别按公式(2.4)和(3.1)进行计算。图 3.11 为本文公式计算结果与数值计算结果对比，从图中  $T/T_u-N/N_u$  相关曲线可以看出，压扭构件简化计算结果和数值模拟结果基本吻合且处于数值计算结果下方偏安全。图 3.12 给出的计算值与实验值对比，简化计算结果与实验结果对比数值偏下。



(a) 钢材强度

(b) 混凝土强度

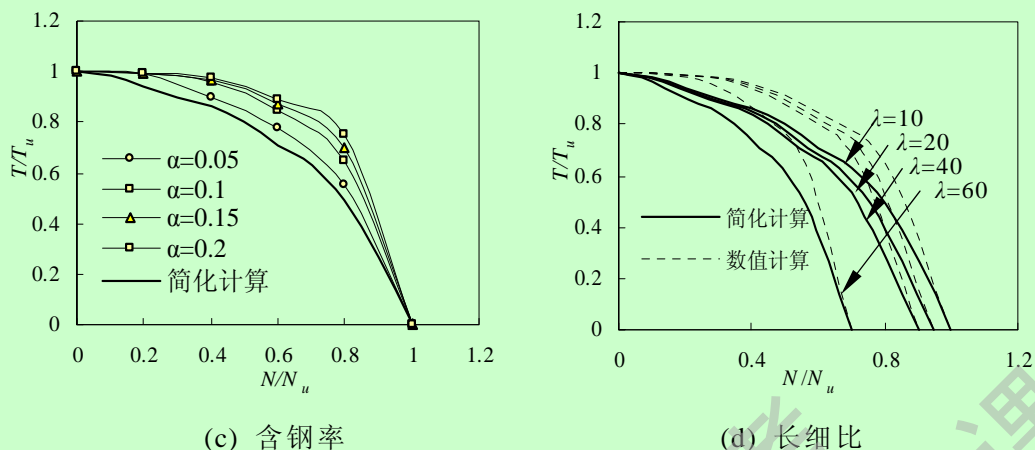


图 3.11 压扭构件  $T/T_u-N/N_u$  先关曲线简化计算结果与数值计算结果的比较

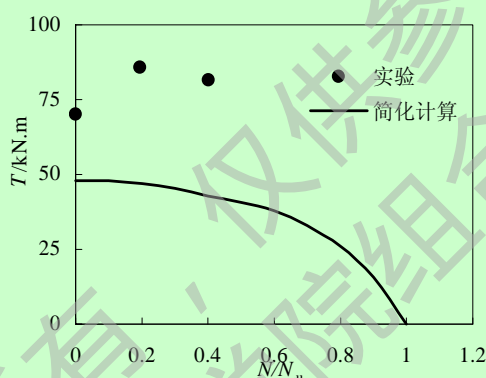


图 3.12 钢管混凝土压扭构件简化计算模型计算结果与实验陈逸玮(2003)<sup>[59]</sup>对比考虑长细比的影响，对压扭构件相关计算公式如下：

$$\left(\frac{N}{\varphi A_{sc} f_{scy}}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{\gamma_u W_{sc} \tau_{scy}}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.5)$$

式中  $\varphi$  为钢管混凝土轴压稳定系数，可参考《钢管混凝土结构技术规程》(2003)<sup>[15]</sup>确定。简化公式计算结果与参数分析结果和实验结果 (方形) 进行了对比，结果表明，对于方钢管混凝土，计算值与实验比值比较均方差为 0.08。

## 2 矩形钢管混凝土弯扭构件极限承载力计算公式

通过矩形钢管混凝土抗扭承载力计算公式和对矩形钢管混凝土压扭构件的参数分析，参考韩林海(2007)<sup>[11]</sup>和尧国皇(2006)<sup>[56]</sup>，得到了矩形截面钢管混凝土弯扭构件简化计算公式，表达式如下：

$$\left(\frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.6)$$

上式中  $M$  为构件实际弯矩， $T$  为构件实际扭矩， $N_u$  和  $T_u$  分别为钢管混凝土轴压强度和纯扭构件的极限承载力，分别按公式(2.4)和(3.3)进行计算。图 3.13 为本文公式计算结果与数值计算结果对比，从图中  $T/T_u-M/M_u$  相关曲线可以看

出，弯扭构件简化计算结果和数值模拟结果基本吻合且被数值计算曲线所包裹。

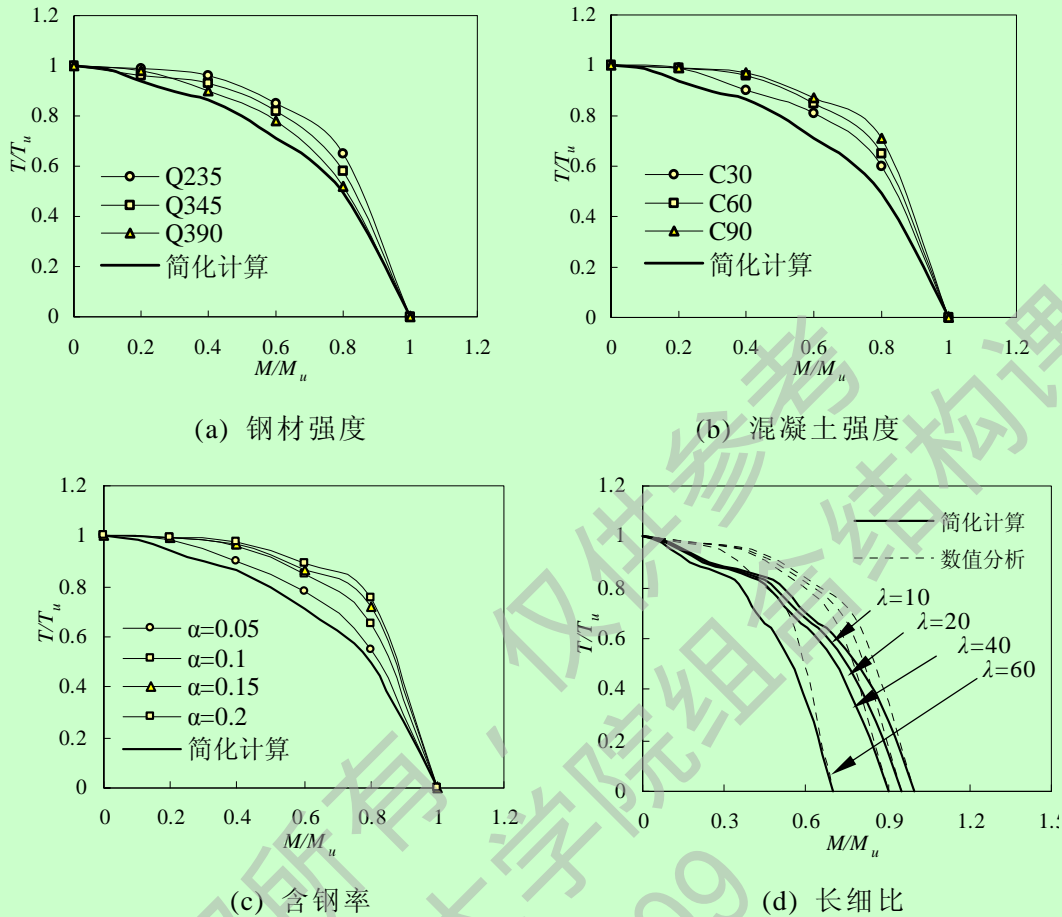


图 3.13 压扭构件  $T/T_u-M/M_u$  先关曲线简化计算结果与数值计算结果比较

## 3.2 矩形钢管混凝土压弯扭、压弯剪构件有限元分析

### 3.2.1 有限元模型

#### 1 单元类型、材料模型和接触模型

矩形钢管混凝土压弯扭、压弯剪构件的单元模型与 2.4.1 节相同。

#### 2 荷载施加及边界条件

矩形钢管混凝土压弯扭构件：构件的固定端，采用  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  三方向约束。本文分析的加载路径为，首先施加轴力  $N$  采用(Load)荷载，然后保持轴力不变施加弯矩  $M$  采用(Load)荷载，最后保持轴力和弯矩不变施加扭矩  $T$  采用(BC)荷载。

矩形钢管混凝土压弯剪构件：构件固定端约束同压弯扭构件。本文分析加载路径为，首先施加轴力  $N$  采用(Load)荷载，然后保持轴力不变施加弯矩  $M$  采用(Load)荷载，最后保持轴力和弯矩不变施加剪力采用(BC)荷载。

图 3.14 为矩形钢管混凝土构件压弯扭和压弯剪计算边界条件。



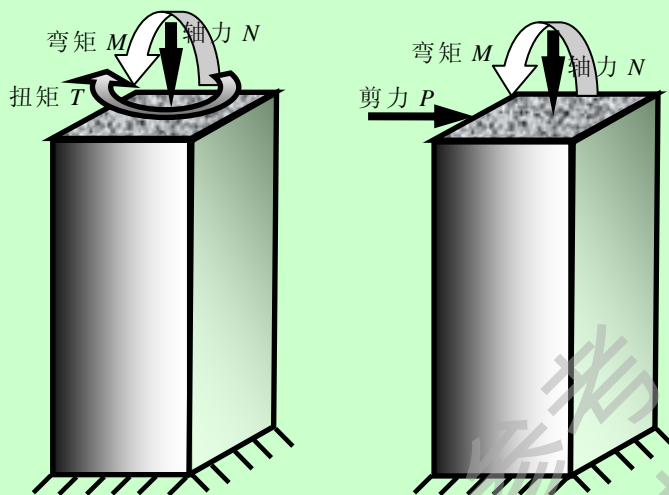
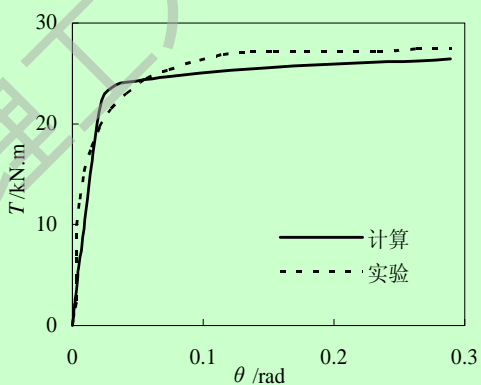


图 3.14 矩形钢管混凝土构件压弯扭、压弯剪荷载和边界条件

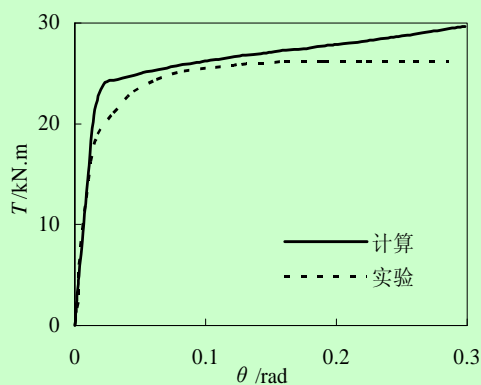
### 3 单元划分

有限元网格划分方法与矩形钢管混凝土纯扭、纯剪构件相同，这里不再详述。

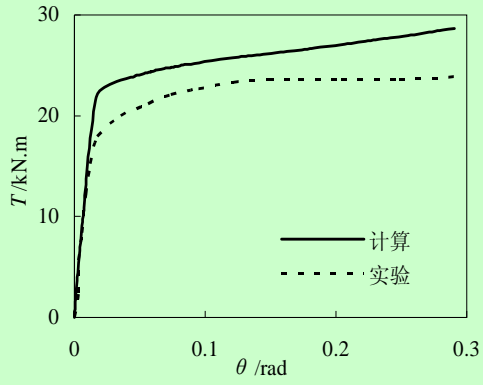
对钢管混凝土压弯扭及压弯剪构件的实验研究很少，所以本节进行了 11 个钢管混凝土压弯扭实验构件和 2 个钢管混凝土压弯剪构件的数值模拟和实验结果对比，验证本节钢管混凝土压弯扭数值分析模型。图 3.15 为有限元计算钢管混凝土压弯扭构件和实验分结果对比，表 3.5 给出了所模拟钢管混凝土压弯扭实验构件的具体参数。图 3.16 给出了有限元计算钢管混凝土压弯剪构件和实验分结果对比，实验模型引自 Ichinohe(1991)<sup>[68]</sup>。从图 3.15 和图 3.16 可以看出计算曲线和实验曲线对比无论是数值大小还是曲线形状都很接近，所以本文建立的钢管混凝土压弯扭构件及压弯剪构件可以用来研究矩形钢管混凝土压弯扭和压弯剪构件的力学性能。



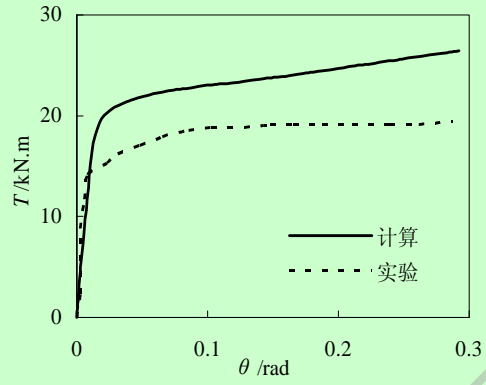
(a) TCB1-1



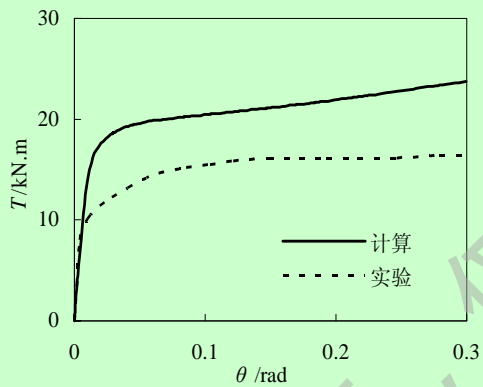
(b) TCB1-2



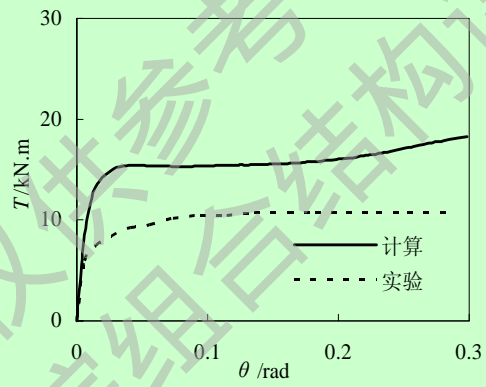
(c) TCB1-3



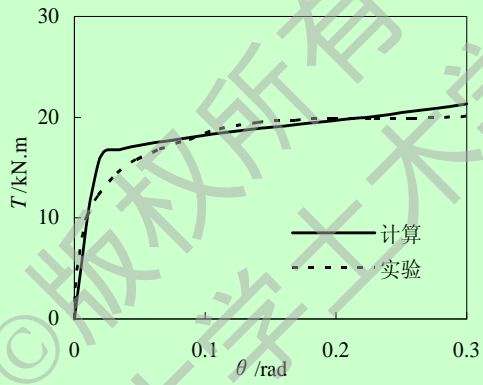
(d) TCB1-4



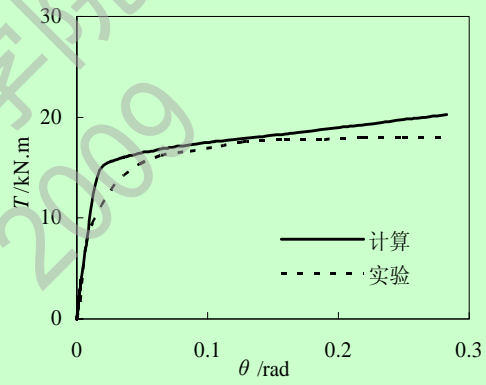
(e) TCB1-5



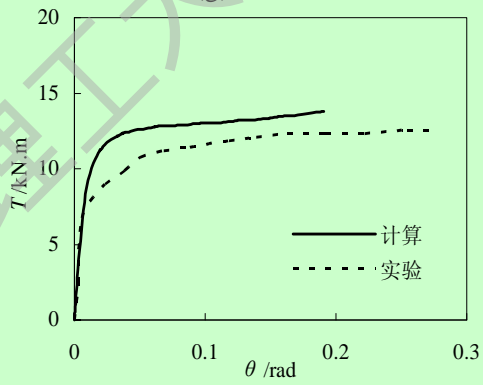
(f) TCB1-6



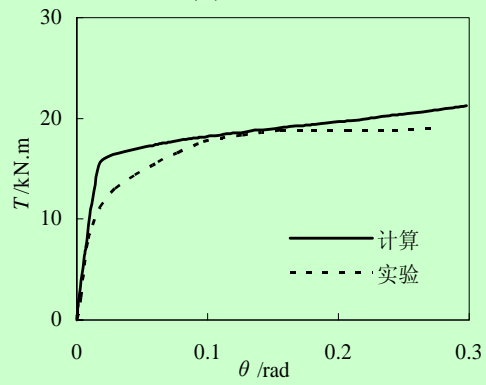
(g) TCB2-1



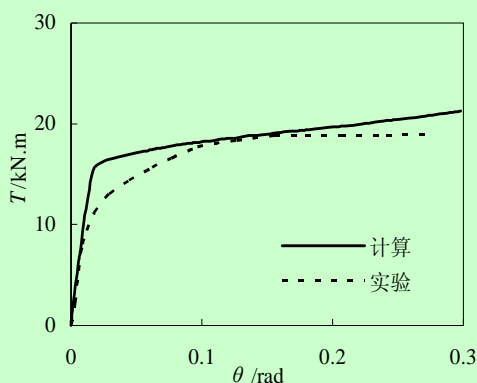
(h) TCB2-2



(i) TCB2-3



(j) TCB2-4



(k) TCB2-4

图 3.15 圆形钢管混凝土压弯扭实验验证 ABAQUS 模拟计算结果

表 3.5 钢管混凝土压弯扭实验试件汇总表

序号	$D \times t \times L$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_{cu}$ (MPa)	$e$ (mm)	$N$ (kN)	数据来源
a	133×4.5×450	324.34	33.3	250	0	韩林海和钟善桐 (1995) <sup>b</sup> <sup>[58]</sup>
b	133×4.5×450	324.34	33.3	250	15	
c	133×4.5×450	324.34	33.3	250	40	
d	133×4.5×450	324.34	33.3	250	65	
e	133×4.5×450	324.34	33.3	250	80	
f	133×4.5×450	324.34	33.3	250	95	
g	130×3×450	324.34	33.3	250	0	
h	130×3×450	324.34	33.3	250	30	
i	130×3×450	324.34	33.3	250	60	
j	130×3×450	324.34	33.3	100	50	
k	130×3×450	324.34	33.3	200	50	

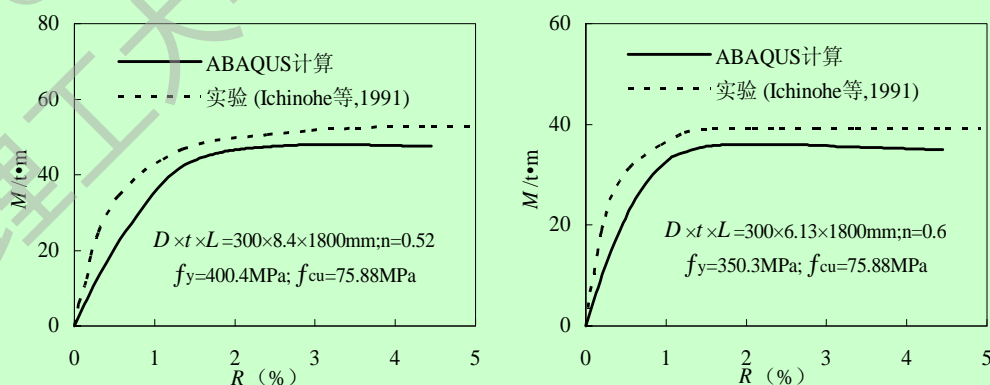


图 3.16 圆形截面压弯剪试件 ABAQUS 计算曲线与实验曲线比较

### 3.2.2 参数分析

通过上述圆形截面及方形截面钢管混凝土压弯扭和压弯剪算例验证后本文进行了大量参数分析。参数分析典型算例基本条件为：截面高宽比  $\beta=1.5(\beta=D/B)$ ,

$B=400\text{mm}$ ), 含钢率  $\alpha=0.1$ , 钢材强度  $f_y=345\text{MPa}$ , 混凝土强度  $f_{cu}=60\text{MPa}$ , 取  $L=1155\text{mm}$ , 使得其长细比  $\lambda \leq 10$  (分别从强轴和弱轴方向考虑), 从而使得构件分析时  $\varphi=1$ , 轴压比  $n=0.4$ , 剪跨比  $m=2$ 。

1 压弯扭参数分析的范围: 轴压力=0kN、600kN、900kN、1200kN。

本文前面第三章中以对矩形钢管混凝土弯扭构件的力学性能进行了参数分析并得到了矩形钢管混凝土弯扭极限承载力的简化计算方法, 本节中只对矩形钢管混凝土压弯扭构件压-弯-扭一种加载路径进行分析, 所以本节只对不同轴心压力情况下的矩形钢管混凝土压弯扭力学性能进行参数分析。

2 压弯剪参数分析范围: 钢材强度  $f_y=235\text{MPa}$ 、 $345\text{MPa}$ 、 $390\text{MPa}$ ; 混凝土强度  $f_{cu}=30\text{MPa}$ 、 $60\text{MPa}$ 、 $90\text{MPa}$ 。截面含钢率  $\alpha=0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.15$ 、 $0.2$ 。

图 3.17 矩形钢管混凝土压弯扭构件在不同轴压力下  $T-\theta$  关系曲线从图中可以看出随着轴压力的增加, 矩形钢管混凝土压弯扭构件的极限承载力降低, 且轴压力越大, 承载力降低的程度越大。

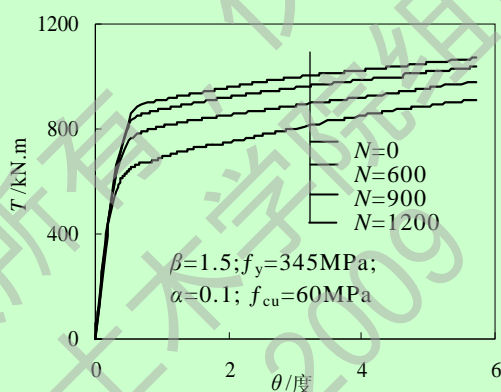


图 3.17 矩形截面钢管混凝土压弯扭  $T-\theta$  关系曲线

图 3.18 给出了矩形钢管混凝土压弯剪构件在不同参数影响下极限承载力的变化规律。

1 钢材强度  $f_y$

图 3.18(a)中给出了钢材强度  $f_y$  对矩形钢管混凝土  $P-u$  关系曲线的影响, 可见随着钢材强度的提高, 矩形钢管混凝土压弯剪构件的极限承载力提高, 构件的初始刚度提高。总体上钢材强度主要影响曲线的数值, 对曲线的形状影响不大。

2 混凝土强度  $f_{cu}$

图 3.18(b) 中给出了混凝土强度  $f_{cu}$  对矩形钢管混凝土  $P-u$  关系曲线的影响, 可以看出, 随着  $f_{cu}$  的提高, 矩形钢管混凝土压弯剪构件极限承载力提高, 构件的初始刚度提高。总体上混凝土强度影响曲线的数值, 对曲线的变化趋势影响不大。

3 含钢率  $\alpha$

图 3.18(c) 中给出了含钢率  $\alpha$  对矩形钢管混凝土  $P-u$  关系曲线的影响,可以看出,随着  $\alpha$  的提高,矩形钢管混凝土压弯剪构件的极限承载力提高,初始刚度略有变化。总体上含钢率主要影响曲线的数值,对曲线的形状影响不大。

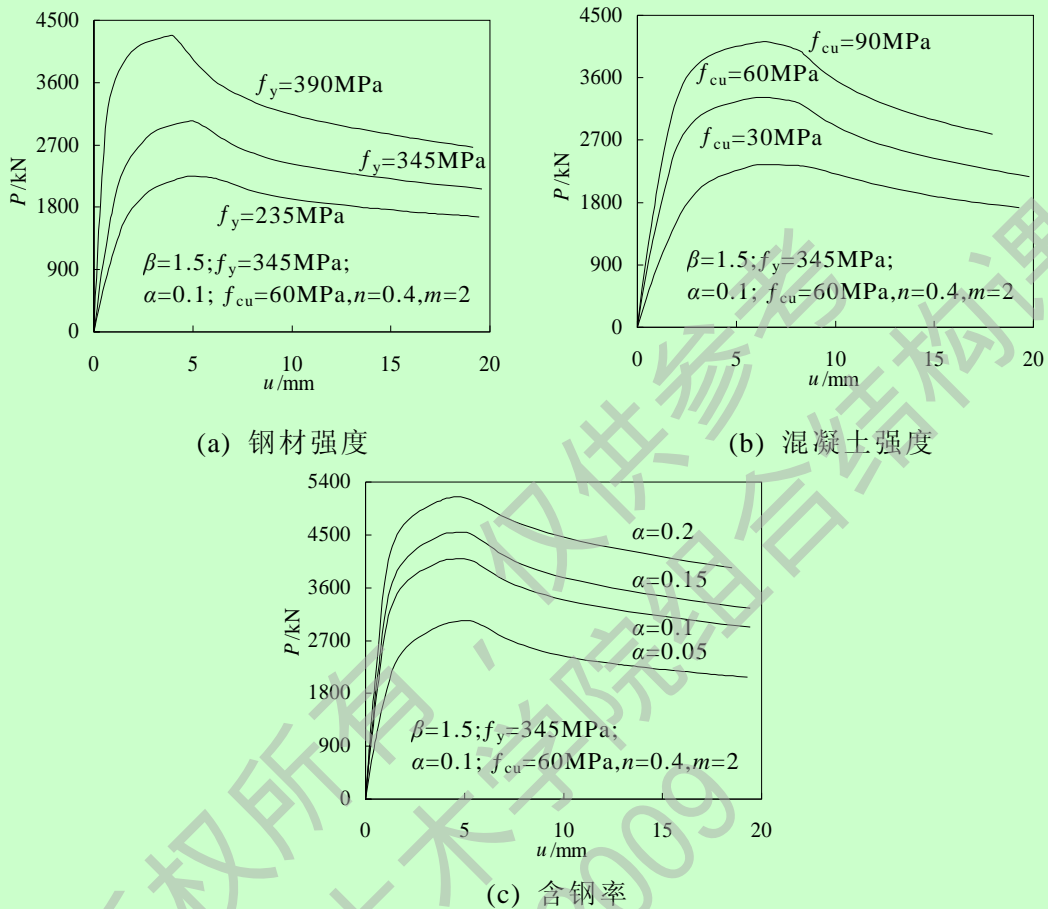
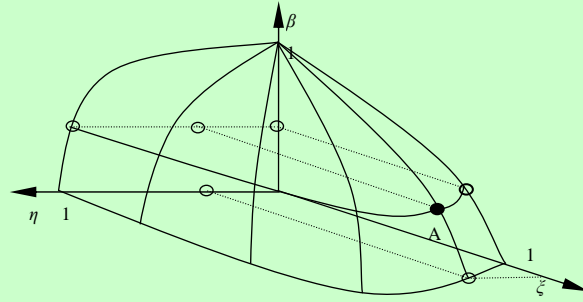


图 3.18 矩形截面钢管混凝土压弯剪  $P-u$  关系曲线

图 3.18 的  $P-u$  曲线关系图可以看出矩形截面钢管混凝土压-弯-扭构件中钢管对核心混凝土的约束效应较好,曲线无下降段如图 3.17 所示,而对压弯剪构件则有所下降,主要是因为约束效应系数  $\zeta$  为平面效应系数,本文对构件分析时采用的加载路径为压-弯-扭,对压弯扭构件分析时扭矩  $T$  为最后施加荷载,而对压-弯-剪,剪力为最后施加荷载,钢管对混凝土的三向被动围压约束作用没有充分发挥,曲线出现下降段。

### 3.2.3 压弯扭实用计算方法

利用有限元分析,考虑加载路径为压弯-扭,对钢管混凝土压弯扭构件进行了荷载-变形关系分析,分析后考虑压弯扭的  $(\eta)N/N_u-(\zeta)M/M_u-(\beta)T/T_u$  相关关系计算的基础上,参考韩林海(1995)<sup>[65]</sup>、韩林海和钟善桐(1995c)<sup>[66]</sup>、韩林海和钟善桐(1996)<sup>[67]</sup>及韩林海(2007)<sup>[1]</sup>的研究成果,据图 3.19 所示的压弯扭构件强度承载力相关曲面  $\eta-\zeta-\beta$  的形状。


 图 3.19 压弯扭构件  $\eta$ - $\zeta$ - $\beta$  关系曲线

经参数分析及本文第二章给得出的纯扭、纯剪、压扭、弯扭计算方法的基础上结合《钢管混凝土结构技术规程》(2003)<sup>[15]</sup>给出的钢管混凝土抗压承载力计算公式(本文中公式 3.1)和钢管混凝土抗弯承载力计算公式(本文中公式 3.3),简化压弯扭计算公式为两段式。式(3.7a)和式(3.7b)为考虑构件受压构件稳定系数时的公式,对于强度问题,上述中稳定系数取  $\varphi=1$ (韩林海, 2007<sup>[11]</sup>)。忽略附加弯曲变形的弯矩放大系数  $1/d$ ,则可得到矩形截面构件压弯扭强度承载力公式,即式(3.8a)和式(3.8b):

$N/N_u \geq 2\varphi^3 \eta_0^{2.4} \sqrt[3]{1-(T/T_u)^{0.91}}$  得到:

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{b} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.7a)$$

$N/N_u < 2\varphi^3 \eta_0^{2.4} \sqrt[3]{1-(T/T_u)^{0.91}}$  得到:

$$\left[-b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.7b)$$

$N/N_u \geq 2\eta_0^{2.4} \sqrt[3]{1-(T/T_u)^{0.91}}$  得到:

$$\left(\frac{N}{N_u} + a \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.8a)$$

$N/N_u < 2\eta_0^{2.4} \sqrt[3]{1-(T/T_u)^{0.91}}$  得到:

$$\left[-b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.8b)$$

图 3.20 为简化计算公式计算的结果与实验进行对比,结果计算值  $V_{uc}$  比实验值  $V_{ue}$  低 16%。由于对方形钢管混凝土和矩形钢管混凝土构件压弯扭实验研究较少,本文只进行了一个实验对比。



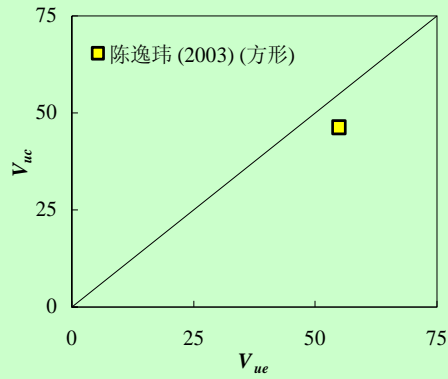


图 3.20 矩形截面压弯扭构件承载力计算值与实验值对比

### 3.2.4 压弯剪实用计算方法

与矩形截面钢管混凝土压弯扭承载力简化计算公式相同，参考韩林海(1995)<sup>[65]</sup>、韩林海和钟善桐(1995c)<sup>[66]</sup>、韩林海和钟善桐(1996)<sup>[67]</sup>及韩林海(2007)<sup>[11]</sup>研究成果，经过简化，建议了矩形截面钢管混凝土压弯剪构件承载力相关方程，也采用两段式表达。式(3.9a)和式(3.9b)为考虑构件受压构件稳定系数时的公式，对于强度问题，上述中稳定系数取  $\varphi=1$ (韩林海，2007<sup>[11]</sup>)。忽略附加弯曲变形的弯矩放大系数  $1/d$ ，则可得到矩形截面构件压弯剪强度承载力公式，即式(3.10a)和式(3.10b)。

$N/N_u \geq 2\varphi^3\eta_0^{2.4}\sqrt[2.4]{1-(V/V_u)^{0.91}}$  得到：

$$\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \frac{N}{N_u} + \frac{a}{b} \cdot \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.9a)$$

$N/N_u < 2\varphi^3\eta_0^{2.4}\sqrt[2.4]{1-(V/V_u)^{0.91}}$  得到：

$$\left[-b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{1}{d} \cdot \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.9b)$$

$N/N_u \geq 2\eta_0^{2.4}\sqrt[2.4]{1-(V/V_u)^{0.91}}$  得到：

$$\left(\frac{N}{N_u} + a \frac{M}{M_u}\right)^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^{0.91} = 1 \quad (3.10a)$$

$N/N_u < 2\eta_0^{2.4}\sqrt[2.4]{1-(V/V_u)^{0.91}}$  得到：

$$\left[-b \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - c \cdot \left(\frac{N}{N_u}\right) + \frac{M}{M_u}\right]^{2.4} + \left(\frac{V}{V_u}\right)^{0.91} = 1$$

(3.10b)

上述公式中， $V_u$  有本文公式 2.6 计算得到， $T_u$  由本文公式(2.4)计算得到，

$M_u$  和  $N_u$  由公式 3.1 和 3.3 计算得到。

矩形截面压弯剪简化计算公式与数值分析结果对比均方差为 0.09,  $\beta=1$  的情况下与试验结果吻合良好, 如图 3.21 所示。由于对方形钢管混凝土和矩形钢管混凝土构件压弯剪实验研究相对较少, 本文只进行几个实验数据的对比。

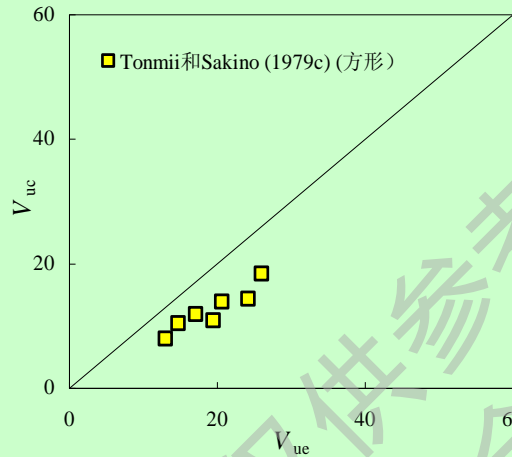


图 3.21 矩形截面压弯剪构件承载力计算值与实验值对比

以上本文探讨的矩形钢管混凝土压弯扭, 压弯剪构件计算公式中的参数 a、b、c 均参考韩林海(2007)<sup>[1]</sup>中的参数取值, 如 3.11(a)、3.11(b)、3.11(c)、3.11(d)。

$$a = \Delta_1 / \Delta \quad (3.11a)$$

$$b = \Delta_2 / \Delta \quad (3.11b)$$

$$c = \Delta_3 / \Delta \quad (3.11c)$$

$$d = 1 - 0.25(N/N_E) \quad (3.11d)$$

式中:  $\Delta = \eta_0^2(\eta_0 - 1)^2$ ;  $\Delta_1 = (\zeta_0 - 1)(1 - 2\eta_0) - \eta_0^2$ ;  $\Delta_2 = 2\eta_0^3 + (3\eta_0^2 - 1)(\zeta_0 - 1)$ ;  
 $\Delta_3 = (2\eta_0 - 3\eta_0^2)(\zeta_0 - 1) - \eta_0^4$ ;

$$\zeta_0 = 1 + 0.14\xi^{-1.3}$$

$$\eta_0 = \begin{cases} 0.5 - 0.3175\xi & (\xi \leq 0.4) \\ 0.1 + 0.14 \cdot \xi^{-0.81} & (\xi > 0.4) \end{cases}$$

### 3.3 本章小结

基于本章上述研究, 可以得到以下结论:

(1) 采用有限元法对圆形、方形截面钢管混凝土压扭、弯扭构件进行了荷载-变形曲线计算, 计算结果和实验结果吻合较好。在参数分析的基础上, 给出了矩形钢管混凝土压扭、弯扭承载力实用计算方法。

(2) 采用有限元法对圆形、方形截面钢管混凝土压弯扭、压弯剪构件进行了荷载-变形曲线计算, 计算结果和实验结果吻合较好。在参数分析的基础上, 探讨了矩形钢管混凝土压弯扭、压弯剪承载力计算方法。

## 结论与展望

### 1 结论

本文对矩形截面钢管混凝土构件在复杂受力状态下的性能进行了分析,设计方法进行了建议,并给出了相应受力方式下的简化计算公式。在此基础上,可得到如下结论:

(1) 有限元模拟了单一受力下钢管混凝土的受力状况,验证了本文建立的矩形截面钢管混凝土单一受力模型。应用本文的模型对矩形钢管混凝土双向压弯力学性能进行了探讨,对矩形截面钢管混凝土纯弯及纯剪构件的力学性能进行了分析,在大量参数分析的基础上给出了矩形截面钢管混凝土纯扭承载力简化计算公式和矩形钢管混凝土纯剪承载力简化计算公式,并给出了两项公式的适用范围。

(2) 在单一受力模型分析的基础上,本文建立了钢管混凝土构件压扭、弯扭模型,通过和已有实验的模拟和对比,验证了本文压扭和弯扭构件模型。通过大量的参数分析和参考了以往研究者对钢管混凝土压、扭和弯、扭两种单一受力的组合方式,得到了矩形钢管混凝土压扭承载力极限公式和矩形钢管混凝土弯扭承载力极限公式,公式计算结果和实验进行了对比。

(3) 在对矩形钢管混凝土压扭及弯扭力学性能分析的基础上,较深入的对矩形钢管混凝土构件压弯扭及压弯剪力学性能进行了探讨。本文建立的钢管混凝土构件压弯扭及压弯剪有限元模型和实验对比吻合良好。进行了矩形钢管混凝土构件压弯扭及压弯剪参数分析,结合本文得出的矩形钢管混凝土抗扭及抗剪计算公式,探讨了矩形钢管混凝土压弯扭及压弯剪构件的极限承载力简化计算方法。

### 2 展望

随着科技的进步,时代的发展,对各行各业的需求都将更加完美,对异形截面钢管混凝土复合受力力学性能及设计方法更全面、深入透彻的研究是十分重要的。本文虽然对矩形钢管混凝土在复合受力时的力学性能做了一些较为深入的研究和探讨,但还有许多问题有待于更为深入的研究,具体如下:

(1) 对矩形钢管混凝土复合受力方式中的加载路径没有做更为深入的分析,因此尚有待于更全面的分析矩形钢管混凝土复合受力时不同加载路径对构件极限承载力的影响。

(2) 对矩形截面钢管混凝土构件复合受力中的压弯扭、压弯剪受力方式仍需更多的参数分析,对本文探讨的公式还需做更多的实验数据对比验证。本文对矩形钢管混凝土压弯扭剪构件复合受力的力学性能还没有研究,因此还有更多的验证工作及研究工作有待完成。

(3) 对异形截面钢管混凝土构件力学性能的研究是完善钢管混凝土构件力学性能分析的重要部分,涉及这方面的研究还少,所以还有待于今后开展研究。

## 参 考 文 献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践(第二版). 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994.
- [3] 张素梅, 郭兰慧. 方钢管高强混凝土偏压构件的试验研究与理论分析. 建筑结构学报, 2004, 25(1):17~24.
- [4] Webb J. and Peyton J.J.. Composite concrete filled steel tube columns. Proceedings of the Structural Engineering Conference. The Institute of Engineering Australia, 1990, 181~185.
- [5] Eurocode 4(EC4). Design of composite steel and concrete structures-Part1-1: General rules and rules for buildings. EN 1994-1-1: 2004, Brussels, CEN, 2004.
- [6] British Standard. BS5400 Steel, concrete and composite bridges, Part5, Code of practice for the design of composite bridges. British Standard Institution, 2005.
- [7] ACI 318-05. Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute, Detroit, U.S.A., 2005.
- [8] ANSI/AISC360-05. Specification for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction(AISC), An American National Standard, Chicago, U.S.A., 2005.
- [9] AIJ. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures. Architectural Institute of Japan (AIJ), Tokyo, Japan, 1997.
- [10] 中华人民共和国国家建筑材料工业局标准 JCJ01-89. 钢管混凝土结构设计施工规程. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [11] 中国工程建设标准化协会标准 CECS28:90. 钢管混凝土结构设计施工规程. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- [12] 中华人民共和国电力行业标准 DL/T5085-1999. 钢-混凝土组合结构设计规程. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [13] 中华人民共和国国家军用标准 GJB4142-2000. 战时军港抢修早强型组合结构技术规程. 北京: 中国人民解放军总后勤部, 2001.
- [14] 中国工程建设标准化协会标准 CECS159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [15] 福建省工程建设地方标准 DBJ13-51-2003. 钢管混凝土结构技术规程. 福州, 2003.

- [16] 福建省工程建设标准 DBJ13-61-2004. 钢-混凝土混合结构技术规程. 福州, 2004.
- [17] 天津市工程建设标准 DB29-57-2003. 天津市钢结构住宅设计规程. 天津, 2003.
- [18] 上海市工程建设规范 DG/TJ08-015-2004. 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程. 上海, 2004.
- [19] Young B., Ellobody E.. Experimental investigation of concrete-filled cold-formed high strength stainless steel tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62: 484~492.
- [20] 丁发兴, 余志武. 圆钢管套箍混凝土轴压短柱受力机理分析. *中国铁道科学*, 2006a, 6: 32~36.
- [21] 丁发兴, 余志武. 圆钢管混凝土轴压短柱受力机理影响因素分析. *铁道科学与工程学报*, 2006b, 3(1): 6~11.
- [22] Ellobody E., Young B., Dennis Lam. Behavior of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(7): 706~715.
- [23] Ellobody E, Young B. Design and behaviour of concrete-filled cold-formed stainless steel tube columns. *Engineering Structures*, 2006, 28(5): 716~728.
- [24] Gupta P.K., Sarda S.M., Kumar M.S.. Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 63(2): 182~193.
- [25] Guo L.H., Zhang S.M., Kim W.J.等. Behavior of square hollow steel tube and steel tubes filled with concrete. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(12): 961~973.
- [26] 余志武, 贺飒飒. 钢管混凝土短柱极限承载力可靠度分析. *工程力学*, 2006, (11): 139~144.
- [27] 钟善桐, 徐国林. 空心钢管混凝土轴心受压构件的工作性能和承载力. *建筑钢结构进展*, 2006, 8(4): 1~11.
- [28] Tao Z., Han L.H., Wang D.Y.. Experimental behaviour of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(9): 517~527.
- [29] Yu Z.W., Ding F.X., Cai C.S.. Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(2): 165~174.
- [30] 郭兰慧, 张素梅. 截面长宽比对矩形钢管高强混凝土力学性能的影响. 哈



- 尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 531~535.
- [31] 尧国皇, 孙素文, 李秀明. 轴心受压型钢-钢管混凝土柱力学性能研究. 建筑钢结构进展, 2007, 6(9), 26~32.
- [32] 黄福云, 陈宝春. 初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能影响. 福州大学学报, 2008, 36(2): 272~277.
- [33] Liu D.. Behavior of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(8): 839~846.
- [34] Xiong D.X., Zha X.X.. A numerical investigation on the behavior of concrete-filled steel tubular columns under initial stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 63(5): 599~611.
- [35] Lu F.W., Li S.P., Sun G.J.. A study on the behavior of eccentrically compressed square concrete-filled steel tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, 63(7):941~948.
- [36] 刘界鹏, 张素梅, 郭兰慧. 考虑扭转的矩形钢管混凝土双向偏压构件静力性能. 哈尔滨工业大学学报, 2006, (5): 712~714.
- [37] 田华, 张素梅, 郭兰慧. 矩形钢管高强混凝土双向压弯构件截面强度. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 10(39): 1520~1528.
- [38] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能. 中国公路学报, 2008, 21(1): 41~45.
- [39] Han L.H., Lu H., Yao G.H., Liao F.Y.. Further study on the flexural behavior of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(6): 554~565.
- [40] Han L.H., Yao G.H., Tao Z.. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(1): 34~36.
- [41] 于清, 陶忠, 陈志波, 吴颖星. 钢管约束混凝土纯弯构件抗弯力学性能研究. 工程力学, 2008, 25(3): 187~193.
- [42] 韩林海. 钢管混凝土压扭构件工作机理研究. 哈尔滨建筑大学学报, 1994, (4): 35~40.
- [43] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土压扭、弯扭构件承载力相关方程. 哈尔滨建筑大学学报, 1994, (2): 32~37.
- [44] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土弯扭构件的理论分析和试验研究. 工业建筑, 1994a, (2): 3~8.
- [45] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土压弯扭构件工作机理及性能研究. 建筑结构学

- 报, 1995a, (4): 32~39.
- [46] Han L.H., Yao G.H. Tao Z.. Behaviors of concrete-filled steel tubular members subjected to combined loading. *Thin-Walled Structures*, 2007, 45(6): 600~619.
- [47] 袁伟斌, 金伟良. 离心钢管混凝土扭转构件工作机理及性能研究. *浙江工业大学学报*, 2007, (1): 91~95.
- [48] 尧国皇, 黄用军, 宋宝东, 孙素文. 钢管混凝土偏压扭短柱承载力简化计算方法研究. *广东土木与建筑*, 2007, 10:23~25.
- [49] 查晓雄, 钟善桐. 钢管初应力对钢管混凝土压弯、压弯扭构件工作性能的影响. *哈尔滨建筑大学学报*, 1997, (2):45~53.
- [50] Hibbitt, Karlson, Sorensen Inc. ABAQUS/standard user's manual, Version 6.5. Providence(RI), 2005.
- [51] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究. 福州: 福州大学博士学位论文, 2005.
- [52] Hillerborg A, Modeer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6), 773~782.
- [53] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [54] 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. BRI Research Paper No.147, Building Research Institute, Japan, 2002.
- [55] 陈刚花, 李斌. 方钢管混凝土偏压短柱试验研究. *西安建筑科技大学学报*, 2006, 38(6): 873-876.
- [56] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究. 福州: 福州大学博士学位论文, 2006.
- [57] Beck J, Kiyomiya O. Fundamental pure torsional properties of concrete filled circular steel tubes. *J. Materials, Cone. Struct. Pavements, JSCE*, 2003, No. 739/V-60, 285~296.
- [58] Kitada T, Nakai H. Experimental study on ultimate strength of concrete-filled square steel short members subjected to compression or torsion. *Proceedings of the Inter. Confer. on Steel-Concrete Composite Structures*. Fukuoka, Japan, 1991. Sep. 137-142.
- [59] 陈逸玮. 钢管混凝土柱形状因素与扭转韧性行为研究. 台湾: 中央大学硕

- 士学位论文, 2003.
- [60] 徐春丽. 钢管混凝土柱抗剪承载力试验研究. 济南: 山东科技大学硕士学位论文, 2004.
- [61] 徐积善, 安宫. 钢管混凝土短柱在压扭复合受力下的实验研究. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991, 24(增刊): 34~41.
- [62] 宫安. 钢管混凝土短柱在压扭复合受力下的研究. 北京: 北京建筑工程学院硕士学位论文, 1989.
- [63] 周竞. 钢管混凝土中长柱在压扭复合受力下的实验研究. 北京: 北京建筑工程学院硕士学位论文, 1990.
- [64] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土弯扭构件的理论分析和试验研究. 工业建筑, 1994a, 24(2): 32~39.
- [65] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土压弯扭构件工作机理及性能研究. 建筑结构学报, 1995b, 6(4): 32~39.
- [66] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土压弯扭(剪)承载力相关关系及钢管混凝土统一设计理论构想. 工业建筑, 1995c, 25(1):14~21.
- [67] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土力学. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.
- [68] Ichinohe Y, Matsutani T, Nakajima M. Elasto-plastic behavior of concrete of concrete filled steel circular coumns. Proceedings of the Third International Conference on Steel-Concrete Composite Structures(1), ASCCS, Fukuoka, Japan, 1991. 131~136.

## 致 谢

2009年如同岁月之如梭，光阴之如箭，一转眼便来到了我的面前。面对2008年的世界金融危机带来的就业压力，回首三年的研究生学习生涯，想到刚刚入校时带着几分大学生的英气和研究生的光荣，有点飘飘然。到了即将毕业时的我，考虑到自己的何去何从心情多了几分沉重。无论前途如何，三年金城兰州的研究生学习生活给我带来的更多的还是快乐的时光，这里我使我了解了西北的人情风俗，结识了许多良师益友，良师益友给我留下了很多的美好回忆，使我在以后的人生道路上能走的更好，更远。

本文是在恩师王文达的悉心指导下完成的，从论文的选题，有限元的学习，模型构件的分析及论文的撰写直到定稿，都留下了恩师的滴滴汗水与心血，老师严谨的学风与治学态度也给学生留下了深刻的印象。在此学生仅代表个人，为恩师王文达对学生细心的教导表示由衷的感谢和敬意！

感谢土木学院全体老师对本人三年来的培养和教导，使本人可以顺利完成学业。

感谢2006级全体土木系研究生对本文撰写的支持，提别是秦庚师兄，文天鹏师兄对我的帮助和指导。

感谢2007级郭智峰师弟、夏秀丽师妹，张鹏鹏师弟，靳垚师弟对本文撰写的协助。

感谢父母对本人三年来研究生学习生活的支持。

感谢兰州理工大学博士基金(SB04200801)及甘肃省高等学校研究生导师科研项目(编号：0703B-05)对本人及本课题的资助。

陈宇超

2009年5月

## 附录A 攻读学位期间所发表的学术论文

- [1] 陈宇超, 王文达. 矩形钢管混凝土双向压弯构件力学性能初探. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(4):313-316.

### 在学期间参与的科研项目

- [1] 兰州理工大学博士基金(SB04200801): “常温及火灾后钢管混凝土柱-钢梁框架力学性能研究”, 2007-2010, 项目参与者。
- [2] 甘肃省高等学校研究生导师科研项目(编号: 0703B-05): “钢管混凝土柱-钢梁框架力学性能研究”, 2007-2009, 项目参与者。