

学校代号 10731

学 号 112081402007

分 类 号 TU398

密 级 公开



硕士学位论文

内配型钢的圆钢管混凝土 构件复合受力性能研究

学位申请人姓名 张海龙

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 2014年5月

学校代号：10731

学 号：112081402007

密 级：公开

兰州理工大学硕士学位论文

**内配型钢的圆钢管混凝土构件
复合受力性能研究**

学位申请人姓名：张 海 龙

导师姓名及职称：王文达 教授 史艳莉 副教授

培 养 单 位：兰州理工大学

专 业 名 称：结 构 工 程

论文提交日期：2014 年 5 月

论文答辩日期：2014 年 6 月 6 日

答辩委员会主席：黎海南 教授级高工

**Research on Behaviour of Concrete-Filled Circular Steel Tubes
with Inner Section Steel under Complicated Loading States**

By

ZHANG Hailong

B.E.(Lanzhou University of Technology) 2011

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 and Shi Yanli

May, 2014

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。

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 日

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 组合构件的特点及发展	1
1.1.1 型钢混凝土的特点及发展	1
1.1.2 钢管混凝土的特点及发展	1
1.1.3 内配型钢钢管混凝土的特点及发展	2
1.2 相关课题的研究现状	3
1.2.1 型钢混凝土构件的研究现状	3
1.2.2 钢管混凝土的研究现状.....	4
1.2.3 内配型钢钢管混凝土的研究现状	9
1.2.4 文献综述小结.....	11
1.3 课题研究方法与技术路线	11
1.4 课题研究的创新性及意义	12
1.5 本文主要研究内容	12
第 2 章 内配十字型钢圆钢管混凝土轴压构件的力学性能研究	14
2.1 引言	14
2.2 内配十字型钢圆钢管混凝土轴压构件的力学性能	14
2.2.1 材料的本构关系模型.....	14
2.2.2 有限元模型.....	16
2.2.3 模型验证.....	17
2.2.4 典型构件的荷载-变形关系曲线	24
2.2.5 荷载-应变分配曲线分析	27
2.2.6 参数分析.....	28
2.3 本章小结	30
第 3 章 内配十字型钢圆钢管混凝土受扭、受弯和受剪构件的力学性能研究	31
3.1 引言	31
3.2 内配十字型钢圆钢管混凝土受扭构件的力学性能	31
3.2.1 有限元模型.....	31
3.2.2 模型验证.....	32
3.2.3 构件的扭矩-转角关系曲线全过程分析	36
3.2.4 构件应力分析.....	37
3.2.5 承载力分配曲线.....	38

3.2.6 变形模式.....	38
3.2.7 参数分析.....	39
3.3 内配十字型钢圆钢管混凝土受弯构件的力学性能	41
3.3.1 有限元模型.....	41
3.3.2 模型验证.....	42
3.3.3 典型构件的挠度分布状况	45
3.3.4 弯矩-曲率关系曲线全过程分析	46
3.3.5 分部件承载力曲线.....	47
3.3.6 参数分析.....	47
3.4 内配十字型钢圆钢管混凝土受剪构件的力学性能	49
3.4.1 有限元模型.....	50
3.4.2 模型验证.....	50
3.4.3 纯剪、弯剪和弯曲的界限确定	52
3.4.4 典型构件的分部件承载力对比曲线.....	53
3.4.5 承载力分配曲线.....	53
3.4.6 参数分析.....	54
3.5 本章小结	55
第4章 内配十字型钢圆钢管混凝土偏压、压扭和弯扭构件的力学性能研究.....	56
4.1 引言	56
4.2 内配十字型钢圆钢管混凝土偏压构件的力学性能	56
4.2.1 有限元模型.....	56
4.2.2 模型验证.....	56
4.2.3 典型构件的荷载-变形关系曲线全过程分析	58
4.2.4 参数分析.....	59
4.3 内配十字型钢圆钢管混凝土压扭构件的力学性能	61
4.3.1 有限元模型.....	61
4.3.2 模型验证.....	61
4.3.3 典型构件的荷载-变形关系曲线分析和应力分布	64
4.3.4 典型构件的轴向荷载分配曲线	66
4.4 内配十字型钢圆钢管混凝土弯扭构件的力学性能	68
4.4.1 有限元模型.....	68
4.4.2 模型验证.....	68
4.4.3 典型构件的荷载-变形关系曲线分析和应力分布	70
4.5 本章小结	72

第 5 章 内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪和压弯扭剪构件的力学性能研究	73
5.1 引言	73
5.2 内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件的力学性能	73
5.2.1 有限元模型.....	73
5.2.2 典型构件的荷载-变形关系曲线全过程分析	73
5.2.3 构件受力性能分析.....	76
5.2.4 参数分析.....	77
5.3 内配十字型钢圆钢管混凝土压弯扭剪构件的力学性能	79
5.3.1 有限元模型.....	79
5.3.2 构件的力学性能研究.....	79
5.4 本章小结	82
第 6 章 结论与展望	83
参考文献	84
致谢	89
附录 A 攻读硕士学位期间取得的科研成果	90
附录 B 攻读硕士学位期间参与的科研项目	90

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
<http://www.cewangwd.com>

内配型钢的圆钢管混凝土构件复合受力性能研究

摘要

以往,国内外学者们对钢筋混凝土构件、型钢混凝土构件以及钢管混凝土构件的受力性能和工作机理研究的比较多,尤其是这些构件在简单受力状况下的性能研究相对比较成熟,而在复合受力状况下的研究则少一些。但随着科研的进一步深入和实际工程的需要,内配型钢的钢管混凝土构件作为一种新型组合构件,综合了型钢混凝土构件和钢管混凝土构件的优良性能,表现出较好的发展潜力,开始进入学者和工程师的视野。

本文采用有限元软件 ABAQUS 对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件的受力性能和工作机理进行了研究分析,主要研究内容如下:

(1) 本文通过选取合理的钢材和混凝土材料本构模型,并正确定义单元类型、边界条件等,建立了钢筋混凝土、型钢混凝土、钢管混凝土以及内配型钢钢管混凝土构件的数值模型并进行计算分析,计算结果曲线与试验结果曲线吻合较好,说明建模方法正确,可以应用到对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件受力性能的研究与分析中;

(2) 对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件在压、扭、弯、剪简单受力作用下的情况进行数值模拟,并分析了构件受力后的应力分布、承载力变化等力学性能,最后对影响构件承载力的相关参数(混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管含钢率、型钢含钢率等)进行了分析;

(3) 对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件在压、扭、弯、剪复合作用下的情况进行数值模拟,并对其受力后的荷载-变形关系曲线、荷载分配情况进行分析,最后还对构件在不同加载路径下的力学性能进行了深入的研究分析。

关键词: 型钢; 钢管混凝土; 有限元模型; 承载力; 参数分析

Research on Behaviour of Concrete-Filled Circular Steel Tubes with Inner Section Steel under Complicated Loading States

Abstract

In the past, much research has been done on reinforced concrete (RC), steel reinforced concrete (SRC) and concrete-filled steel tube (CFST) at home and abroad, especially, in the condition of the members under simply loading states. On the contrary, research of the members under complicated loading states was a little. But, with the deepening of research and the need of practical engineering, the CFST with inner section steel has achieved high performance and has been taken seriously, because of combining the advantages of SRC and CFST.

In this paper, the research on behaviour of concrete-filled circular steel tubes with inner section steel was carried out by the finite element software ABAQUS. And the main contents are as follows:

(1) Based on the reasonable constitutive models of steel and concrete, the element type and boundary conditions, the finite element (FE) models of RC, SRC, CFST and CFST with inner section steel have been established and analyzed. It is shown that the FE method can be used to study the behaviour of the CFST with inner section steel by the good agreements of the numerical computing results and the tested results.

(2) The numerical simulation of the CFST with inner section steel under compression, torsion, bending and shear conditions were carried out, in addition, the stress distribution and the bearing capacity conditions were studied, as well as the main influence parameters, such as strength of concrete, strength of steel tubes, strength of section steel, ratios of steel tubes, and ratios of section steel.

(3) The numerical simulation of the CFST with inner section steel under combined loading conditions was studied, as well as load versus deformation curves and load distribution conditions. Finally, the influences of loading paths on the members were researched.

Keywords: section steel; concrete-filled steel tube (CFST); finite element (FE) model; the bearing capacity; parameter analysis

第 1 章 绪论

1.1 组合构件的特点及发展

内配型钢的钢管混凝土组合构件是在型钢混凝土构件和钢管混凝土构件的基础上发展起来的，也是这两类组合构件的再次组合，集二者的优良性能于一体。因此，内配型钢的钢管混凝土构件具有较好的发展潜力与应用前景。

1.1.1 型钢混凝土的特点及发展

型钢混凝土构件是由内部的型钢、钢筋以及包裹型钢和钢筋的混凝土三种材料组成的能够协同工作的组合构件。型钢混凝土构件具有以下优点(范涛, 2004^[1]):

- (1) 型钢和钢筋的抗拉性能优良，混凝土的抗压性能较好，故在组合构件中，型钢、钢筋、混凝土能够充分发挥各自的性能，因此构件具有承载力高、截面小的特点；
- (2) 可以节约钢材，降低造价；
- (3) 钢材被混凝土包裹，可以避免钢材的腐蚀，故该组合构件具有较好的耐久性；
- (4) 由于外围混凝土的存在，能够有效避免型钢的局部屈曲，故延性好；
- (5) 施工快、工期短。

欧美国家对型钢混凝土结构的研究较早，而对这类组合梁的研究，始于加拿大，后来在英国、美国、日本、前苏联等国家也相继开始了研究。经过各国学者的大量研究分析，在理论、计算模型、设计方法等方面都取得了许多成果(王连广和刘之洋, 1995^[2])。

20 世纪 50 年代初，我国也开始了对型钢混凝土结构的研究分析，到了 80 年代，随着我国建筑行业的快速发展，型钢混凝土结构开始大量应用于大型建筑以及桥梁工程中，并取得了较好的效果。典型的实际工程有(范涛, 2004^[1]): 香港中国银行；北京长富宫饭店；北京香格里拉饭店；杭州市钱江四桥；万县长江大桥等。

1.1.2 钢管混凝土的特点及发展

钢管混凝土构件是指混凝土外包钢管而形成的结构构件。钢管混凝土结构之所以被实际工程广泛采用，是因为此类结构具有以下优点(韩林海, 2007^[3]):

- (1) 施工方便，工期短。由于钢管混凝土施工过程中没有支模、绑扎钢筋等工序，故施工方便，工期短；
- (2) 经济效果好。由于钢管混凝土结构中，钢管、混凝土两种材料能够充分发挥各自的优良性能，故具有较好的经济效果；
- (3) 耐腐蚀性能好。由于钢管混凝土中有填充物混凝土，故可减少钢材的外露面积，故具有较好的耐腐蚀性；

(4) 良好的塑性。混凝土是脆性材料，故将其放入钢管中可改善这一缺点；

(5) 节省材料。该组合结构与钢筋混凝土结构、钢结构相比，可大量节约混凝土、钢材材料；

(6) 承载力高。由于核心混凝土的存在，可以延缓或是避免钢管发生局部屈曲，而钢管的存在，又使得轴心受力下的混凝土处于三向受压状态，可延缓纵向开裂。两种材料的相互有利贡献，使构件具有较高的承载力。

随着结构的复杂化，钢管混凝土迎合了时代的要求，进入了研究人员和设计人员的视野。

钢管混凝土在国外的应用和研究较早，但早期的研究并不全面，1923 年日本关西大地震和 1995 年阪神地震后，人们发现了钢管混凝土结构的优越性，同时也促进了对这种结构的应用和研究。经过各国学者的大量研究，已取得许多成果(韩林海和杨有福，2007^[4])。

在我国，对钢管混凝土结构较早开展研究工作的有原中国科学院哈尔滨土建研究所等单位。后来，越来越多的单位和学者也开始了对钢管混凝土结构的研究与分析，到了 1978 年，这一结构在我国的发展进入了高潮，并取得了大量成果，同时，此类结构开始广泛应用到实际工程中，并取得了较好的经济效益和社会效益(韩林海和杨有福，2007^[4])。

我国对钢管混凝土的早期研究主要是关于内填普通混凝土的圆形构件。最近几年，随着经济技术的腾飞，内填高强混凝土的构件开始普遍应用于工程实践，而截面形式也由原来的圆形截面扩展到方形、矩形截面(周绪红和刘界鹏，2010^[5])。

采用钢管混凝土的典型房建工程实例如图 1-1(a~c)所示。

采用钢管混凝土的典型桥梁工程实例如图 1-2(d~f)所示。

1.1.3 内配型钢钢管混凝土的特点及发展

随着建筑物的现代化发展，型钢混凝土和钢管混凝土都暴露出了自身的不足。因为在高耸、大跨度的建筑物中，柱子将承受极大的轴力，而建筑物承重柱又是保证建筑物在大震下是否会正常工作的关键，这就要求在重载条件下，柱子既要有足够的强度又要有较好的延性(王清湘等，2003^[6])，在这种情况下，内配型钢的钢管混凝土又走入了人们的视野，在建筑行业迎来了一股研究热潮。

内配型钢钢管混凝土构件是指将型钢插入钢管中，然后将混凝土填满钢管而形成的一种新型组合构件。

内配型钢钢管混凝土组合构件是一种新模式下的重载构件，它很好的综合了型钢混凝土和钢管混凝土构件的优良特性，集二者的优点于一体。力学性能方面具体表现在：在型钢钢管混凝土中，钢管可以对混凝土施加一定的约束作用，故可提高混凝土的抗压性能；内配型钢的存在，延缓或是避免了混凝土剪切裂缝的发生，使组合构件的抗剪能



(a) 深圳赛格广场



(b) 台北 101 大楼



(c) 广州好世界广场

图 1-1 典型房建工程



(d) 广州丫髻沙大桥



(e) 浙江义乌宾王桥



(f) 巫山长江大桥

图 1-2 典型桥梁工程

力得以改善；混凝土的存在，可以较好的改善钢管和型钢发生局部屈曲(王连广等，2010^[7])。总之，在内配型钢的钢管混凝土构件中，钢管、混凝土和型钢这三部分的相互作用，使这类组合构件表现出较好的力学性能。

内配型钢的钢管混凝土构件还具有以下优点：施工方便、经济效果好、承载力高、塑性和韧性好、耐火性能较好等(韩林海，2007^[3])。

由于内配型钢的钢管混凝土具有以上诸多优点，在实际工程中具有较好的发展前景和潜力，目前与之相关的科学研究也较多。

1.2 相关课题的研究现状

为了更好的对内配型钢钢管混凝土构件在复合受力情况下的工作机理和力学性能进行研究，就必须全面了解国内外学者对型钢混凝土、钢管混凝土和内配型钢钢管混凝土构件的研究情况。下面对相关现状进行归纳总结(尧国皇，2006^[8])。

1.2.1 型钢混凝土构件的研究现状

Han 等(2004)^[9]对持续荷载作用下的型钢混凝土构件进行研究，并通过控制相关参

数进行对比分析，最后提出了承载力计算公式。

白国良和雷强(2007)^[10]对 3 根型钢混凝土构件的受扭情况进行试验，在合理选取单元类型、材料本构关系及边界条件的基础上，利用 ANSYS 有限元软件对其进行数值模拟，并分析了构件受力过程中裂缝、应力的发展及承载力状况。

郑山锁等(2007)^[11]对 8 根不同偏心率、长细比的型钢混凝土构件进行了偏心荷载作用试验，在此基础上，通过选取合适的材料模型和单元类型，利用有限元软件 ANSYS 建立数值模型，并将计算结果与试验结果进行了对比分析。

李红波等(2008)^[12]对 2 组型钢混凝土构件和钢筋混凝土构件进行试验研究，描述了构件的受力过程及破坏现象，并对构件开裂扭矩、极限扭矩进行分析推导，最后还对型钢混凝土及钢筋混凝土的扭转变形曲线进行了对比分析。

1.2.2 钢管混凝土的研究现状

1.2.2.1 简单受力构件研究现状

Kitada 和 Nakai(1991)^[13]采用试验方法对方形截面的钢管混凝土短柱构件在受压和受扭下的力学性能进行了研究分析。

韩林海和钟善桐(1995)^[14]详细介绍了研究钢管混凝土纯扭转性能的试验装置以及试验现象，据试验数据绘制了扭矩-总扭转角曲线，并将典型的扭矩-总扭转角全曲线与试验曲线进行了对比分析，还对抗扭承载力进行了研究，同时提出了抗扭承载力、屈服极限、比例极限和剪切模量的计算式。

韩林海(1997)^[15]对钢管高强混凝土构件在纯弯荷载作用下的荷载-变形关系进行了研究，并对弯矩-曲率曲线的三个阶段进行了分析，最后给出了此类构件的抗弯承载力和组合抗弯刚度计算公式。

韦灼彬等(1998)^[16]利用合理的基本假设，采用四分点加载方式对 8 个方钢管混凝土构件进行了纯弯的试验研究和理论分析。

陶忠(1998)^[17]对方形截面钢管混凝土构件进行了纯弯试验，并对其承载力等力学性能进行了深入的研究分析。

Roeder 等(1999)^[18]阐述了钢管混凝土构件在美国和日本的发展，分析了粘结应力以及钢管与混凝土之间接触面研究的重要性。并由试验证明，粘结应力的下降对构件或结构是很不利的，对粘结应力的影响因素有：混凝土特性、钢管直径以及钢管内表面的接触情况。

Han(2000)^[19]对 11 根钢管混凝土构件和 4 根空钢管构件进行了试验研究，对此类构件的相关力学性能进行了研究分析，并通过与试验数据相比较，发现采用 AIJ(2004)和 EC4(1994)所提供的承载力计算方法所得到的值较为保守，而 LRFD(1999)和 DL/T 5088(1999)所得到的承载力值与试验较接近，可用于长细比较大的钢管混凝土构件的承载力计算。

杨有福和韩林海(2001)^[20]对 8 个矩形钢管混凝土纯弯构件进行了试验研究,并用有限元软件对试验构件进行模拟分析,最后研究了 EC4、LRFD、AIJ、GJB 及数值方法在计算这类构件时的抗弯刚度和承载力方面的差别。

郭兰慧等(2002)^[21]采用合理的材料本构模型及合理的假设条件,对 2 根方形,4 根矩形钢管高强混凝土构件的受弯情况进行了试验分析;在此基础上,编制了非线性数值分析程序,并采用该程序研究了相关参数对这类构件的弯矩-曲率关系曲线的影响情况,最后对构件受弯得到的典型曲线进行了详细分析。

关萍等(2003)^[22]对 2 根内配型钢的钢管混凝土构件进行了纯弯试验研究,并对得到的弯矩-曲率曲线、荷载-位移曲线进行了分析。

陈宝春等(2003)^[23]对 18 根钢管混凝土构件在偏心荷载作用下的力学性能进行试验研究,可得结论:偏心率、含钢率、套箍系数以及混凝土强度对构件的受力性能均有不同程度的影响,特别是偏心率对构件的承载力影响较为显著,而对构件延性的影响较小。

Beck 和 Kiyomiya(2003)^[24]对 3 个圆形截面的钢管混凝土构件在扭矩作用下的情况进行了试验研究与分析。

卢辉和韩林海(2004)^[25]进行了 6 根圆钢管混凝土纯弯构件的试验研究,并对试件的破坏形态进行了分析,最后比较了不同规程在计算构件刚度上的差异。

Fam 等(2004)^[26]为了研究不同条件下钢管混凝土构件的承载力、延性等力学性能,分别对 5 根钢管混凝土短柱和 5 根钢管混凝土梁柱构件进行了试验研究,试验时在短柱构件上施加轴心荷载,在梁柱构件上施加轴心荷载和水平往复荷载,试验控制参数有钢管和核心混凝土之间是否有粘结力以及荷载施加在构件截面还是核心混凝土截面,最后对得到的荷载-变形曲线进行了深入的研究分析。

徐春丽(2004)^[27]对若干组钢管混凝土抗剪构件进行试验研究,还通过有限元软件对其进行数值模拟并和试验结果进行对比分析,最后推导了构件抗剪承载力计算公式。

王玉银和张素梅(2004)^[28]通过圆钢管混凝土和圆钢管高强混凝土短柱的对比试验,研究了圆钢管高强混凝土短柱的变形和破坏特征以及相关因素对其力学性能的影响,最后还依据试验数据,对比分析了已有承载力公式的精确性。

Fujimoto 等(2004)^[29]对 33 个圆钢管混凝土、32 个方钢管混凝土偏心受力构件进行了试验研究,分析了不同荷载作用时构件的受力情况,并将计算得到的弯矩-曲率关系曲线与试验曲线进行对比,研究了钢材和核心混凝土的应力-应变关系模型,还对构件的极限抗弯强度进行了分析。

Sakino 等(2004)^[30]对包括空钢管以及钢管混凝土在内的 114 个试件进行了试验研究,分析了钢管对混凝土的约束效用以及核心混凝土对钢管壁局部屈曲的抑制作用,并对空钢管试件、钢管混凝土试件的力学性能进行了分析,最后还对此类构件的承载力计算式进行了推导。

Zeghiche 和 Chaoui(2005)^[31]对 27 个钢管混凝土构件进行了试验研究,其中包括 15

个轴压构件、8个单向偏压构件和4个双向偏压构件，通过参数分析，研究了这类构件的力学性能。通过 EC4(1994)规范计算得到的这类构件在轴压、单向偏压状况下的承载力值与试验值以及数值计算值吻合较好，且偏于安全；而据此计算出的双向偏压构件的承载力与试验值及数值计算值相比，吻合不好且偏向不安全的一面。

丁发兴和余志武(2006)^[32]通过理论与数值分析，得到了钢管混凝土构件的组合抗弯刚度、极限抗弯承载力等计算式，并通过对3根自密实钢管混凝土和1根普通钢管混凝土受弯构件的试验，验证了所得计算式的正确性，并进一步研究了影响构件受弯力学性能的因素。

刘晓等(2007)^[33]通过对内配型钢的钢管高强混凝土构件在受弯情况下会出现的9种破坏方式进行了分析阐述，并对中和轴通过此构件截面腹板和不通过构件截面钢骨两种情况下的承载力公式进行了推导。

钱稼茹等(2007)^[34]对35根钢管混凝土受剪构件进行了试验，对试验过程及结果进行了详细说明和分析，并研究了不同参数对此类构件受力性能的影响情况，最后提出了受剪承载力公式。

王庆利等(2007)^[35]对4根圆形截面的钢管混凝土构件进行受弯试验研究，由研究可知，在一定的范围内，构件的荷载-跨中挠度曲线可分为弹性阶段、弹塑性阶段和增强阶段，另外还对构件的环向应变、纵向应变的特征进行了研究分析。

李黎明等(2007)^[36]通过选择合适的材料本构模型，采用有限条分法对矩形钢管混凝土纯弯构件进行了数值分析，并将通过数值分析得到的弯矩-曲率曲线以及构件的承载力与试验得到的相应曲线和承载力进行对比，最后提出了简化后的抗弯承载力公式。

尧国皇等(2007)^[37]通过有限元软件 ABAQUS，在纯弯构件和纯扭构件模型验证的基础上，对弯扭构件在不同加载路径下的力学性能进行深入分析，最后在参数分析的基础上，回归得到了构件弯扭承载力的简化计算式。

于清等(2008)^[38]对2个圆形、2个方形钢管约束混凝土进行了纯弯试验研究，并采用合理的材料本构关系模型，利用有限元软件 ABAQUS 建模分析，最后提出了纯弯构件的承载力计算公式。

Han 等(2008)^[39]对32根钢管混凝土构件的轴压情况进行了研究，其中28根构件为局部受压，通过控制构件截面形状、混凝土截面面积与受压面积比值以及端板厚度三参数，研究了不同参数下构件的力学性能及特性。

Yu 等(2008)^[40]对28个薄壁钢管高性能混凝土轴压、偏压构件进行试验研究，阐述了构件的制作及试验装置情况，并对构件的破坏模式进行了分析，最后将 AISC(807-2004)、EC4(1994)、DBJ(13-51-2003)规范所提供的承载力预测值与试验值进行了对比分析。

陈宝春和李晓辉(2008)^[41]对1个素混凝土构件、2个空钢管构件以及2个钢管混凝土构件进行了约束扭转试验，分析了试验中出现的现象，并以钢管壁厚为参数，分析了

空钢管、钢管混凝土构件的扭矩-最大剪应变的关系曲线和扭矩-转角关系曲线，最后定义了构件的抗扭承载力指标，还对构件的约束抗扭承载力进行了分析，发现构件的约束效应使其抗扭转的承载力得到了加强。

余志武和丁发兴(2008)^[42]进行了 8 根钢管自密实混凝土偏压柱的试验研究并分析了其破坏特征，采用模型柱法、有限元法计算并与试验比较，进而提出了偏压柱承载力计算公式。

丁发兴等(2009)^[43]通过对已有混凝土受力的应力应变关系进行修正，并通过有限元建模及分析，得到相关曲线与试验结果曲线吻合比较好，并在此基础上对不同类型构件的力学性能进行比较分析。

张旭和傅学怡(2009)^[44]通过选取合理的材料模型、正确模拟钢管与混凝土之间的界面接触，利用有限元方法建立了圆钢管混凝土受剪构件的数值模型，并验证了建模方法的正确性，在此基础上，分析了不同参数对构件力学性能的影响情况，最后提出了抗剪承载力的简化式。

王文达等(2010)^[45]通过 ABAQUS 软件对矩形钢管混凝土构件纯扭时的性能进行了分析，详细介绍了有限元模型的建立方法，并对模型的正确性及有效性进行了验证；还对影响构件受扭状态下 $T-\theta$ 关系曲线的相关因素进行了参数分析。最后，提出了构件的抗扭承载力公式。

史艳莉等(2010)^[46]通过选取合理的材料应力-应变关系模型，并在合理定义接触、边界条件等的基础上，采用有限元软件 ABAQUS 建立了圆、方形钢管混凝土受剪构件的模型并得以验证。在此基础上建立矩形钢管混凝土受剪模型，并通过参数分析，提出了抗剪承载力计算式。

李晓辉等(2010)^[47]采用 ANSYS 软件对圆钢管混凝土受扭构件进行有限元分析，介绍了有限元的建模过程，并分别选取三种不同的核心混凝土本构关系进行受扭模拟，最后确定了有限元计算抗扭极限承载力的方法，其计算值与试验值及其他学者提出的承载力公式计算值吻合较好。

Liang(2011)^[48]通过试验及数值模拟的方法对钢管高强混凝土长柱构件进行研究，分析了这类构件的力学性能，研究参数有：长细比、偏心率、混凝土抗压强度、钢材的屈服应力、含钢率以及混凝土的约束效应。

Portolés 等(2011)^[49]为了研究圆钢管高强混凝土构件在偏心荷载作用下的受力情况，对 37 根内填普通混凝土和高强混凝土的钢管混凝土构件进行了试验研究，试验中通过控制混凝土强度、宽厚比、偏心率和长细比，来研究相关参数对构件力学性能的影响状况，并对混凝土贡献率、强度指标以及延性情况进行研究，最后还将试验所得到的承载力与欧洲规范 4 的计算值进行了对比分析。

黄勇等(2011)^[50]通过两组无轴力作用的抗剪钢管混凝土短柱进行单调、循环加载试验，对构件受力性能进行分析，并采用有限元软件 ANSYS 对其进行数值模拟且与试验

对比, 模拟结果和试验结果吻合较好。

赵晓亮(2013)^[51]对 9 根钢管混凝土构件进行受压试验研究, 对其破坏形态和力学性能进行深入分析, 并对相关参数的影响进行了对比。进而采用有限元软件对典型构件进行数值模拟, 确定了中长柱关于承载力的折减系数, 最后还提出了偏压构件承载力计算公式。

王志滨等(2013)^[52]通过选取合理的本构关系模型及单元种类, 建立矩形钢管混凝土构件的受扭数值模型, 模型计算曲线与试验曲线吻合较好。在此基础上, 建立典型构件的数值模型并计算, 研究分析了构件的荷载分配情况、承载力等力学性能, 最后提出了构件抗扭承载力计算公式, 并得到已有试验数据的验证。

1.2.2.2 复合受力构件研究现状

徐积善和周竞(1991)^[53]对钢管混凝土压扭构件进行了研究分析。

韩林海和钟善桐(1993)^[54]通过选取合理的钢材和混凝土本构关系模型, 采用有限元软件对钢管混凝土纯扭构件以及压扭构件进行了数值模拟分析, 模拟结果得到了已有试验结果的验证。

韩林海和钟善桐(1994)^[55]对钢管混凝土弯扭构件进行理论分析, 并对 12 根弯扭构件进行试验研究, 最后推导了承载力相关方程。

韩林海和钟善桐(1995)^[56]通过选取四种不同的加载路径, 对钢管混凝土构件受压弯扭复合受力情况进行了研究分析, 得到结论: 不同加载路径对压弯扭复合受力构件的 $N/N_u-M/M_u-T/T_u$ 相关曲线的形状影响很小, 而长细比较大时, 对其影响略大; 作者还对 12 个构件进行了压弯扭试验, 并将试验结果与理论结果对比, 吻合较好。

尧国皇和韩林海(2004)^[57]对 22 个圆形截面、16 个方形截面钢管自密实高性能混凝土构件进行了试验研究, 试验分为轴压和压弯两类, 作者研究了这两类构件的破坏形态, 提取并分析了相关的荷载-变形曲线, 最后将构件在压弯时的承载力实测值与各规程计算结果进行对比分析, 结果吻合良好。

田华等(2007)^[58]对矩形钢管高强混凝土构件受双向压弯时的截面强度进行了研究, 详细阐述了材料的加卸载规则, 并分析了构件在不同的加载路径下, 不同参数对截面 $M-\varphi$ 全曲线、 $N_u/N_0-M_u/M_0$ 相关曲线的影响程度, 最后提出了这类构件的截面强度承载力计算式。

袁伟斌和金伟良(2008)^[59]对 11 个离心钢管混凝土弯扭构件进行试验研究, 并建立有限元模型对构件全过程进行分析, 最后提出承载力相关方程。

陈宇超和王文达(2008)^[60]通过 ABAQUS 软件对矩形钢管混凝土双向压弯构件建模并进行数值模拟, 得到了良好效果。在此基础上, 又分析了相关参数对构件力学性能的影响状况。

陈宣言等(2012)^[61]采用有限元软件 ABAQUS, 对圆形截面的钢管混凝土弯扭构件进行数值模拟, 在模型验证的基础上, 研究了构件在不同加载路径作用下的力学性能, 并

通过参数分析，推导了承载力相关方程。

1.2.3 内配型钢钢管混凝土的研究现状

1.2.3.1 简单受力构件研究现状

王清湘等(2002)^[62]通过对 13 根内配型钢钢管混凝土组合柱进行轴心受压试验，分析了套箍指标、配骨指标和长细比对组合柱的不同影响，最后提出了承载力计算公式。

赵大洲(2003)^[63]对 6 根长细比各不相同的型钢-圆钢管高强混凝土组合柱进行了轴压试验研究，并详细讲述了试验的设计方案、试件的破坏过程、变形特征以及其力学性能，并将千分之一的柱长作为这类构件的初始挠度，利用有限元进行了相应的数值建模及分析。并在此基础上进行公式推导，提出了这类长柱的轴压承载力公式。

Wang 等(2004)^[64]阐述了内配型钢的钢管混凝土构件具有型钢混凝土和钢管混凝土各自的优点，并对 15 根内配型钢的钢管混凝土构件以及 1 根钢管混凝土构件受轴压的情况进行了试验研究，详细讲述了试验装置以及试验过程的设置，并通过控制参数(混凝土强度、套箍指标、配骨指标和长径比)，分析了型钢钢管混凝土构件的相关力学性能，最后提供了这类构件的极限承载力计算公式。

张素梅(2004)^[65]通过控制不同的偏心率、含钢率和长细比，对 8 根方钢管混凝土构件进行了单向压弯试验，并对试验现象及得到的相关曲线进行分析，最后又对偏压构件进行了理论计算和参数分析。

朱美春(2005)^[66]对 8 个内配型钢-方钢管自密实高强混凝土长柱的轴压力学性能进行了研究分析，该试验将试件分为 2 组，各组试件分别配装十字形型钢和工字形型钢，且所有试件都设定长细比为唯一参数，并介绍了试验的装置设置、试件破坏形态，同时分析了力学性能特征，最后提出了这类轴压长柱构件的承载力实用计算公式。

朱美春等(2006)^[67]通过对 8 个型钢-方钢管高强混凝土轴心受压长柱试件进行试验研究，对比分析了不同长细比所对应试件在试验中的不同破坏形态，荷载与应变、挠度关系曲线的不同特点，进而分析了长细比对这类轴压长柱构件的影响状况，最后推导出了这类组合柱轴压稳定承载力公式。

赵根田等(2006)^[68]通过采用合理的假定及材料本构模型，同时借助相关的试验数据，利用数值编程的方法获得了偏压长柱的荷载-挠度关系曲线并进行了分析。

尧国皇等(2007)^[69]通过算例分析，在已有的混凝土本构关系模型的基础上进行修正并提出了型钢-钢管混凝土中核心混凝土的本构关系模型，同时利用 ABAQUS 软件对型钢-圆、方钢管混凝土轴压短柱、长柱试件进行建模并分析，并在此基础上提出了构件轴压强度承载力和轴压稳定承载力的实用计算公式。

徐亚丰等(2007)^[70]采用有限元方法模拟了内配型钢的钢管混凝土短柱试验，描述了构件的破坏形态，并由模拟曲线与试验对比之后得到如下结论：1) 柱的模拟刚度比试验刚度大；2) 含钢率的提高，很好地改善了柱的承载力和延性。

赵同峰等(2008)^[71]阐述了方钢管-钢骨高强混凝土具有的优势,进而修正了方钢管-钢骨内核心混凝土及钢材的应力应变关系,进而建立模型并计算,计算结果与试验吻合较好,并在此基础上提出了轴心受压短柱的承载力计算公式。

赵同峰等(2008)^[72]推导出了偏心受压中长柱的承载力计算公式,且进行了算例分析,同时还研究了长细比、偏心率、套箍率和配箍率对承载力的不同影响程度。

王兵等(2009)^[73]推导出了组合柱受压区高度、偏心距增大系数及内配型钢的钢管混凝土大偏心受压组合柱的承载力计算公式,并分析长细比和用钢量对承载力的影响。

刘强和陈素容(2009)^[74]通过对9根内配型钢的钢管混凝土短柱及1根钢管混凝土短柱进行了轴压对比试验,研究并分析了混凝土的强度、配骨指标和套箍指标三参数对组合柱的承载力和延性的影响程度,并提出了两种内配型钢的钢管混凝土组合轴压短柱承载力计算公式。

何益斌等(2009)^[75]基于组合切线模量和叠加切线模量,分别推导出钢骨-圆钢管混凝土轴压中长柱的稳定承载力理论计算式及极限承载力简化计算式,并考虑 $l_0/1000$ 初偏心,对长柱进行全过程数值分析,得到了与试验吻合较好的结果。

肖阿林(2009)^[76]对20根内配型钢的钢管高性能混凝土构件进行轴压试验研究,试验中控制短柱试件长径比为4,长柱试件长径比范围取8~12,作者详细介绍了试验的设计方法及短、长柱的破坏情况以及对试验得到的相关数据进行分析,并通过数值模拟方法,得到了极限承载力的近似计算公式。

王金鑫(2009)^[77]对6根内配十字形型钢的方钢管混凝土偏心受压短构件进行了试验研究,试验构件偏心距均为25mm,混凝土和钢材材性由试验测得,作者分析了这类构件的破坏形态,受力特征。

王连广等(2009)^[78]通过对9根内配工字形型钢的方钢管混凝土双向偏压构件进行试验,分析了构件受力变形情况以及相关参数对构件极限承载力的影响状况,并通过编制构件双偏压程序SPYZTF,获得了荷载-跨中挠度曲线,最后得到了实用的承载力计算公式。

杨山波(2009)^[79]对8根内配型钢的钢管混凝土构件以及1根钢管混凝土构件进行了偏心试验,并对试验现象和结果进行了分析,最后通过选取合理的材料本构模型,采用数值模拟的方法对构件进行了进一步的研究。

何益斌等(2010)^[80]对9根内配型钢的钢管自密实高强混凝土短柱进行了轴压试验,研究了构件的变形、破坏过程及特征,分析了套箍系数、配骨指标、混凝土强度对其力学性能的影响状况,最后提出了承载力计算公式。

王连广等(2010)^[81]对10个内配工字形型钢的方钢管高强混凝土单向偏压柱进行了试验,介绍了试验的设计、加载、收集数据等操作,还对试验现象进行了描述,并分析了偏心率、配骨指标、长细比、加载方向分别变化时对荷载-挠度曲线、承载力的影响状况,最后得到了偏压柱的承载力计算公式。

王金鑫等(2011)^[82]通过对 6 根内配型钢的方钢管混凝土短柱进行偏压试验研究,阐述了试件的变形、破坏过程及特征,分析了混凝土的强度、钢管宽厚比以及配骨率对试件力学性能的影响。最后提出方钢管和钢骨的变形是协调的,且组合柱符合平截面假定。

刘忠等(2012)^[83]采用有限元软件,对内配型钢的钢管混凝土偏压构件进行数值研究,在此基础上,分析了相关因素对这类构件力学性能的影响状况。

杨旭和徐亚丰(2012)^[84]通过确定合理的材料本构关系模型,对 4 个剪跨比小于等于 2 的受剪短柱进行有限元建模,并对模拟结果进行研究,分析了不同剪跨比对构件受力性能的影响状况。

1.2.3.2 复合受力构件研究现状

关萍等(2003)^[85]对 2 根内配型钢钢管混凝土组合柱进行单调压弯试验研究,并分析了柱的破坏特征,以及内配型钢的截面积和惯性矩对组合柱承载力和延性的影响状况。

1.2.4 文献综述小结

目前国内外研究者对型钢混凝土构件和钢管混凝土构件的研究比较成熟,包括试验研究、解析研究和数值研究,而对于内配型钢的钢管混凝土构件的研究,由于试验的成本较高,再加上是一种新型承重构件,无论是试验、解析还是数值研究都较少,而且已有的科研基本上都局限于对构件简单受力情况的研究,所以通过有限元法(数值研究方法的一种)来研究内配型钢的钢管混凝土复合受力性能具有重大意义。

1.3 课题研究方法与技术路线

本文搜集了钢筋混凝土、型钢混凝土、钢管混凝土和内配型钢的钢管混凝土构件的压、扭、弯、剪等简单受力以及钢管混凝土构件复合受力的相关试验构件数据,并采用

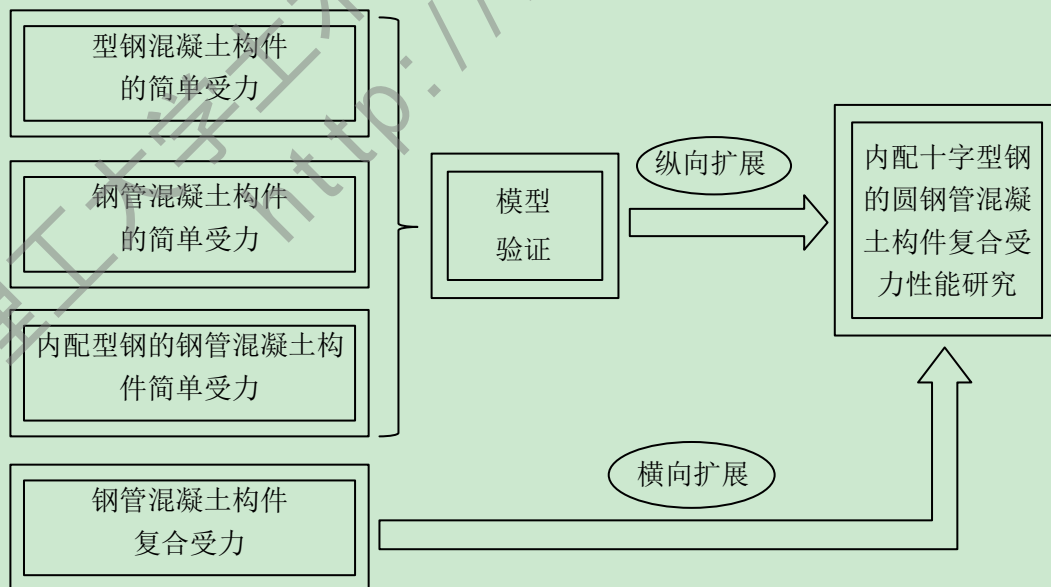


图 1-3 研究方法与技术路线示意图

有限元软件对其进行数值模拟,在有限元模型得以验证的基础上,利用该模拟方法对内配十字型钢的圆钢管混凝土复合受力构件进行数值模拟研究,并通过合理选取参数,对可能影响构件在复合受力作用下工作机理和力学性能的因素进行分析。本文具体的研究方法与技术路线如图 1-3 所示,研究成果可为实际工程提供一定的参考依据。

本课题的研究采用 ABAQUS 有限元分析软件,核心混凝土本构关系模型采用塑性损伤模型,韩林海提出了考虑约束效应系数影响的,适用于被动约束状态下的钢管混凝土的应力-应变关系模型^[3];钢材本构关系模型选用二次塑流模型(有明显屈服平台的二次塑流模型);并选用合理的单元创建部件。图 1-4 为内配十字型钢的圆钢管混凝土构件有限元模型的横截面网格示意图。

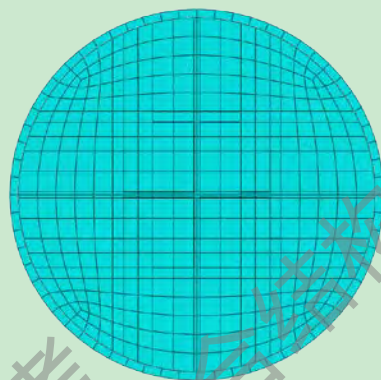


图 1-4 有限元模型的横截面网格示意图

1.4 课题研究的创新性及意义

内配十字型钢的圆钢管混凝土构件作为一种新型的承重构件,是型钢混凝土构件和钢管混凝土构件的完美结合,它不但克服了型钢混凝土和钢管混凝土各自的不足,而且能够集二者的优点于一体,故这种构件具有较好的发展空间,目前这类构件已经引起了国内外学者的广泛关注,相信随着研究的深入与成熟,这种新型组合构件将会大量应用于实际工程,并给社会带来更好的经济效益。但目前关于这类构件的研究比较少,尤其对构件复合受力的研究极少,与之相关的力学性能及工作机理尚不是很清楚,本课题拟通过有限元方法在其他学者所研究的基础上,对组合构件的受力情况尤其是复合受力情况,进行深入的研究分析,了解构件受力后的工作机理,可为实际工程提供一定的参考依据。综上分析,本课题的研究是一个较新的研究领域,且具有重要的研究意义。

1.5 本文主要研究内容

本文在以往学者所研究的钢筋混凝土、型钢混凝土、钢管混凝土以及内配型钢的钢管混凝土构件的基础上,采用有限元分析方法对内配十字型钢的圆钢管混凝土简单受力、复合受力下的力学性能进行了深入的研究分析。本文的主要研究内容如下:

(1) 对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件的数值建模进行了阐述,包括钢材、混凝土的本构模型、选用的单元类型以及不同材料之间的接触定义等,并建立构件数值模型,得到已有试验的验证;

(2) 对这类组合构件在简单受力(压、扭、弯、剪)下的变形情况、承载力等力学性能进行了研究分析,不仅可以为实际工程及科研提供参考依据,还有助于研究构件在复合受力作用下的力学性能;

(3) 对这类组合构件在压、扭、弯、剪的复合受力作用下的力学性能进行了研究，可为实际工程和科研提供一定的参考依据。

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
<http://www.cewangwd.com>

第2章 内配十字型钢圆钢管混凝土轴压构件的力学性能研究

2.1 引言

在实际工程中,构件最普遍的受荷方式便是承受轴向荷载,因此本章采用数值模拟的方法对内配十字型钢的圆钢管混凝土轴压构件进行研究分析。首先利用有限元软件 ABAQUS 对钢筋混凝土构件、型钢混凝土构件、钢管混凝土构件以及内配型钢的钢管混凝土构件进行建模并验证模型的正确性,在此基础上对内配十字型钢的圆钢管混凝土轴压构件进行研究,并通过参数分析,明确各参数对组合构件受力性能的影响。

2.2 内配十字型钢圆钢管混凝土轴压构件的力学性能

本节对内配十字型钢圆钢管混凝土轴压构件的有限元建模过程以及其力学性能进行研究分析。

2.2.1 材料的本构关系模型

本文有限元建模采用三种材料模型,下面对各材料模型进行详细介绍。

(1) 钢材材料模型

本文中的钢管和型钢均采用钢材材料模型,该材料模型被定义为弹塑性模型,由于低碳软钢和高强钢材的本构关系曲线不同,故分别简化为五段式二次塑流模型和双折线模型^[8],如图 2-1 所示。

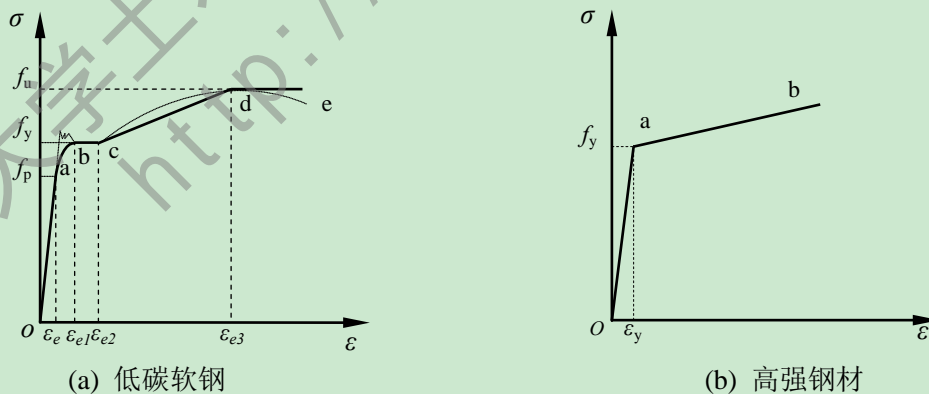


图 2-1 钢材的本构关系曲线

图 2-1(a)中,虚线代表钢材的实际应力-应变关系曲线,实线为简化后的钢材应力-应变关系曲线, o、a、b、c、d、e 把曲线分为五段,故称此曲线为五段式二次塑流模型;图 2-1(b)为双折线模型, o、a、b 把曲线分为两段,即弹性段和强化段,强化段模量值

取 $0.01E_s$ 。

上图中, f_p ---钢材的比例极限;

f_y ---钢材的屈服极限;

f_u ---钢材的抗拉强度极限。

本文中的钢材均为低碳软钢,故采用二次塑流模型,二次塑流模型具体表达式如下:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_e \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} \\ f_y \left[1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right] & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中, $\varepsilon_e = 0.8f_y/E_s$, $\varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e$, $\varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}$, $\varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1}$, $A = 0.2f_y/(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2$

$B = 2A\varepsilon_{e1}$, $C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e$

(2) 混凝土材料模型

本文中的混凝土采用塑性损伤模型。

1) 韩林海(2007)^[3]提出了适用于钢管混凝土的应力-应变关系模型,表达式如下:

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

式中

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

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

$$\sigma_0 = f'_c \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800 \cdot \zeta^{0.2} \times 10^{-6}$$

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

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

$$\beta_0 = \begin{cases} \left[(2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\zeta - 0.5)^2} \right] \cdot (f'_c)^{0.5} \cdot 0.5 \geq 0.12 & \text{(圆形钢管混凝土)} \\ \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2\sqrt{1 + \zeta}} & \text{(方、矩形钢管混凝土)} \end{cases}$$

上式中,混凝土圆柱体抗压强度(f'_c)以 N/mm^2 计。

混凝土弹性模量的计算式取为 $E_c = 4700(f'_c)^{0.5}$ (MPa),泊松比取值为 0.2。

2) 当构件受拉时,需定义混凝土的受拉软化性能。本文运用有限元软件 ABAQUS 模拟时,采用混凝土破坏能量准则来考虑混凝土的受拉软化性能^[8]。混凝土受拉软化模型如图 2-2 所示,图中, σ_{t0} 为破坏应力, G_f 为混凝土的断裂能。

其中，C20 混凝土对应的 G_f 为 40N/m，C40 混凝土对应的 G_f 为 120N/m，中间插值计算^[3]。 σ_{t0} 由下式计算得到(沈聚敏等，1993^[86]):

$$\sigma_{t0}=0.26 \times (1.25 f'_c)^{2/3}$$

(3) 刚度大的弹性材料

数值模拟时，加载板采用刚度很大的弹性材料，弹性模量定义为 10^{12} MPa，泊松比定义为 0.0001。

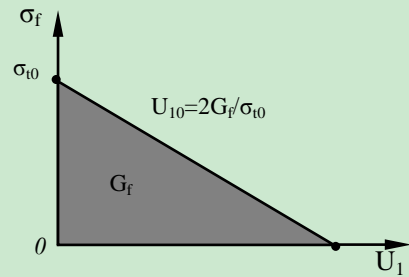


图 2-2 混凝土受拉软化模型

2.2.2 有限元模型

(1) 模型单元的选取

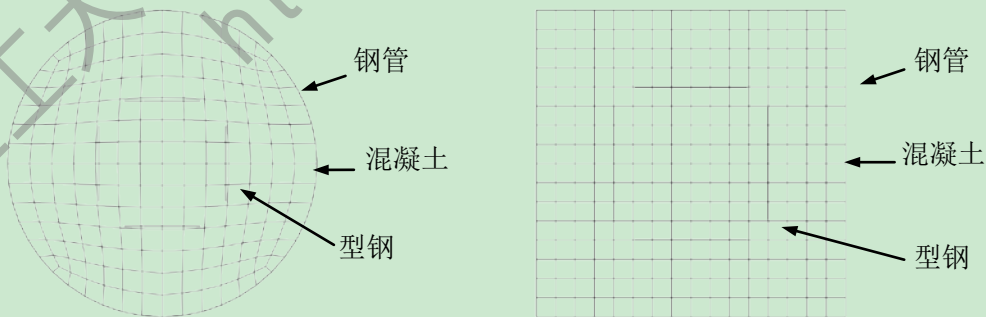
本文利用有限元软件 ABAQUS 建模时，采用两种模型单元，即实体单元和壳体单元。实体单元采用八节点缩减积分格式的三维实体单元，即 C3D8R 单元，这种单元虽精度稍低但省时，具有较好的经济性^[8]。壳体单元采用四节点缩减积分格式的壳单元，即 S4R 单元^[8]。文中构件模拟时，混凝土柱和加载板采用实体单元创建，钢管和型钢采用壳体单元创建。

(2) 模型接触的定义

定义模型接触时，钢管和型钢与加载板之间的接触类型定义为 Shell-to-solid coupling；型钢与混凝土之间的接触类型定义为 Embedded region；混凝土与加载板之间的接触类型定义为 Tie；核心混凝土与钢管之间的接触采用 Surface-to-Surface，界面法线方向(Normal Behavior)的接触采用硬接触(Hard Contact)，在模拟界面切向力(Tangential Behavior)的传递时采用库仑摩擦模型。

(3) 模型网格划分

在有限元数值模拟中，模型的网格划分显得尤为重要。如果网格划分过于细密，则精度提高不多，但浪费大量时间；反之，如果模型的网格划分过于稀疏，则会出现计算精度较差，甚至导致模型分析出错，故模型网格的划分要合适。图 2-3 所示为模型截面网格划分示意图。



(a) 内配型钢的圆钢管混凝土

(b) 内配型钢的方钢管混凝土

图 2-3 模型截面网格划分示意图

(4) 边界条件的确定

所建数值模型采用位移加载，约束构件两端加载板。底端加载板控制 U_1 、 U_2 、 U_3 方向位移，顶端加载板控制 U_1 、 U_2 方向位移， U_3 方向施加位移加载量。轴压长柱模拟时还需考虑 $L/1000$ 的初始偏心距。图 2-4 为短柱模型边界条件示意图。

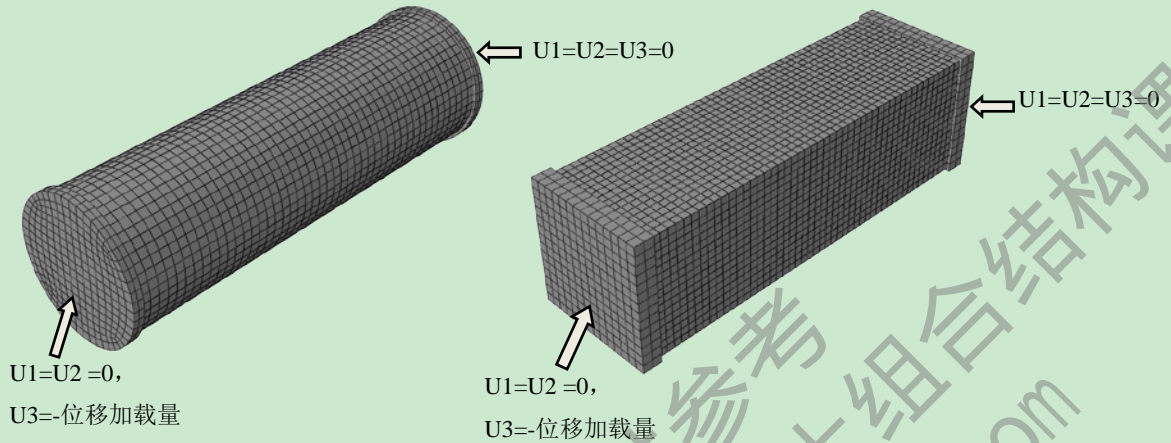


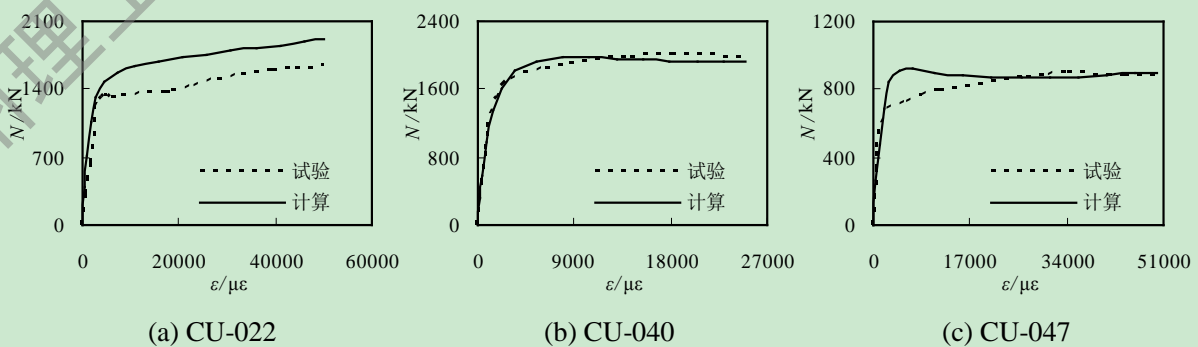
图 2-4 短柱有限元模型边界条件示意图

2.2.3 模型验证

查阅资料可知，刘威(2005)^[87]、尧国皇(2006)^[81]、肖阿林(2009)^[76]、赵大洲(2003)^[63]、尧国皇(2007)^[69]、肖阿林(2009)^[76]、朱美春(2006)^[67]对 12 个圆形截面、12 个方形截面的钢管混凝土轴压构件，40 个内配型钢的钢管混凝土构件进行了研究分析。为验证有限元轴压模型的正确性与合理性，本节采用数值方法对前面学者的试验构件进行模拟计算，图 2-5~图 2-10 所示为试验结果曲线和有限元结果曲线的对比图，表 2-1~表 2-3 为相关轴压构件的参数一览表。

(1) 钢管混凝土轴压构件

图 2-5、图 2-6 分别为圆、方钢管混凝土轴压短柱构件的荷载-纵向应变曲线对比图，图中虚线为国内外已有试验结果曲线，实线为采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟计算得到的结果曲线。由图中的对比曲线可知，有限元模拟结果与试验结果吻合比较好，证明数值模拟方法正确。表 2-1 为钢管混凝土轴压构件参数一览表。



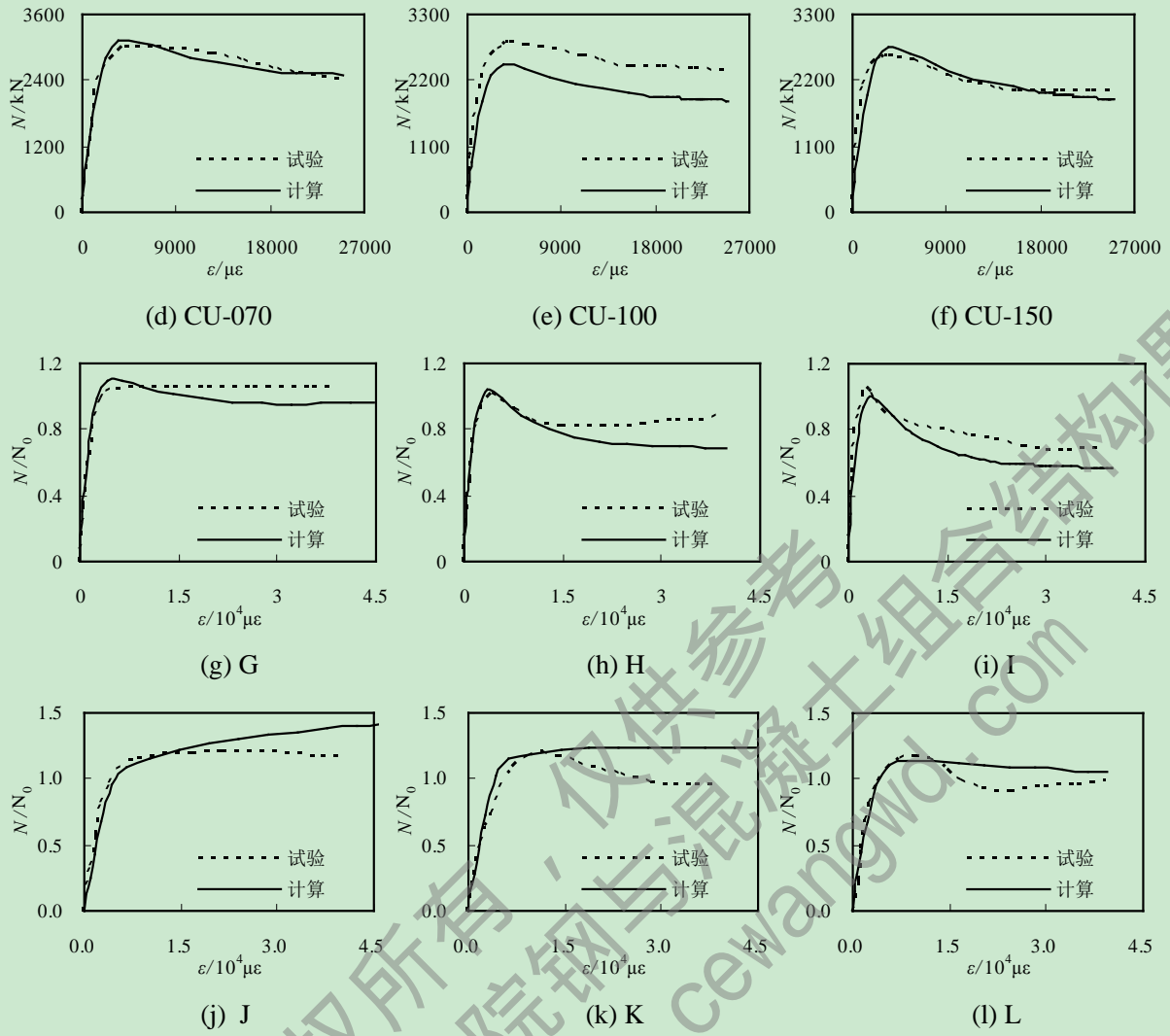
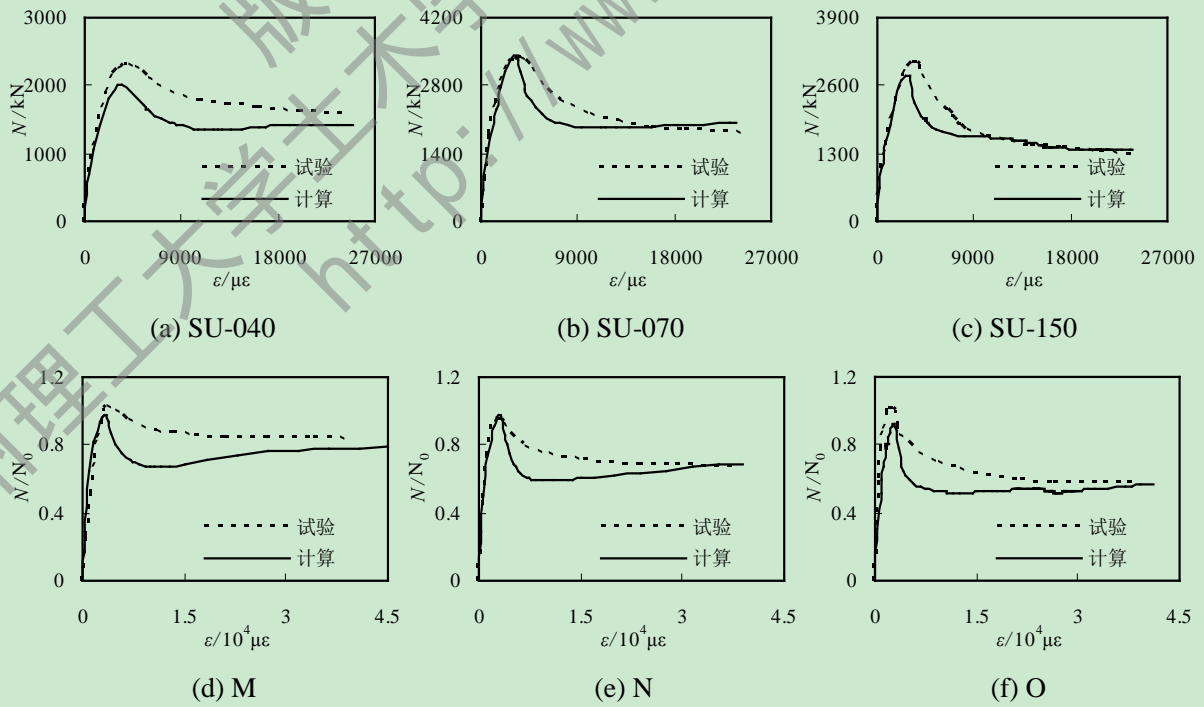


图 2-5 圆钢管混凝土



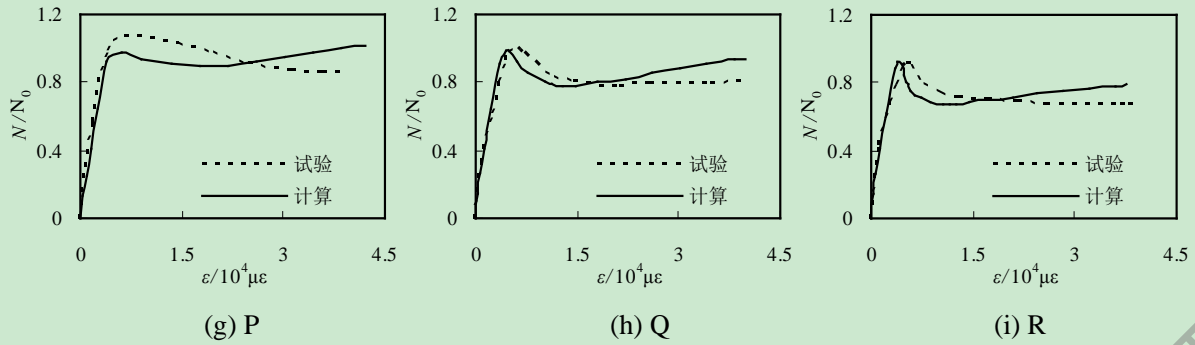


图 2-6 方钢管混凝土

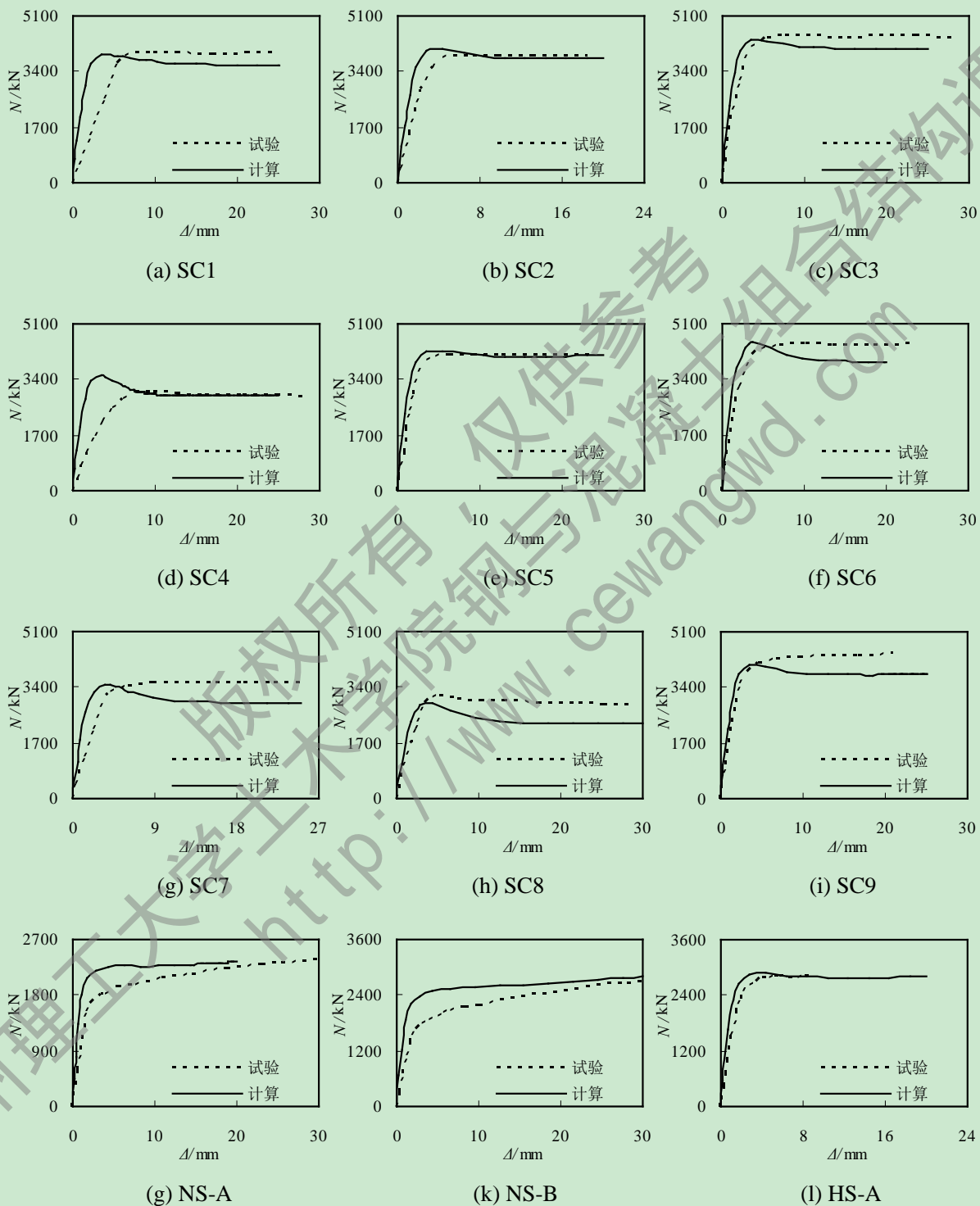
表 2-1 钢管混凝土轴压构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	$f_c (f_{cu})$ (MPa)	数据来源
圆形	CU-022	140×6.5×602	313.0	23.80	刘威 (2005) ^[87]
	CU-040	200×5.0×840	265.8	27.15	
	CU-047	140×3.0×602	285.0	28.18	
	CU-070	280×4.0×840	272.6	31.15	
	CU-100	300×3.0×900	232.0	22.44	
	CU-150	300×2.0×840	341.7	27.23	
	G	149×2.96×447	308	(47)	尧国皇 (2006) ^[81]
	H	300×2.96×900	279	(43.8)	
	I	450×2.96×1350	279	(41.8)	
	J	108×6.47×324	853	(87)	
	K	222×6.47×666	843	(80.9)	
	L	337×6.47×1011	823	(84)	
方形	SU-017	127×7.47×609.6	347.0	23.80	刘威 (2005) ^[87]
	SU-022	127×5.67×609.6	312.0	23.80	
	SU-029	127×4.34×609.6	357.0	26.00	
	SU-040	200×5.0×840	265.8	27.15	
	SU-070	280×4.0×840	272.6	31.15	
	SU-150	300×2.0×840	341.7	27.27	
	M	148×4.38×444	262	(46.8)	尧国皇 (2006) ^[81]
	N	215×4.38×645	262	(45.5)	
	O	323×4.38×969	262	(42.3)	
	P	119×6.47×357	835	(84.7)	
Q	175×6.47×525	835	(84.7)		
R	265×6.47×795	835	(80.7)		

(2) 内配型钢的钢管混凝土轴压构件

1) 轴压短柱构件

图 2-7、图 2-8 分别为内配型钢的圆、方钢管混凝土轴压短柱构件的荷载与纵向位移($N-\Delta$)曲线对比图, 表 2-2 为轴压短柱构件参数一览表。由图中的对比曲线可知, 有限元模拟结果与试验结果吻合比较好, 故建模方法合理。



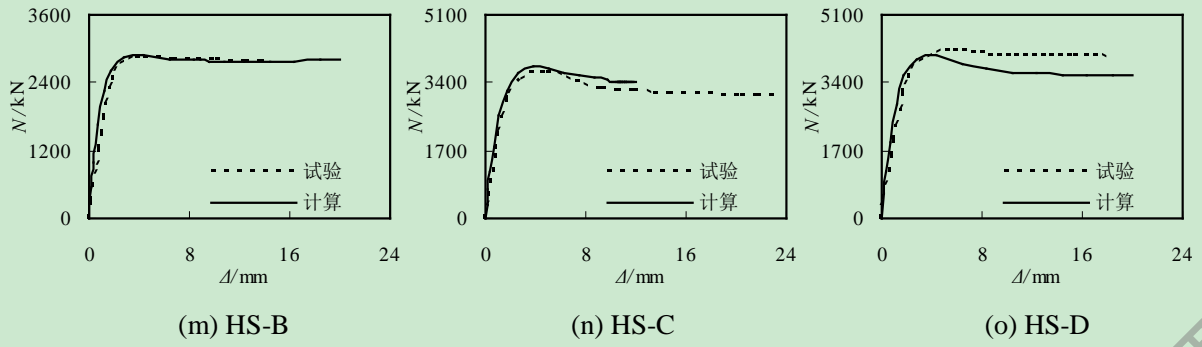


图 2-7 内配型钢的圆钢管混凝土短柱构件

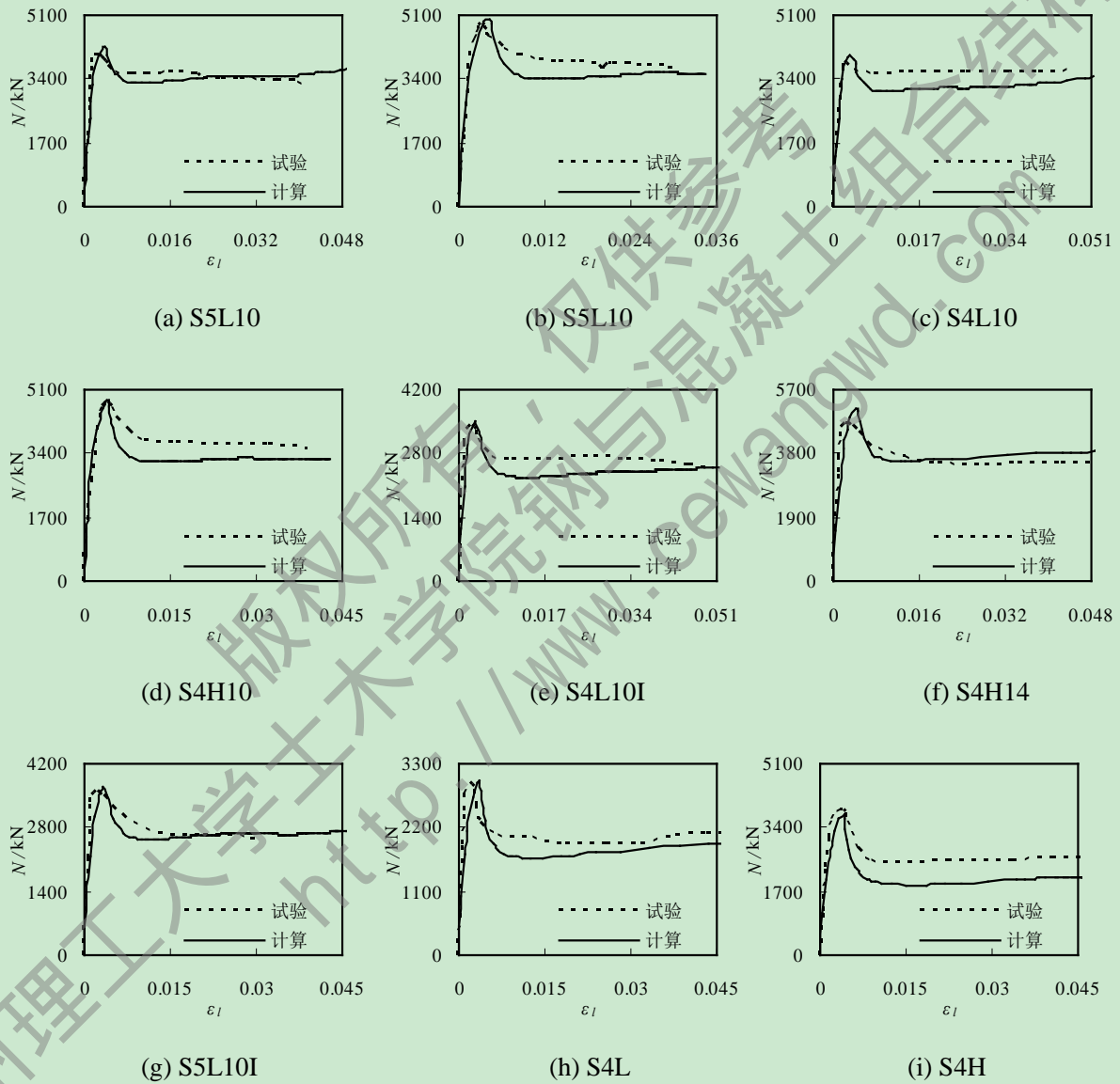


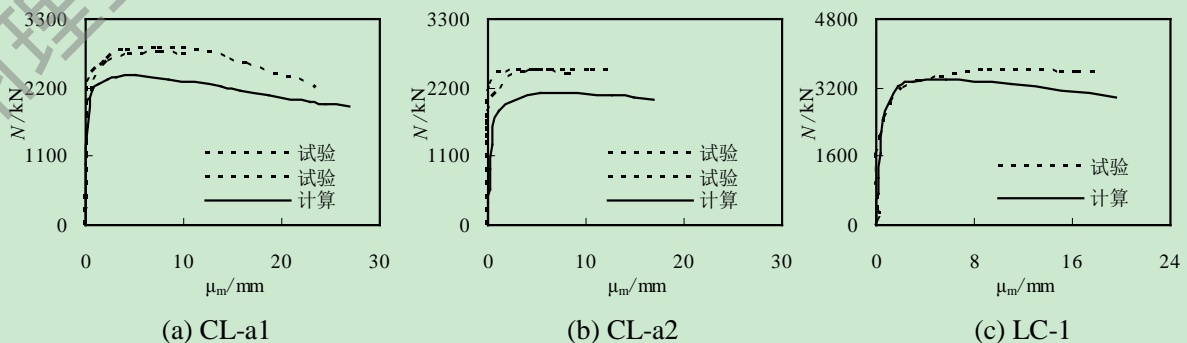
图 2-8 内配型钢的方钢管混凝土短柱构件

表 2-2 内配型钢的钢管混凝土轴压短柱构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times t \times L$ mm	f_{ty} MPa	f_{sy} MPa	f_c MPa	型钢类型 十字形	数据来源
圆形	SC1	219×4.0×876	337	318	43.6	I10	肖阿林 (2009) ^[76]
	SC2	219×4.0×876	337	303	43.6	I12	
	SC3	219×4.0×876	337	308	43.6	I14	
	SC4	219×2.1×876	308	303	43.6	I12	
	SC5	219×5.6×876	289	303	43.6	I12	
	SC6	219×4.0×876	337	303	53.1	I12	
	SC7	219×4.0×876	337	303	43.6	I12 (工)	
	SC8	219×4.0×876	337	/	43.6	/	
	SC9	219×4.0×876	337	303	43.6	I12	
	NS-A	166×2.7×655	318	288	29.6	10	赵大洲 (2003) ^[63]
	NS-B	168×3.7×666	318	288	29.6	I10	
	HS-A	166×2.7×655	318	288	47.9	I10	
	HS-B	168×3.7×666	318	288	47.9	I10	
	HS-C	216×3.0×860	269	288	47.9	I10	
HS-D	216×3.0×860	269	314	47.9	I12		
方形	S5L10	192.5×5.5×585	288	338	48.4	I10	朱美春 (2005) ^[66]
	S5H10	192.5×5.5×585	288	338	70.8	I10	
	S4L10	193.5×4.5×585	289	338	48.4	I10	
	S4H10	193.5×4.5×585	289	338	70.8	I10	
	S4L10I	193.5×4.5×585	289	338	48.4	I10	
	S4H14	193.5×4.5×585	289	327	70.8	I14	
	S5L10I	192.5×5.5×585	288	338	48.4	I10 (工)	
	S4L	193.5×4.5×585	289	/	48.4	/	
	S4H	193.5×4.5×585	289	/	70.8	/	

2) 轴压长柱构件

图 2-9、图 2-10 分别为内配型钢的圆、方钢管混凝土轴压长柱构件的荷载与挠度曲线对比图，表 2-3 为轴压长柱构件参数一览表。由图中的对比曲线可知，除个别构件之外，有限元模拟结果曲线与试验结果曲线吻合良好，说明有限元建模方法合理。



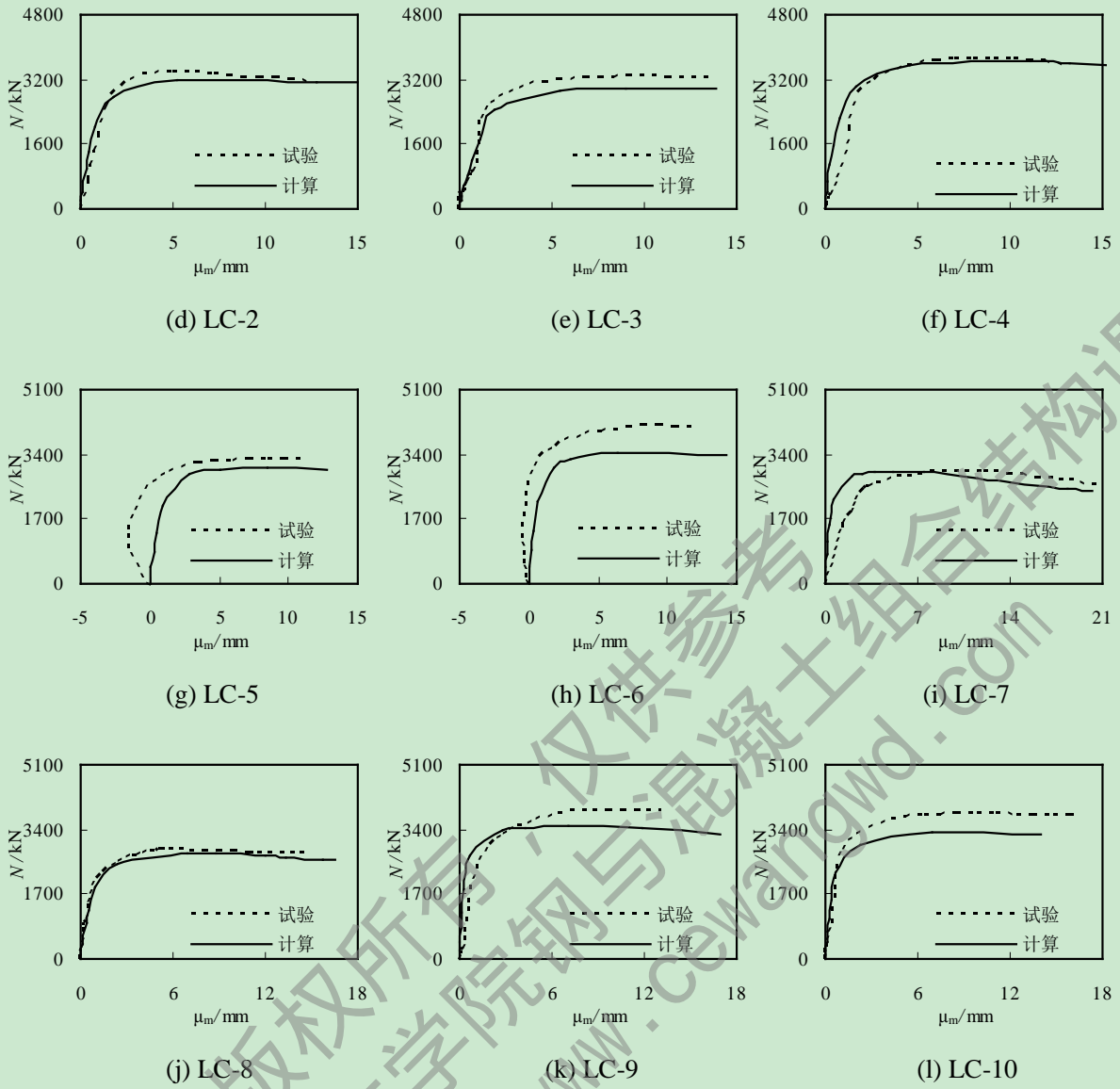


图 2-9 内配型钢的圆钢管混凝土轴压长柱构件

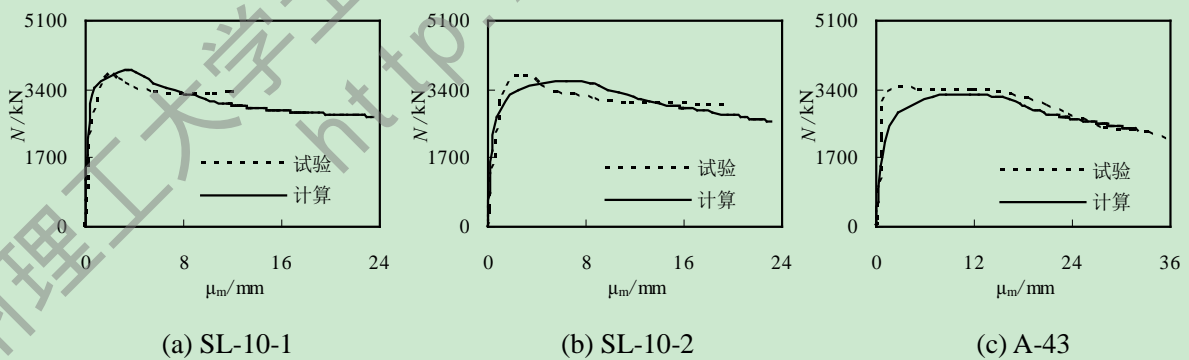


图 2-10 内配型钢的方钢管混凝土轴压长柱构件

表 2-3 内配型钢的钢管混凝土轴压长柱构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times t \times L$ (mm)	f_{ty} (MPa)	f_{sy} (MPa)	f_c (MPa)	型钢类型 十字形	数据来源
圆形	CL-a1	168×3.7×1176	318	288	47.9	I10	尧国皇 (2007) ^[69]
	CL-a2	168×3.7×1680	318	288	47.9	I10	
	LC1	219×4.0×1752	337	303	36.8	I12	肖阿林 (2009) ^[76]
	LC2	219×4.0×2190	337	303	36.8	I12	
	LC3	219×4.0×2628	337	303	36.8	I12	
	LC4	219×4.0×2190	337	303	53.1	I12	
	LC5	219×4.0×2190	337	318	39.0	I10	
	LC6	219×4.0×2190	337	308	39.0	I14	
	LC7	219×2.1×1752	308	303	39.0	I12	
	LC8	219×2.1×2190	308	303	36.8	I12	
	LC9	219×5.6×1752	289	303	39.0	I12	
LC10	219×5.6×2190	289	303	39.0	I12		
LC11	219×4.0×2190	337	303	36.8	I		
方形	SL-10-1	195×4.5×1200	289	338	48.4	I10	尧国皇 (2007) ^[69]
	SL-10-2	195×4.5×1800	289	338	48.4	I10	
	A-43	195×4.5×2400	289	338	48.4	I10	朱美春 (2006) ^[67]

2.2.4 典型构件的荷载-变形关系曲线

采用上述建模方法对轴压构件进行数值研究，可得到轴压构件的荷载-变形关系曲线，图 2-11 所示为典型的内配型钢钢管混凝土轴压构件的荷载-纵向应变关系曲线。典型轴压构件数据为： $D=400\text{mm}$ ， $L=1200\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_t=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ 。根据曲线特征，可将此曲线分为如下四个阶段：

(1) 弹性阶段(OA)：在弹性阶段，外围钢管、填充混凝土以及内配型钢均处于弹性阶段并单独受力，荷载-纵向应变关系曲线基本成一直线，此阶段荷载增加幅度很大，应变增加比较缓慢，A 点为钢管材料开始屈服的起点。

(2) 弹塑性阶段(AB)：此时，相对于弹性阶段，荷载-纵向应变关系曲线的应变增加较快，荷载增加变得缓慢。在轴向荷载的作用下，所填充混凝土的横向变形大于外围钢管材料的横向变形时，其变形受到外围钢管约束作用，此时构件进入复合受力状态，b 点大致为钢管材料进入塑性阶段的起点^[8]。

(3) 下降段(BC)：在此阶段，荷载-纵向应变关系曲线呈下降趋势，荷载下降缓慢，应变增加较快。

(4) 平缓段(CD)：在此阶段，荷载-纵向应变关系曲线呈水平状，荷载基本不变，应

变快速增加。

由图中曲线可以看出，内配型钢的钢管混凝土没有明显的下降段，这是因为，所填充混凝土可以有效阻止外围钢管发生局部屈曲，而外围钢管又对混凝土提供约束作用，以阻止混凝土的过大变形，再加上内配型钢对构件承载力的贡献，使得此类构件具有较好的承载力和塑性性能。

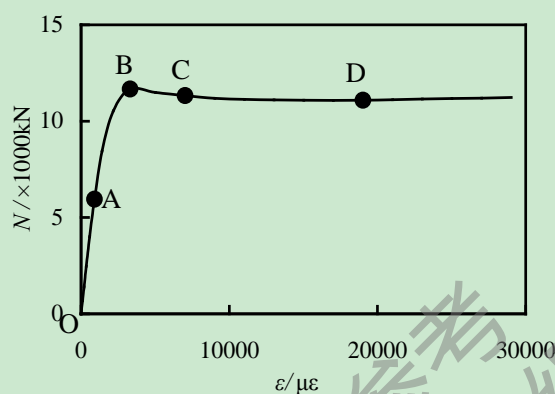


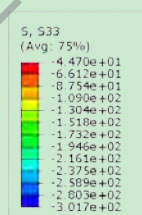
图 2-11 轴压构件荷载-应变关系曲线

图 2-12~图 2-14 所示为典型的内配型钢圆钢管混凝土轴压构件柱中横截面的纵向应力分布示意图(ZX-a、ZX-b、ZX-c、ZX-d 分别表示柱中横截面在 a、b、c、d 点所对应的应力分布示意图)。

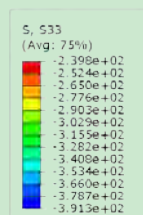
从上图中可知，外围钢管纵向应力分布较均匀，a 点到 b 点所对应的纵向应力不断增大且在 b 点达到最大值(b 点为承载力峰值点)，再到 c 点的过程中，应力趋于下降，由于曲线中 cd 段稍有上升，故应力又略有增加。

混凝土纵向应力分布较均匀，且为多轴对称应力分布图，从 a 点到 b 点的过程中，混凝土应力不断增大，当到达 b 点时构件达到极限承载力，此时型钢周围混凝土的应力也达到一峰值点，b 点到 c 点的过程中，由于承载力在下降，故型钢周围混凝土应力也有所下降，但型钢内部混凝土应力却急剧增加，c 点到 d 点的过程中，型钢内外部混凝土基本呈下降趋势。

内配型钢的纵向应力分布图同样比较均匀，且多轴对称，另外，翼缘应力值均大于腹板应力值。从 a 点到 b、c、d 各点，型钢翼缘应力先增后减，最后又呈增加趋势，腹板应力从 a 点到 b、c 点逐减，从 c 点到 d 点呈增加趋势。



(a) ZX1-a



(b) ZX1-b

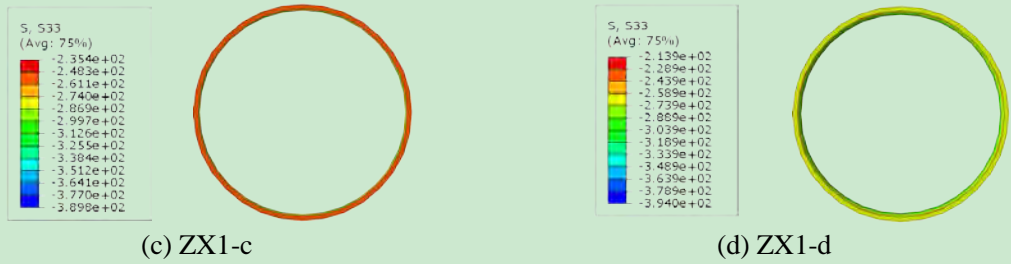


图 2-12 钢管中横截面纵向应力分布示意图

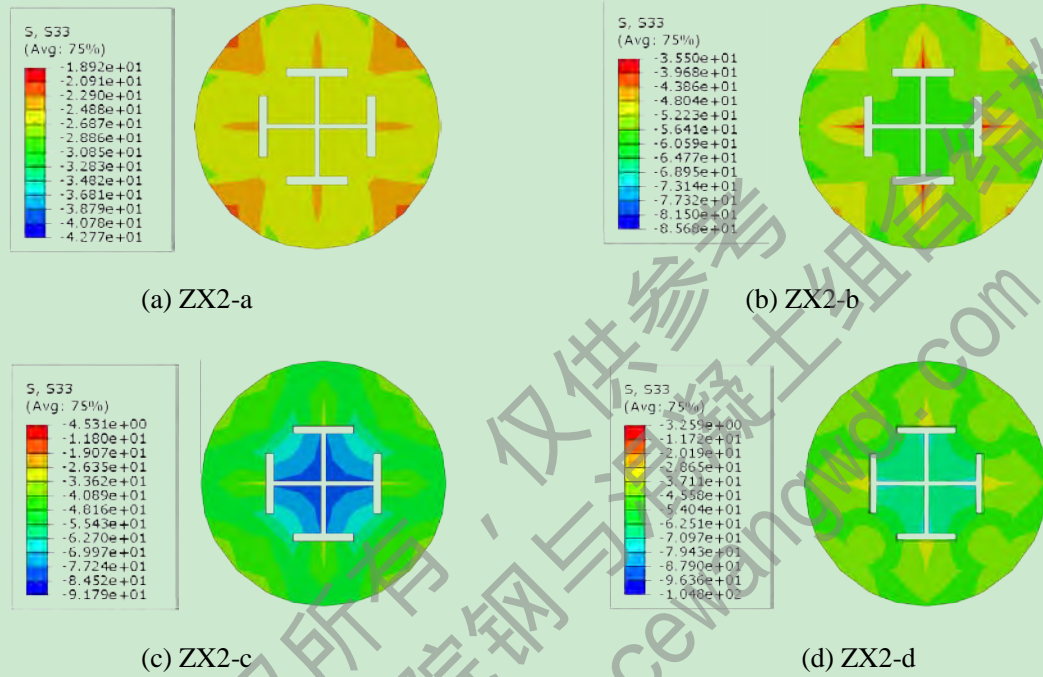


图 2-13 混凝土中横截面纵向应力分布示意图

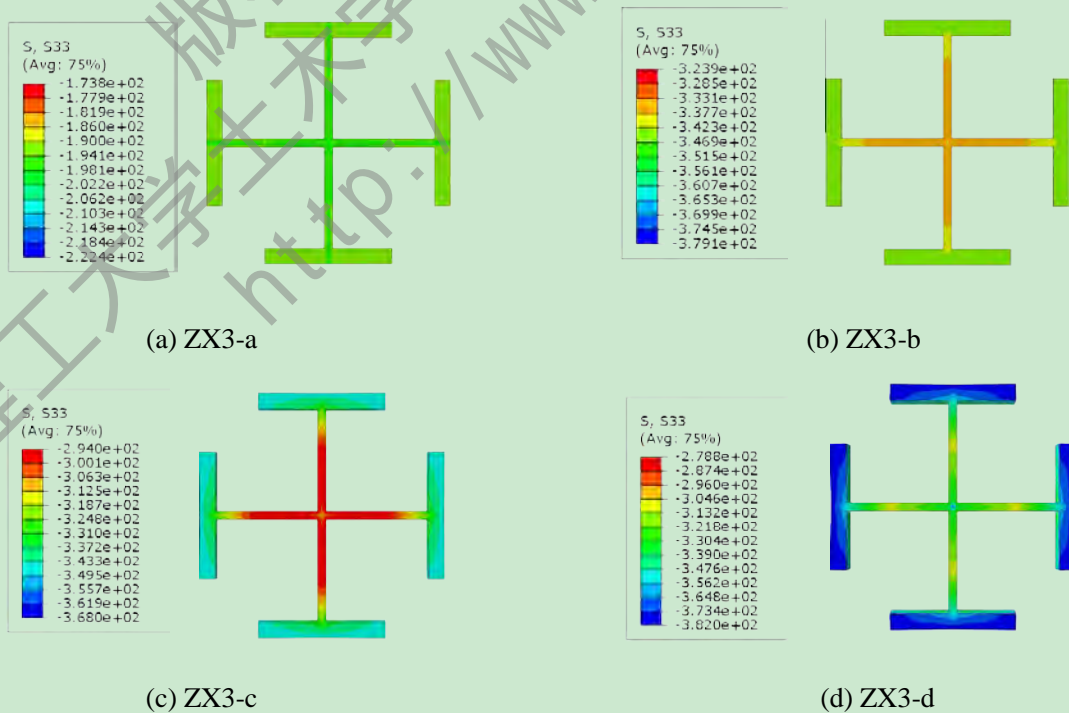


图 2-14 十字型钢中横截面纵向应力分布示意图

图 2-15 所示为典型的内配型钢圆钢管混凝土轴压构件柱中纵截面的纵向应力分布示意图(图 a、b、c、d 分别表示柱中纵截面在 a、b、c、d 点所对应的应力分布示意图)。从图中可以看出,内配型钢钢管混凝土在 a 点时应力分布图较均匀,且构件中部和两端部应力基本一致;对应于 b 点时的应力图对称于中横截面和中纵截面,且两端部应力小于中部应力; c 点时,构件截面应力分布较复杂,两端部应力明显大于中部应力; d 点时,构件中心应力值又开始增大,最终出现中部应力值大于两端部应力值的现象。

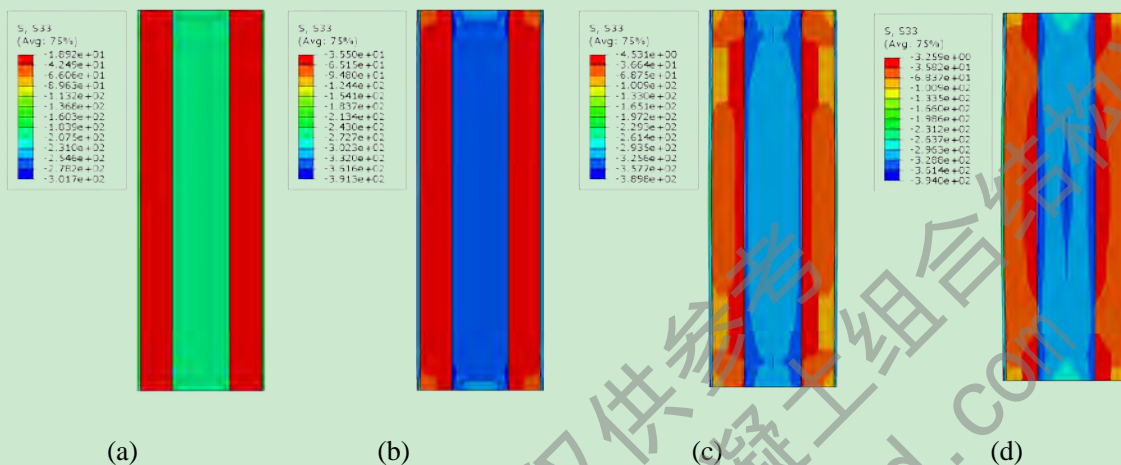


图 2-15 典型轴压构件中纵截面纵向应力分布示意图

图 2-16 为内配型钢的圆钢管混凝土轴压构件中纵截面塑性应变分布示意图,从下图可以看出典型轴压构件的塑性变形发展规律。首先,混凝土进入塑性区且塑性变形发展较快, b 点时,构件中部的钢管、混凝土、型钢塑性都在继续发展, c 点时构件中部的塑性发展极大,中部塑性较大区域略成同心圆, cd 段,中部应力开始向周边扩展。

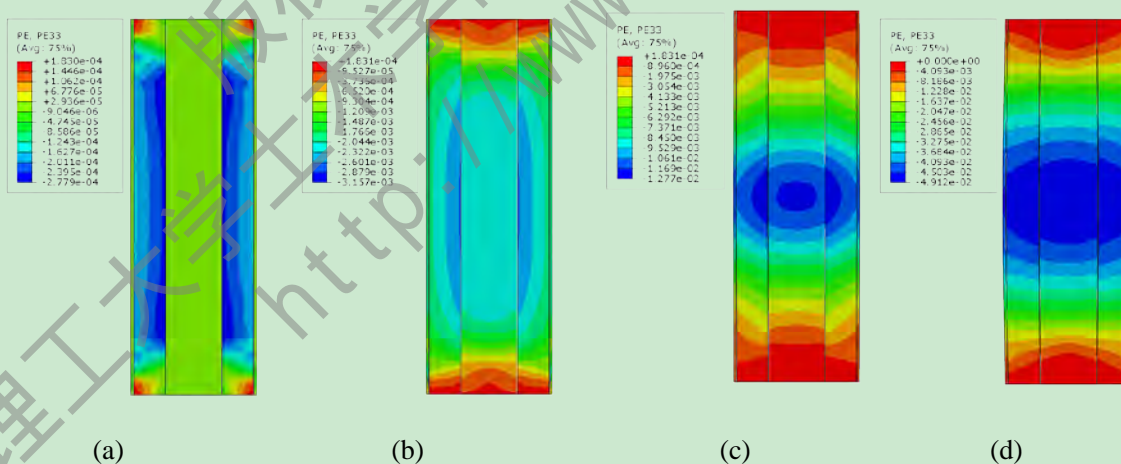


图 2-16 典型轴压构件中纵截面塑性应变分布示意图

2.2.5 荷载-应变分配曲线分析

图 2-17 为典型内配型钢的钢管混凝土轴压构件荷载-应变分配曲线。图中绘出了型钢钢管混凝土构件以及构成该构件的混凝土、外围钢管、内配型钢各自承担的荷载-应变关系曲线。由曲线可知,当型钢混凝土构件达到极限承载力时,填充混凝土、外围钢

管、内配型钢均达到了各自的极限承载力值，并且之后的曲线稍有下降，后又略有上升，表现出良好的塑性性能。此外还可知，内部填充的混凝土为整个构件的承载力贡献较大，其次是外围钢管和内配型钢，这三者各自对构件承载力的贡献大约为 1/2、1/3、1/6。

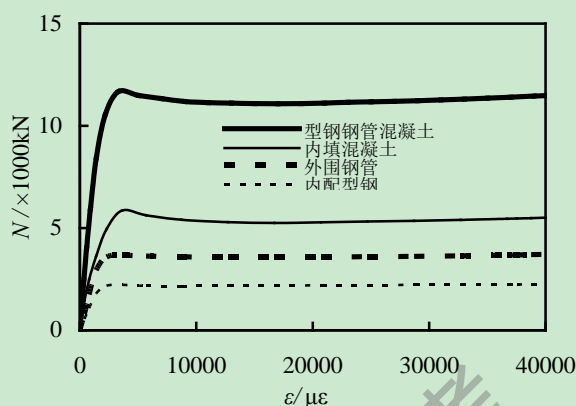


图 2-17 轴压构件荷载分配曲线

2.2.6 参数分析

对于内配型钢的钢管混凝土轴压构件而言，影响其荷载-纵向应变关系曲线的因素有混凝土强度、钢管材料强度、钢管含钢率、型钢含钢率和型钢材料强度。下面通过有限元软件模拟来研究分析以上因素对典型内配型钢的钢管混凝土轴压构件的荷载-纵向应变曲线的影响状况。典型轴压构件的基本数据为： $D=400\text{mm}$ ， $L=1200\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_t=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ 。

(1) 混凝土强度(f_{cu})的影响

图 2-18(a)给出了不同内填混凝土强度时典型轴压构件的荷载-变形关系曲线，由图中曲线知，混凝土强度的增加对构件的抗压承载力影响比较明显，但对荷载-纵向应变关系曲线的弹性阶段刚度的影响并不明显。

(2) 钢管材料强度(f_{ty})的影响

图 2-18 (b)给出了不同钢管材料强度时典型轴压构件的荷载-变形关系曲线，由图中曲线知，钢管材料强度的增加对构件的抗压承载力的影响较为明显，但对荷载-纵向应变关系曲线的弹性阶段刚度几乎没有影响。

(3) 型钢材料强度(f_{sy})的影响

图 2-18(c)给出了不同型钢材料强度时典型轴压构件的荷载-变形关系曲线，由图中曲线知，型钢材料强度的增加对构件的抗压承载力略有影响，对荷载-纵向应变关系曲线的弹性阶段刚度几乎没影响。

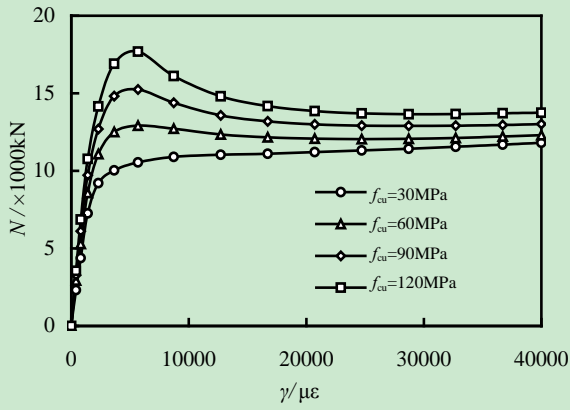
(4) 钢管含钢率(α_t)的影响

图 2-18(d)给出了不同钢管含钢率时典型轴压构件的荷载-变形关系曲线，由图中曲线知，钢管含钢率的增加对构件的抗压承载力影响非常大，但对构件荷载-纵向应变关系曲线

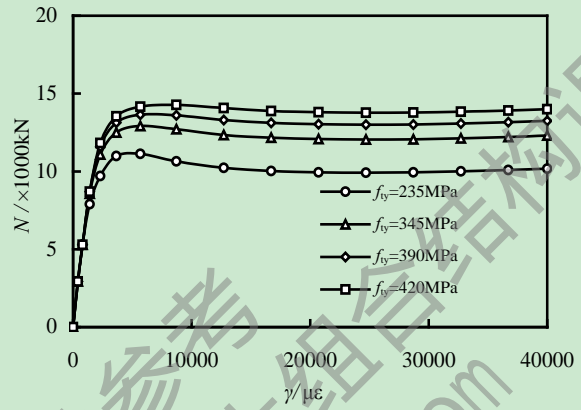
的弹性阶段刚度影响并不大。

(5) 型钢含钢率(α_s)的影响

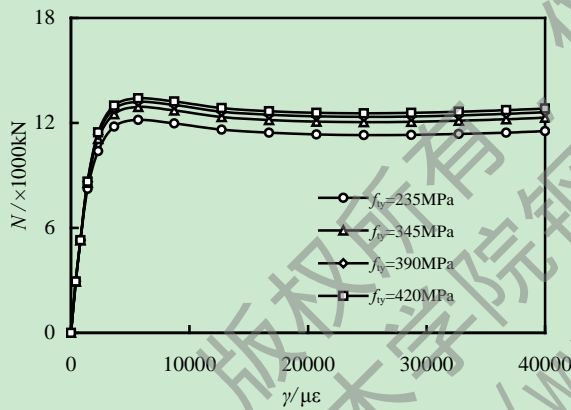
图 2-18(e)给出了不同型钢含钢率时典型轴压构件的荷载-变形关系曲线, 由图中曲线知, 型钢含钢率的增加对构件的抗压承载力影响比较小, 对构件荷载-纵向应变关系曲线的弹性阶段刚度几乎没影响。



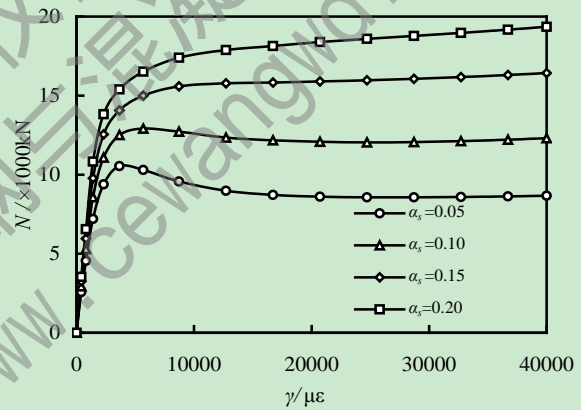
(a) 混凝土强度的影响



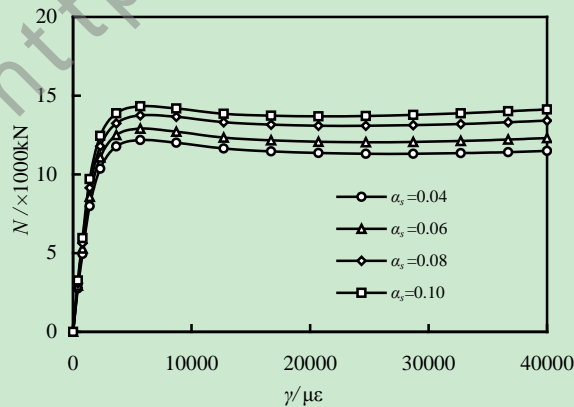
(b) 钢管材料强度的影响



(c) 型钢材料强度的影响



(d) 钢管含钢率的影响



(e) 型钢含钢率的影响

图 2-18 相关参数对构件轴力-应变曲线的影响

2.3 本章小结

通过本章的研究分析，可得结论如下：

(1) 本章选用合理的材料本构关系模型，并通过有限元软件对组合构件进行数值建模，模拟结果曲线与试验结果曲线吻合较好，说明本构关系选用合理，且建模方法可行、正确。

(2) 对典型的内配十字型钢圆钢管混凝土轴压构件的荷载-应变全曲线、应力分布、荷载-应变分配曲线进行分析，深入了解其工作机理。

(3) 通过对轴压组合构件进行参数分析，明确各参数对构件力学性能的影响状况。

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

第3章 内配十字型钢圆钢管混凝土受扭、受弯和受剪 构件的力学性能研究

3.1 引言

上一章研究了内配十字型钢的圆钢管混凝土轴压构件的力学性能和工作机理,除此之外,构件在实际工程中常见的简单受力形式还有扭、弯、剪,因此有必要对构件在扭、弯、剪作用下的受力性能进行深入的研究分析,分析结果可为实际工程和科研提供一定的参考依据。

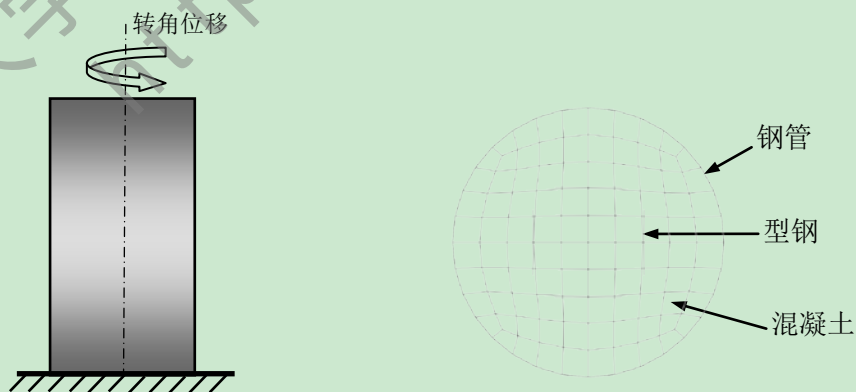
3.2 内配十字型钢圆钢管混凝土受扭构件的力学性能

本节采用有限元方法对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件受扭情况进行数值模拟,在数值模型得以验证的基础上,设计典型的受扭构件进行力学性能的研究分析。

3.2.1 有限元模型

本文通过有限元软件 ABAQUS 对受扭构件进行研究,有限元分析模型的边界条件及网格划分示意如图 3-1 所示。定义边界条件时,在构件的加载板和非加载板外表面几何中心设置参考点并耦合于外表面,将非加载板参考点完全固定,约束加载板参考点的竖向位移以及绕其余两轴的转角,并施加转角位移(黄宏和黄斌洁,2010^[88])。另外,网格划分的大小要合理,尽量使网格划分规则、均匀。

定义分析模型接触时,钢管和混凝土之间的接触通过法向和切向接触来模拟,法向接触(Normal Behavior)采用大刚度接触单元来模拟,接触刚度取 1000N/mm(Beck 和 Kiyomiya,2003^[24]),切向接触(Tangential Behavior)采用库仑摩擦模型。



(a) 计算模型边界条件示意图

(b) 构件网格划分示意图

图 3-1 受扭构件的计算模型边界条件和网格划分示意图

3.2.2 模型验证

为验证有限元建模方法的正确性和可行性，分别对型钢混凝土受扭构件、钢筋混凝土受扭构件、钢管混凝土受扭构件进行数值模拟并验证模型。经查阅相关资料可知，郑杰(2010)^[89]、李红波(2008)^[12]对 7 个矩形型钢混凝土受扭构件、2 个矩形钢筋混凝土受扭构件进行了研究分析，韩林海和钟善桐(1995a)^[14]、陈逸玮(2003)^[90]、宫安(1989)^[91]、周竞(1990)^[92]、Beck 和 Kiyomiya(2003)^[24]、Kitada 和 Nakai(1991)^[13]对 12 个圆形截面的钢管混凝土受扭构件以及 2 个方形截面的钢管混凝土受扭构件进行了研究分析。现将他们所研究的试验构件进行有限元模拟，图 3-2~图 3-6 所示为相关构件的试验结果曲线和数值模拟曲线的对比图，表 3-1~表 3-3 为相关受扭构件的参数一览表。

(1) 型钢混凝土受扭构件

图 3-2 为型钢混凝土受扭构件的扭矩-转角关系曲线对比图。由图可知，除个别构件的对比曲线之外，有限元模拟结果曲线与试验结果曲线吻合挺好，说明建模方法合理、正确。

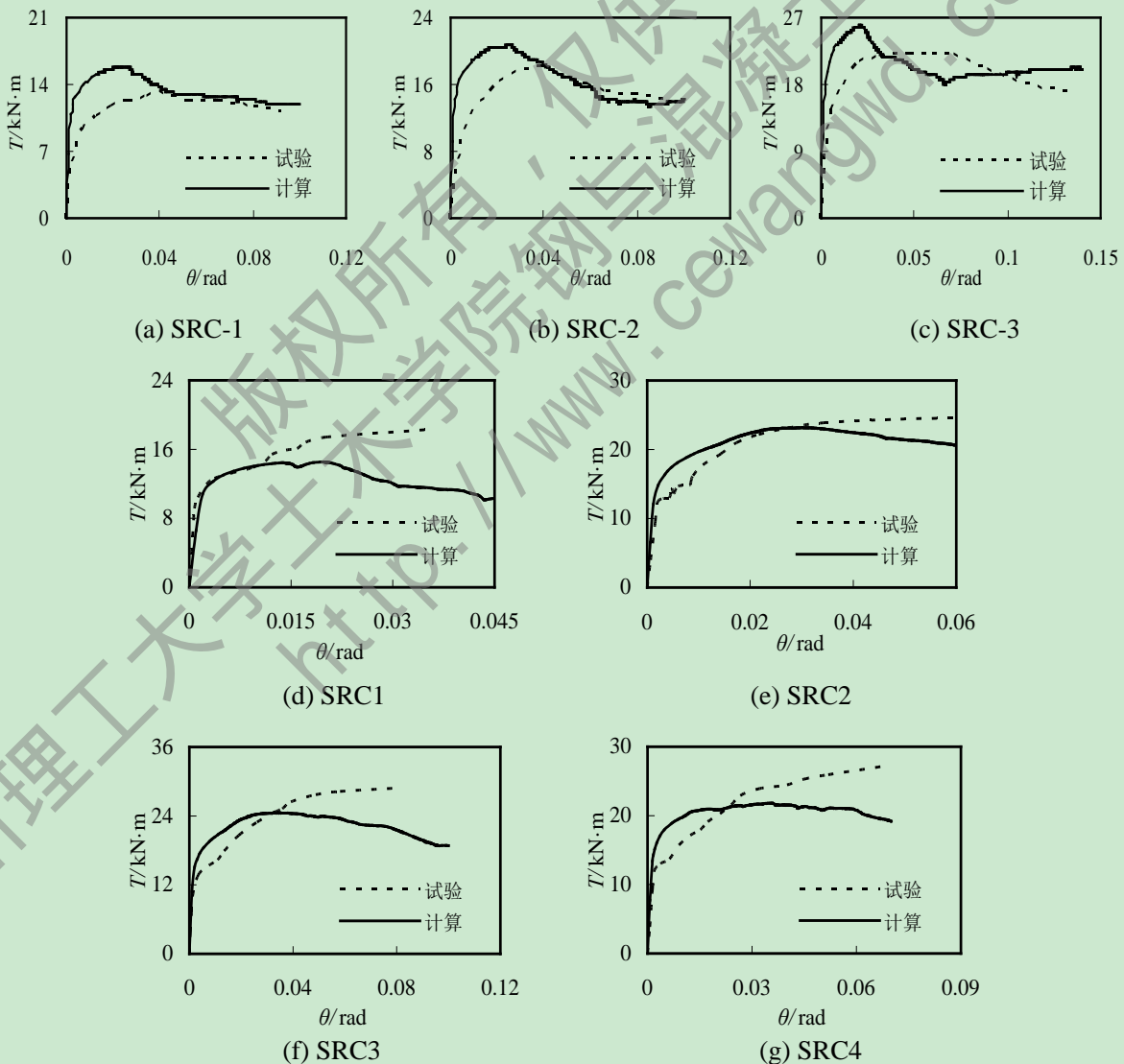


图 3-2 型钢混凝土受扭构件

表 3-1 型钢混凝土受扭构件参数一览表

试件 编号	$D(B) \times H \times L$ (mm)	型钢尺寸 (mm)	纵筋 (mm)	箍筋 (mm)	型钢 f_y (MPa)	纵筋 f_y (MPa)	箍筋 f_y (MPa)	$f_{cu} (f_c)$ (MPa)	数据 来源
SRC-1	240×260×1050	100×100×6×8	#4(12.7)/4	#3(9.53)/150	324.4	312.2	372.7	(27.7)	郑杰 (2010) ^[89]
SRC-2	240×310×1050	150×100×6×9	#4(12.7)/4	#3(9.53)/150	324.4	312.2	372.7	(27.7)	
SRC-3	240×360×1050	200×100×5.5×8	#4(12.7)/4	#3(9.53)/150	324.4	312.2	372.7	(27.7)	
SRC-1	225×300×2400	150×75×5×7	4 ϕ 10	ϕ 8@200	329.58	306.36	283.3	38.2	李红波 (2008) ^[12]
SRC-2	225×300×2400	150×75×5×7	4 ϕ 10	ϕ 8@100	329.58	306.36	283.3	39.4	
SRC-3	225×300×2400	150×75×5×7	4 ϕ 10	ϕ 8@100	329.58	360.39	303.53	41.56	
SRC-4	225×300×2400	160×88×6×9.9	4 ϕ 10	ϕ 8@100	296.62	287.87	303.53	41.56	

(2) 钢筋混凝土受扭构件

图 3-3 所示为钢筋混凝土的扭矩-转角关系曲线对比图，由对比图可知，有限元模拟结果曲线与试验结果曲线吻合良好，故建模方法合理。

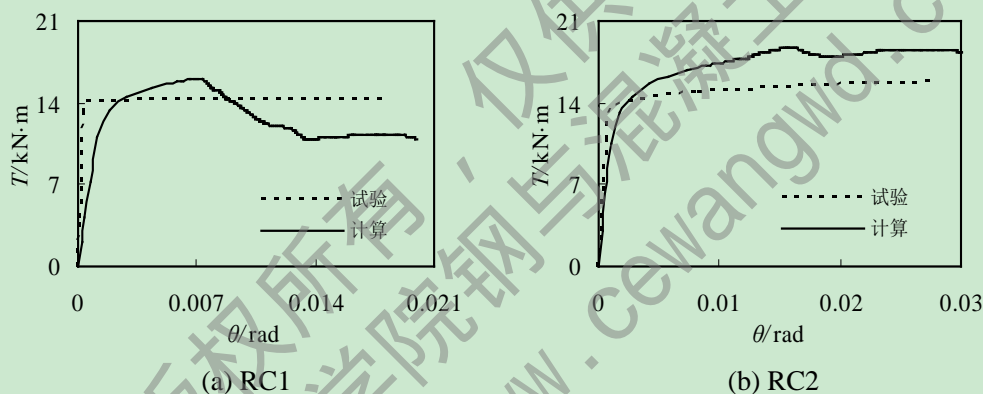


图 3-3 钢筋混凝土受扭构件

表 3-2 钢筋混凝土受扭构件参数一览表

试件 编号	$D(B) \times H \times L$ (mm)	纵筋	箍筋	纵筋 f_y (MPa)	箍筋 f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	试验 来源
RC-1	225×300×2400	4 ϕ 10	ϕ 8@200	315.67	298.22	36.6	李红波
RC-2	225×300×2400	4 ϕ 10	ϕ 8@100	315.67	298.22	36.6	(2008) ^[12]

(3) 钢管混凝土受扭构件

图 3-4、图 3-5 分别为圆形截面、方形截面钢管混凝土受扭构件扭矩-转角关系曲线的数值模拟结果曲线与试验结果曲线的对比图，图 3-6 为圆形截面钢管混凝土受扭构件的扭矩-截面纤维最大剪应变曲线的数值模拟结果与试验结果对比图，由对比图可知两曲线吻合较好，说明有限元方法合理。

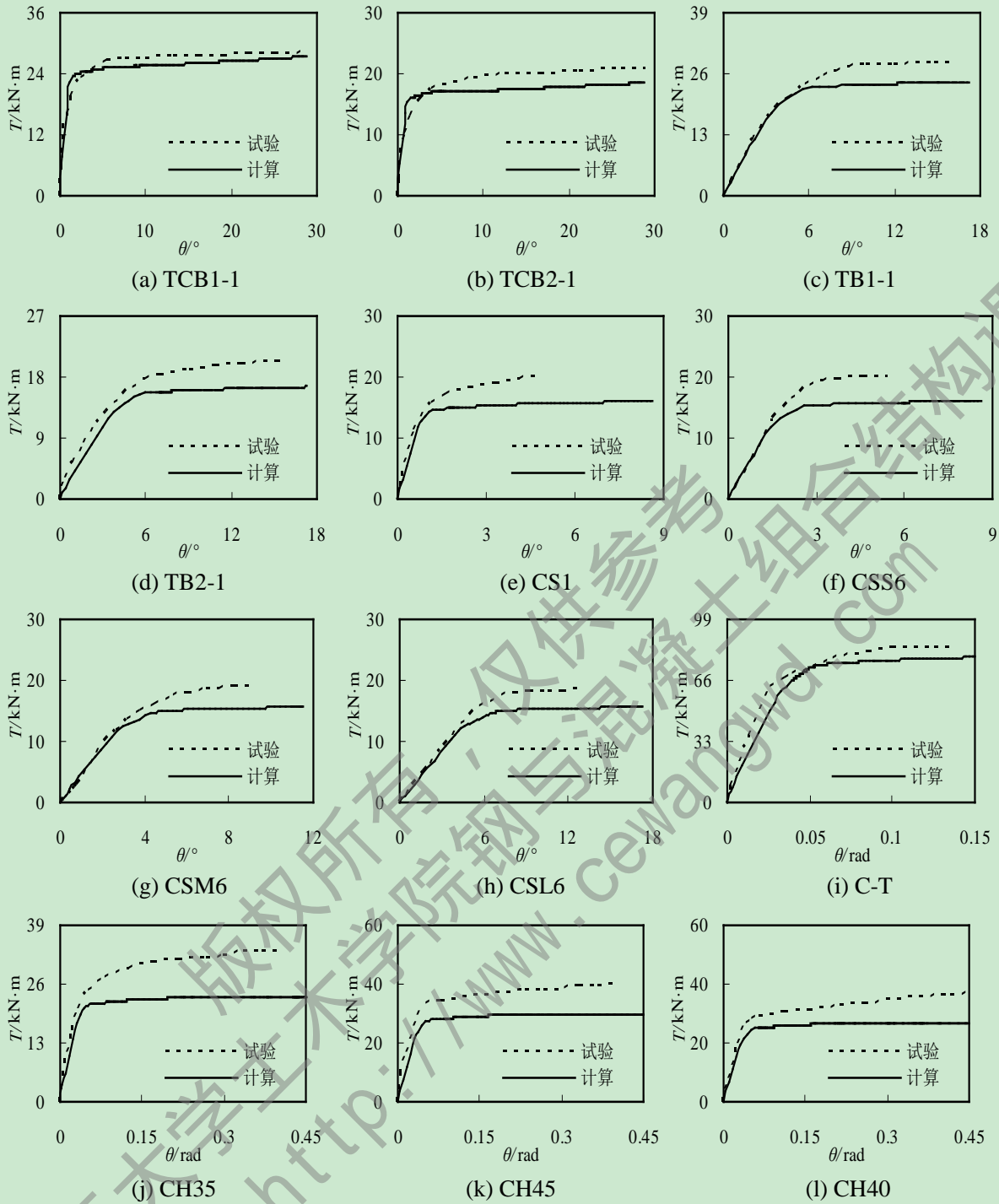


图 3-4 圆形截面钢管混凝土受扭构件

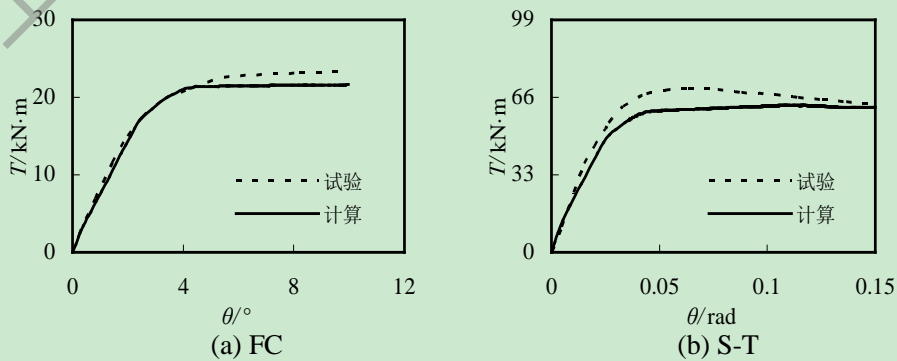


图 3-5 方形截面钢管混凝土受扭构件

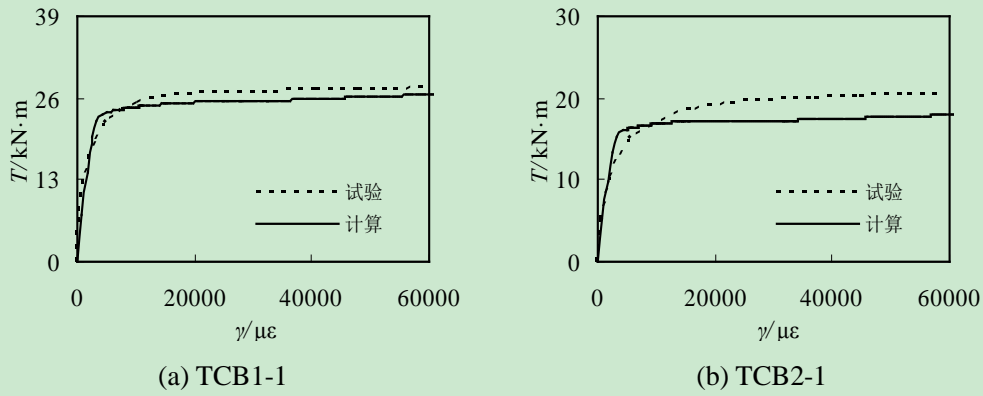


图 3-6 构件扭矩-截面纤维最大剪应变关系曲线

表 3-3 钢管混凝土受扭构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	T_{ue}	T_{uc}	T_{uc}/T_{ue}	数据来源
圆形	TCB1-1	133×4.5×450	324.34	33.3	28.95	27.39	0.946	韩林海和钟善桐
	TCB2-1	130×3×450	324.34	33.3	17.35	18.51	1.067	(1995a) ^[14]
	TB1-1	133×4.5×2000	324.34	30.4	28.23	24.33	0.862	陈逸玮
	TB2-1	130×3×2000	324.34	30.4	17.2	16.55	0.962	(2003) ^[90]
	CS1	114×4.5×387	280	33.1	19.66	15.96	0.812	宫安(1989) ^[91]
	CSS6	114×4.5×800	301.9	21.9	19	16.15	0.850	
	CSM6	114×4.5×1480	301.9	20.6	18.5	15.64	0.845	周竞(1990) ^[92]
	CSL6	114×4.5×2280	301.9	22.2	17.8	15.67	0.880	
	C-T	216.3×4.5×1620	354.8	39	84.31	78.53	0.931	陈逸玮
								(2003) ^[90]
方形	CH35	139.8×3.5×1000	322.9	36.3	33.4	23.12	0.692	Beck 和
	CH45	139.8×4.5×1000	348.2	31.8	40.1	29.99	0.748	Kiyomiya
	CH40	139.8×4×1000	340.3	38.2	42	26.85	0.639	(2003) ^[24]
	FC	123.5×4.5×1590	274	25.6	23.36	21.62	0.926	Kitada 和 Nakai
							(1991) ^[13]	
	S-T	200×4.5×1620	261.4	39	69.59	62.54	0.899	陈逸玮
							(2003) ^[90]	

由前面的对比曲线可知，无论是型钢混凝土受扭构件、钢筋混凝土受扭构件，还是钢管混凝土受扭构件，本文的有限元模拟结果曲线与试验结果曲线吻合均较好，说明该建模方法可行。又因为内配十字形型钢的圆钢管混凝土构件是型钢混凝土构件和钢管混凝土构件的有效组合，故可推知，该建模方法同样可适用于对内配十字形型钢的圆钢管

混凝土受扭构件的数值建模和研究分析。

3.2.3 构件的扭矩-转角关系曲线全过程分析

利用以上的有限元建模方法建立内配十字型钢圆钢管混凝土受扭构件的数值模型，计算可得到这类构件的扭矩-转角关系曲线，图 3-7 为典型的内配型钢钢管混凝土受扭构件的扭矩-转角关系曲线图。典型构件的基本数据为： $D=400\text{mm}$ ， $L=1200\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_t=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ ，图中 θ 表示构件的扭转角度， T 表示施加在构件上的扭矩。如图所示，内配型钢钢管混凝土受扭构件的扭矩-转角曲线可分为三个阶段，即：弹性阶段、弹塑性阶段和塑性强化阶段^[8]。各阶段特征描述如下：

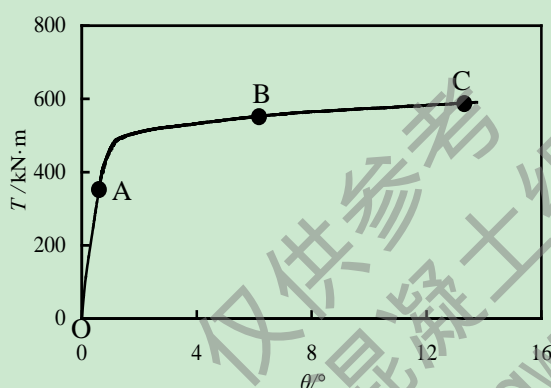


图 3-7 典型构件的扭矩-转角曲线

(a) 弹性阶段(OA)

在弹性阶段，即 OA 段，内配十字型钢的圆钢管混凝土受扭构件的扭矩(T)-转角(θ)曲线大致呈线性增长，且构件刚度较大，钢管、混凝土以及内配型钢均为单独承受荷载，A 点大致相当于钢管材料进入弹塑性阶段的起点。

(b) 弹塑性阶段(AB)

在弹塑性阶段，即 AB 段，组合构件受到较大的扭矩作用后，构件中的内填混凝土发生横向变形且当变形大于外围钢管的横向变形时，又会受到外围钢管的约束作用，因此内填混凝土与钢管之间发生相互作用关系^[8]；另外，内填混凝土在承受较大荷载产生大变形的过程中还受到内配型钢的阻力，故内填混凝土和内配型钢之间也产生了相互作用力，此时的外围钢管、内填混凝土以及内配型钢均处于复杂受力状态。B 点大致相当于内配型钢材料进入塑性阶段的起点。

(c) 塑性强化阶段(BC)

在塑性强化阶段，内填混凝土横向变形较大，但却受到外围钢管的约束，故较好地改善了内填混凝土的承载能力，另外，由于内填混凝土的存在，又可以延缓或是避免钢管发生局部屈曲^[8]，再者，内配型钢对构件又有一定的承载力贡献。总之，由于钢管、混凝土和型钢的相互贡献，使构件的抗扭承载力持续递增，内配型钢的钢管混凝土受扭构件的扭矩-转角曲线不出现下降段，表现出较好的抗扭承载力和延性性能。

3.2.4 构件应力分析

图 3-8~图 3-10 所示为典型的内配十字形型钢圆钢管混凝土受扭构件的填充混凝土、外围钢管、内配型钢的固定边界剪应力分布示意图(ZX-A、ZX-B、ZX-C 分别表示构件固定边界在上图曲线中 A、B、C 点所对应的剪应力分布示意图)。从图中可知,在扭矩较小时,填充混凝土、外围钢管的剪应力分布比较均匀,随着扭矩的进一步增大,剪应力变化明显且不再均匀分布;当扭矩增大时,内配型钢的变形也较明显。

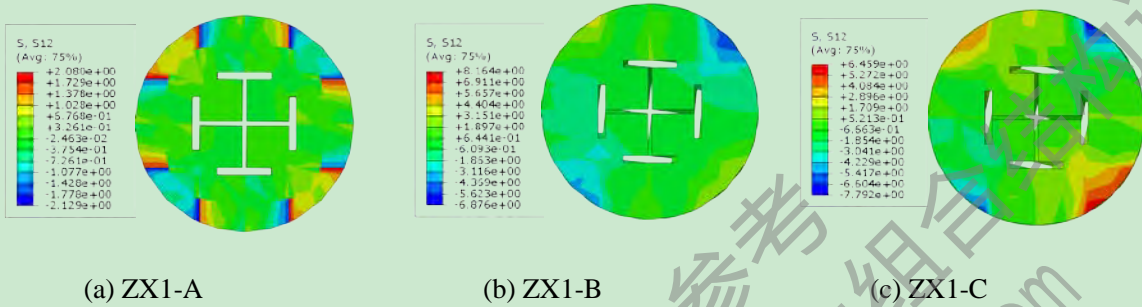


图 3-8 混凝土的固定边界剪应力分布示意图

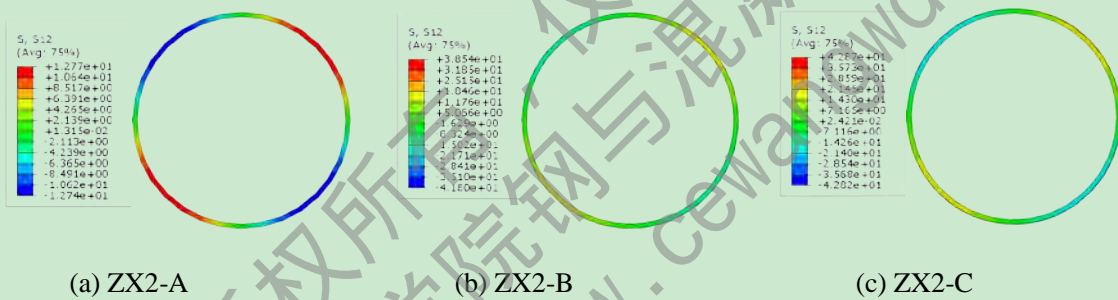


图 3-9 钢管的固定边界剪应力分布示意图

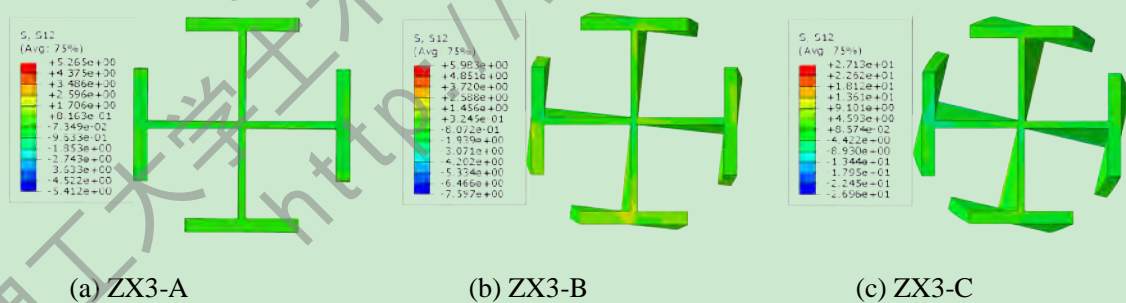


图 3-10 型钢的固定边界剪应力分布示意图

图 3-11 所示为典型内配型钢的圆钢管混凝土受扭构件在 a、b、c 三点所对应的中纵截面剪应力分布示意图,从图(a)可知,当扭矩较小时,构件变形极小,剪应力也较小且分布较均匀;随着扭矩的进一步加大,构件变形发展较快,剪应力继续增长,且型钢的扭转变形已经达到构件中部,见图(b);随着扭矩的持续增大,构件变形仍在发展,此时型钢变形继续向固定端部发展。

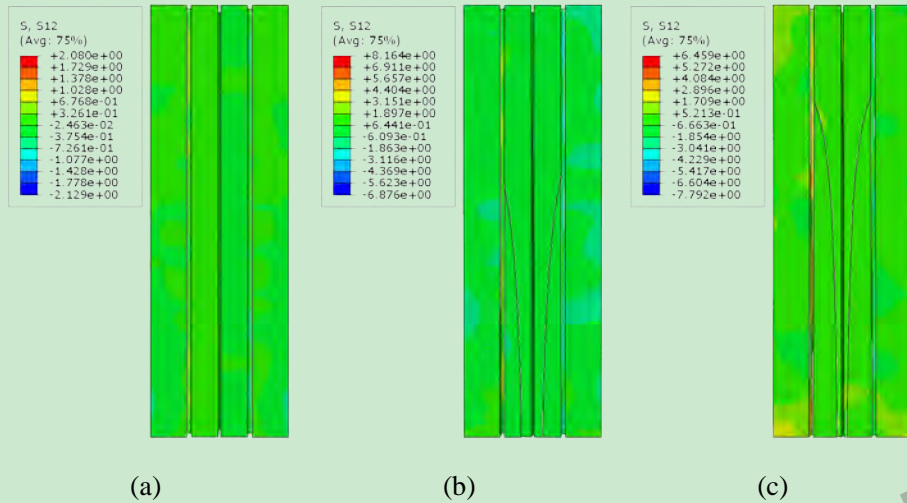


图 3-11 构件在 a、b、c 三点所对应的剪应力分布示意图

3.2.5 承载力分配曲线

图 3-12 所示为内配十字型钢的圆钢管混凝土以及组成该构件的外围钢管、填充混凝土、内配型钢的扭矩-转角分配曲线图。从图中可知，这类构件在扭矩作用下的扭矩荷载主要由外围钢管来承受，填充混凝土只承受很少的一部分扭矩，而内配型钢对构件扭矩的贡献很小，几乎可以忽略。另外，内配型钢、填充混凝土、外围钢管所对应曲线的弹性段逐渐变陡，说明刚度依次在增大。

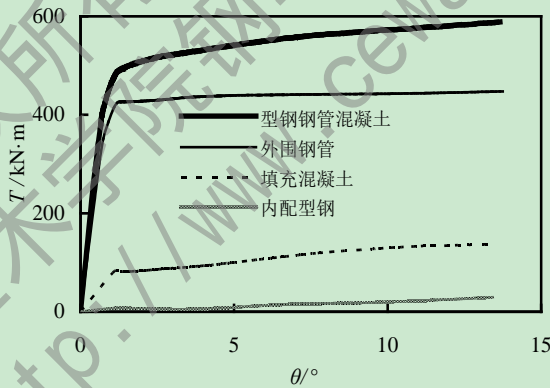


图 3-12 构件的扭矩-转角分配曲线

3.2.6 变形模式

图 3-13 为典型受扭构件破坏形式图，从变形图可知，填充混凝土、外围钢管以及内配型钢均发生了扭转变形，说明组成内配十字形型钢圆钢管混凝土构件的各材料能够共同承受外荷载，故数值模拟符合实际情况。另外还可知，此构件具有良好的塑性性能。

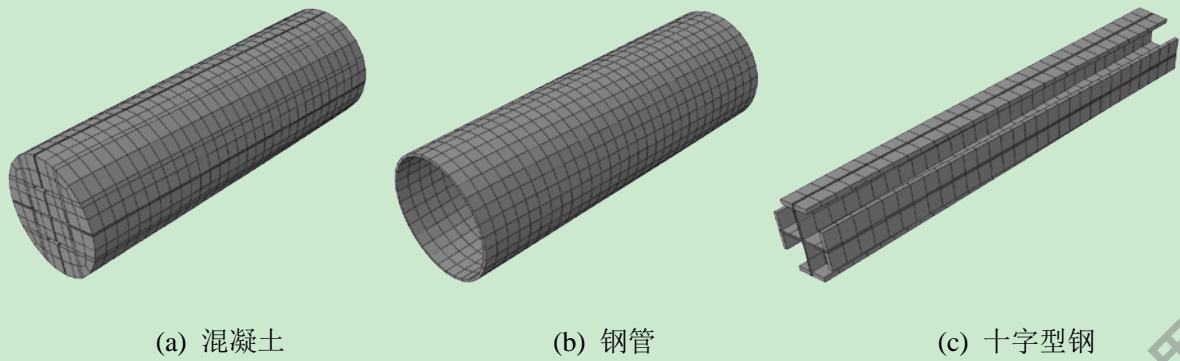


图 3-13 纯扭构件破坏形式

3.2.7 参数分析

对于内配十字型钢的圆钢管混凝土受扭构件而言，影响其 $T-\gamma$ 曲线的可能因素有混凝土强度、钢管材料强度、钢管含钢率、型钢含钢率和型钢材料强度。下面通过有限元模拟来研究分析以上因素对 $T-\gamma$ 曲线的影响状况。典型构件的基本数据为： $D=400\text{mm}$ ， $L=1200\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_t=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ 。

(1) 混凝土强度的影响

图 3-14(a)给出了不同内填混凝土强度时内配型钢的钢管混凝土受扭构件 $T-\gamma$ 曲线，从图中可以看出，混凝土强度的增加对该曲线的弹性阶段刚度影响不大，对构件的抗扭承载力有影响，但影响并不大。

(2) 钢管材料强度的影响

图 3-14(b)给出了不同钢管材料强度时内配型钢钢管混凝土受扭构件 $T-\gamma$ 曲线，从图中可以看出，钢管材料强度的增加对此曲线的弹性阶段刚度基本没影响，但对构件的抗扭承载力有很明显的影响，抗扭承载力随着钢管材料强度的增大而显著提高。

(3) 钢管含钢率的影响

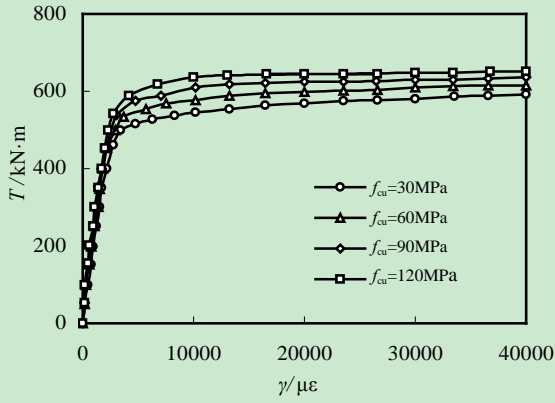
图 3-14(c)给出了不同钢管含钢率时内配型钢的钢管混凝土受扭构件 $T-\gamma$ 曲线，从图中可以看出，钢管含钢率的增加对曲线的弹性阶段刚度以及纯扭构件的抗扭承载力均有很大的影响，弹性阶段刚度和抗扭承载力都随着钢管含钢率的增大而有所提高。

(4) 型钢含钢率的影响

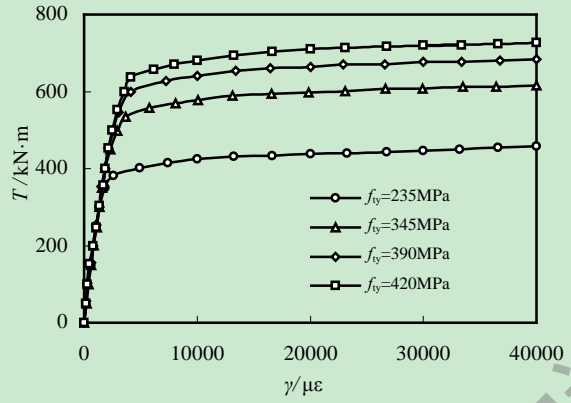
图 3-14(d)给出了不同型钢含钢率时内配型钢的钢管混凝土受扭构件 $T-\gamma$ 曲线，从图中可以看出，型钢含钢率的增加对此曲线的弹性阶段刚度基本没影响，对构件的抗扭承载力略有影响。

(5) 型钢材料强度的影响

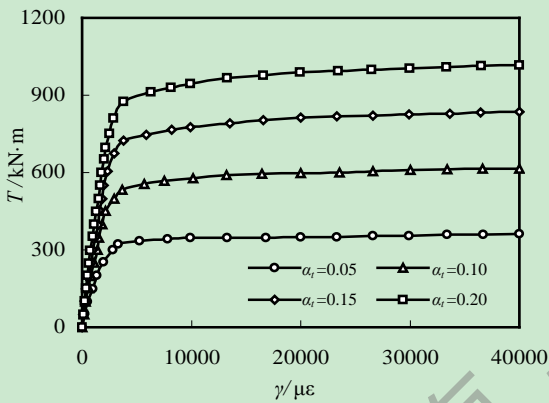
图 3-14(e)给出了不同型钢材料强度时内配型钢的钢管混凝土受扭构件 $T-\gamma$ 曲线，从图中可以看出，型钢材料屈服强度的增加对此曲线的弹性阶段刚度以及纯扭构件的抗扭承载力基本没影响。



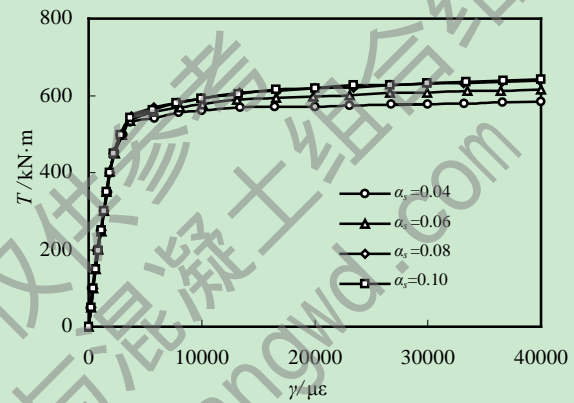
(a) 混凝土强度的影响



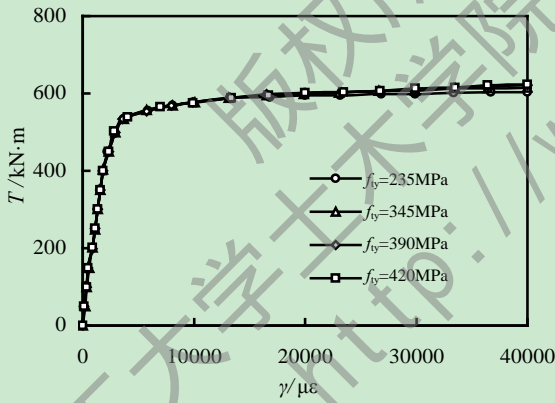
(b) 钢管材料强度的影响



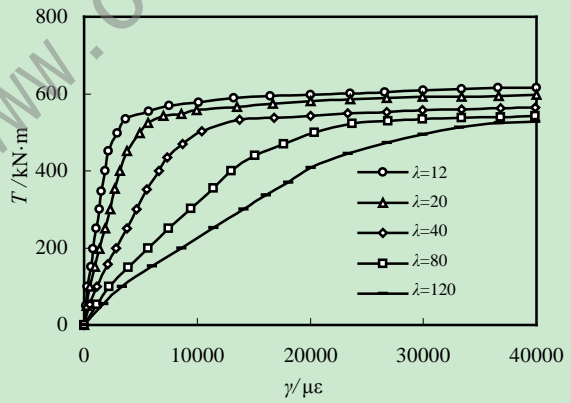
(c) 钢管含钢率的影响



(d) 型钢含钢率的影响



(e) 型钢材料强度的影响



(f) 长细比的影响

图 3-14 相关参数对构件扭矩-转角曲线的影响

(6) 长细比的影响

图 3-14(f)给出了不同长细比时内配型钢的钢管混凝土受扭构件 $T-\gamma$ 曲线,由图可知,随着构件长细比的增大,纯扭构件的抗扭承载力呈递减趋势,递减程度不会太大;但对此曲线的弹性阶段刚度影响比较大,刚度随着长细比的增大呈明显降低趋势。

3.3 内配十字型钢圆钢管混凝土受弯构件的力学性能

由于目前国内外学者对内配十字形型钢的圆钢管混凝土受弯构件的试验研究和数值研究极少，而构件受弯又是实际工程中不可或缺的受荷方式，另外，受弯构件的进一步研究也有利于对构件复合受力性能的研究，因此对构件受弯研究具有重要意义。在本节中，采用有限元软件对其他学者所做的钢管混凝土和内配型钢钢管混凝土受弯试验试件进行数值模拟，在验证模型的基础上，对内配十字形型钢的圆钢管混凝土受弯构件进行进一步的数值研究分析。

3.3.1 有限元模型

参考其他学者所做试验，基本是采用构件四分点加载方式，图 3-15 为试验加载示意图，图 3-16 为采用这种加载方式加载时的构件变形简图，图 3-17 为四分点加载时的弯矩分配示意图。

本文采用有限元软件 ABAQUS 对受弯构件进行研究，依据试验加载方式，建立有限元分析模型如图 3-18(a)所示。设置边界条件及加载方式时，固结构件一端加载板外表面的水平中轴线，铰接另一端相应的水平中轴线，并在靠近构件两端的四分点处的条带上进行位移加载。图 3-18(b)为受弯构件有限元模型的受荷变形示意图。

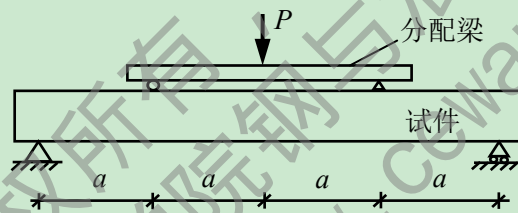


图 3-15 试验加载示意图



图 3-16 数值模拟简图

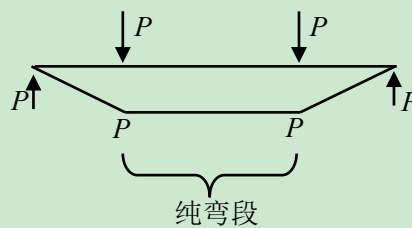
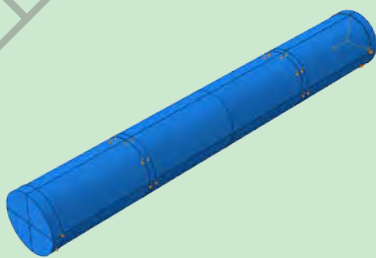
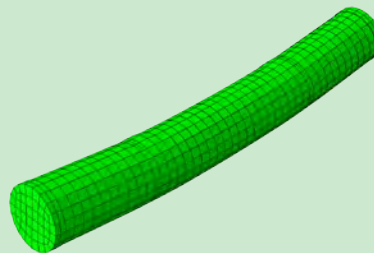


图 3-17 试件弯矩图



(a) 有限元模型



(b) 构件变形图

图 3-18 构件有限元模型及变形图

3.3.2 模型验证

查阅相关文献可知,于清等(2008)^[38]、卢辉和韩林海等(2003)^[25]、韦灼彬等(1998)^[16]、陶忠(1998)^[17]、杨有福和韩林海(2001)^[20]对 4 根圆钢管混凝土受弯构件、20 根方钢管混凝土受弯构件以及 4 根矩形钢管混凝土受弯构件进行了试验研究分析;关萍等(2003)^[22]对 2 根内配型钢的圆钢管混凝土受弯构件进行了试验分析。

为验证本节受弯有限元模型的正确性和有效性,本节对以上学者所做试验研究的构件进行数值模拟,数值模拟结果曲线与试验结果曲线的对比如图 3-19~图 3-22 所示,其中 φ 表示构件中截面的曲率,计算公式为 $\varphi = \pi^2 \cdot \mu_m / l^2$, M 为构件中间纯弯段的弯矩。表 3-4、表 3-5 所示为相关受弯构件的参数一览表。

由图中对比曲线可知,无论是受扭构件的挠度-弯矩曲线还是曲率-弯矩曲线,数值模拟结果和试验结果均能够很好地吻合,故说明有限元建模方法正确且这种建模方法能够应用到受弯构件的研究和分析中。

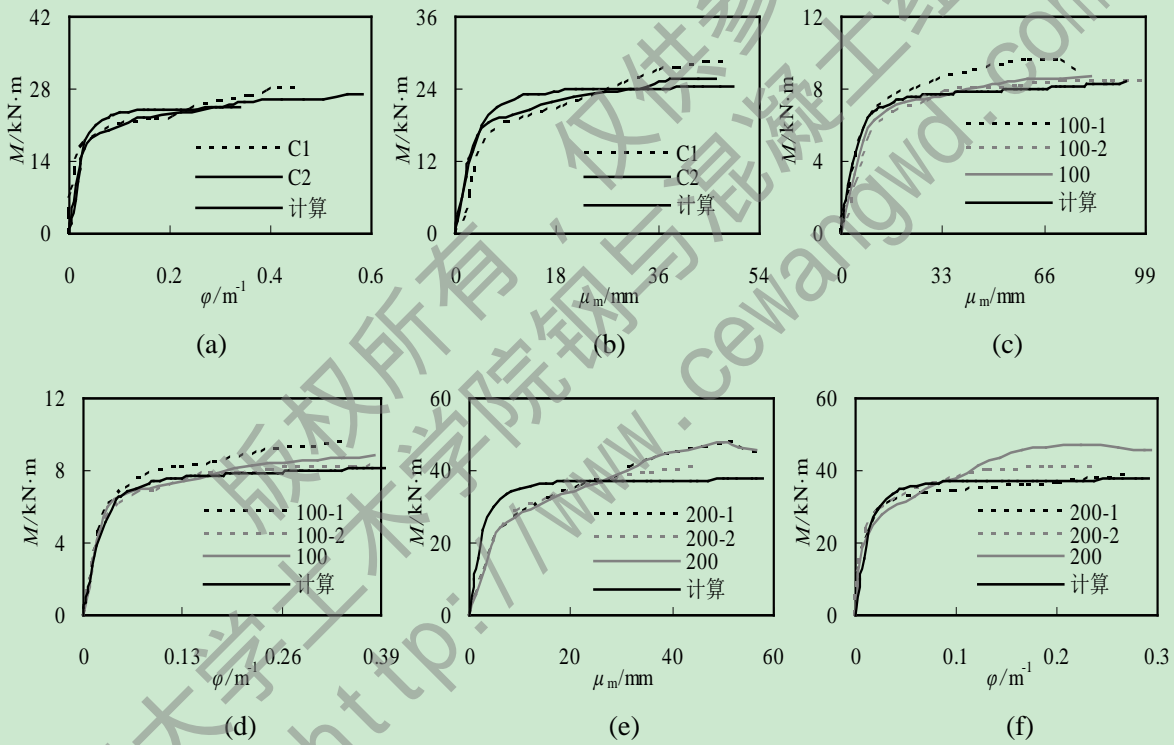
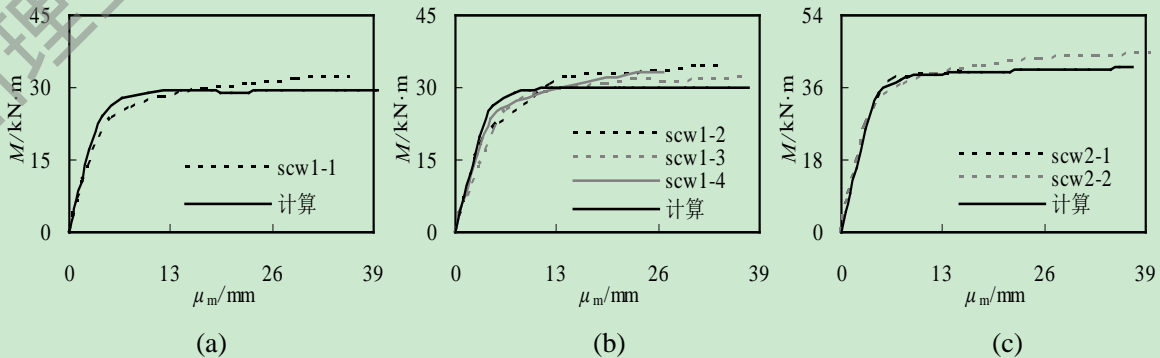


图 3-19 圆形截面钢管混凝土



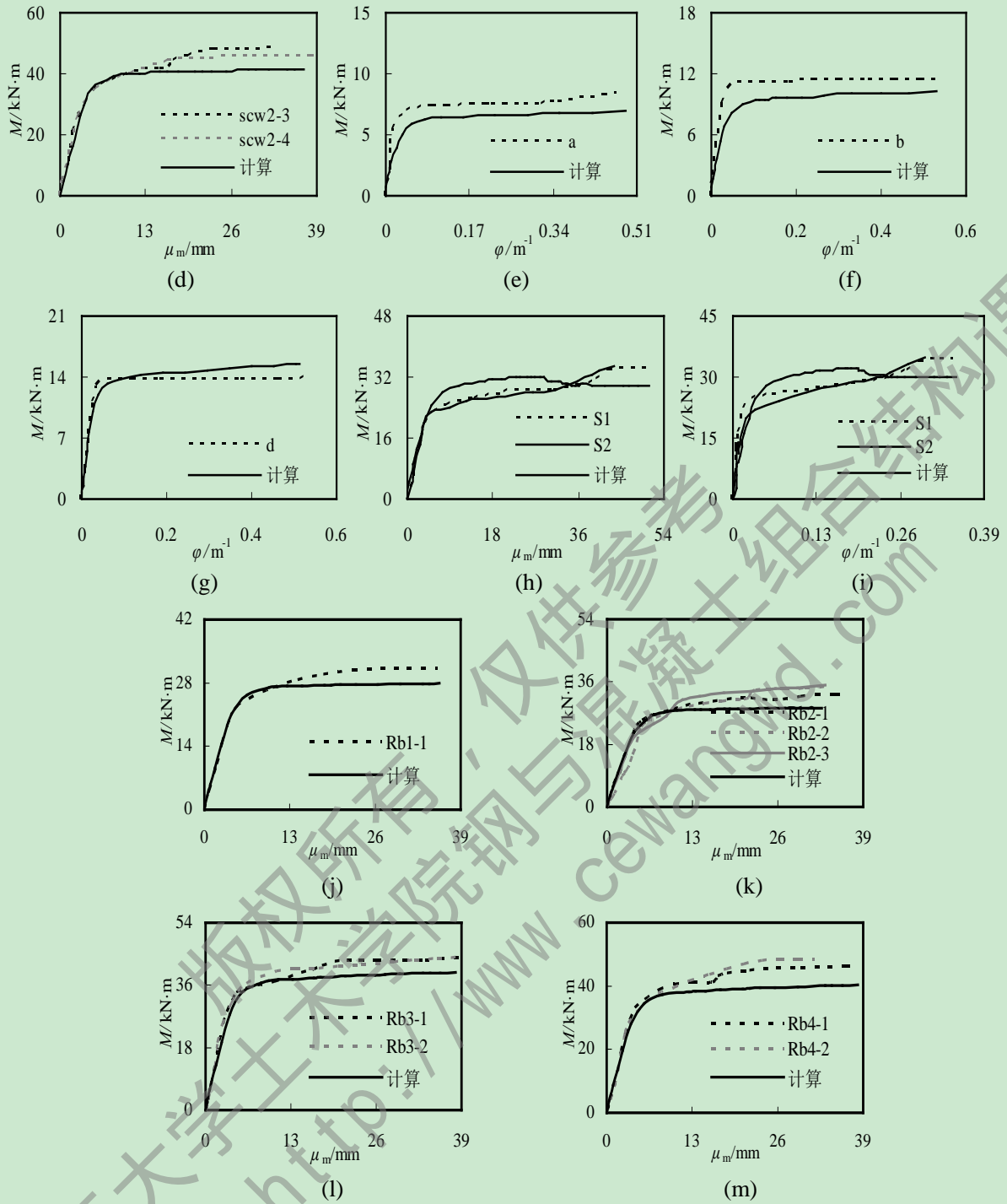
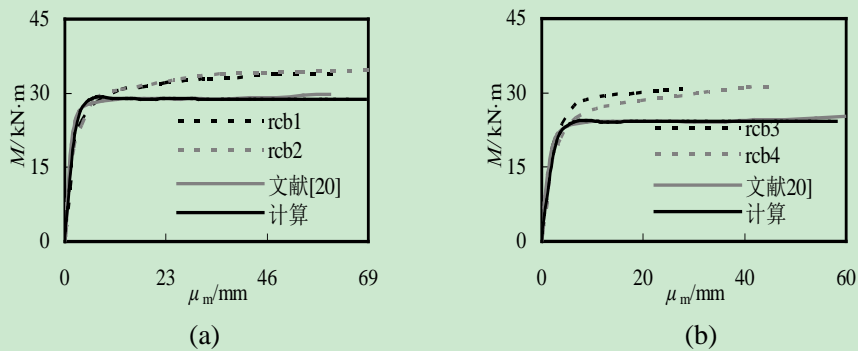


图 3-20 方形截面钢管混凝土



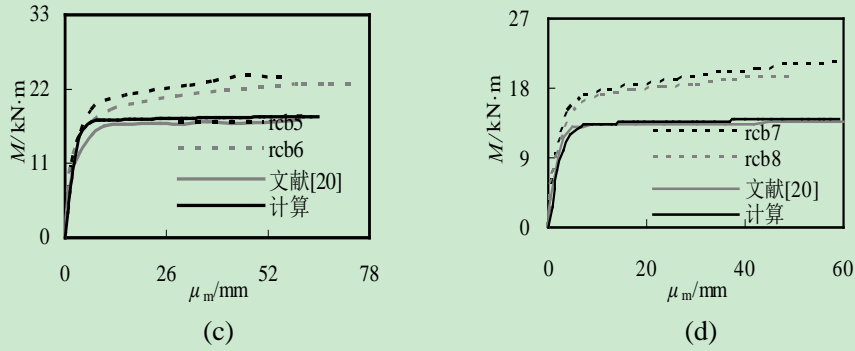


图 3-21 矩形截面钢管混凝土

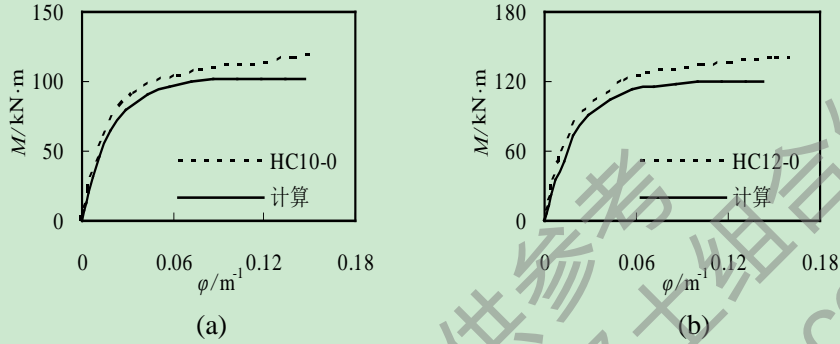


图 3-22 内配型钢圆钢管混凝土

表 3-4 钢管混凝土受弯构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times (B) \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	$f_{cu}(f_{ck})$ (MPa)	数据来源
圆形	C1/ C2	180×1.48×1200	307	64	于清等(2008) ^[18]
	OCSA100-1				卢辉和韩林海等 (2003) ^[25]
	OCSA100-2	100×1.9×1400	282	81.3	
	OCSB100				
	OCLA200-1				
	OCLA200-2	200×1.9×1400	282	81.3	
OCLB200					
方形	scw1-1	120×3.84×1100	330.1	(18.34)	韦灼彬等 (1998) ^[16]
	scw1-2	120×3.84×1100	330.1	(23.64)	
	scw1-3	120×3.84×1100	330.1	(23.64)	
	scw1-4	120×3.84×1100	330.1	(23.64)	
	scw2-1	120×5.86×1100	321.1	(20.98)	
	scw2-2	120×5.86×1100	321.1	(20.98)	
	scw2-3	120×5.86×1100	321.1	(26.80)	
	scw2-4	120×5.86×1100	321.1	(26.80)	
	a	100×2.29×300	194	(19.13)	
	b	200×2.27×300	305	(17.18)	
d	100×4.25×300	284	(14.83)		

(续表)

方形	S1/ S2	180×1.48×1200	307	64	于清等(2008) ^[38]
	Rb1-1	120×3.84×1100	330.1	(27.3)	
	Rb2-1	120×3.84×1100	330.1	(35.2)	
	Rb2-2	120×3.84×1100	330.1	(35.2)	
	Rb2-3	120×3.84×1100	330.1	(35.2)	
	Rb3-1	120×5.86×1100	321.1	(31.3)	陶忠(1998) ^[17]
	Rb3-2	120×5.86×1100	321.1	(31.3)	
	Rb4-1	120×5.86×1100	321.1	(40)	
	Rb4-2	120×5.86×1100	321.1	(40)	
矩形	rcb1/ rcb2	150×120×2.93×1000	293.8	(23.1)	
	rcb3/ rcb4	150×90×2.93×1000	293.8	(23.1)	杨有福和韩林海
	rcb5/ rcb6	120×90×2.93×1000	293.8	(23.1)	(2001) ^[20]
	rcb7/ rcb8	120×60×2.93×1000	293.8	(23.1)	

注：数据表中的 OCSA100-1 在曲线对比图中简写为 100-1，其他类似。

表 3-5 内配型钢的钢管混凝土受弯构件参数一览表

试件 编号	钢管			型钢			f_{cu} (MPa)	剪跨 比	含钢 率 (%)	数据 来源
	D (mm)	t (mm)	f_{ty} (MPa)	采用工 字钢	截面 积 (mm ²)	f_{sy} (MPa)				
HC10-0	218	4.0	269	I 10	2324	288	74.3	2.752	15.51	关萍等
HC12-0	218	4.0	269	I 12	3570	314	74.3	2.752	20.15	(2003) ^[22]

3.3.3 典型构件的挠度分布状况

为进一步研究内配十字形型钢的圆钢管混凝土受弯构件的力学性能，本节采用以上有限元建模方法，设计典型受弯构件并进行有限元分析。该典型构件内配十字形型钢，构件基本数据为： $D=600\text{mm}$ ， $L=3000\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_t=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ 。

图 3-23 所示为典型受弯构件各特征点的挠度分布情况， $t=1/4$ 、 $t=1/2$ 、 $t=3/4$ 、 $t=1$ 对应的曲线分别表示将典型构件受弯过程均分为四个阶段，每个阶段末构件各特征点所对应的挠度分布状况。可见，随着挠度的逐渐增大，构件所受荷载（弯矩或条带加载力）也在逐渐增大，构件挠度曲线近似为正弦半波曲线。 μ_m 为构件八分点处的挠度， M 为构件纯弯段的弯矩。

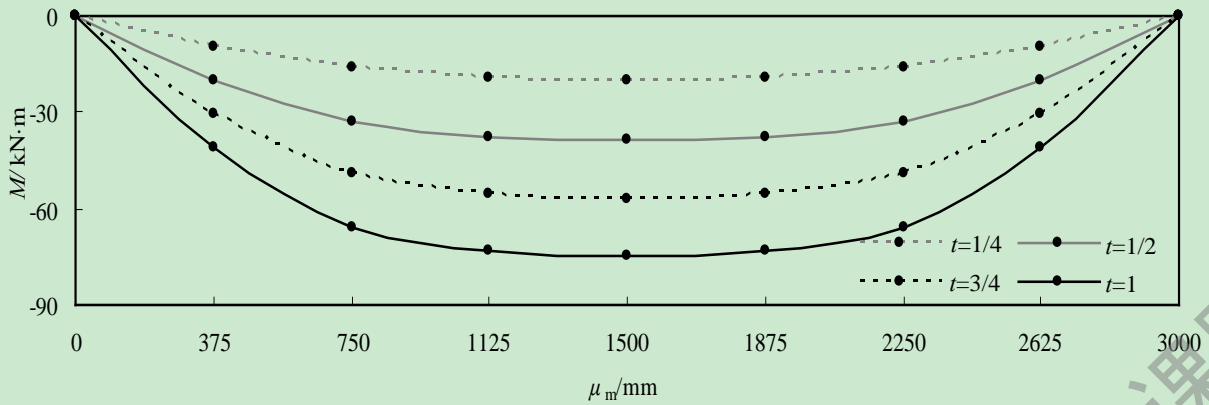


图 3-23 典型构件各特征点的挠度分布

3.3.4 弯矩-曲率关系曲线全过程分析

图 3-24 为典型构件的中截面弯矩-曲率($M-\varphi$)关系曲线,由曲线可知,内配十字形型钢的圆钢管混凝土受弯构件的 $M-\varphi$ 曲线大致可分为三个阶段,即:弹性阶段、弹塑性阶段和塑性强化阶段,其中 φ_e 、 M_e 、 φ_o 、 M_o 和 φ 、 M 分别表示弹性阶段末、弹塑性阶段末和塑性强化阶段末所对应的曲率和弯矩,以下为各阶段的特征描述^[16]。

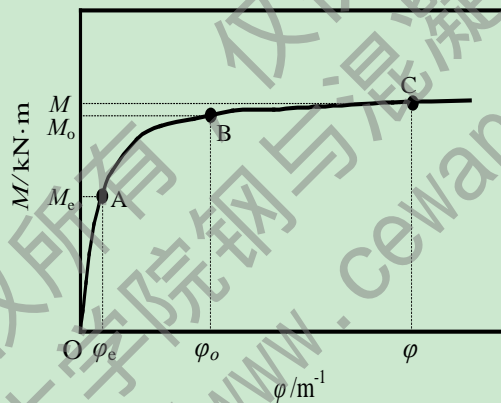


图 3-24 典型构件的弯矩-曲率关系曲线

弹性阶段 (OA 段): 在此阶段的内配十字形型钢圆钢管混凝土构件受弯过程中,内配型钢、压区混凝土以及外围钢管基本处于弹性状态,故构件 $M-\varphi$ 曲线基本成一斜直线,且曲率的增长幅度小于弯矩的增大幅度;此外,构件中和轴线与截面形心轴线基本重合;在该阶段末,受拉区的混凝土处于未开裂与开裂的临界状态。

弹塑性阶段 (AB 段): 在此阶段,受弯组合构件 $M-\varphi$ 曲线呈非线性增长关系,且曲率的增长幅度明显大于弯矩的增大幅度;构件的部分内配型钢、填充混凝土以及外围钢管进入塑性状态,混凝土受拉区不断扩大,构件截面刚度减小并出现应力重分布现象,中和轴线开始偏离截面形心轴线而不断向构件受压区域移动。

塑性强化阶段 (BC 段): 在此阶段,构件中的内配型钢、填充混凝土和外围钢管均处于塑性状态, $M-\varphi$ 关系曲线基本呈水平趋势,这是因为内配型钢、填充混凝土和外围钢管之间具有相互有利的贡献作用。另外,此阶段弯矩-曲率曲线没有下降段,说明组合构件具有较好的抗弯承载力和延性性能^[93]。

3.3.5 分部件承载力曲线

图 3-25 所示为典型构件中的组成部分(十字形型钢、圆钢管、钢管混凝土和型钢钢管混凝土)单独受弯时的 $M-\varphi$ 关系曲线图。由图中各条曲线可知,随着构件曲率的增大,构件抗弯承载力也在逐渐提高。型钢构件和钢管构件的抗弯承载力最低,钢管构件抗弯承载力高于型钢构件承载力,这是因为钢管横截面对中性轴的惯性矩远大于型钢横截面的惯性矩;钢管混凝土构件的抗弯承载力显著高于钢管构件的抗弯承载力,这是因为钢管混凝土构件中有混凝土,而混凝土的存在能够很好地改善钢管发生局部屈曲,有利于构件承载力的提高;内配型钢钢管混凝土构件的抗弯承载力最大,远高于钢管混凝土承载力,这是因为型钢、混凝土和钢管的相互贡献,即:型钢对构件有一定的承载力贡献,混凝土的存在延缓或是避免了型钢和钢管发生局部屈曲,钢管对混凝土和型钢提供约束作用^[8]。图 26 所示为各构件单独受弯的应力云图,其中的钢管应力云图并非图 25 中所对应的曲线末时刻云图,因为对应于曲线末时刻的钢管构件变形已经很严重了。

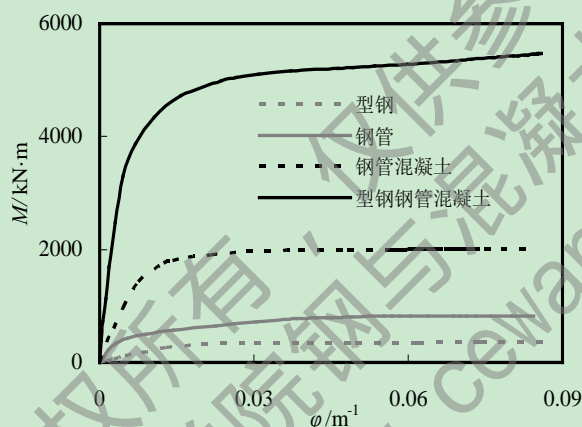


图 3-25 分部件受弯时的弯矩-曲率关系曲线

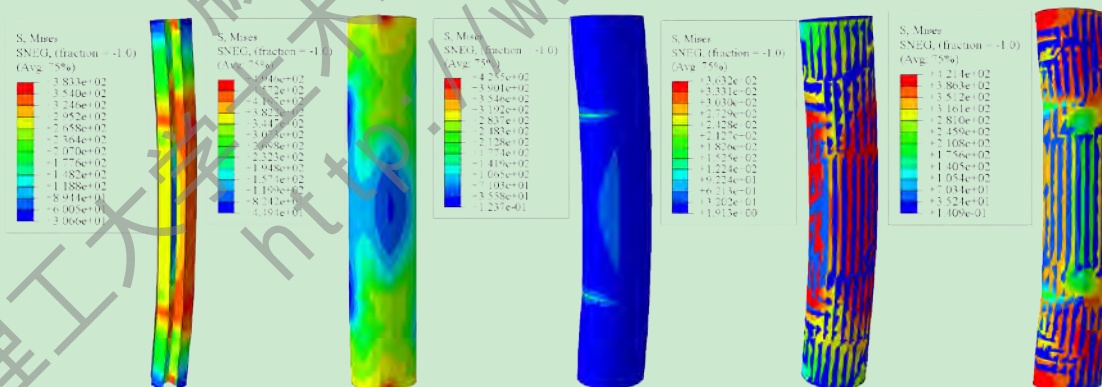


图 3-26 分部件受弯变形后的应力云图

3.3.6 参数分析

为了对内配十字形型钢的圆钢管混凝土受弯构件进行更加深入的研究分析,本小节分别对影响该类组合构件弯矩-曲率($M-\varphi$)曲线的主要因素进行了参数分析,这些主要因素包括混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管截面含钢率和型钢截面含钢率。

下面通过有限元模拟来研究分析以上因素对构件的影响状况，图 3-27 为某一参数变化时典型受弯构件的中截面弯矩-曲率关系曲线图。

(1) 混凝土强度的影响

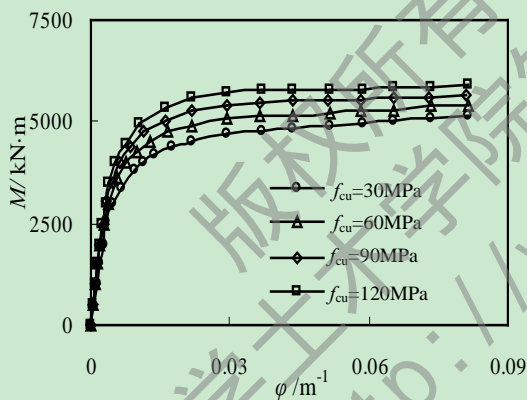
图 3-27(a)给出了不同内填混凝土强度时内配十字形型钢的圆钢管混凝土受弯构件的 $M-\varphi$ 关系曲线。由图中曲线可知，随着混凝土强度的增大，该曲线的弹性阶段刚度变化很小，但构件的抗弯承载力却在逐渐增大。这是因为不同混凝土强度时的弹性模量相差不是太大，故曲线弹性阶段刚度变化很小。此外，由于构件受弯时，填充混凝土承担较少的弯矩，故混凝土强度增大时，其对构件抗弯承载力的贡献并不大，例如， $f_{cu}=60\text{MPa}$ 时构件的抗弯承载力相比于 $f_{cu}=30\text{MPa}$ 的构件提高了约 8.4%^[93]。

(2) 钢管材料强度的影响

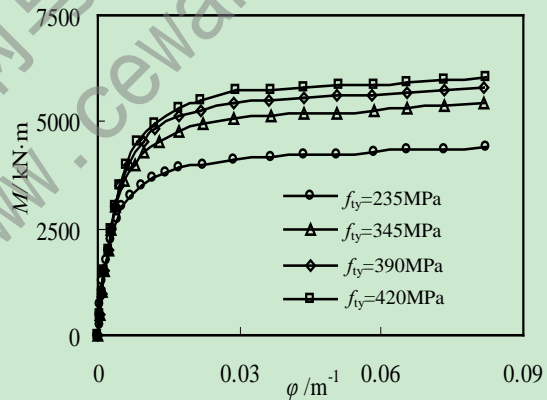
图 3-27(b)给出了不同钢管材料强度时受弯组合构件的 $M-\varphi$ 关系曲线。由图中曲线可知，随着钢管材料强度的增大，曲线的弹性阶段刚度变化极小，但构件的抗弯承载力却在逐渐增大。

(3) 型钢材料强度的影响

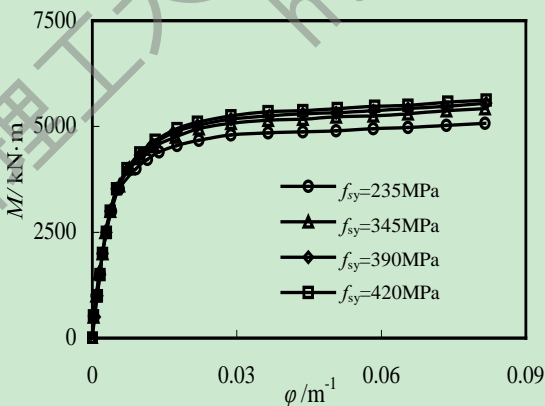
图 3-27(c)给出了不同型钢材料强度时受弯组合构件的 $M-\varphi$ 关系曲线。由图中曲线可知，随着型钢材料强度的增大，曲线的弹性阶段刚度基本没变化，构件的抗弯承载力却在增大，但增大幅度很小。



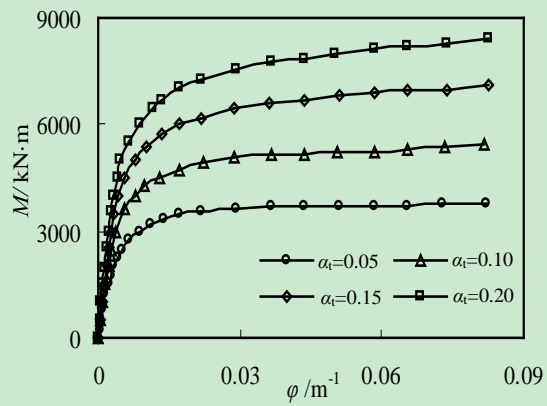
(a) 混凝土强度的影响



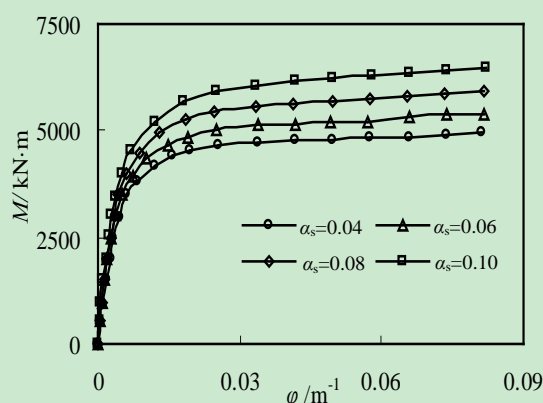
(b) 钢管材料强度的影响



(c) 型钢材料强度的影响



(d) 钢管截面含钢率的影响



(e) 型钢截面含钢率的影响

图 3-27 不同参数时构件中截面的弯矩-曲率关系曲线

(4) 钢管截面含钢率的影响

图 3-27(d)给出了不同钢管截面含钢率时受弯组合构件的 $M-\phi$ 关系曲线。从图中曲线可知，随着钢管截面含钢率的增加，曲线的弹性阶段刚度有一定程度的变化，构件抗弯承载力则大幅提高。这主要是因为随着钢管含钢率的增加，构件中钢材用量增多，而钢材的弹性模量值又比混凝土的弹性模量值大得多，故曲线弹性阶段刚度有一定程度的提高。另外，构件弯矩主要由外围钢管承担，钢材用量的增加必然可以承担较多弯矩，此外，钢材用量的增加意味着钢管壁厚增厚，这可以加强钢管对混凝土的约束效应作用，同样有利于提高构件抗弯承载力。例如， $\alpha_t=0.10$ 的构件抗弯承载力相比于 $\alpha_t=0.05$ 的构件提高了约 40.5%。

(5) 型钢截面含钢率的影响

图 3-27(e)给出了不同型钢截面含钢率时受弯组合构件的 $M-\phi$ 关系曲线。从图中曲线可知，随着型钢截面含钢率的增加，构件的抗弯承载力逐渐增强。这是因为型钢截面含钢率的增加意味着相同混凝土用量的减少，而在构件受弯的过程中，混凝土受拉区部分会逐渐开裂并最终退出工作，但钢材却有较好的抗拉性能，故型钢截面含钢率的增加改善了构件的抗拉性能，有利于承载力的提高。

综上所述，对于内配十字型钢的圆钢管混凝土受弯构件而言，混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管截面含钢率和型钢截面含钢率对受弯构件 $M-\phi$ 关系曲线的弹性阶段刚度以及构件抗弯承载力的影响各不相同，但曲线大致形状是一致的。

3.4 内配十字型钢圆钢管混凝土受剪构件的力学性能

研究内配十字型钢圆钢管混凝土构件在纯剪作用下的工作性能和受力机理是研究组合构件复合受剪的前提，因此对构件受纯剪的研究显得尤为必要。本节在有限元模型验证的基础上，确定了构件纯剪、弯剪和弯曲破坏的剪跨比界限，进而对构件受纯剪情况进行了深入的研究和分析。

3.4.1 有限元模型

本节采用有限元软件 ABAQUS 对内配十字型钢圆钢管混凝土受剪构件进行分析。图 3-28 所示为其他学者所研究的两种试验构件的受剪示意图, 根据这两种受剪方式得到的受剪构件有限元模型变形图如图 3-29 所示。

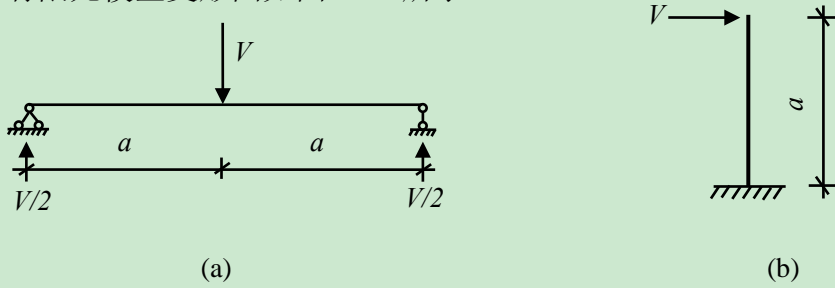


图 3-28 构件受力示意图

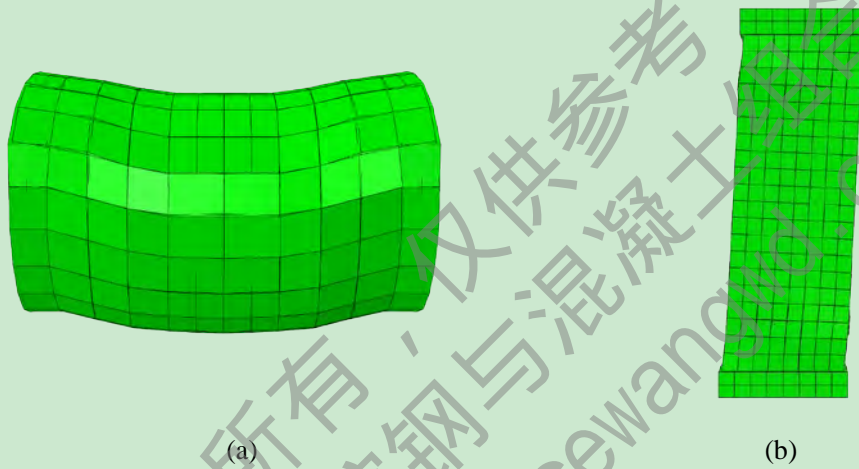
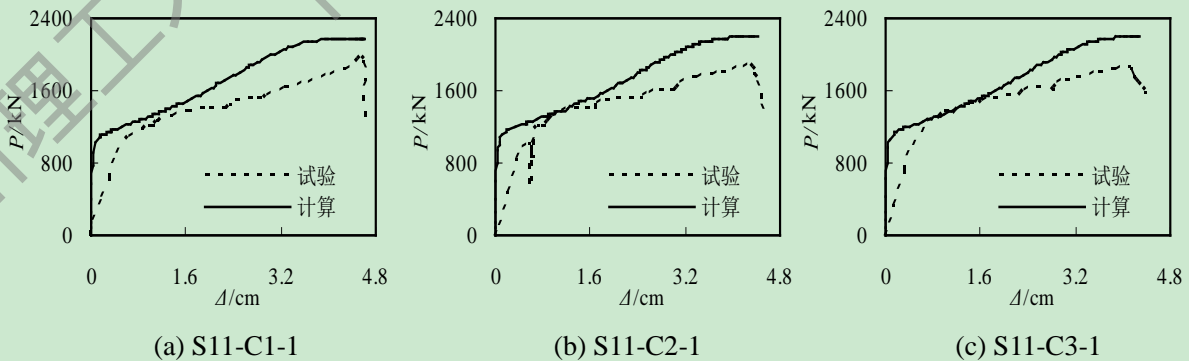


图 3-29 构件变形示意图

3.4.2 模型验证

由于目前关于内配型钢的钢管混凝土构件受剪的试验很少, 本文收集了关于钢管混凝土受剪的相关试验数据进行数值模拟, 用以验证有限元建模的正确性。图 3-30 所示为部分数值计算结果曲线和试验结果曲线的对比图, 表 3-6 所示为所模拟钢管混凝土受剪构件的参数一览表, 这些数据取自于论文徐春丽(2004)^[27]和黄勇等(2011)^[50]。



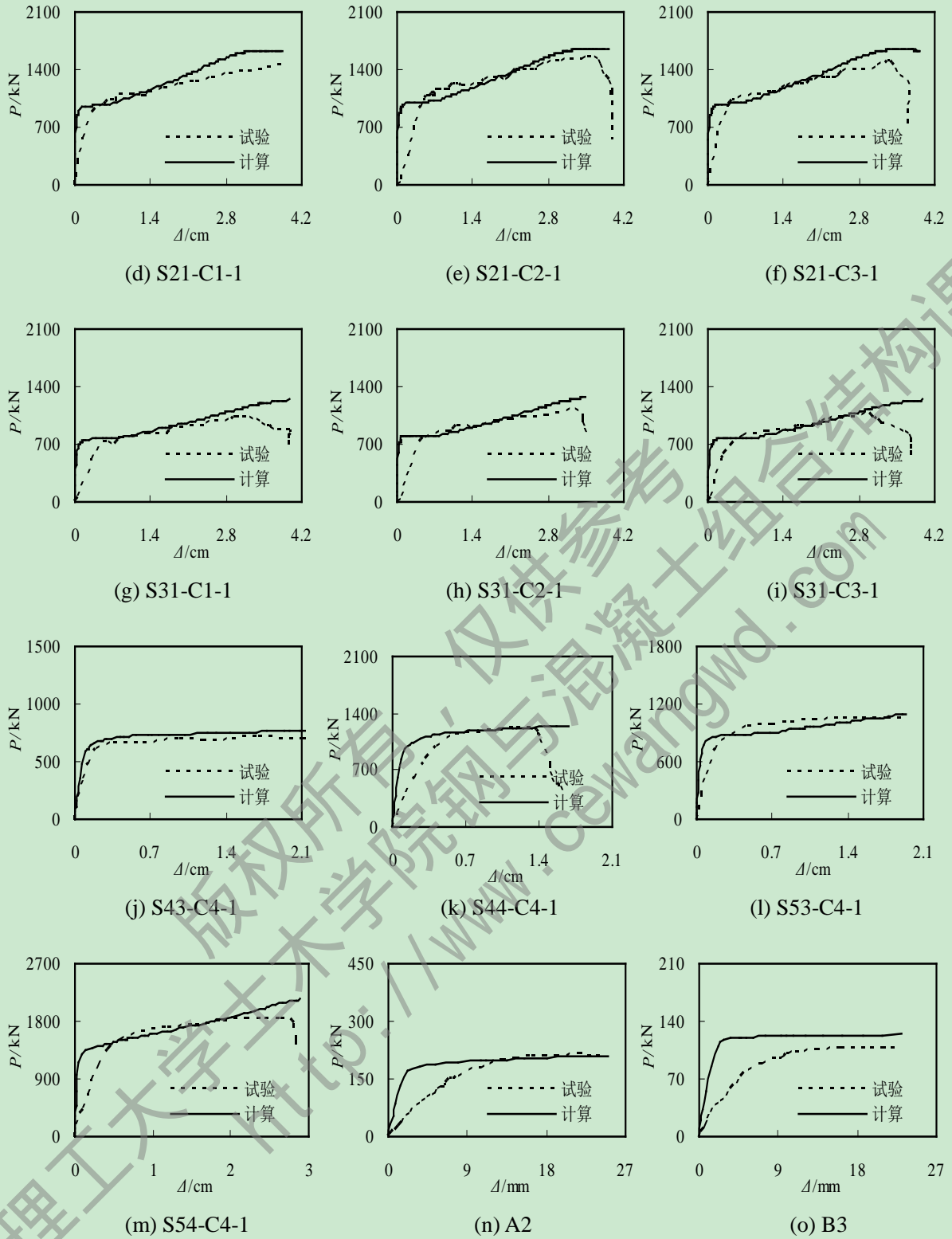


图 3-30 计算曲线与试验曲线对比图

由计算结果曲线和试验结果曲线的对比图可知，除了构件计算曲线的弹性段刚度偏大之外，两条曲线吻合较好。查阅徐春丽论文可知，造成两曲线刚度差异的主要原因可能是：(1)试验构件跨中位移包含了支座处钢管自身变形而产生的位移；(2)试验构件存在初始缺陷(徐春丽，2004)^[27]。

表 3-6 钢管混凝土受剪构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B)$ (mm)	t (mm)	H/D	f_y (MPa)	$f_{ck}(f_{cu})$ (MPa)	数据来源
圆形	S11-C1-1	160	5.5	0.4	377	25.9	徐春丽 (2004) ^[27]
	S11-C2-1	160	5.5	0.4	377	32.4	
	S11-C3-1	160	5.5	0.4	377	29.5	
	S21-C1-1	166	4.4	0.4	345	25.9	
	S21-C2-1	166	4.4	0.4	345	32.4	
	S21-C3-1	166	4.4	0.4	345	29.5	
	S31-C1-1	165	3	0.4	408	25.9	
	S31-C2-1	165	3	0.4	408	32.4	
	S31-C3-1	165	3	0.4	408	29.5	
	S43-C4-1	161	6.5	0.5	445	20.1	
	S44-C4-1	161	6.5	1	445	20.1	
	S53-C4-1	165	4.1	0.5	385	20.1	
	S54-C4-1	165	4.1	1	385	20.1	
	方形	A2	165	4	2.87	306.2	
	B3	150	4	2.61	306.2	(34.2)	黄勇等(2011) ^[50]

3.4.3 纯剪、弯剪和弯曲的界限确定

剪跨比不同时, 构件所受的破坏形式是有很大的区别的, 为了研究内配十字型钢的圆钢管混凝土构件的具体破坏形式, 采用有限元软件对不同剪跨比的典型构件进行数值计算研究。内配十字型钢的圆钢管混凝土典型构件基本数据为: $D=600\text{mm}$, $f_{cu}=60\text{MPa}$, $f_{ty}=345\text{MPa}$, $f_{sy}=345\text{MPa}$, $\alpha_t=0.1$, $\alpha_s=0.06$ 。图 3-31 为计算得到的内配十字型钢圆钢管混凝土构件的 $\tau/\tau_{\max}-m$ 关系曲线, 其中的 m 表示剪跨比, τ 表示剪应力, τ_{\max} 表示剪跨比为 0.1 时构件的 $\tau-\gamma$ (剪应变)关系曲线弹塑性段的峰值应力。曲线中各个数值点所对应构件的剪跨比依次为: 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.75、1、1.5、2、3、4、5、6、8、10 和 12。

由图中曲线可知, 随着构件剪跨比的逐渐增大, τ/τ_{\max} 在依次降低。当 $m \leq 0.3$ 时, τ/τ_{\max} 降低幅度很大; 当 $0.3 < m \leq 6$ 时, τ/τ_{\max} 降低幅度有所减缓; 当 $m > 6$ 时, τ/τ_{\max} 降低幅度相对平缓。基于以上研究分析, 本文定义: 当 $m \leq 0.3$ 时, 内配十字型钢的圆钢管混凝土以剪切破坏为主; 当 $0.3 < m \leq 6$ 时, 构件以弯剪破坏为主; 当 $m > 6$ 时, 构件以弯曲破坏为主^[8]。综上, 本文将 $m=0.3$ 的构件抗剪强度定义为内配十字型钢的圆钢管混凝土纯剪构件的抗剪强度。

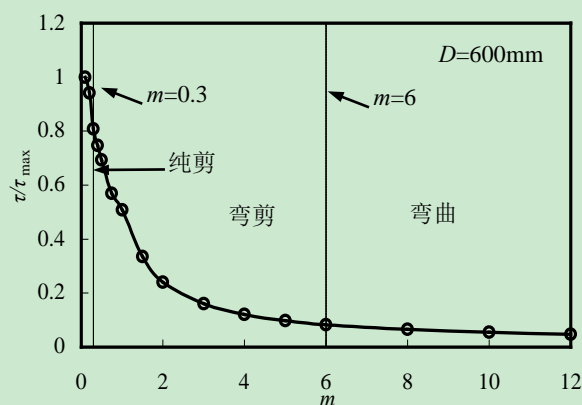


图 3-31 $\tau/\tau_{max}-m$ 关系曲线

3.4.4 典型构件的分部件承载力对比曲线

图 3-32 所示为内配十字型钢的圆钢管混凝土典型构件的各分部件(型钢、钢管、型钢混凝土、钢管混凝土和型钢钢管混凝土)单独受纯剪荷载时的剪力-位移曲线。由曲线可知,各分部件的 $P-\Delta_p$ 曲线的弹性段刚度基本没区别,但构件的承载力却依次大幅提高,而且具有较好的延性和抗剪承载力。

3.4.5 承载力分配曲线

图 3-33 为标准构件受剪的承载力分配曲线,由曲线可知,混凝土承受荷载较多,钢管承受荷载较少,型钢承受荷载最少。而这三者有效组合后的内配型钢钢管混凝土构件,由于各材料的相互有利贡献,表现出较好的抗剪承载力,并具有很好的延性。图 3-34 所示为标准构件的应力云图,由应力云图可知,相比于型钢和钢管而言,混凝土应力还是比较小的。

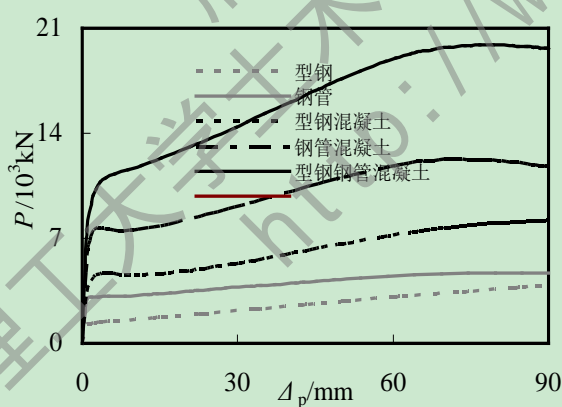


图 3-32 分部件承载力对比曲线

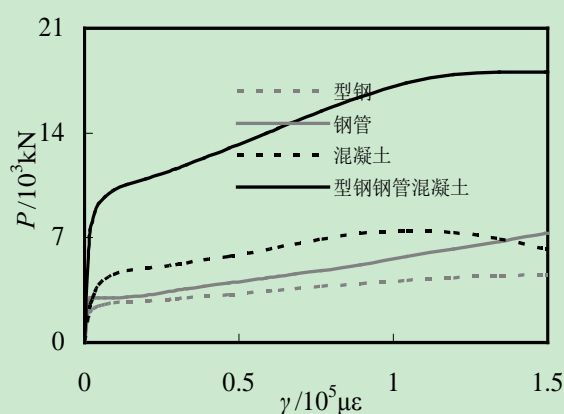


图 3-33 构件承载力分配曲线

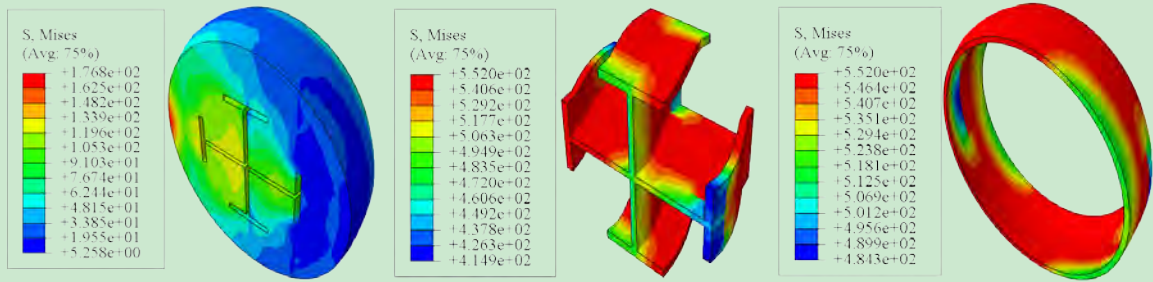
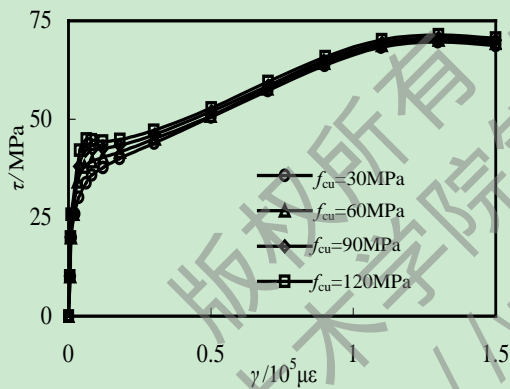


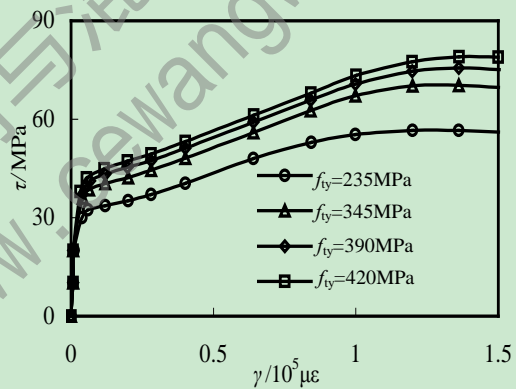
图 3-34 构件应力云图

3.4.6 参数分析

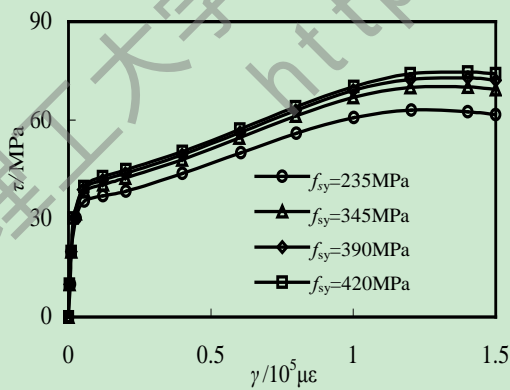
图 3-35 所示为标准构件在不同参数时的剪应力-剪应变关系曲线。由图中曲线可知，混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管截面含钢率和型钢截面含钢率的变化对 τ - γ 曲线的弹性段剪切刚度基本没影响，对构件的抗剪承载力影响各不相同，但总趋势是一样的，即：随着变化参数的依次增大，构件抗剪承载力也在逐渐提高，且表现出良好的延性和抗剪承载力性能。其中，钢管截面含钢率和型钢截面含钢率的变化对构件抗剪承载力的影响较为显著，钢管材料强度和型钢材料强度对其影响不大，混凝土强度的影响极小。



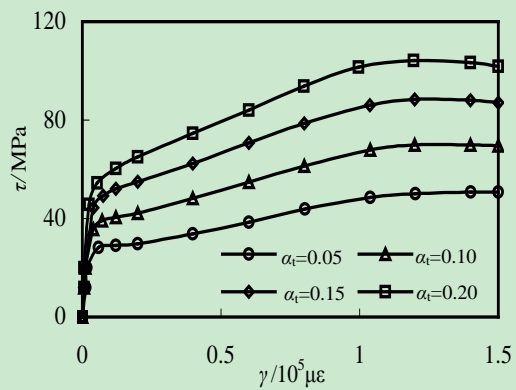
(a) 混凝土强度的影响



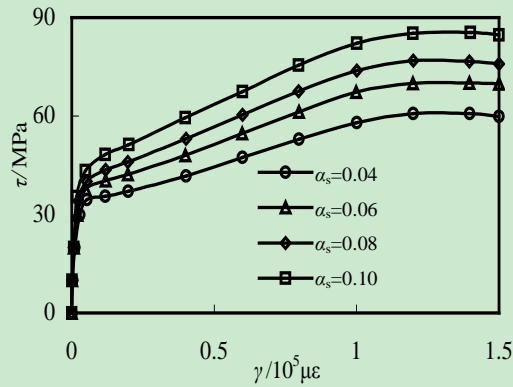
(b) 钢管材料强度的影响



(c) 型钢材料强度的影响



(d) 钢管截面含钢率的影响



(e) 型钢截面含钢率的影响

图 3-35 不同参数时构件的 τ - γ 关系曲线

3.5 本章小结

基于本章研究，可得结论如下：

(1) 采用有限元软件对受扭、弯的组合构件进行数值建模和模型验证，在此基础上，对典型内配十字型钢的圆钢管混凝土受扭、弯构件的扭矩-转角曲线、应力分布状况、挠度、弯矩-曲率曲线及承载力状况等进行了深入的研究分析，最后还进行了参数分析；

(2) 确定了组合构件纯剪破坏、弯剪破坏、弯曲破坏的界限。在此基础上，对典型内配十字型钢的圆钢管混凝土纯剪构件进行有限元建模，并对构件承载力分配曲线、应力分布状况等进行研究，最后还进行了参数分析。

第4章 内配十字型钢圆钢管混凝土偏压、压扭和弯扭构件的力学性能研究

4.1 引言

构件常见的受力形式除了第二章、第三章所讲的几种简单受力形式外，构件受偏压荷载的情况也是很常见的。另外，在实际工程中，构件往往是受多种荷载作用的，也就是说，构件处于复合受力的情况。因此，本章继续对内配十字型钢的圆钢管混凝土偏压构件、压扭构件和弯扭构件进行深入的研究。

4.2 内配十字型钢圆钢管混凝土偏压构件的力学性能

偏压也是实际工程中较常见的受力形式，另外，对偏压构件的研究也是研究构件复合受力的基础，因此很有必要对这类构件进行研究，本节将采用有限元软件对内配十字型钢圆钢管混凝土偏压构件进行分析。

4.2.1 有限元模型

本文建立偏压构件的数值模型时，构件一端线约束，另一端的偏心线上施加位移荷载，为避免出现应力集中现象，在构件两端建立刚性垫板，垫板尺寸不小于构件截面尺寸。构件网格划分时，三向尺寸相差不能太大。

4.2.2 模型验证

查阅相关资料可知，国内外学者对钢筋混凝土偏压构件、型钢混凝土偏压构件以及钢管混凝土偏压构件等做了许多试验研究和理论分析，其中，余志武和丁发兴(2008)^[42]、陈刚花和李斌(2006)^[94]、陈宇超(2009)^[60]对 2 根圆形截面、9 根方形截面的钢管混凝土偏压构件进行了研究，王连广等(2010)^[7]对 6 根内配型钢的圆形截面钢管混凝土偏压构件进行了分析。为了验证采用有限元软件所建立偏压构件模型的正确性，本节对以上学者所做试验研究的相关构件进行数值模拟并计算，计算结果曲线与以上学者所做试验的结果曲线的对比如图 4-1~图 4-3 所示，表 4-1、表 4-2 为相关偏压构件的参数一览表。

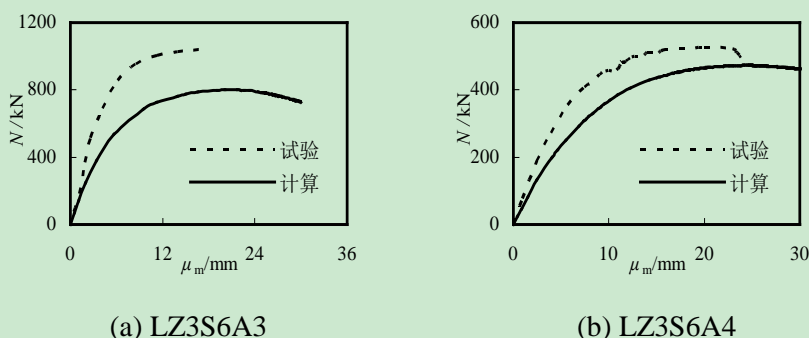


图 4-1 圆钢管混凝土

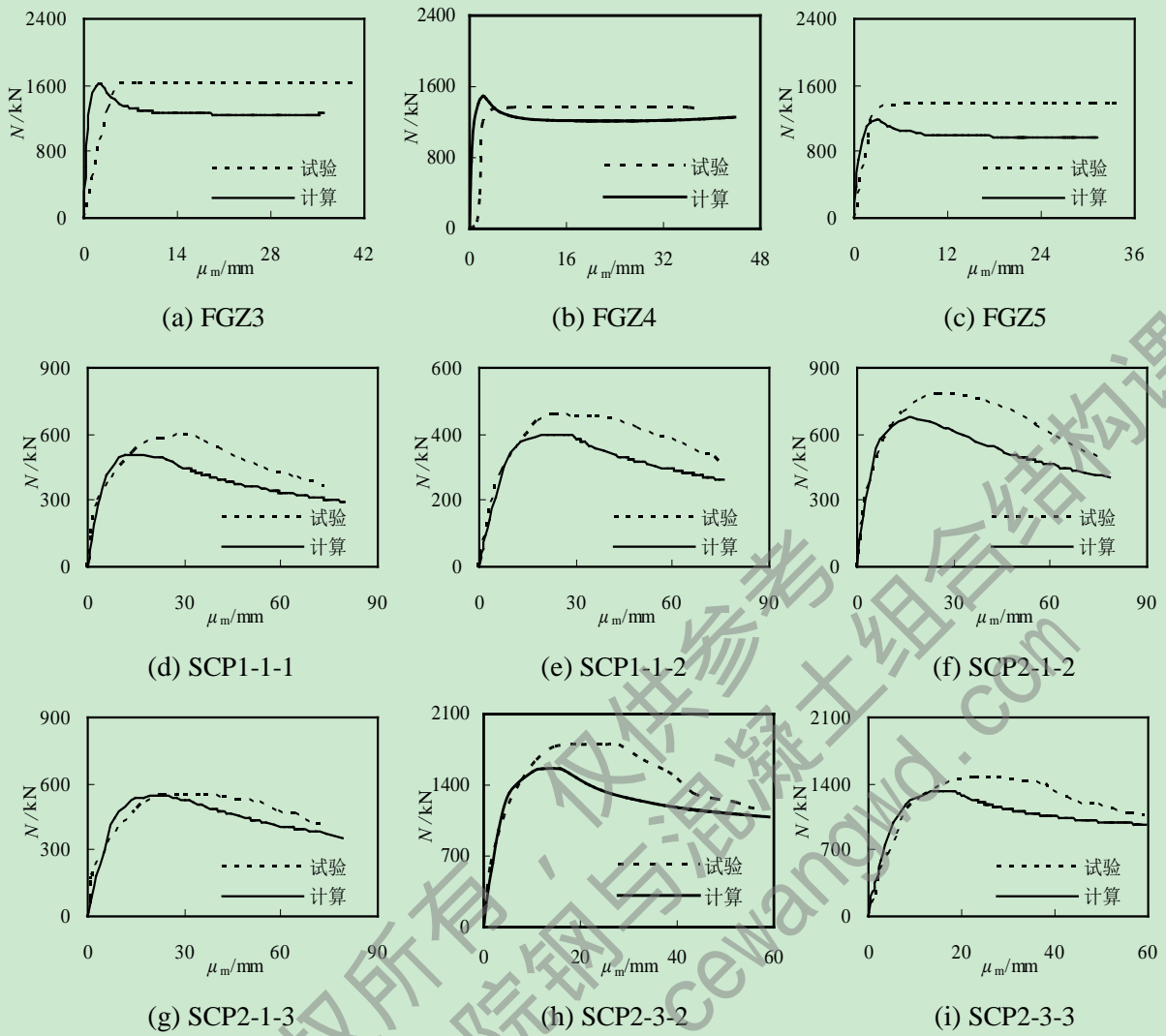


图 4-2 方钢管混凝土

表 4-1 钢管混凝土偏压构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	e	数据来源
圆形	LZ3S6A3	165×2.73×2046	350	77.2	27	余志武和 丁发兴 (2008) ^[42]
	LZ3S6A4	165×2.77×2041	350	77.2	65	
方形	FGZ3	150×7.8×600	282	85.18	25	陈刚花和李斌 (2006) ^[95]
	FGZ4	150×7.8×600	282	68.82	25	
	FGZ5	150×7.8×600	282	79.85	50	
	SCP1-1-1	120×3.84×2253	330.1	28.3	15	陈宇超 (2009) ^[60]
	SCP1-1-2	120×3.84×2253	330.1	28.3	30	
	SCP2-1-2	120×5.86×2253	321.1	35.1	15	
SCP2-1-3	120×5.86×2253	321.1	35.1	30		
SCP2-3-2	200×5.86×2250	321.1	35.1	30		
SCP2-3-3	200×5.86×2250	321.1	35.1	50		

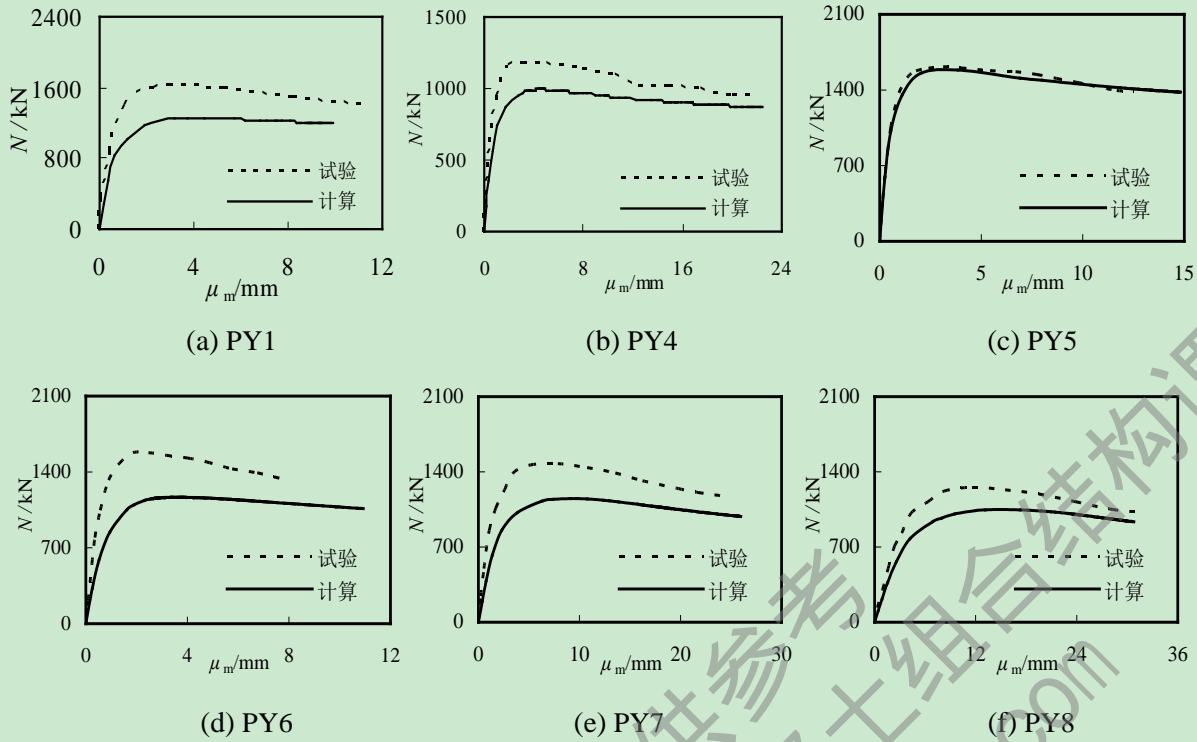


图 4-3 内配型钢的钢管混凝土偏压构件

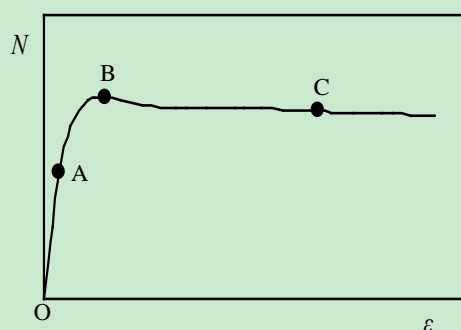
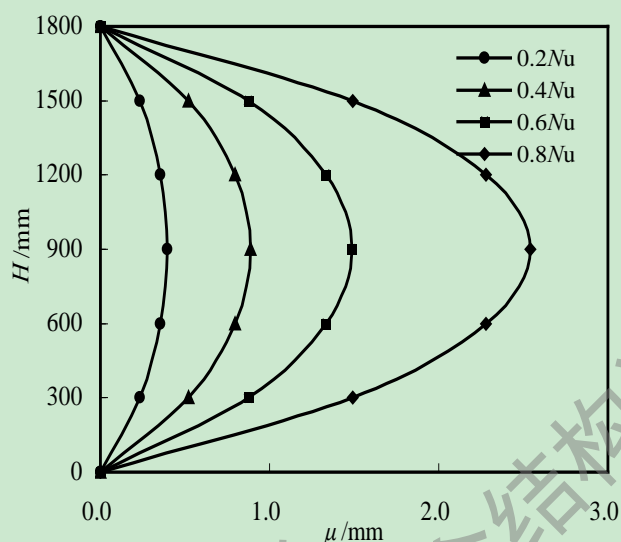
表 4-2 内配型钢的圆钢管混凝土偏压构件参数一览表

试件 编号	$D \times t \times L$ (mm)	f_{ty} (MPa)	f_{sy} (MPa)	f_c (MPa)	e (mm)	加载 方向	型钢类型 工字形	数据来源
PY1	165×4.2×550	310	293	48.6	0	轴心	I10	王连广等 (2010) ^[7]
PY4	165×4.2×550	310	293	48.6	60	强轴	I10	
PY5	165×4.2×550	310	293	48.6	20	弱轴	I10	
PY6	165×4.2×550	310	293	48.6	40	弱轴	I10	
PY7	165×4.2×990	310	293	48.6	40	强轴	I10	
PY8	165×4.2×1452	310	293	48.6	40	强轴	I10	

4.2.3 典型构件的荷载-变形关系曲线全过程分析

为进一步研究内配十字型钢的圆钢管混凝土偏压构件的力学性能和工作机理,本文采用有限元分析方法建立典型偏压组合构件进行研究分析,典型构件的基本数据为: $D=600\text{mm}$, $L=1800\text{mm}$, $f_{cu}=60\text{MPa}$, $f_{ty}=345\text{MPa}$, $f_{sy}=345\text{MPa}$, $\alpha_t=0.1$, $\alpha_s=0.06$, $e=120\text{mm}$ 。

图 4-4 所示为典型偏压构件的 $N-\varepsilon$ 关系曲线,其中 N 表示偏心荷载, ε 表示纵向应变。图中 B 点为荷载峰值点,经计算,偏心荷载作用构件的极限承载力近似为轴心荷载作用构件承载力的 60%。由图中曲线知,偏压构件的 $N-\varepsilon$ 关系曲线可分为三个受力阶段,即:弹性阶段(OA)、弹塑性阶段(AB)、塑性阶段(BC),各阶段特征如下^[79]:

图 4-4 典型偏压构件的 $N-\varepsilon$ 关系曲线图 4-5 典型偏压构件的 $H-\mu$ 关系曲线

弹性阶段(OA): 在弹性阶段, 构件的 $N-\varepsilon$ 关系曲线基本成一直线且刚度很大, 另外, 由于构件所填充的混凝土为高强混凝土, 故弹性阶段相对较长, A 点为外围钢管开始屈服的起点;

弹塑性阶段(AB): 在弹塑性阶段, 由于施加在构件上的偏心荷载逐渐增大, 构件外围钢管和内配型钢材料开始部分屈服, 再加上混凝土开始出现裂缝, 使得构件整体刚度下降, 表现为 AB 曲线段斜率不断降低, 成非线性趋势。

塑性阶段(BC): 在塑性阶段, 虽然钢材屈服较严重, 且混凝土大量开裂, 但由于外围钢管可为混凝土提供约束, 故可较好改善高强混凝土的延性。

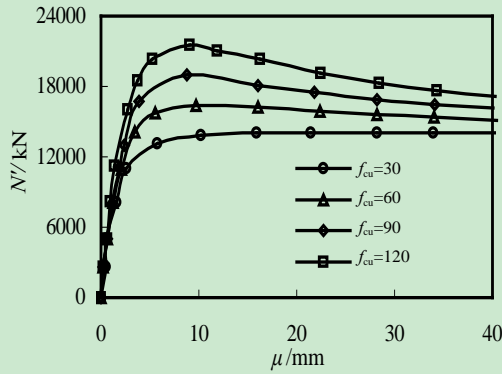
图 4-5 所示为典型偏压构件的 $H-\mu$ 关系曲线, 其中, H 表示构件上所研究挠度对应点至构件底部的距离, μ 表示构件不同点的挠度。由图中曲线可知, 构件的挠度随着施加在构件上的偏心荷载的增大而增大, 而且在某一荷载作用下的挠度曲线近似为正弦半波曲线。

4.2.4 参数分析

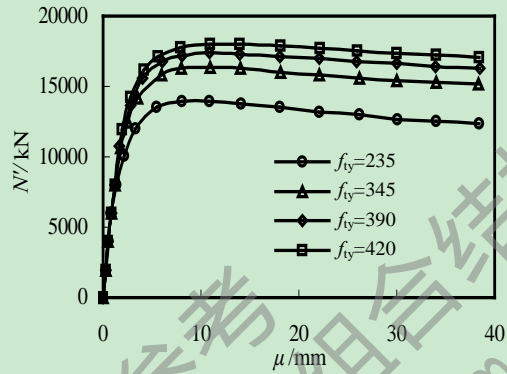
为了更深入了解相关因素对典型内配十字型钢圆钢管混凝土偏压构件的影响程度, 本节对可能影响构件承载力的因素进行了参数分析, 如图 4-6 所示。

由图可知, 混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管含钢率对偏压构件的影响各不相同, 但影响趋势是一样的, 构件承载力均是随着混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管含钢率的提高而提高的, 但提高幅度有区别, 承载力随着钢管含钢率的提高而大幅提高, 混凝土强度、钢管材料强度的影响次之, 型钢材料强度的影响最小, $f_{sy}=345$ 、 $f_{sy}=390$ 、 $f_{sy}=420$ 时偏压构件的荷载-挠度曲线基本可以重合。此外, 钢管含钢率的提高使得构件荷载-挠度曲线的弹性刚度也略有提高, 而其他三参数的改变对曲线的弹性刚度几乎没影响。

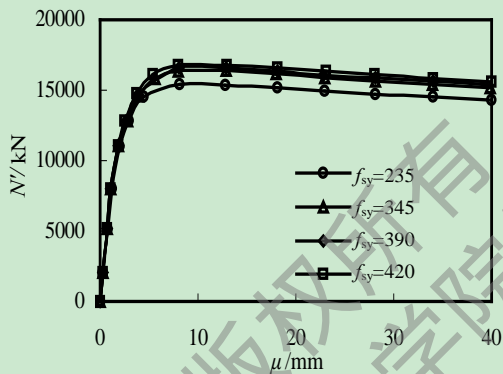
图中的(e)所示为偏心距对构件承载力的影响状况对比图。由图中的对比曲线可知,随着构件偏心距的不断增大,构件荷载-挠度曲线的弹性刚度加速降低,而且承载力也在大幅下降,所研究的偏心距为 180 的构件承载力大约为偏心距为 30 的构件承载力的 53.9%。因此,在实际工程中应尽量防止构件承受偏心受压荷载,尤其是大偏心荷载,以免造成构件破坏^[83]。



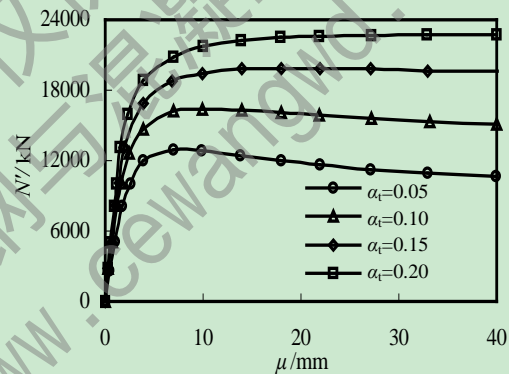
(a) 混凝土强度的影响



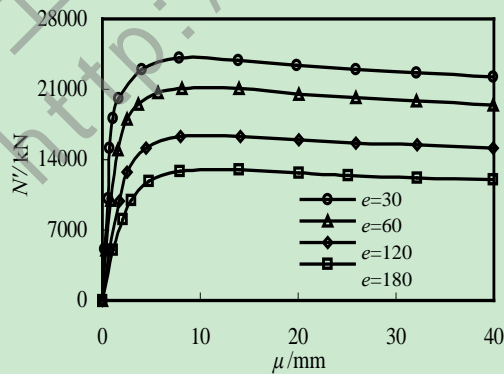
(b) 钢管材料强度的影响



(c) 型钢材料强度的影响



(d) 钢管含钢率的影响



(e) 偏心距的影响

图 4-6 典型偏压构件参数分析

4.3 内配十字型钢圆钢管混凝土压扭构件的力学性能

由于压扭构件所受荷载为轴力和扭矩复合作用的效果，这两种形式的荷载作用顺序的不同将会引起构件不同的力学性能，因此有必要对构件在不同加载路径下的受力状况进行研究分析。常见压扭构件加载路径如图 4-7 所示，即：(1)加载路径 I：先进行轴力加载，再进行扭矩加载；(2)加载路径 II：先进行扭矩加载，再进行轴力加载；(3)加载路径 III：轴力、扭矩按比例同时加载^[8]。

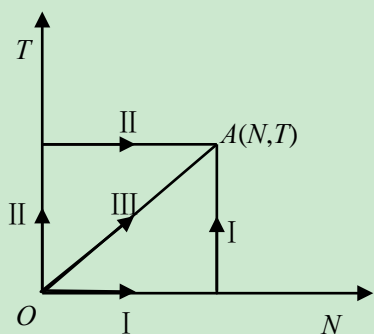


图 4-7 压扭构件加载路径示意图

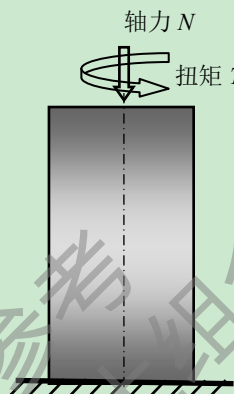


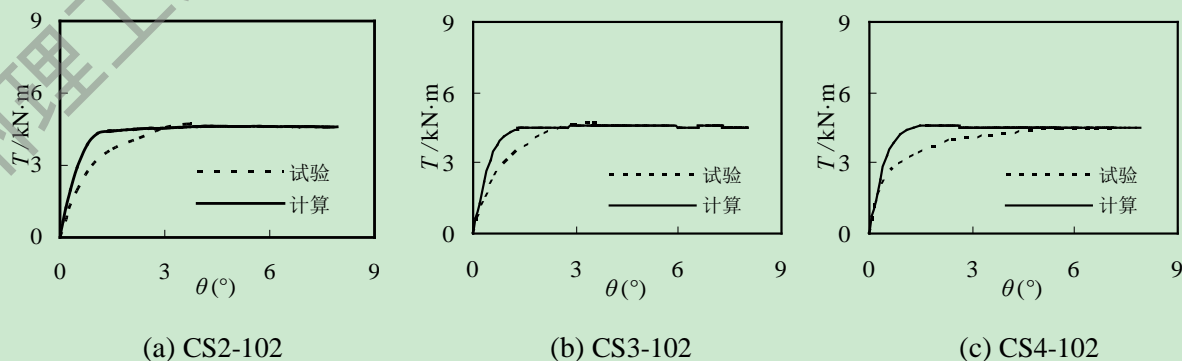
图 4-8 压扭构件计算模型

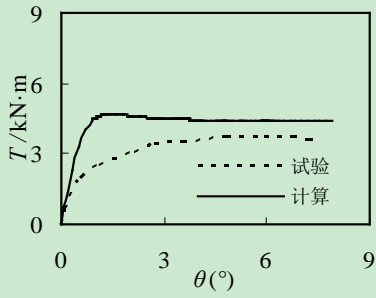
4.3.1 有限元模型

图 4-8 所示为有限元软件分析内配十字型钢的圆钢管混凝土压扭构件的数值模型示意图，构件底端固结，顶端自由，并在自由端施加轴力和弯矩。

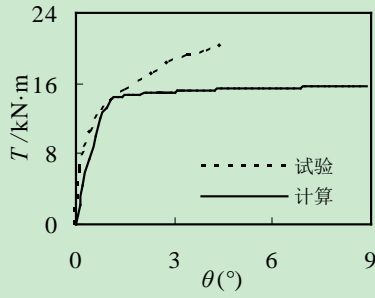
4.3.2 模型验证

查阅相关资料，国内外对钢筋混凝土、型钢混凝土以及钢管混凝土的压扭构件均有研究与分析，其中，徐积善和宫安(1991)^[95]、宫安(1989)^[91]、周竞(1990)^[92]、陈逸玮(2003)^[90]对 22 根圆形截面、2 根方形截面的钢管混凝土压扭构件进行了研究。为验证本文所建立的内配十字型钢圆钢管混凝土压扭构件模型的正确性，采用有限元软件对前面学者所研究的构件进行数值模拟并分析，模拟结果曲线与试验结果曲线的对比如图 4-9 所示，由图中对比曲线可知，模拟结果与试验结果吻合较好，故建模方法可行。表 4-3 所示为钢管混凝土压扭构件参数一览表。

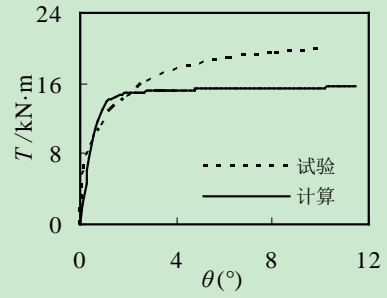




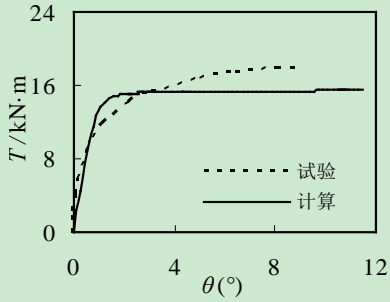
(d) CS5-102



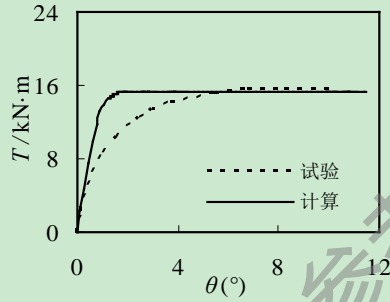
(e) CS2-114



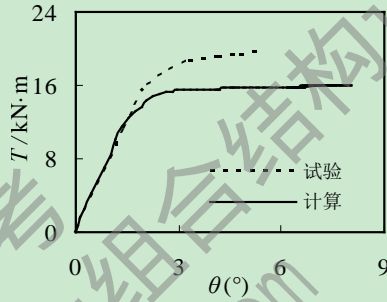
(f) CS3-114



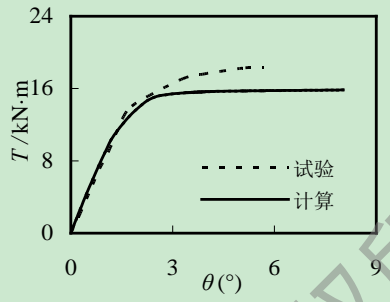
(g) CS4-114



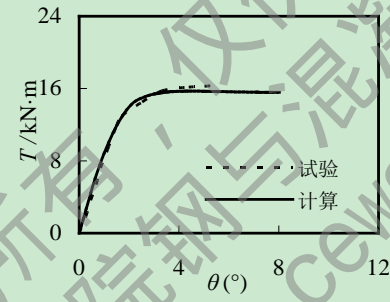
(h) CS5-114



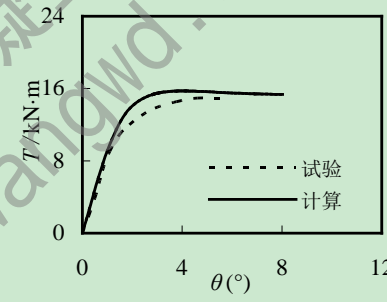
(i) CSS2



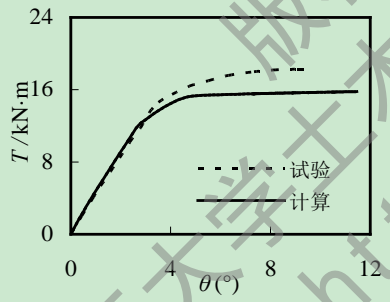
(j) CSS3



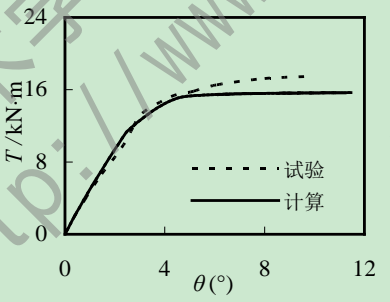
(k) CSS4



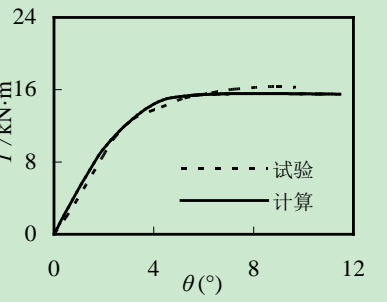
(l) CSS5



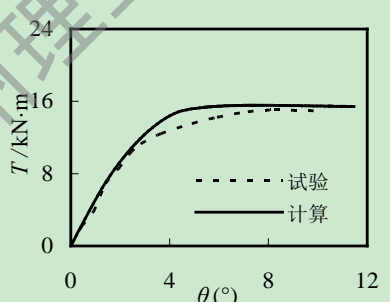
(m) CSM2



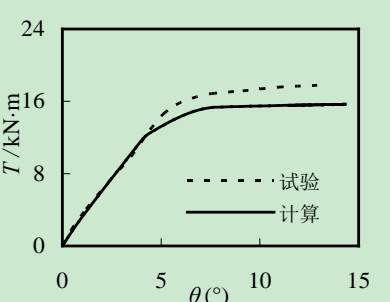
(n) CSM3



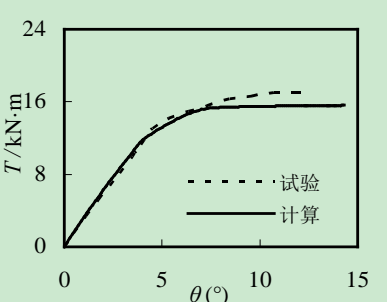
(o) CSM4



(p) CSM5



(q) CSL2



(r) CSL3

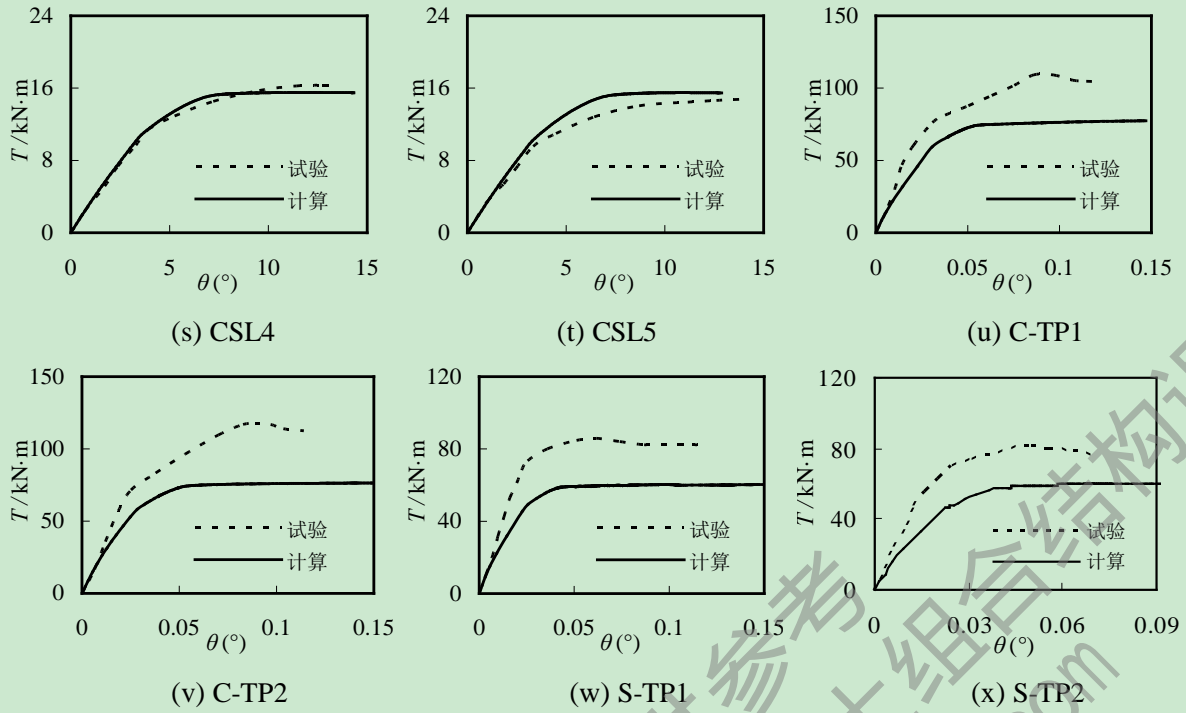


图 4-9 钢管混凝土构件

表 4-3 钢管混凝土压扭构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D(B) \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	n	数据来源
圆形	CS2-102	102.4×1.6×406	242.3	32.9	0.25	徐积善和宫安(1991) ^[96]
	CS3-102	102.4×1.6×406	242.3	32.9	0.5	
	CS4-102	102.4×1.6×406	242.3	32.9	0.75	
	CS5-102	102.4×1.6×406	242.3	32.9	0.85	
	CS2-114	114×4.5×387	280	27.4	0.25	
	CS3-114	114×4.5×387	280	27.4	0.5	
	CS4-114	114×4.5×387	280	27.4	0.75	
	CS5-114	114×4.5×387	280	27.4	0.85	
	CSS2	114×4.5×800	301.9	21.9	0.25	周竟(1990) ^[92]
	CSS3	114×4.5×800	301.9	21.9	0.5	
	CSS4	114×4.5×800	301.9	21.9	0.75	
	CSS5	114×4.5×800	301.9	21.9	0.85	
	CSM2	114×4.5×1480	301.9	20.9	0.25	
	CSM3	114×4.5×1480	301.9	20.9	0.5	
	CSM4	114×4.5×1480	301.9	20.9	0.75	
CSM5	114×4.5×1480	301.9	20.9	0.85		
CSL2	114×4.5×2280	301.9	21.9	0.25		
CSL3	114×4.5×2280	301.9	21.9	0.5		

(续表)

圆形	CSL4	114×4.5×2280	301.9	21.9	0.75	周竞
	CSL5	114×4.5×2280	301.9	21.9	0.85	(1990) ^[92]
	C-TP1	216.3×4.5×1620	354.8	39	0.2	陈逸玮
	C-TP2	216.3×4.5×1620	354.8	39	0.4	(2003) ^[90]
方形	S-TP1	200×4.5×1620	261.4	39	0.2	陈逸玮
	S-TP2	200×4.5×1620	261.4	39	0.4	(2003) ^[90]

4.3.3 典型构件的荷载-变形关系曲线分析和应力分布

本节建立内配十字型钢的圆钢管混凝土典型构件来研究分析压扭构件在不同加载路径下的受力性能，典型构件基本数据为： $D=600\text{mm}$ ， $L=1800\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_t=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ 。

(1) 加载路径 I

图 4-10 所示为内配十字型钢的圆钢管混凝土典型压扭构件在加载路径 I 下的扭矩-转角全曲线，由图中可知，扭矩-转角曲线可分为三个阶段，即：弹性段(OA)，弹塑性段(AB)，塑性段(BC)，以下为各阶段特点^[8]：

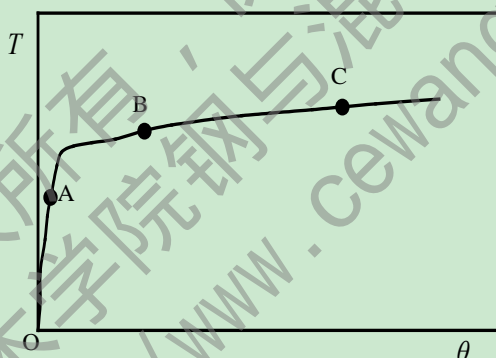


图 4-10 典型构件在加载路径 I 下的 $T-\theta$ 曲线

弹性段(OA):在弹性阶段，内配十字型钢圆钢管混凝土材料在压扭作用下处于弹性范围， $T-\theta$ 曲线大致呈直线，内配型钢、钢管及混凝土相互独立承担荷载，A 点为钢材开始屈服的起点；

弹塑性段(AB):在弹塑性阶段，构件的一部分材料处于塑性状态，另一部分还处于弹性状态，在这一阶段，由于构件变形较大，钢管、混凝土和型钢之间有相互作用力，处于复杂受力状态；

塑性段(BC):在塑性阶段，由于混凝土的填充作用、钢管的约束作用和内配型钢对承载力的有利贡献，构件的 $T-\theta$ 曲线不出现下降段，表现出较好的抗扭承载力和延性。

图 4-11~图 4-13 所示为典型压扭构件在加载路径 I 下的固定端剪应力分布示意图。其中 S-a 表示构件的内配型钢变形至图 4-10 中 A 点时的应力分布图，其它类似。由应力分布图可知，内配型钢和钢管的应力均随着构件变形的发展逐渐增大，而混凝土的应

力却随着构件变形的增大而先增大，后减小。主要原因是在扭转变形的过程中，填充混凝土较好的改善了钢管性能，使得钢管表现出较高的承载力和较好的延性，故可承担较多的剪力。而混凝土的剪力先增大后减小，是因为在构件小变形情况下，混凝土承担剪力逐渐增多，担当构件的扭转变形较大时，混凝土柱开始出现斜裂缝，其承担的剪应力开始降低。此外，对比各材料的应力分布数据可知，构件在扭转变形的过程中，剪力主要有钢管和型钢所承担，且以钢管承担为主。

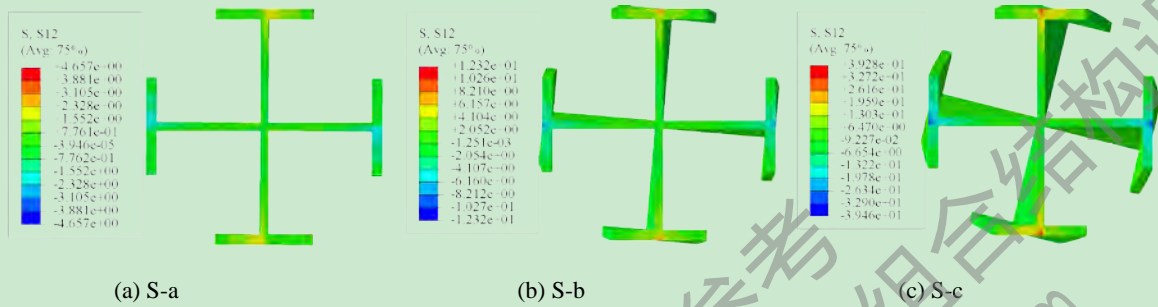


图 4-11 型钢固定端剪应力分布图

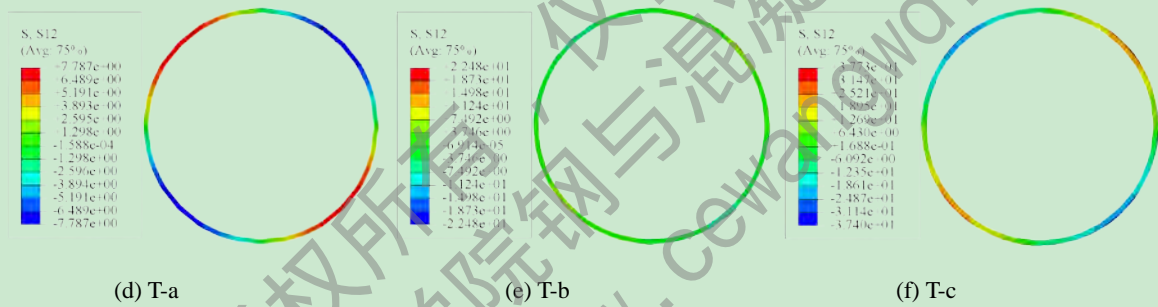


图 4-12 钢管固定端剪应力分布图

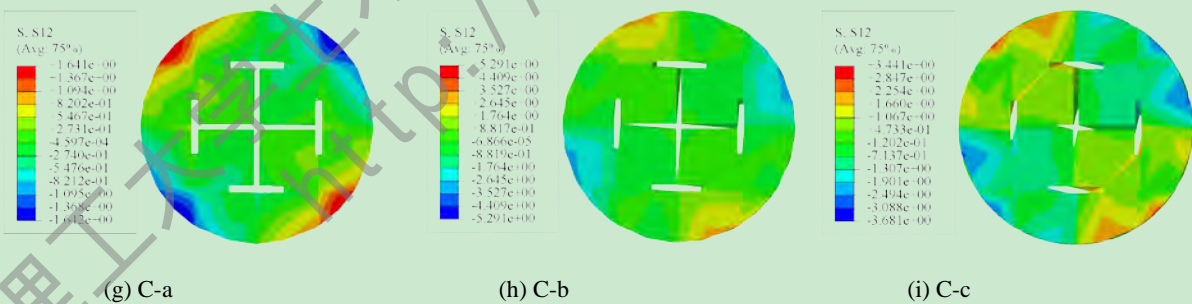


图 4-13 混凝土固定端剪应力分布图

由图 4-14 可知，在一定的钢管材料强度下，施加不同轴压比对构件的 $T-\theta$ 关系曲线有不同程度的影响。当轴压比 $N/N_u \leq 0.6$ 时， $T-\theta$ 关系曲线的差别极小； $N/N_u > 0.6$ 时， $T-\theta$ 关系曲线急剧下降，构件承载力大幅降低，延性变差。此外，在相同的轴压比作用下，压扭构件的抗扭承载力随着构件钢管材料强度的提高而大幅提高，这是因为构件的

抗扭承载力主要有钢管来承担，提高钢管材料强度能够较好的改善其承载力。但无论是构件材料强度的变化还是轴压比的不同，对构件 $T-\theta$ 关系曲线的弹性段刚度基本没影响。

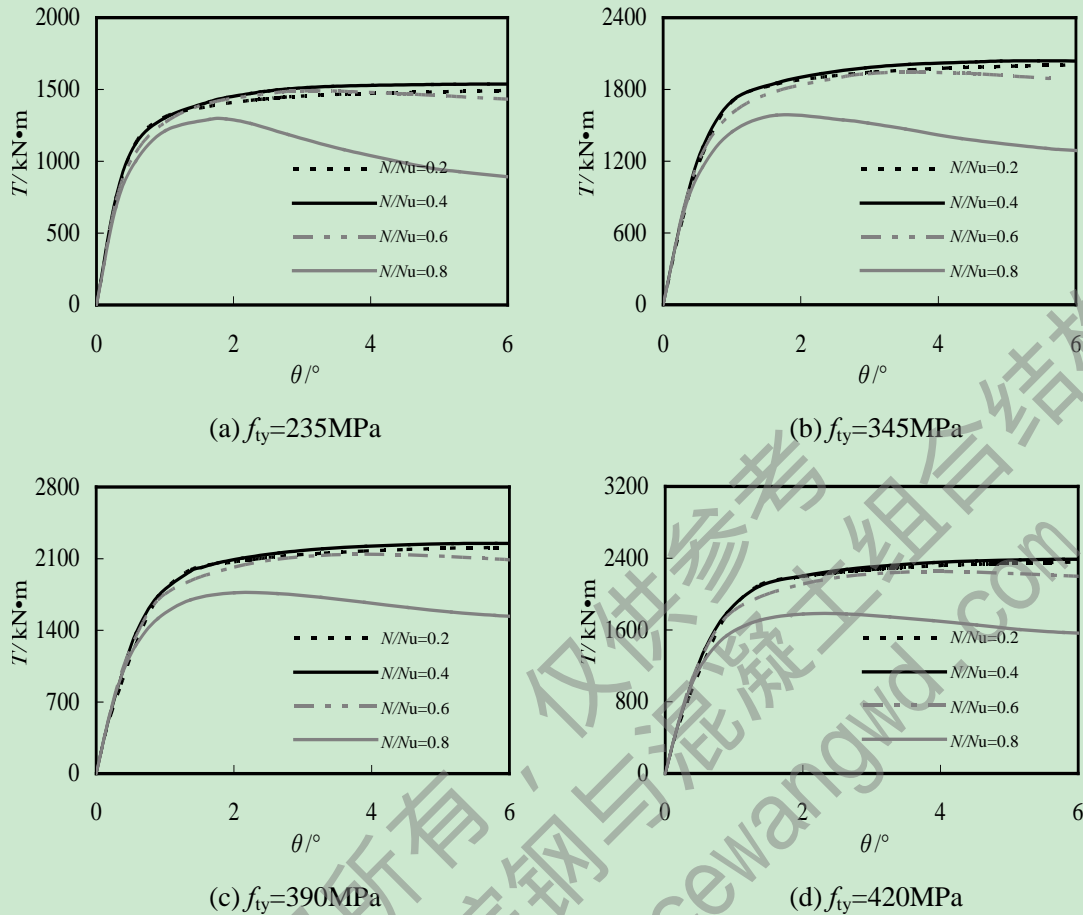


图 4-14 压扭构件在加载路径 I 下的 $T-\theta$ 关系曲线

4.3.4 典型构件的轴向荷载分配曲线

图 4-15 所示为典型压扭构件在加载路径 I 下的 $n-\theta$ 关系曲线，其中， θ 为构件扭转角度， n 为内配型钢、钢管和混凝土所承担的轴向荷载与内配型钢钢管混凝土所承担的轴向荷载的比值，由图中曲线可知，在第一加载阶段末，混凝土所承担轴向荷载最多，其次是钢管，型钢承担荷载最少。当构件进入第二阶段的受力之后，构件的轴向荷载开始在各材料中发生应力重分布，应力重分布的结果是，混凝土所承受荷载先减少后增大，钢管所承受荷载先增大后减少，而型钢所承受的荷载则是持续增大。混凝土所受荷载先减少后增大，是因为随着扭矩的增大，混凝土开始出现斜裂缝，故降低了承载力，但由于开裂的混凝土有外围的钢管所约束，又可承担更多的轴向荷载。钢管所承受荷载先增大后减少，是因为在钢管材料在屈服之前，可承担较多荷载，在屈服之后，承载力开始大幅降低。型钢所承受的荷载持续增大，主要是因为型钢被包裹在内部，在构件扭转的过程中型钢材料尚未达到屈服状态。虽然各材料所承担荷载增减各不相同，但最后都趋于平稳状态。

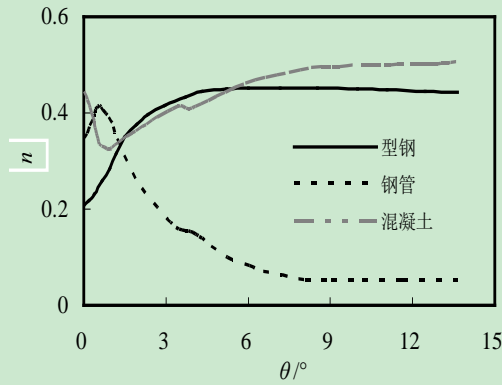


图 4-15 压扭构件在加载路径 I 下的 $n-\theta$ 关系曲线

(2) 加载路径 II

图 4-16 所示为压扭构件在加载路径 II 下的 $N-\varepsilon$ 关系曲线，由图中的对比曲线可知，在一定的材料强度下，不同的扭矩比对构件的 $N-\varepsilon$ 关系曲线基本没影响，曲线大致可重合；在相同的扭矩比作用下，构件的抗压承载力随着构件材料强度的增大而提高。另外，构件的 $N-\varepsilon$ 关系曲线下降段不明显，具有较好的延性性能。

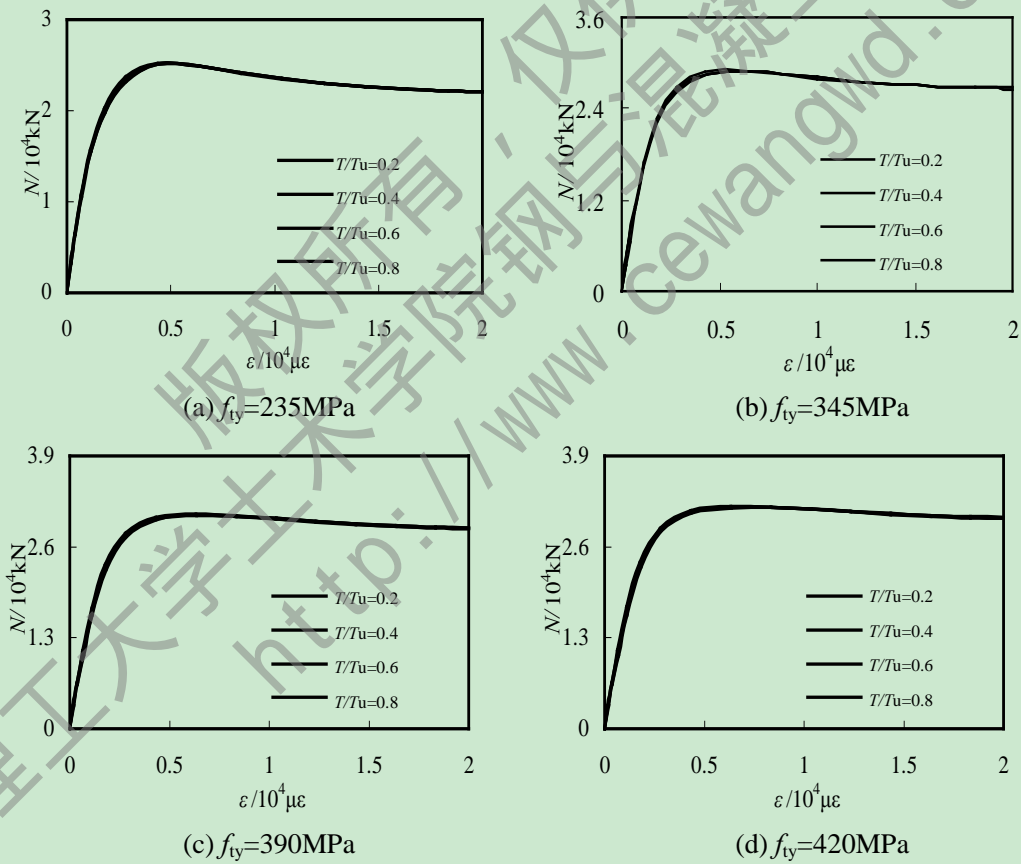


图 4-16 压扭构件在加载路径 II 下的 $N-\varepsilon$ 关系曲线

(3) 加载路径 III

由于压扭构件在加载路径 III 下的受力形式比较少见，本文不做研究。

4.4 内配十字型钢圆钢管混凝土弯扭构件的力学性能

4.4.1 有限元模型

弯扭构件的有限元模型如下图 4-17 所示，模型边界条件为底端固定，另外一端自由，荷载作用在构件的自由端。由于构件受力形式为复合受力，故可将构件所受荷载分步施加在自由端，对于按比例施加弯矩和扭矩的形式，可将弯矩和扭矩以力加载的方式同时作用于同一分析步。

图 4-18 所示为弯扭构件加载示意图，由图可知弯扭构件的加载方式有三种：(1)弯矩和扭矩根据一定比例同时施加，此时构件弯扭比 $m=M/T$ 恒定；(2)先作用扭矩 T ，保持扭矩的大小和方向不变，再施加弯矩 M ，最后可得到 $M-\theta$ 曲线；(3)先作用弯矩 M ，保持弯矩的大小和方向不变，再施加扭矩 T ，可得到 $T-\theta$ 曲线^[8]。

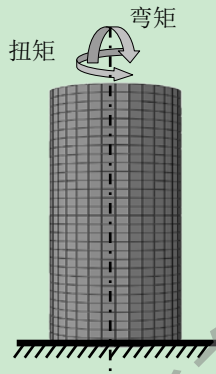


图 4-17 弯扭构件模型

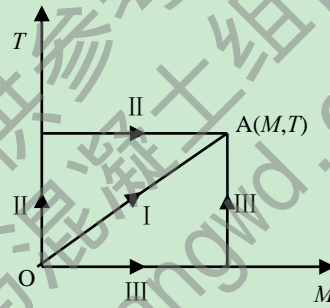
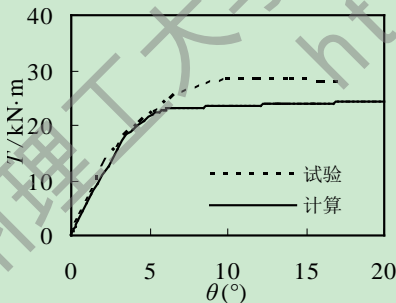


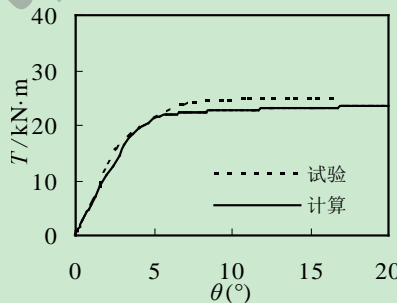
图 4-18 弯扭构件加载示意图

4.4.2 模型验证

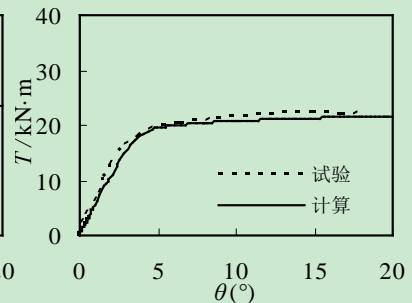
查阅相关资料可知，韩林海和钟善桐(1994a)^[55]对 12 根圆形截面的钢管混凝土弯扭构件进行了研究分析，本节为验证有限元弯扭模型的合理性，对这 12 根试验构件进行数值模拟计算，试验结果曲线和计算结果曲线的对比如图 4-19 所示，表 4-4 所示为管混凝土弯扭构件参数一览表。



(a) TB1-1



(b) TB1-2



(c) TB1-3

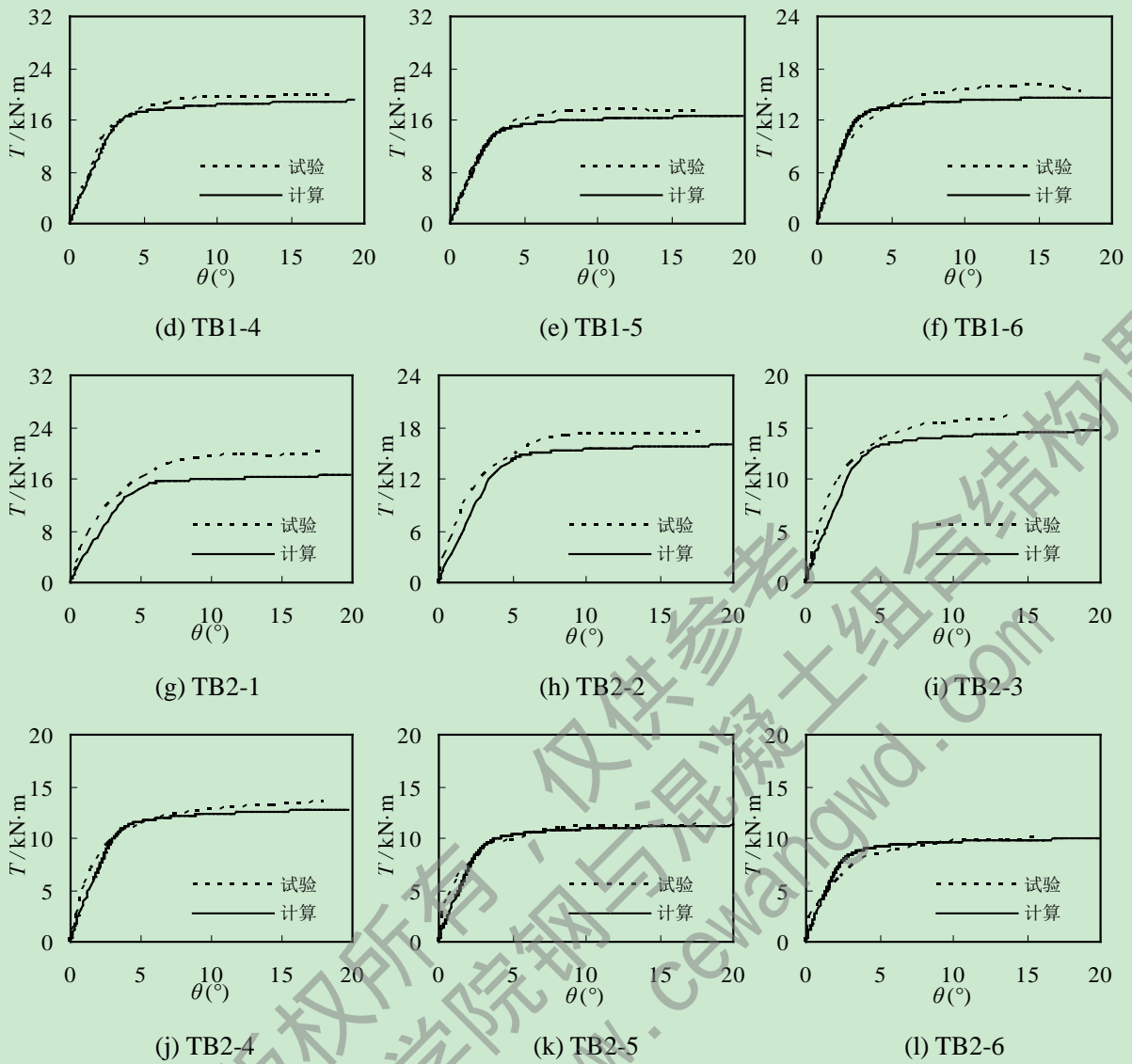


图 4-19 钢管混凝土弯扭构件

表 4-4 钢管混凝土弯扭构件参数一览表

截面形式	试件编号	$D \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	f_{cu} (MPa)	弯扭比 $m_0(=M/T)$	数据来源
圆形	TB1-1	133×4.5×2000	324.34	30.4	0	韩林海和钟善桐(1994a) ^[55]
	TB1-2	133×4.5×2000	324.34	30.4	0.3	
	TB1-3	133×4.5×2000	324.34	30.4	0.6	
	TB1-4	133×4.5×2000	324.34	30.4	0.9	
	TB1-5	133×4.5×2000	324.34	30.4	1.2	
	TB1-6	133×4.5×2000	324.34	30.4	1.5	
	TB2-1	130×3×2000	324.34	30.4	0	
	TB2-2	130×3×2000	324.34	30.4	0.3	
	TB2-3	130×3×2000	324.34	30.4	0.6	

(续表)

圆形	TB2-4	130×3×2000	324.34	30.4	0.9	韩林海和钟善桐(1994a) ^[55]
	TB2-5	130×3×2000	324.34	30.4	1.2	
	TB2-6	130×3×2000	324.34	30.4	1.5	

4.4.3 典型构件的荷载-变形关系曲线分析和应力分布

本节建立内配十字型钢的圆钢管混凝土典型构件来研究分析弯扭构件在不同加载路径下的受力性能，典型构件基本数据为： $D=600\text{mm}$ ， $L=1800\text{mm}$ ， $f_{\text{cu}}=60\text{MPa}$ ， $f_{\text{ty}}=345\text{MPa}$ ， $f_{\text{sy}}=345\text{MPa}$ ， $\alpha_{\text{t}}=0.1$ ， $\alpha_{\text{s}}=0.06$ 。

(1) 加载路径 I

图 4-20 所示为内配十字型钢的圆钢管混凝土典型弯扭构件在加载路径 I 下的扭矩-转角全曲线示意图，由图可知，扭矩-转角曲线可分为三个阶段，即：弹性段(OA)，弹塑性段(AB)，塑性强化段(BC)，以下为各阶段特点^[8]。

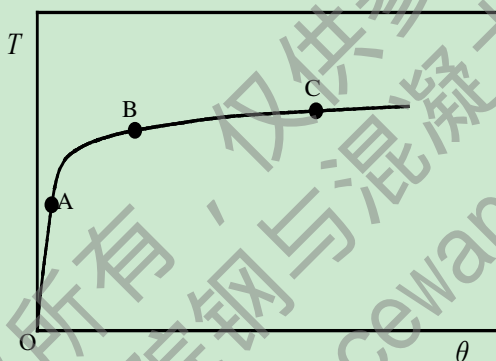


图 4-20 典型构件在加载路径 I 下的 $T-\theta$ 曲线

弹性段(OA)：在弹性阶段，内配十字型钢圆钢管混凝土材料在弯扭作用下处于弹性状态，构件承受的扭矩增长幅度很大，转角增长很缓慢。另外，构件的刚度很大，A 点为钢材开始屈服的起点；

弹塑性段(AB)：在弹塑性阶段，构件的一部分材料处于塑性状态，一部分还处于弹性状态，在这一阶段，由于构件变形较大，钢管、混凝土和型钢之间有相互作用力，处于复杂受力状态；

塑性强化段(BC)：在塑性强化阶段，由于混凝土的填充作用、钢管的约束作用和内配型钢对承载力的有利贡献，构件的 $T-\theta$ 曲线不出现下降段，表现出较好的抗扭承载力和延性性能。

图 4-21~图 4-23 所示为典型内配十字型钢圆钢管混凝土弯扭构件固定边界的剪应力分布示意图，其中的图(a)、图(b)、图(c)分别为混凝土、钢管、型钢变形至图 4-20 中 $T-\theta$ 曲线上的 A 点、B 点、C 点时的剪应力图。由图可知，钢管剪应力较大，这主要是因为钢管处于构件最外边缘，相对变形较大；混凝土剪应力较小，主要原因是构件在变形过程中混凝土逐渐开裂，混凝土承载力有所下降。

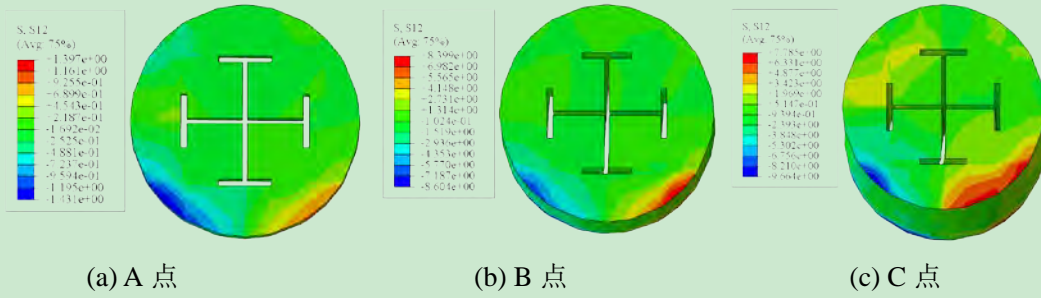


图 4-21 混凝土固定边界的剪应力分布

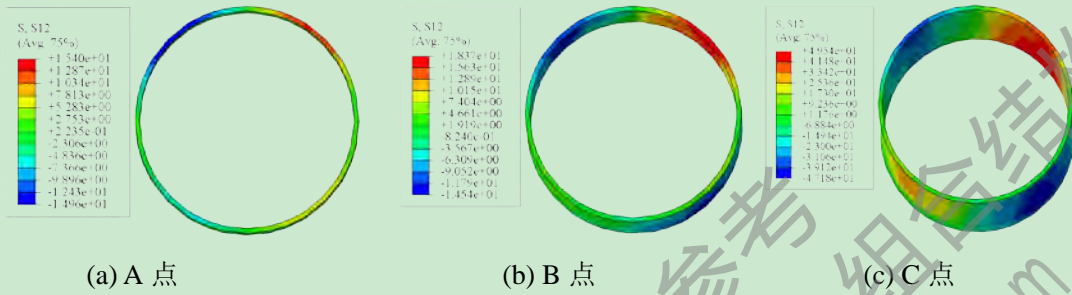


图 4-22 钢管固定边界的剪应力分布

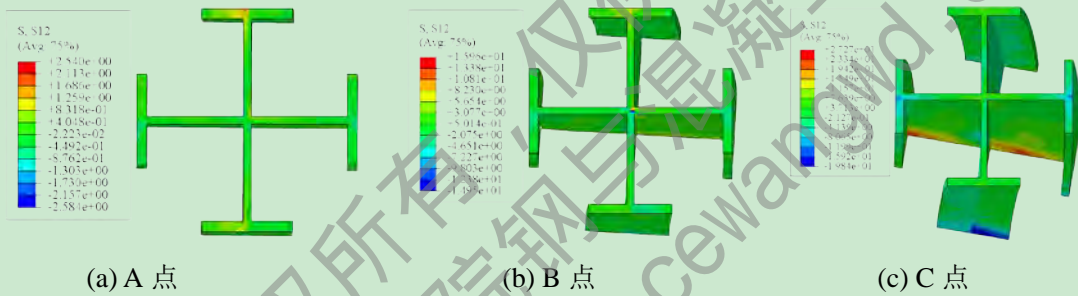
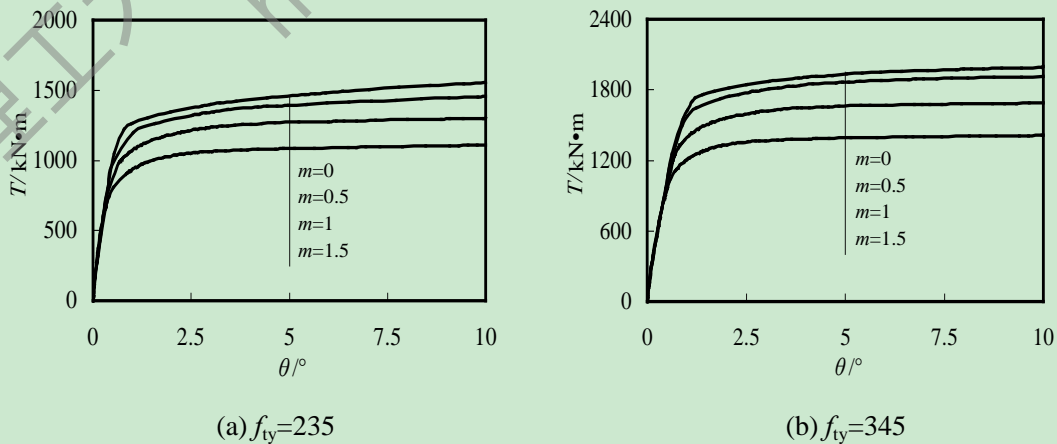
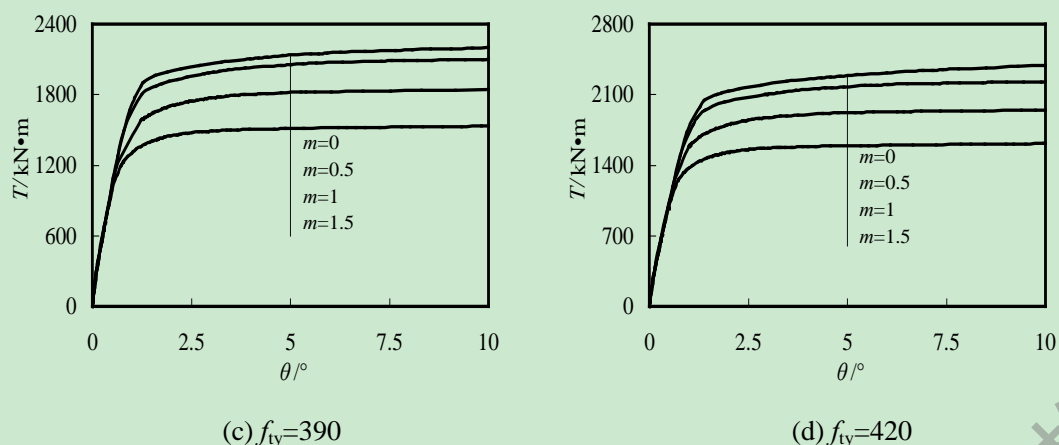


图 4-23 十字型钢固定边界的剪应力分布

图 4-24 所示为典型弯扭构件在加载路径 I 下的 $T-\theta$ 关系曲线图，由图可知，在一定的材料强度下，构件弯扭比的不断增大，构件的 $T-\theta$ 关系曲线在不断降低，故承载力在下降，但对曲线弹性段刚度几乎没影响；在相同的弯扭比下，随着构件材料强度的提高，构件承载力在不断提高。另外，所有曲线均不出现下降段，说明弯扭构件具有较好的承载力和延性性能。



图 4-24 典型弯扭构件在加载路径 I 下的 $T-\theta$ 关系曲线

(2) 对于加载路径 II、加载路径 III，本文不做相关研究。

4.5 本章小结

(1) 在有限元偏压模型得以验证的基础上，采用数值分析的方法对偏压构件 $N-\varepsilon$ 关系曲线、 $H-\mu$ 关系曲线进行研究，最后还进行了参数分析；

(2) 采用有限元方法，对不同路径下的压扭、弯扭构件进行力学性能和工作机理分析，相关研究结果可为实际工程和科研工作提供一定的参考依据。

第5章 内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪和压弯扭剪构件的力学性能研究

5.1 引言

前面几章对内配十字型钢圆钢管混凝土构件的简单受力构件和部分复合受力构件进行了研究，然而在实际工程应用中，构件有可能会承受更加复杂的荷载作用，因此有必要对构件的复杂受力进行更深的研究，例如构件在压弯剪和压弯扭剪作用下的力学性能急需研究分析。另外，这一部分很少能找到相关的试验研究，即不能进行模型验证，本章的研究思路是采用前面构件简单受力的建模方法，将简单受力进行有效组合来研究构件受压弯剪和压弯扭剪作用时的力学情况。

5.2 内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件的力学性能

第三章第四节确定了内配十字型钢圆钢管混凝土构件受剪时不同破坏模式的界限，在此基础上，本节选取合理剪跨比的典型组合构件进行压弯剪作用时的力学性能和工作机理的研究分析。

5.2.1 有限元模型

图 5-1 所示为内配十字型钢的圆钢管混凝土构件受压弯剪作用时的计算模型。其边界条件的设置为底端固定，顶端自由^[8]。施加荷载时，分别采用力加载、位移加载的方式在构件自由端施加轴向压力、横向位移。

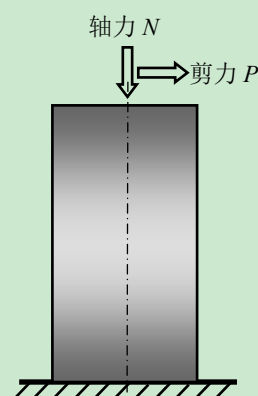


图 5-1 构件受压弯剪作用时的计算模型

5.2.2 典型构件的荷载-变形关系曲线全过程分析

图 5-2 所示为典型压弯剪构件的剪力-横向位移($P-\Delta$)关系曲线，典型压弯剪构件的基本尺寸数据为： $D=600\text{mm}$ ， $f_{cu}=60\text{MPa}$ ， $f_{ty}=345\text{MPa}$ ， $f_{sy}=345\text{MPa}$ ， $m=3$ ， $n=0.4$ ， $\alpha_1=0.1$ ， $\alpha_s=0.06$ ， m 为构件剪跨比， n 为轴压比。

图中曲线大致可分为三个阶段，即弹性阶段(OA)、弹塑性阶段(AB)、塑性阶段(BC)^[8]。在弹性阶段，构件的剪力增长幅度较大，但横向位移发展很缓慢， $P-\Delta$ 关系曲线基本呈线性增长，在 A 点，部分钢管开始屈服；在弹塑性阶段，构件的 $P-\Delta$ 关系曲线不再呈线性增长，而是随着横向荷载的缓慢提高，构件横向位移急剧增大，在此阶段，构件截

面的受压屈服面积和受拉面积逐渐增多，整个截面处于弹塑性状态，构件刚度在逐渐降低；在塑性阶段，构件横向位移较大，再加上构件已经承受了一定的轴向荷载，此时构件的“二阶效应”越来越明显，但由于钢管、混凝土和型钢的相互有利贡献， $P-\Delta$ 关系曲线并没出现明显的下降段^[8]。

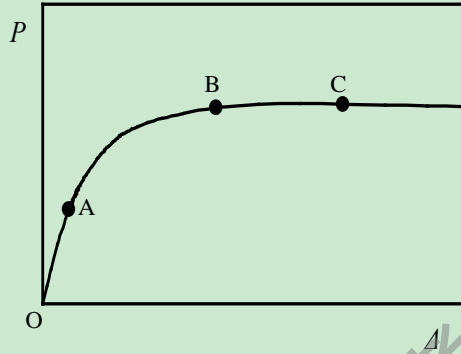


图 5-2 典型构件的 $P-\Delta$ 关系曲线

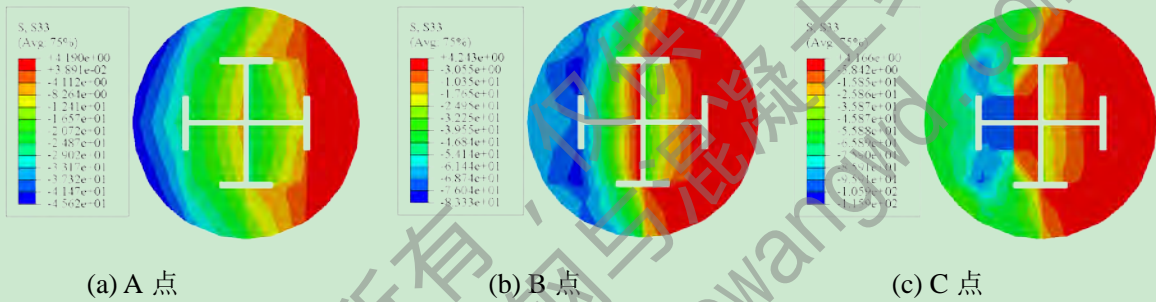


图 5-3 混凝土固定边界的纵向应力分布

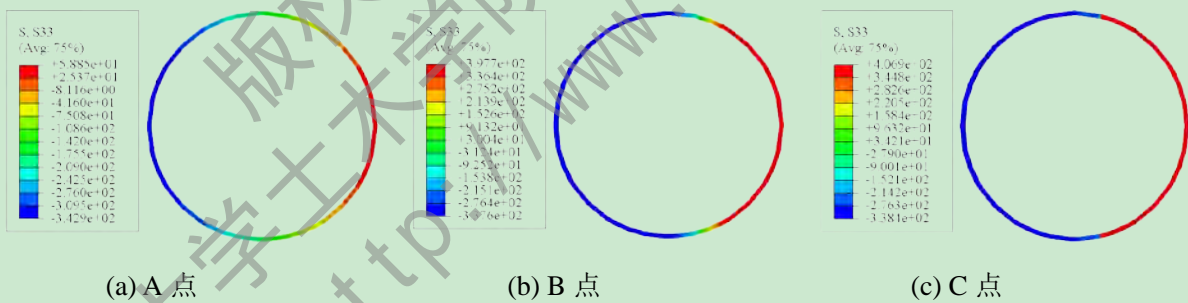


图 5-4 钢管固定边界的纵向应力分布

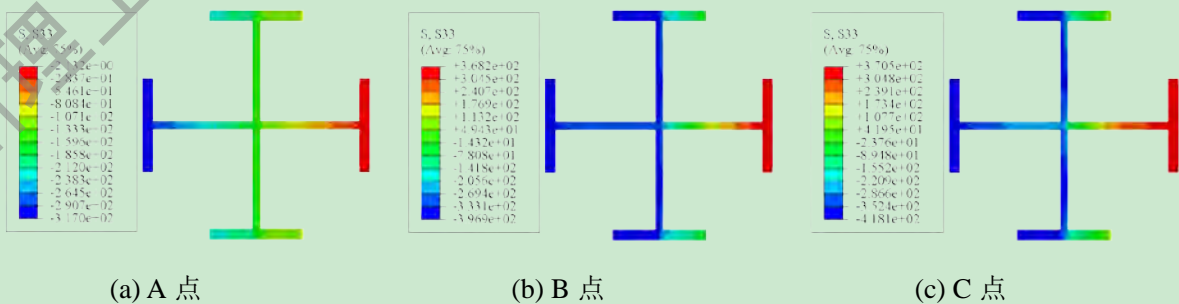


图 5-5 十字型钢固定边界的纵向应力分布

图 5-3~图 5-5 所示为典型的内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件固定边界在不同特征点时的纵向应力分布示意图。从应力图可知，在典型构件的 $P-\Delta$ 关系曲线中 A 点时，混凝土和钢管固定边界均有压应力区域和拉应力区域；由于型钢处于构件中间，变形相对较小，因此截面全部出于受压状态。在 B 点时，由于构件的变形发展已经很大，故型钢截面也出现受拉区域。随着构件变形的持续，混凝土、钢管和型钢截面的受拉区域在不断增加，截面中和轴不断左移。

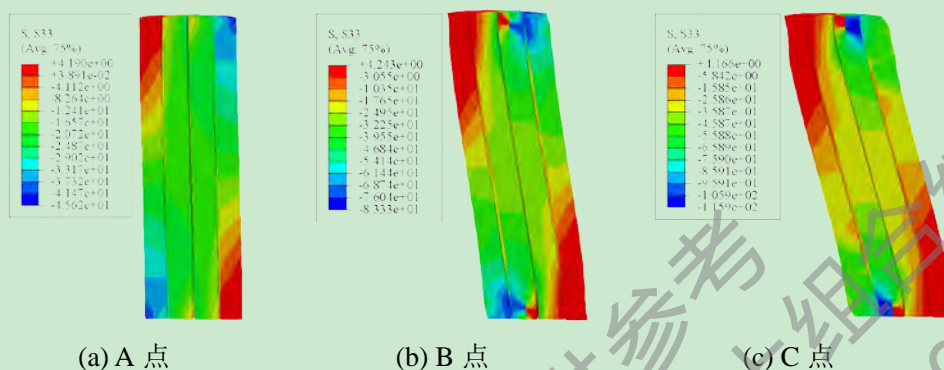


图 5-6 混凝土纵向中截面的纵向应力分布

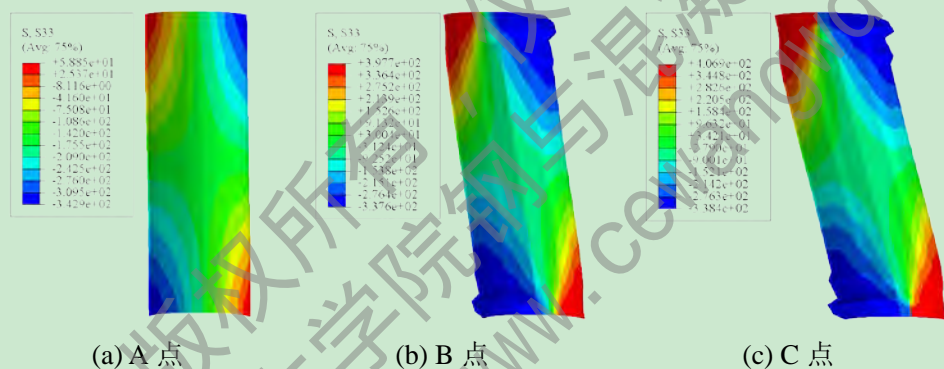


图 5-7 钢管纵向中截面的纵向应力分布

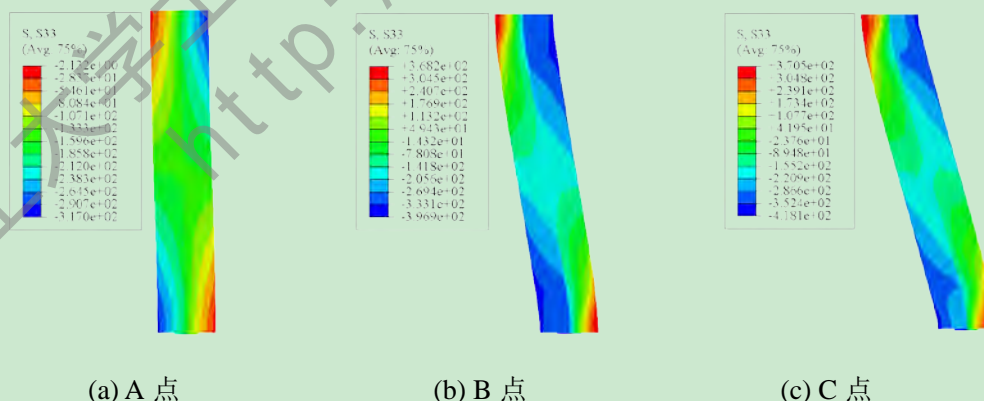


图 5-8 十字型钢纵向中截面的纵向应力分布

图 5-6~图 5-8 所示为典型的内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件纵向中截面在不同特征点时的纵向应力分布示意图。从应力图可知，在典型构件的 $P-\Delta$ 关系曲线中 A

点时,型钢的整个纵截面均处于受压状态,钢管和型钢纵截面均有受压区和受拉区,由于构件承受向左的剪力,故构件底端右边区域和顶端左边区域均处于受压状态,底端左边区域和顶端右边区域处于受压状态。随着构件所承受荷载的增大,由于钢管在最外边,相对变形较大,故纵向中截面的受压区域和受拉区域都较大,而型钢处于构件中间状态,相对变形较小,故受压区域和受拉区域都较小。

5.2.3 构件受力性能分析

图 5-9 为内配十字型钢的圆钢管混凝土典型构件在不同轴压比($n=0、0.2、0.4、0.6、0.8$)情况下,受压弯剪复合受力时十字型钢、填充混凝土、钢管和型钢钢管混凝土各自的 $P-\Delta$ 关系曲线对比图。

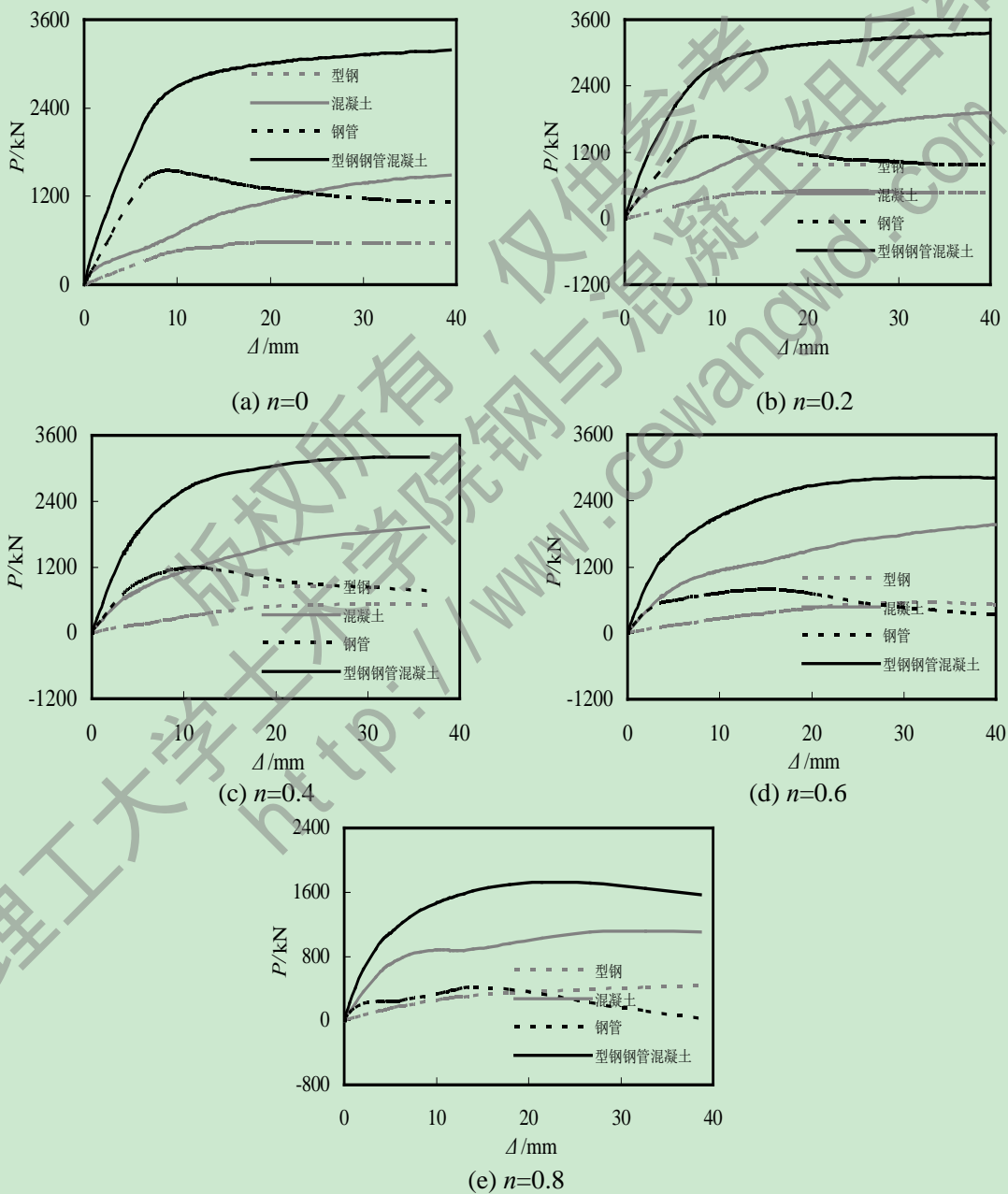


图 5-9 不同轴压比时构件的 $P-\Delta$ 关系曲线

由图 5-9 可知,不同轴压比对典型压弯剪构件 $P-\Delta$ 关系曲线的影响有所不同,现将影响规律总结如下:

(1) 当 $n \leq 0.4$ 时,钢管的 $P-\Delta$ 曲线有较高的承载力点,且曲线不出现下降段。这是因为施加在构件上的荷载较小,构件相应的变形也较小,另外,填充混凝土的存在可防止钢管发生局部屈曲,钢管对构件有一定的约束效应,型钢又可提供一定的承载力,故 $P-\Delta$ 曲线有较高的承载力点,且曲线不出现下降段^[8]。

(2) 当 $n \geq 0.2$ 时,填充混凝土的剪力开始出现负值;

(3) 当 $n=0.8$ 时,型钢和钢管的 $P-\Delta$ 曲线在 20mm 之前非常接近,之后交叉分离。

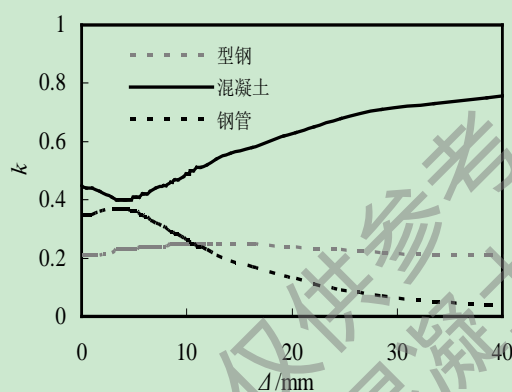


图 5-10 构件 $k-\Delta$ 关系曲线

图 5-10 所示为内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件的 $k-\Delta$ 关系曲线,其中 k 表示十字型钢、填充混凝土和钢管所承受的轴力与型钢钢管混凝土所承受轴力的比值。可见,随着构件横向位移的发展,型钢所承受的轴力基本保持不变,钢管所承受轴力先增大,之后快速减小,在 $\Delta=30\text{mm}$ 之后趋于稳定,混凝土所承受轴力则是先减小,后增大。这是因为构件复合受力时,由于混凝土和钢管、型钢之间的相互作用,使得轴向压力在混凝土、钢管和型钢上重新分配,即混凝土所承担的轴向压力急剧增大,钢管所承担的轴向压力不断减小,而型钢所承受的轴向压力减小的并不明显,这是因为构件建模时型钢采用壳体单元建模,且与混凝土的接触近似定义为 Embedded region 所致^[8]。

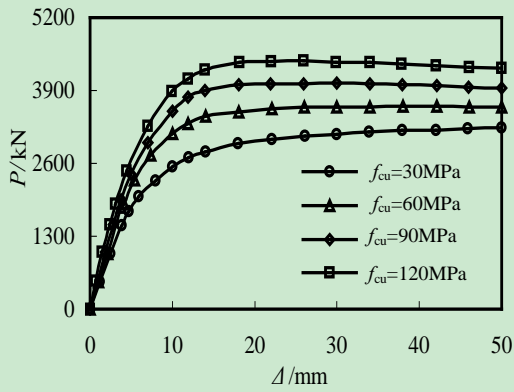
5.2.4 参数分析

为进一步研究压弯剪构件的工作机理,对影响典型压弯剪构件的 $P-\Delta$ 关系曲线的可能因素进行了参数分析,如图 5-11 所示。

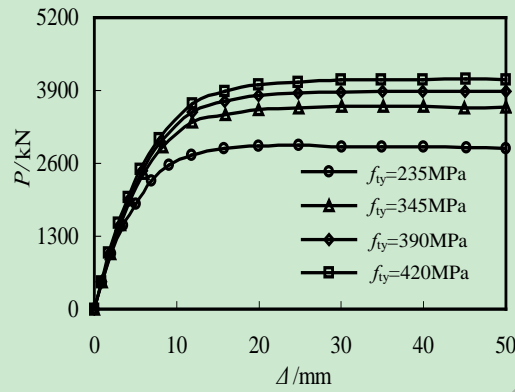
由图可得如下结论:

(1) 钢管截面含钢率对内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件的 $P-\Delta$ 关系曲线的影响较为显著。在其他参数一定时,随着钢管截面含钢率的逐渐增大,构件抗剪承载力在大幅提高, $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度也在逐渐增大;

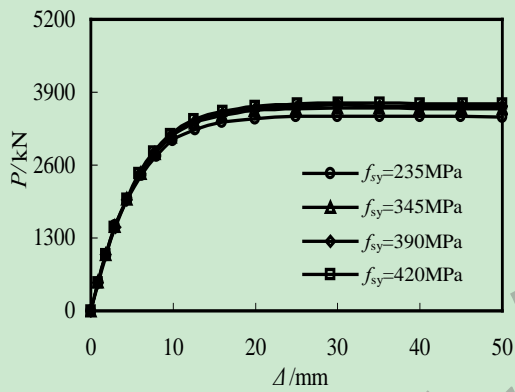
(2) 轴压比对压弯剪构件的 $P-\Delta$ 关系曲线影响显著。 $n=0、0.2、0.4$ 时,构件抗剪承载力相差不大, $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度也基本没变化,但随着轴压比的进一步增大,



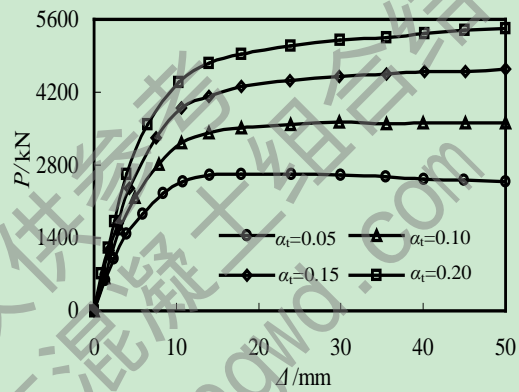
(a) 混凝土强度的影响



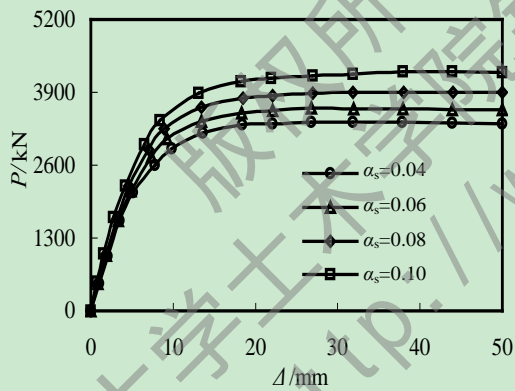
(b) 钢管材料强度的影响



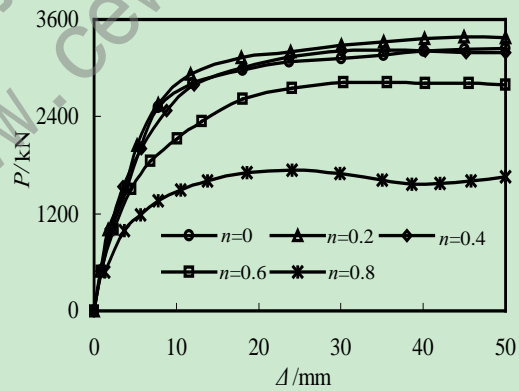
(c) 型钢材料强度的影响



(d) 钢管截面含钢率的影响



(e) 型钢截面含钢率的影响



(f) 轴压比的影响

图 5-11 不同参数时构件的 $P-\Delta$ 关系曲线

构件抗剪承载力开始大幅降低, 当 $n=0.8$ 时, 构件的抗剪承载力和 $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度已经降低了很多;

(3) 混凝土强度、钢管材料强度和型钢截面含钢率对压弯剪构件的 $P-\Delta$ 关系曲线都有一定程度的影响。随着混凝土强度、钢管材料强度和型钢截面含钢率的增大, 构件抗剪承载力也在逐渐提高, 但提高幅度不大; 另外, 随着混凝土强度的增大, $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度也略有增大;

(4) 型钢材料强度的变化对构件的抗剪承载力和 $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度几乎没有影响。

5.3 内配十字型钢圆钢管混凝土压弯扭剪构件的力学性能

在实际工程中, 构件还有可能受压弯扭剪的复合受力作用, 例如在地震作用下的构件就处于这种受力方式, 因此, 有必要对压弯扭剪复合作用下的内配十字型钢圆钢管混凝土构件的力学性能进行深入研究。

5.3.1 有限元模型

图 5-12 所示为组合构件受压弯扭剪作用时的有限元模型图, 构件的有限元模型边界条件设置为底端固定, 顶端自由, 施加荷载时, 分别采用力加载、位移加载的方式在构件自由端施加轴力和扭矩、横向位移。由于构件是复合受力, 故需分步加载。

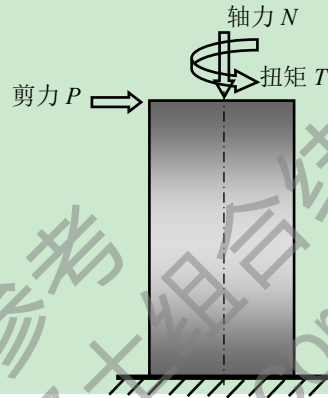


图 5-12 构件受压弯扭剪作用时的计算模型

5.3.2 构件的力学性能研究

由于压弯扭剪的复合受力是压、弯、扭、剪单独作用效果的有效组合, 而且组合顺序(加载路径)的不同必然会引起构件工作机理和破坏形式的差异, 因此有必要对构件在不同加载路径下的力学性能进行深入探讨和研究。常见的加载路径如下^[8]:

加载路径 I: 先施加轴力, 再施加扭矩, 最后施加剪力和弯矩, 这是实际工程中最常见的受力形式;

加载路径 II: 先施加扭矩, 再施加轴力, 最后施加剪力和弯矩;

加载路径 III: 先施加扭矩, 再施加剪力和弯矩, 最后施加轴力。

下面采用典型的内配十字型钢圆钢管混凝土构件对以上三种常见路径下的压弯扭剪复合受力作用情况进行研究分析。典型构件的基本尺寸数据为: $D=600\text{mm}$, $f_{cu}=60\text{MPa}$, $f_{ty}=345\text{MPa}$, $f_{sy}=345\text{MPa}$, $m=3$, $\alpha_t=0.1$, $\alpha_s=0.06$ 。

(1) 加载路径 I

图 5-13 所示为压弯扭剪构件在加载路径 I 下的 $P-\Delta$ 关系曲线, 由图中曲线可知, 在一定的轴压比下, 当施加在构件上的扭矩比值(T/T_0)不断增大时, 构件受剪承载力在逐渐降低, 当扭矩比值大于 0.4 时, 承载力的降低幅度开始明显增大。当扭矩比值在 0.2~0.8 之间变化时, 构件 $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度基本没变化, 但构件的延性在不断降低。

另外, 当构件轴压比小于等于 0.4 时, 随着扭矩比的增大, 构件抗剪承载力和延性下降幅度不大, 当轴压比大于 0.4 时, 构件抗剪承载力和延性下降幅度很大。

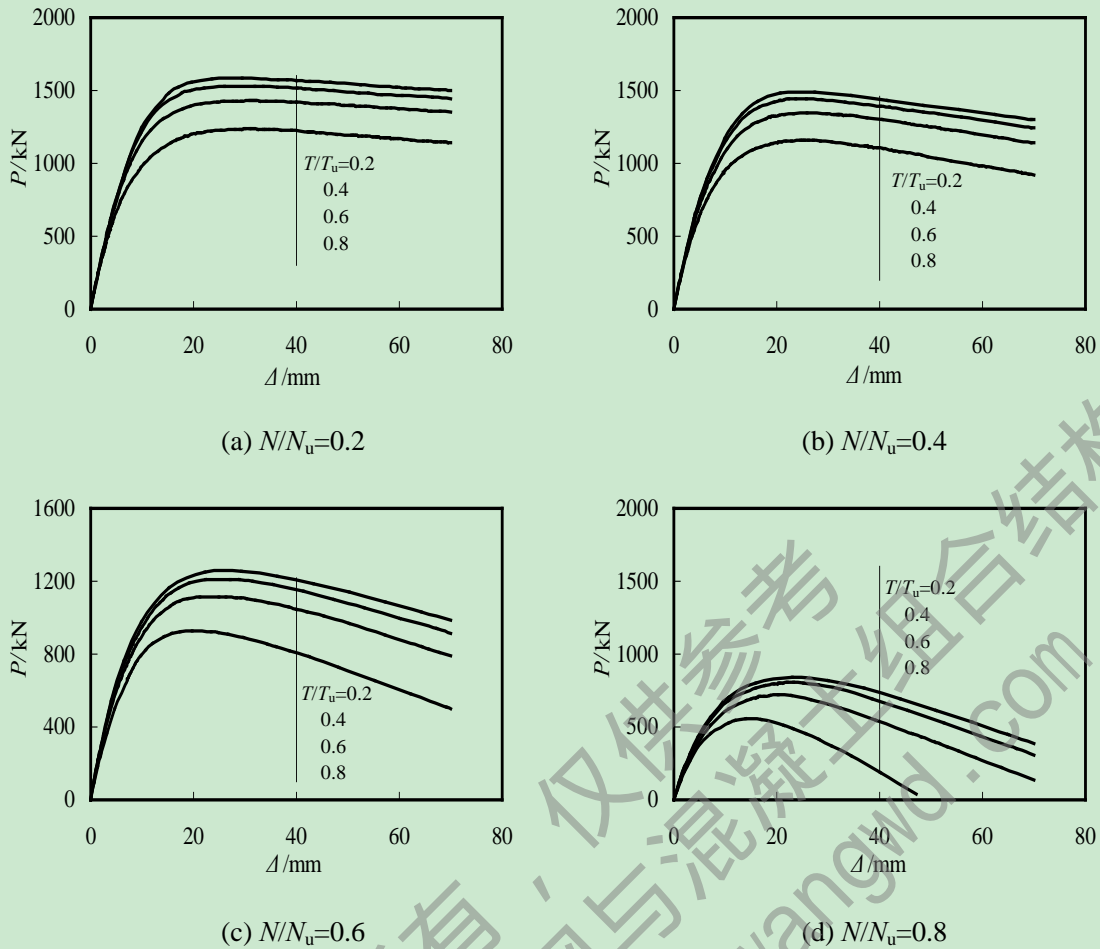
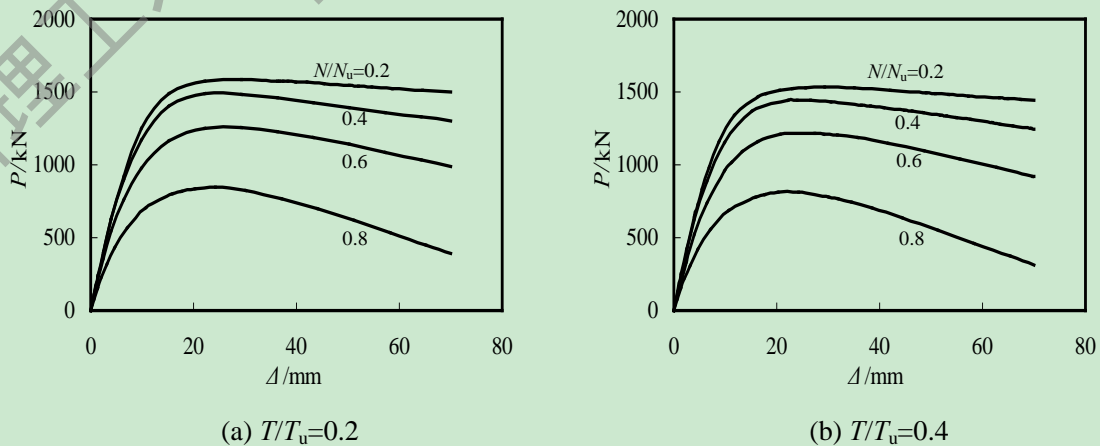


图 5-13 压弯扭剪构件在加载路径 I 下的 $P-\Delta$ 关系曲线

(2) 加载路径 II

图 5-14 所示为压弯扭剪构件在加载路径 II 下的 $P-\Delta$ 关系曲线，由图中曲线可知，在一定的扭矩作用下，构件的抗剪承载力随着轴压比的增大逐渐降低，当构件所承受的轴压比小于等于 0.4 时， $P-\Delta$ 关系曲线的弹性段刚度基本没变化，且承载力降低幅度不大，当轴压比大于 0.4 时，弹性段刚度和承载力开始大幅降低。

另外，在一定的轴压比作用下，随着施加在构件上的扭矩的不断增大，构件抗剪承载力和延性也在逐渐降低，承载力的降低幅度不大，延性却在大幅下降。



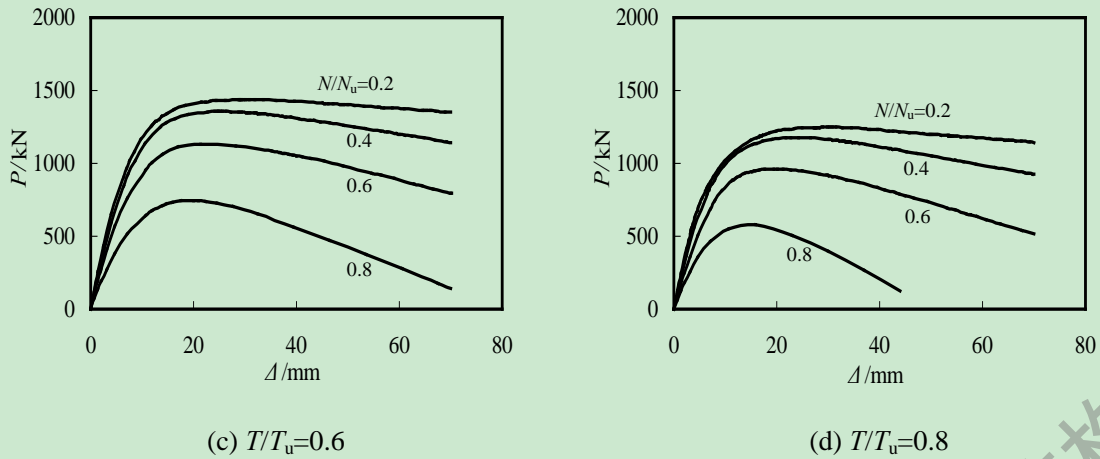


图 5-14 压弯扭剪构件在加载路径 II 下的 $P-\Delta$ 关系曲线

(3) 加载路径 III

图 5-15 所示为压弯扭剪构件在加载路径 III 下的轴力-应变关系曲线，由图中曲线可知，在一定的扭矩作用下，随着构件所承受剪力的不断增大，构件抗压承载力在逐渐降低，且降低幅度相对较均匀（除了 $T/T_u=0.8, P/P_u=0.8$ 所对应的曲线）。

另外，在一定的剪力比作用下，随着扭矩的增大，构件抗压承载力也在降低，但降低幅度不大，构件轴力-应变关系曲线的弹性段刚度基本没变化（除了 $T/T_u=0.8, P/P_u=0.8$ 所对应的曲线）。

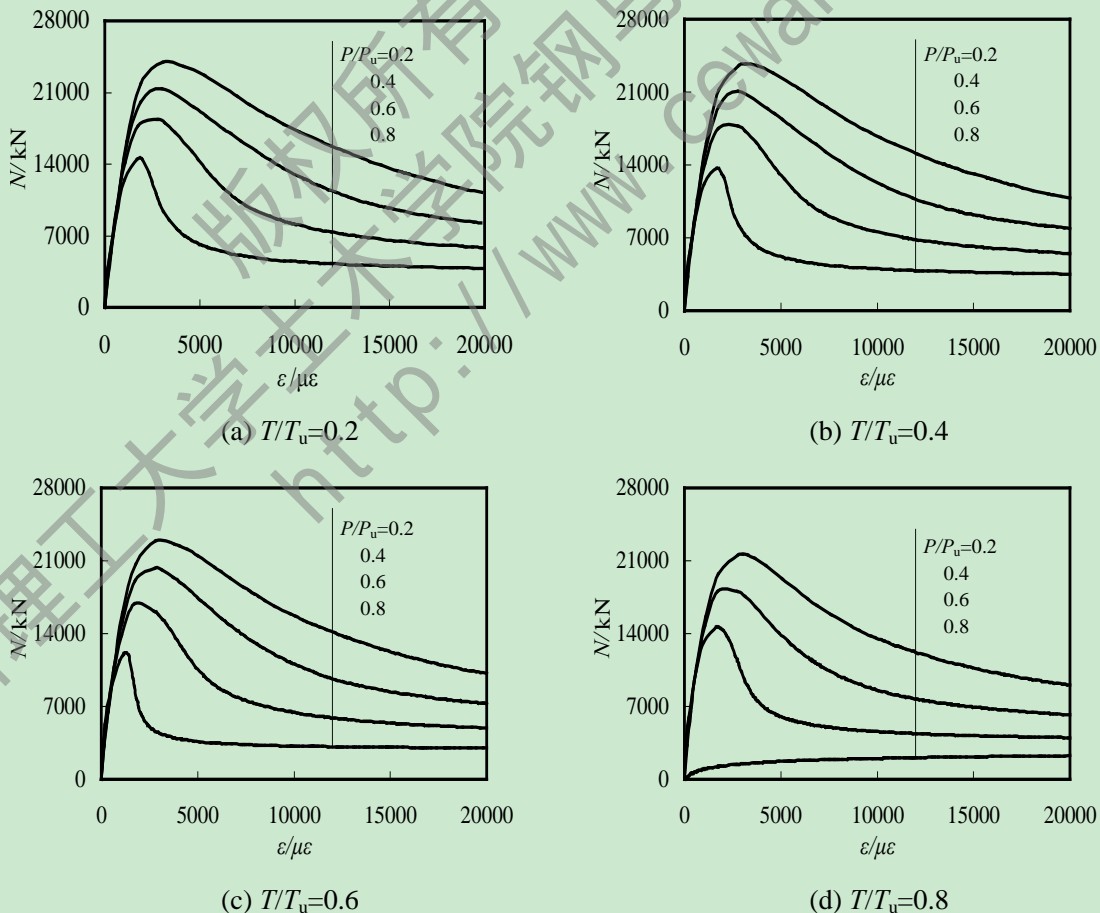


图 5-15 压弯扭剪构件在加载路径 III 下的 $P-\Delta$ 关系曲线

5.4 本章小结

基于本章的研究，主要内容可总结如下：

(1) 对内配十字型钢圆钢管混凝土压弯剪构件进行合理的数值建模分析，研究了构件的荷载-变形全曲线、应力云图的相关特征状况，并分析了构件在不同轴压比下的 $P-\Delta$ 关系曲线以及构件的 $k-\Delta$ 关系曲线，最后还进行了相关的参数分析。

(2) 对内配十字型钢圆钢管混凝土压弯扭剪构件进行合理的数值建模分析，并对三种常见路径下构件的荷载-变形曲线进行了对比分析。

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

第 6 章 结论与展望

结论

本文对内配十字型钢的圆钢管混凝土构件在简单受力、复合受力作用下的力学性能和工作机理进行了研究分析，基于本文的研究，可得结论如下：

(1) 通过大量的相关试验算例(包括钢筋混凝土、型钢混凝土、钢管混凝土以及内配型钢的钢管混凝土构件算例)，对采用有限元软件 ABAQUS 所建立的数值模型进行对比验证，证明有限元建模方法正确；

(2) 通过对受剪构件的计算分析，可定义内配十字型钢的圆钢管混凝土构件剪切、弯剪、弯曲破坏的界限，即：当 $m(\text{剪跨比}) \leq 0.3$ 时，组合构件以剪切破坏为主；当 $0.3 < m \leq 6$ 时，构件以弯剪破坏为主；当 $m > 6$ 时，构件以弯曲破坏为主；

(3) 对组合构件受压、扭、弯、剪等情况进行研究，并由参数分析可知：混凝土强度、钢管材料强度、型钢材料强度、钢管截面含钢率和型钢截面含钢率等对构件受力性能的影响各不相同，但大致趋势是一样的；

(4) 对组合构件受压扭、压弯剪、压弯扭剪的情况进行数值研究，可知，不同加载路径引起的复合受力，对构件力学性能的影响也各不相同。

展望

本文对内配型钢的钢管混凝土构件复合受力性能的分析还不够深入，有必要从以下方面进行深入研究：

(1) 本文对内配十字型钢的圆钢管混凝土复合受力的研究是基于组合构件受简单荷载作用基础之上的，但对构件受简单荷载作用的研究还比较肤浅，有待于深入研究；

(2) 本文对构件受拉、压弯、压弯扭、压扭剪、压扭弯等作用下的受力性能没有进行分析，但这又是实际工程中存在的荷载作用形式，有必要做进一步的研究分析；

(3) 本文没有对构件的具体受力形式进行承载力的公式推导，不能为实际工程提供承载力参考值，需进一步完善；

(4) 目前，许多国内外学者采用数值方法对组合构件受力进行研究，但相关的试验研究却很少，因此有必要通过试验来分析构件受力状况，这样更加接近实际情况；

(5) 本文所研究的对象是内配十字型钢的圆钢管混凝土构件，但为了满足实际工程的需要，应对不同的截面形式(圆形、方形、矩形)以及内配不同形式型钢(工字型钢、十字型钢)的组合构件进行研究分析。

参考文献

- [1] 范涛. 浅述型钢混凝土结构的特点及应用[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(4): 38-39.
- [2] 王连广, 刘之洋. 型钢混凝土结构在国内外应用和研究的进展[J]. 东北大学学报(自然科学版)1995, 16(3): 238-242.
- [3] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 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.
- [5] 周绪红, 刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 王清湘, 赵大洲, 关萍. 钢管-钢管高强混凝土轴压组合柱受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 44-49.
- [7] 王连广, 刘晓, 常江. 钢管-钢管高强混凝土偏心受压承载力试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 124-129.
- [8] 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[D]. 福州: 福州大学博士学位论文, 2006.
- [9] Han L.H., Tao Z., Liu W.. Effects of sustained load on concrete-filled hollow structural steel columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(9): 1392-1404.
- [10] 白国良, 雷强. 型钢混凝土受扭构件的非线性有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增刊 2): 103-107.
- [11] 郑山锁, 赵伟, 李磊, 等. 型钢混凝土偏压柱 ANSYS 数值模拟分析研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增刊 2): 179-183.
- [12] 李红波, 秦士洪, 丁智潮. 型钢混凝土受扭构件试验研究[C]. 第 17 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册), 武汉, 2008, 73-76.
- [13] Kitada T, Nakai H. Experimental study on ultimate strength of concrete-filled square steel short members subjected to compression or torsion[C]. Proceedings of the Inter. Confer. on Steel-Concrete Composite Structures. Fukuoka, Japan, 1991.Sep.137-142.
- [14] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土纯扭转问题研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(1): 7-13.
- [15] 韩林海. 钢管高强混凝土纯弯曲构件力学性能及承载力的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(1): 32-40.
- [16] 韦灼彬, 陶忠, 韩林海. 方钢管混凝土受弯构件力学性能及承载力的研究[J]. 工业建筑, 1998, 28(10): 6-9.
- [17] 陶忠. 方形截面钢管混凝土力学性能及承载力的理论分析与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学硕士学位论文, 1998.
- [18] Roeder C.W., Cameron B., Brown C.B.. Composite action in concrete filled tubes[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(5): 477-484.
- [19] Han L.H.. Tests on concrete filled steel tubular columns with high slenderness ratio[J]. Advances in Structural Engineering, 2000, 3(4): 337-345.

- [20] 杨有福, 韩林海. 矩形钢管混凝土构件抗弯力学性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3): 41-48.
- [21] 郭兰慧, 张素梅, 王玉银. 方形、矩形钢管高强混凝土受弯构件的理论分析与试验研究[J]. 钢结构, 2002, 17(6): 29-33.
- [22] 关萍, 王清湘, 赵大洲. 钢管-钢管混凝土受弯组合柱受力性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 57-60.
- [23] 陈宝春, 王来永, 欧智菁, 等. 钢管混凝土偏心受压应力-应变试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 154-159.
- [24] Beck J, Kiyomiya O. Fundamental pure torsional properties of concrete filled circular steel tubes[C]. J. Materials, Conc. Struct. Pavements, JSCE, 2003, No. 739/V-60, 285-296.
- [25] 卢辉, 韩林海. 圆钢管混凝土抗弯刚度计算方法探讨[J]. 工业建筑, 2004, 34(1): 1-5.
- [26] Fam A., Qie F.S., Rizkalla S.. Concrete-Filled Steel Tubes Subjected to Axial Compression and Lateral Cyclic Loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 631-640.
- [27] 徐春丽. 钢管混凝土柱抗剪承载力试验研究[D]. 济南: 山东科技大学硕士学位论文, 2004.
- [28] 王玉银, 张素梅. 圆钢管高强混凝土轴压短柱性能的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1646-1648.
- [29] Fujimoto T., Mukai A., Nishiyama I., et al. Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 203-212.
- [30] Sakino K., Nakahara H., Morino S., et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [31] Zeghiche J., Chaoui K.. An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(1): 53-66.
- [32] 丁发兴, 余志武. 圆钢管自密实混凝土纯弯力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 63-79.
- [33] 刘晓, 王连广, 张晓范. 钢管-钢管高强混凝土抗弯承载力理论研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(8): 1198-1201.
- [34] 钱稼茹, 崔瑶, 方小丹. 钢管混凝土柱受剪承载力试验[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 1-9.
- [35] 王庆利, 董志峰, 高建志. 圆截面钢管混凝土受弯构件试验研究[J]. 四川建筑科技研究, 2007, 33(3): 9-12.
- [36] 李黎明, 姜忻良, 陈志华, 等. 矩形钢管混凝土抗弯性能数值分析与简化计算[J]. 天津大学学报, 2007, 40(8): 990-994.
- [37] 尧国皇, 宋宝东, 黄用军. 矩形钢管弯扭构件的工作性能研究[J]. 深圳土木与建筑, 2007, 4(3): 13-18.
- [38] 于清, 陶忠, 陈志波, 等. 钢管约束混凝土纯弯构件抗弯力学性能研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 187-193.
- [39] Han L.H., Liu W., Yang Y.F.. Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(4): 377-387.
- [40] Yu Q., Tao Z., Wu Y.X.. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular

- columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46(4): 362-370.
- [41] 陈宝春, 李晓辉. 钢管混凝土(单圆管)约束扭转试验研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(5): 735-739.
- [42] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(1): 40-46.
- [43] 丁发兴, 周林超, 余志武, 等. 钢管混凝土轴压短柱非线性有限元分析[J]. *中国科技论文在线*, 2009, 4(7): 472-479.
- [44] 张旭, 傅学怡. 圆钢管混凝土构件抗剪性能分析[J]. *工业建筑*, 2009, (增刊): 1317-1323.
- [45] 王文达, 陈宇超, 张鹏鹏. 矩形钢管混凝土构件扭转性能及设计方法研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(10): 83-88.
- [46] 史艳莉, 陈宇超, 王文达. 矩形钢管混凝土构件基本剪切性能研究[J]. *铁道建筑*, 2010, (3): 109-111.
- [47] 李晓辉, 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土构件受扭有限元非线性分析方法[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(3): 412-417.
- [48] Liang Q.Q.. High strength circular concrete-filled steel tubular slender beam-columns, PartII: Fundamenta behavior[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67: 172-180.
- [49] Portolés J.M., Romero M.L., Bonet J.L., et al. Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(4): 623-633.
- [50] 黄勇, 陈伟刚, 段莉. 钢管混凝土短柱(剪力键)受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(12): 178-185.
- [51] 赵晓亮. 钢管混凝土构件受力性能试验与有限元研究[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2013.
- [52] 王志滨, 陈靖. 矩形钢管混凝土构件纯扭力学性能及设计研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2013, 41 (5): 909-915.
- [53] 徐积善, 周竞. 钢管混凝土中长柱在压扭复合受力下的试验研究[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1991, 24(增刊): 43-50.
- [54] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土压扭短柱理论分析方法[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1993, 26(3): 18-23.
- [55] 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[J]. *工业建筑*, 1994a, 24(2): 3-8.
- [56] 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[J]. *建筑结构学报*, 1995, 16 (4): 32-39.
- [57] 尧国皇, 韩林海. 钢管自密实高性能混凝土压弯构件力学性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(4): 34-42.
- [58] 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[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(10): 1520-1528.
- [59] 袁伟斌, 金伟良. 离心钢管混凝土弯扭构件试验研究与理论分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(1): 116-121.
- [60] 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[J]. *华中科技大学学报(城市科学)*

- 版), 2008, 25(4): 313-316.
- [61] 陈宜言, 林松, 尧国皇. 圆形钢管弯扭构件承载力实用计算方法研究[J]. 特种结构, 2012, 29(2): 95-108.
- [62] 王清湘, 赵大洲, 关萍. 轴心受压钢骨钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 710-714.
- [63] 赵大洲. 钢骨-钢管高强混凝土组合柱力学性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2003.
- [64] Wang Q.X., Zhao D.Z., Guan P.. Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 907-915.
- [65] 张素梅, 郭兰慧, 王玉银, 等. 方钢管高强混凝土偏压构件的试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 17-24, 70.
- [66] 朱美春. 钢骨-方钢管自密实高强混凝土柱力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2005.
- [67] 朱美春, 王清湘, 刘士润, 等. 钢骨-方钢管自密实高强混凝土轴压长柱试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6): 875-879.
- [68] 赵根田, 李华, 王晶, 等. 单向偏压钢骨高强混凝土长柱承载力的数值模拟[J]. 包头钢铁学院学报, 2006, 25(1): 77-80.
- [69] 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的研究[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(6): 26-32.
- [70] 徐亚丰, 向常艳, 李达, 等. 钢骨-钢管混凝土轴压短柱模拟实验分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(5): 747-750.
- [71] 赵同峰, 王连广, 赵爽. 方钢管-钢骨高强混凝土轴压短柱承载力分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(10): 1502-1504.
- [72] 赵同峰, 王连广, 吴少敏. 方钢管-钢骨混凝土偏压柱正截面承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 92-95.
- [73] 王兵, 王连广, 刘晓. 钢管钢骨混凝土组合柱大偏心受压承载力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(4): 712-716.
- [74] 刘强, 陈素容. 钢骨-钢管高强混凝土轴压短柱力学性能和承载力研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2009, 11(4): 76-78.
- [75] 何益斌, 肖阿林, 黄频. 方钢骨-钢管混凝土轴压中长柱极限承载力研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(6): 29-33.
- [76] 肖阿林. 钢骨-钢管高性能混凝土轴压组合柱受力性能与设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学博士学位论文, 2009.
- [77] 王金鑫. 钢骨-方钢管混凝土短柱偏压力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2009.
- [78] 王连广, 赵同峰, 安山河. 方钢管-钢骨混凝土双向偏压试件试验研究与理论分析[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 137-141.
- [79] 杨山波. 钢骨-钢管混凝土偏压短柱承载力试验研究[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2009.

- [80] 何益斌, 肖阿林, 郭健, 等. 钢筋-钢管自密实高强混凝土轴压短柱承载力-试验研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 19-33.
- [81] 王连广, 赵同峰, 李宏男. 方钢管-钢筋高强混凝土偏压柱试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(7): 64-70.
- [82] 王金鑫, 翁尚彬, 刘遥, 等. 钢筋-方钢管混凝土偏压短柱力学性能的试验研究[J]. 兰州理工大学学报, 2011, 37(4): 139-144.
- [83] 刘忠, 朱勇杰, 谭良斌, 等. 方钢筋-工字型钢筋混凝土偏压柱受力性能数值分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2012, 34(2): 26-30.
- [84] 杨旭, 徐亚丰. 剪跨比不同时钢筋-钢管混凝土柱的受剪承载力研究[C]. 第21届全国结构工程学术会议论文集第III册, 沈阳, 2012, 163-166.
- [85] 关萍, 王清湘, 赵德深. 钢筋-钢管混凝土组合柱压弯性能试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(3): 299-331.
- [86] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1993.
- [87] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学博士学位论文, 2005.
- [88] 黄宏, 黄斌洁. 圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件工作机理研究[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(6): 1-6.
- [89] 郑杰. 型钢混凝土复合受扭构件的抗扭刚度和变形的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学硕士学位论文, 2010.
- [90] 陈逸玮. 钢管混凝土柱形状因素与扭转韧性行为研究[D]. 台湾: 中央大学硕士学位论文, 2003.
- [91] 宫安. 钢管混凝土短柱在压扭复合受力下的研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院硕士学位论文, 1989.
- [92] 周竞. 钢管混凝土中长柱在压扭复合受力下的试验研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院硕士学位论文, 1990.
- [93] 吉伯海, 胡正清, 陈甲树, 等. 圆钢管轻集料混凝土构件抗弯性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8): 35-40.
- [94] 陈刚花, 李斌. 方钢管高强混凝土偏压短柱试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(6): 873-877.
- [95] 徐积善, 宫安. 钢管混凝土短柱在压扭复合受力下的实验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1991, 24(增刊): 34-41.

致谢

时光匆匆，转眼，研究生三年的学习生涯已然接近尾声。蓦然回首，欢笑与泪水共存，拼搏与汗水相依，虽然一路走来些许艰辛，但却甚是欣慰。因为人生最精彩的不是成功的那一瞬间，而是回头看，那段漆黑看似没有尽头、苦苦摸索的过程。三年的学习生活中，正是因为有了这样一个勇于探索、奋发进取的过程，才使得我在不断成长。这样的一种经历，使我的生活充实、岁月无悔，这样的一种经历，也是我对青春岁月的最好回报与铭记。

三年的学习生活富有意义，这得益于大家的帮助与关心。在此，首先感谢爷爷奶奶、父母、哥哥嫂子以及父老乡亲们的相助，正是由于你们的频频鼓励与大力支持，才使我有足够的信心与动力，不断拼搏奋进；同时，我的导师王文达教授、史艳莉副教授对我的教诲与帮助，让我甚为感激。无论是专业课程的精心讲解，还是期刊论文的顺利发表，亦或是学位论文的最终定稿，都倾注了导师太多的心血。另外，两位导师知识渊博、富于进取，对科研一丝不苟、对工作认真负责、对学生无私奉献，这种精神是我所必需学习的。总之，两位导师不仅是我的授业者，更是我人生路上的领航者，使我心怀梦想，风雨无阻。

本文的撰写还得到了张鹏鹏老师以及王景玄、包延红两位博士师兄的悉心指导与帮助，他们帮我理清课题思路并分析解决了许多疑难问题，使我在科研道路上少走了许多弯路；此外，感谢师兄魏国强、孙战伟、王亚伟、师姐黄秋秋、未晓丽在本文撰写中给予的大力支持与相助，使我的课题研究得以顺利进行；感谢同级的李华伟、王明涛、杨全全、肖会霞、杨金娟，师弟车向龙、宋子龙、师妹张敏、韩祎等在学习过程中的积极交流和讨论，为我提供了良好的学习环境。

感谢的同学还有王婧、赵红、马润田、王宪统、王月礼、陈星强、陈帅强等！

最后，再次衷心感谢一直在关心、支持与帮助我的亲人、老师、同学们，一路走来，有你们的相伴，倍感温馨。

本文的撰写还得到了国家自然科学基金(编号：51268035)和甘肃省建设科技攻关项目(编号：JK2012-42)的资助，特此致谢！

张海龙

2014年4月于工大

附录A 攻读硕士学位期间取得的科研成果

攻读硕士学位期间发表的学术论文：

- [1] 史艳莉, 张海龙, 王文达. 内置钢骨圆钢管混凝土纯扭构件力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊 1): 327-331. (EI 收录: 20133916790356)
- [2] 张海龙, 史艳莉, 王文达. 内配十字形型钢的圆钢管混凝土构件受弯性能分析[J]. 公路交通科技. (复审中)

软件著作权：

- [1] 王文达, 李华伟, 王景玄, 包延红, 张海龙, 王明涛. 钢与混凝土材料应力应变关系计算软件. 软件著作权登记号: 2014SR031087.

附录B 攻读硕士学位期间参与的科研项目

- [1] 国家自然科学基金(编号: 51268035): 内配型钢的钢管高性能混凝土构件压弯扭剪复合受力工作机理研究, 项目参加人, 在研。
- [2] 甘肃省建设科技攻关项目(编号: JK2012-42): 内配型钢钢管混凝土构件基本力学性能研究, 项目参加人, 在研。