

学校代号 10731

学 号 102081402023

分 类 号 TU398

密 级 公开



硕士学位论文

内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能研究

学位申请人姓名 王 亚 伟

培 养 单 位 兰州理工大学

导师姓名及职称 王文达 教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 钢-混凝土组合结构

论文提交日期 2013 年 5 月

学校代号: 10731

学 号: 102081402023

密 级: 公开

兰州理工大学硕士学位论文

内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能研究

学位申请人姓名:	王 亚 伟
导师姓名及职称:	王文达 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:	2013 年 5 月
论文答辩日期:	2013 年 6 月
答辩委员会主席:	莫庸 教授级高工

Analytical Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Stub Column
with internal Steel Reinforced under Bend Compression

By

WANG Yawei

B.E.(Lanzhou University of Technology) 2010

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Structural Engineering

in the

School of Civil Engineering

of

Lanzhou University of Technology

Supervisor

Professor Wang Wenda

May, 2013

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、保密口，在____年解密后适用本授权书。

2、不保密口。

(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 课题背景.....	1
1.2 相关课题的研究现状.....	2
1.3 课题的研究意义及研究现状.....	3
1.3.1 轴心受压.....	5
1.3.2 偏心受压.....	6
1.3.3 压弯、弯剪、扭转.....	7
1.4 本文的主要研究工作.....	8
第 2 章 内配型钢的钢管混凝土轴心受压构件的力学性能.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 有限元建模.....	10
2.2.1 材料模型.....	10
2.2.2 单元模型、接触和边界条件.....	12
2.2.3 单元划分与有限元算法.....	13
2.2.4 ABAQUS 建模.....	13
2.2.5 模型验证.....	13
2.3 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱的力学性能.....	15
2.3.1 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱的力学性能分析.....	16
2.3.2 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱的参数分析.....	21
2.3.3 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱极限承载力简化计算.....	27
2.3.4 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱承载力计算方法的比较.....	30
2.4 内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱的力学性能.....	33
2.4.1 有限元模型.....	33
2.4.2 内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱的力学性能分析.....	35
2.4.3 内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱稳定承载力简化计算.....	42
2.5 本章小结.....	44
第 3 章 内配型钢的钢管混凝土压弯构件的力学性能.....	46
3.1 引言.....	46
3.2 有限元建模.....	46
3.2.1 有限元建模过程.....	46
3.2.2 有限元模型验证.....	46

3.3 内配型钢的钢管混凝土纯弯构件的力学性能分析.....	49
3.3.1 内配型钢的钢管混凝土受弯构件的力学性能分析.....	49
3.3.2 内配型钢的钢管混凝土受弯构件的参数分析.....	51
3.3.3 内配型钢的钢管混凝土受弯构件实用计算方法.....	58
3.4 内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能.....	59
3.4.1 有限元建模过程.....	59
3.4.2 有限元模型验证.....	59
3.4.3 内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能研究.....	60
3.5 本章小结.....	67
结论与展望.....	69
参考文献.....	70
致 谢.....	74
附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录.....	75

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>

摘 要

内配型钢的钢管混凝土是一种现代新型的钢-混组合柱，其通过在钢管混凝土中插入型钢而形成的一种新的结构形式。本文基于以往学者研究的基础上，对此类新型构件的四种不同截面形式（包括内配工字型钢的圆钢管混凝土、内配工字型钢的方钢管混凝土、内配十字型钢的圆钢管混凝土和内配十字型钢的方钢管混凝土构件）分别进行了轴压、受弯和压弯力学性能的研究。

具体进行了以下工作：

(1) 利用有限元分析软件建立了内配型钢的钢管混凝土轴压短构件模型并进行了模拟，有限元结果与相关试验结果吻合良好。对四种不同截面形式的轴压短构件的受力机理进行了研究，并且进行了大量的参数分析，得到了各参数对轴压短构件承载力的影响规律，并得到了在参数变化范围内的简化计算方法。

(2) 采用有限元软件 ABAQUS 对内配型钢的钢管混凝土轴压长构件进行了理论模拟，模拟结果与试验值吻合良好。有限元分析了四种不同截面形式轴压长构件在不同参数下的极限承载力的变化规律，得到了在参数变化范围内的轴压长构件简化计算方法。

(3) 有限元模拟了内配型钢的钢管混凝土受弯构件试验，模拟结果与试验结果吻合良好。分析了各主要参数对内配型钢的钢管混凝土四种不同截面形式构件的影响规律，得到了在参数分析范围内的内配型钢钢管混凝土受弯构件承载力计算公式。

(4) 对内配型钢的钢管混凝土压弯试验进行了有限元模拟，模拟结果与试验结果吻合良好。分析了各主要参数对内配型钢的钢管混凝土压弯构件极限承载力的影响规律，结合本文所分析的内配型钢的钢管混凝土轴压、受弯构件的力学性能，得到压弯构件极限承载力计算方法。

关键词：内配型钢的钢管混凝土，轴心受压，受弯，压弯，力学性能，有限元分析

Abstract

Concrete-filled steel tubular column with the internal profile steel is a modern steel and concrete composite columns. It is a new construction style which inserting steel in concrete-filled steel tube. This paper presents a finite element(FE) model to analyse the mechanical behavior of concrete-filled steel tubualr columns with internal profile steel, including concrete-filled steel tube with I section steel, concrete-filled steel square tube with I section steel, concrete-filled steel circular tube with cross steel section and concrete-filled steel square tube with cross steel section. The main researches can be summarized as follows:

(1) The FE model of axial compressive was developed to investigate the performance of the CFST stub columnns with internal profile steel based on the others' results. The caculation results are agreed well with the experimantal results. Than the mechanism research on the four different cross-section of the axial compressive stub components and take much analysis of parameters, then get effect of law on influence of axial compressive bearing capacity of stud components. The simplified calculation method was given based the parametric analysis.

(2) The FE model of axial compressive was developed to investigate the performance of the CFST columnns with internal profile steel based on the others' results based on ABAQUS software. The caculation results are agreed well with the experimantal results. Than the mechanism research on the four different cross-section of the axial compressive members and take much analysis of parameters, then get effect of law on influence of axial compressive bearing capacity of long components. The simplified calculation method was given based the parametric analysis.

(3) The FE model was developed to investigate the pure bending performance of the CFST columnns with internal profile steel based on the others' results. The caculation results are agree well with the experimantal results. Than the bending mechanism research on the four different cross-section of the CFST columns and take much analysis of parameters, then get effect of law on influence of bending bearing capacity of components. The simplified calculation method was given based the parametric analysis.

(4) The FE model was developed to investigate the bending performance of the CFST columnns with internal profile steel based on the others' results. The results are matched well with the experimental results. A practical design approach of ultimate strength for the concrete-filled steel tube of the internal profile steel members were given under bending based on a large scale parameter studies.

Key word: Concrete-filled steel tube, Axially, Flexural, Bending, Mechanical properties, Finite element analysis

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景

随着人类科技的进步，社会的不断发展。各种造型美观的高层建筑渐渐融入到我们的生活当中，高层建筑的出现使我们大大提高了对城市土地的利用率，大大的提高了土地的利用率。但是对着建筑物高度的不断升高，传统意义上的钢筋混凝土结构在高层建筑中的不足开始凸现出来，构件的截面尺寸过大占据了较多的建筑空间，在一定程度上影响了建筑的使用功能而且构件自重较大限制了楼层的高度。因此，传统的钢筋混凝土结构和钢结构已不能满足现代工程跨度大、承载力高、抗震性能好等要求，于是新型的钢-混组合结构开始被大量应用于现代结构工程。

钢-混组合结构诞生于 19 世纪末期，由于钢材和混凝土二者组合在一起共同作用，可以充分发挥各自材料的特点和优点，具有轻型大跨、预制装配、快速施工等优点，能够产生显著的技术经济效益和社会效益^[1-2]。随着科学技术的不断发展，钢-混组合结构分为三种主要形式：型钢混凝土(Steel Reinforced Concrete)结构^[3]、钢-混凝土组合梁(Steel-Concrete Composite Beam)结构^[4]和钢管混凝土(Concrete Filled Tube or Concrete Filled Steel Tube)结构^[5]。

在现代工程中使用较多的承载组合柱有型钢混凝土组合柱和钢管混凝土柱。型钢混凝土柱简称 SRC 柱是在钢筋混凝土柱中插入型钢，使得柱中钢筋、型钢和混凝土三者协同工作的组合柱。

钢管混凝土柱简称CFST柱，是指在钢管中填充混凝土而形成的、且钢管及核心混凝土能够共同承受外荷载作用的结构构件。按截面形式不同，可分为圆钢管混凝土，方、矩形钢管混凝土和多边形钢管混凝土等。实际结构中，根据钢管作用的差异，钢管混凝土构件又可分为两种形式：一是组成钢管混凝土的钢管和混凝土在受荷初期就共同受力；二是外加荷载仅作用在核心混凝土上，钢管只对其核心混凝土起约束作用，即所谓的钢管约束混凝土构件。

钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用，及钢管对其核心混凝土的约束作用，使混凝土处于复杂应力状态之下，从而使混凝土的强度得以提高，塑性和韧性性能得到改善。同时由于混凝土的存在还可以延缓或者避免钢管过早的发生局部屈曲，从而可以保证其材料性能的充分发挥。

钢管混凝土由于具有承载力高、塑性和韧性好、施工方便、耐火性能好、经济效果好等特点，现在已被大量的应用于高层和超高层建筑以及跨度较大的桥梁结构中并取得了良好的经济效益和社会效益（韩林海，2007^[5]）。

在工程方面，钢管混凝土结构在新型高层和大跨度的拱桥中得到了越来越多的应用，如：台北 101 大厦和南京新世界大厦图(1.1)。



(a) 台北 101 大厦



(b) 南京新世界大厦

图 1.1 钢管混凝土结构实际工程应用

1.2 相关课题的研究现状

外国对钢管混凝土的研究开展的较早，前苏联在 20 世纪 50~60 年代对钢管混凝土结构进行了系统的研究，并使其在工业厂房、空间结构和拱桥结构中应用。再西欧一些国家如英国，德国和法国等，主要研究方钢管混凝土、圆钢管混凝土和矩形钢管混凝土结构，核心混凝土为素混凝土，或在核心混凝土中配置钢筋或型钢等(韩林海，2007^[5])。以下是一些钢管混凝土构件的国内外相关文献：

田宏伟等(2007)^[6]基于双剪统一强度理论，文章建立了钢管的承载力公式；同时，避开混凝土破坏准则中的测压系数不确定分析，建立了混凝土承载力公式，两者叠加建立钢管混凝土短柱承载力公式并根据弹性模量理论进而推出钢管混凝土长柱的稳定影响系数，导出极限承载力公式，通过与相关实验值比对，结果显示计算值与实验值吻合良好。

金伟良等(2010)^[7]对薄壁圆钢管自密实混凝土短柱进行了轴向加载实验研究，对相同尺寸的试件进行试验并记录分析了实验现象和破坏形式以及绘制了荷载位移曲线。

刘鹏等(2010)^[8]对轴压短柱的基本性能、通过数据的对比说明长径比对轴压短柱承载力的影响即试件较短时，试件的端部会产生附加的套箍约束，从而使核心混凝土的强度提高。长径比较大时，会因为压曲而使极限承载力下降。

Hajjar 和 Gourley(1996)^[9]进行了矩形和方形截面的钢管混凝土试验，在最后综合了轴向力，强弱轴弯曲的组合作用，得到了包含钢管混凝土的宽厚比和混凝土的抗压强度与钢管的屈服强度等设计参数的公式。

Saw.H.S 等(2000)^[10]根据欧洲规范做了钢管混凝土复合柱的试验，研究对象包括构件的各个设计参数对构件的受力性能和变形影响，最后试验结果与规范规定相比较发现规范相对比较保守。

O'Shea 和 Bridge(2000)^[11]进行了薄壁钢管混凝土柱的轴向加载试验，结果表明由于混凝土的存在薄壁钢管发生局部屈曲受到了限制，并且用实验数据验证了相关规范中的设计要求。

崔清洋和张颖(2003)^[12]通过对十六根不同参数的钢管混凝土受压构件进行的试验研究,分析了钢管混凝土柱的受压破坏过程和破坏机理。钢管混凝土构件之所以要比相应的空钢管和核心混凝土的极限承载力之和大很多,这是由于钢管内混凝土受到钢管的紧箍作用而增强。而且受压构件的承载力(偏心或轴压)随长细比的增大而减小,随含钢量增大而增大,构件不发生失稳破坏时,长细比和含钢量对构件竖向应变影响不大。

余志武和丁发兴(2008)^[13]通过对 8 根自密实钢管混凝土偏压柱的力学性能进行对比试验,分析了各个因素对受力性能的影响,用有限元分析方法进行全程分析,最后提出钢管混凝土偏压柱实用承载力计算公式。

方小丹等(2010)^[14]设计了 26 个钢管混凝土短柱试件进行试验研究,通过对试验结果的分析及对比,提出了短柱在压弯作用下的受剪承载力计算公式。

随着组合结构理论的不断发展和完善,研究人员发展了一系列的钢-混新型组合柱。

钢管约束混凝土柱。这种形式最早是由 Tommii 等在 1985 年的研究中提出,钢管约束混凝土中钢管取代了传统形式上的钢筋,钢管不直接承担纵向荷载,而是只和混凝土在横向之间有相互作用。以下是一些国内外的相关文献:

Tomii 等^[15]提出了将传统钢筋混凝土中的钢筋由钢管所取代,并对此种新型的构件形式在抗震性能方面进行了对比试验。

刘界鹏等(2009)^[16]对圆钢管约束混凝土短柱的力学性能进行了试验研究,试验以钢管屈服强度和径厚比为变量参数,共分为三组共十四个短柱的试件。试件的破坏是内部核心混凝土的剪切破坏。这是因为由于混凝土受到钢管的紧箍作用而峰值应变增大,所以在混凝土破坏时,钢管早已屈服。最后根据试验可以得出钢管屈服点可以作为此种短柱的轴压承载力屈服点,并推导出了轴压承载力公式。

Zhang 和 Liu (2007)^[17]作者主要对 23 个方钢管约束混凝土(STRC)短柱进行了单向轴压试验,并归纳推算除了此类构件的承载力公式,除此以外还做个梁柱组合结构的实验分析,最后结合试验分析,提出了有限元分析模型的纤维模型。

Zhang 等(2005)^[18]设计了 50 个矩形钢管混凝土柱的构件,用于加载试验。根据试验结果确定了混凝土强度对构件承载力的影响以及建立了等效一维非线性应力-应变模型用于模拟矩形钢管混凝土。

周绪红等(2010)^[19]对 2 个内配工字型钢的圆钢管约束混凝土柱和 2 个内配工字型钢的方钢管约束混凝土柱试件进行了压弯试验,确定了在核心混凝土中不必像型钢混凝土一样设置钢筋笼,并对由试验得到的荷载位移滞回曲线进行了数值模拟。

Zhou 等(2005)^[20]本文中主要利用有限元分析软件分析和动态分析了中国青海省西宁市跨度 90 米的钢管混凝土中乘式拱桥,并且详细介绍了有限元分析方法和分析过程。

此外,还有中空夹层钢管混凝土柱^[21-22]、复式钢管混凝土柱^[23-24]、钢管混凝土异形柱^[25]和内配型钢的钢管混凝土等。

1.3 课题的研究意义及研究现状

众所周知,由于钢管混凝土柱具有承载力高,抗火性能好和抗震性能好的特点,因此在我国当前的高层建筑中得到了广泛的应用,目前多数超高层建筑中大多采用型钢混凝土或钢管混凝土框架柱。但钢管混凝土和型钢混凝土相比抗火性能相对较差,在较高轴压比的情况下,钢管混凝土柱的延性难以满足抗震需求。而型钢混凝土柱的配筋构造较为复杂,在工程设计阶段比较复杂,且现场施工中既有内部型钢的钢结构施工又有内置钢筋笼的施工施工量大而繁琐。

作为一种现代新型的钢-混组合柱,内配型钢的钢管混凝土柱又被称之为钢骨混凝土柱(Steel Reinforced Concrete Filled Tube),是在钢管混凝土中插入型钢形成一种新的结构形式,图 1.2 给出了内配工字型钢和十字型钢的圆钢管混凝土构件截面。这一看似简单的组合使得内配型钢的钢管混凝土构件内部不需像型钢混凝土一样设置钢筋笼,可以有效的缩短施工周期,减小施工难度,而且由于没有设置钢筋笼可以提高内部核心混凝土的质量,并有效地提高弹塑性层间变形的能力,且内配型钢的钢管混凝土构件的抗火性能也得到较大的提高。除此之外,内配型钢的钢管混凝土柱还具有承载力高的特点。

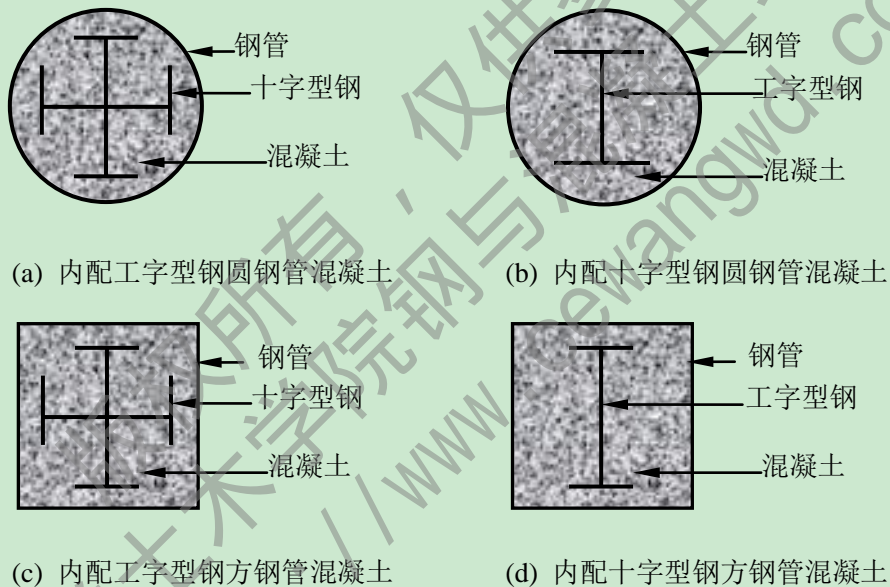


图 1.2 内配不同型钢的圆钢管混凝土截面

型钢插入钢管混凝土中而形成的这种新的截面形式,并不是简单的将三者相加在一起,而是钢管、型钢和混凝土三者有机结合,相互作用提高了构件的承载力,且远远大于三者单独承载力的几何相加。在实际工程中,由于承载力提高,构件的截面尺寸减小,构件自重减轻有利于建筑空间的利用和相应的降低地基基础造价,因此采用内配型钢的钢管混凝土柱具有较好的经济效果。

这种新型的截面形式最早见诸于文献 EuroCode4^[26],提出了这种将型钢埋与钢骨混凝土中的截面形式并作出了一定分析。近年来随着科学技术的不断发展,国内外很多学者对内配型钢的钢管混凝土构件做了很多的试验,并且有了较深的研究。本文查阅了相关课题文献,并进行了综述和分析,主要包括内配型钢的钢管混凝土柱在轴心受压、偏心受压和剪切性能等几方面内容。

1.3.1 轴心受压

在诸多的轴心受压试验中根据试验构件的构件类型又大致分为内配十字形钢的钢管混凝土构件、内配工字形的钢管混凝土构件。

(1) 内配十字型钢的钢管混凝土构件：

朱美春等(2006)^[27]对 13 根内配工字形钢的钢管自密实混凝土柱试件进行了轴向加载力学性能试验及理论分析。作者分析了其破坏过程及破坏形态，并由试验得到了荷载-轴向变形曲线和核心约束混凝土应力应变模型及高强混凝土轴心受压短柱荷载-轴向变形全过程曲线。

刘强和陈素容(2009)^[28]对型钢插入钢管，内部填充混凝土的组合柱构件进行了轴向加载的试验，分析得出在加入型钢后，柱子的承载力有明显的提高，并能延缓混凝土剪切裂缝的出现和发展，随着配骨指标的提高，组合柱的延性和承载力有所提高。最后提出了基于统一理论推导出的轴压承载力计算公式。

朱美春等(2006)^[29]进行了 8 根内配十字型钢的方钢管自密实混凝土组合长柱的轴向加载实验，试验采用分级加载的方式直至破坏。最后实验结果显示混凝土可以在构件内实现自密实的效果，过程中没有出现分层离析现象，长细比在 11 到 43 的范围内，试件由强度破坏至弹塑性失稳破坏转化，最后提出了自密实混凝土组合柱承载力计算公式与试验对比良好。

徐亚丰等(2009)^[30]对 5 个内配型钢的钢管混凝土柱试件进行低周反复荷载试验，试验采用悬梁式加载，试验中试件的破坏形式都为压弯破坏即表现为外表面向外凸起的破坏形态，这说明构件的核心混凝土被压碎。最后对试验结果进行分析，证明了内配型钢的钢管混凝土柱具有较好的延性性能能满足抗震要求。

Kato Ben(1996)^[31]对内配型钢的钢管混凝土组合柱做了轴向加载的试验，试验构件包括圆形和方形钢管内配型钢的混凝土柱。并且在最后对试验结果进行分析，推导出了此类构件的设计公式。

Wang 等(2004)^[32]对 16 种内配不同型钢的钢管混凝土柱进行了轴向加载试验，并对各种主要参数进行了对比分析，根据试验结果推导出了内配型钢的钢管混凝土柱的承载力公式。

邓远征和王清湘等(2005)^[33]对影响内配十字型钢的钢管混凝土短构件轴压承载力的因素进行了分析研究，提出了约束指标对于承载力和延性的影响。最后结合试验数据，推导出了内配十字型钢的钢管混凝土轴压短柱的承载力公式。

何益斌等(2007)^[34]对内配十字形钢的钢管混凝土短构件的轴心受压承载力公式，基于双剪统一强度理论进行了理论推导，并与相关的试验结果和目前已有的计算公式进行了比较。

肖阿林等(2008)^[35]对内配十字型钢的钢管混凝土轴压长柱构件进行了理论研究，推导出了内配十字型钢的钢管混凝土组合长柱稳定承载力计算公式，并以此为基础推导出了此类构件的长细比限值，最后运用有限元软件对此类构件进行了全过程分析。

(2) 内配工字型钢的钢管混凝土构件:

何益斌等(2010)^[36]对 9 根不同尺寸参数和材料参数的内配工字形钢的钢管混凝土短柱进行了轴压承载力试验研究,结合试验结果讨论了影响内配工字形钢的钢管混凝土短柱力学性能的因素,最后通过线性回归的方法得到了承载力计算公式。

杨包生等(2008)^[37]对八根钢管-钢骨混凝土组合柱进行了轴压承载力的试验,并在最后利用有限元软件 ANSYS 对该试验进行了模拟。

Zhu 等(2005)^[38]对 14 个内配型钢的方钢管自密实混凝土柱构件进行轴向加载试验,研究了各主要参数对于构件的影响,并在最后提出了极限承载力的计算公式。

1.3.2 偏心受压

文献中偏心受压构件的构件类型分为内配十字型钢的钢管混凝土构件、内配工字型钢的钢管混凝土构件。

(1) 内配十字型钢的钢管混凝土构件:

王连广等(2010)^[39]进行了 10 个内配型钢的方钢管高强混凝土柱偏心受压的试验。所有试件均在压力机下施加偏压荷载。根据实验现象和实验数据得出荷载-挠度关系曲线、荷载纵向应变关系曲线、中截面纵向应变分布及挠曲变形。再根据纤维模型法理论,编制了内配型钢的方钢管混凝土偏压程序 ZTFPY。

何益斌等(2010)^[40]对 13 根不同参数的内配十字型钢的钢管混凝土组合柱进行的偏心受压试验,由结果分析得到了荷载变形关系曲线和荷载应变关系曲线。最后由是试验对比和数据分析得到偏心率对偏压组合柱的影响以及内配型钢的钢管混凝土偏压柱的延性和承载力都要优于普通的钢管混凝土柱,这是由于内配型钢的钢管混凝土柱中的内部型钢能延缓或者阻止柱中剪切斜裂缝的开展。

闫长旺等(2008)^[41]对 13 根剪跨比为 2 的内配十字型钢的钢管高强混凝土构件在低周反复荷载下进行了试验。得出短柱的位移延性和轴压比成反比,随其减小而提高;体积配箍率越高则试件延性越好,但配箍率到一定程度时,影响不明显。由于高强混凝土在高层、打跨结构中具有“脆性”的特点,因此采用在混凝土柱中内置钢骨来提高结构的抗震延性是可行的。

王清湘等(2004)^[42]对 12 件具有不同参数的内配十字型钢的钢管混凝土组合短柱偏心受压的试验,试验采用了反复加卸载和单向加载两种加载方式。最后由得出的实验数据对比分析得出:混凝土的强度的提高可以使组合柱的弹性极限增大同时也会影响柱子的延性降低;内置的钢骨可以抑制混凝土剪切斜裂缝;套箍指标能使外部钢管对混凝土的约束作用增强,因此可以提高柱子的承载力。

(2) 内配工字型钢的钢管混凝土构件:

赵同峰等(2011)^[43]对 9 根内配工字型钢的钢管混凝土构件进行了双向偏压柱试验,分析了尺寸参数和材料参数对构件的影响,并在最后基于试验的结果,利用有限元分析软件对构件进行了模拟。

王连广等(2009)^[44]对 9 根构件为内配工字型钢的方钢管混凝土柱构件进行了双向偏

压的试验，试验研究了不同参数条件下构件的力学性能，并在试验的基础上利用程序 SPYZTF 编制了双向偏压程序，最后通过对计算结果的回归分析，得到了此类构件双向偏压承载力公式。

刘晓等(2008)^[45]分析了内配工字型钢的钢管混凝土构件在偏心受压条件下各个部分的工作过程，并提出了内配型钢的钢管混凝土此类构件大小偏心的判断依据和方法。

王兵等(2009)^[46]以内配工字型钢的钢管混凝土大偏心受压柱作为研究对象，通过极限平衡法推导出大偏压柱的承载力公式以及确定偏心距增大系数的方法，考察了长细比对三种不同截面形式的影响：随着长细比的增加，对内置钢管型柱的影响速率较慢；长细比一定时，极限承载力与截面用钢量成正比。

王连广等(2010)^[47]设计了 8 根不同参数的内配工字型钢的钢管混凝土偏心受压组合柱，采用分级加载的方式加载直至破坏，最后试验结果表明：随着构件偏心距的增大，承载力减小且偏心距对于极限承载力的影响较大；长细比与承载力呈反比非线性关系且降低幅度逐渐增大；构件的抗压强度与内部钢骨的截面形式有较大关系。最后在试验的基础上，计算出组合柱偏压承载力的计算公式，并与试验结果相验证，较为符合。

秦国鹏等(2009)^[48]对内配型钢的 GFRP(glass fiber reinforced polymer)管混凝土构件进行了偏心受压试验。试验采用分级加载的方式直至构件破坏。最后把经过试验的得到的结果与作者编制的非线性分析程序运行所得出的相对比，两者吻合较好。并且用该非线性分析程序分析了影响偏压承载力的主要因素：配骨指标和偏心率。

刘晓等(2009)^[49]在进行偏压构件的非线性分析时，考虑了四种假定：平截面假定、柱两端铰接、不考虑局部屈曲、忽略混凝土受拉。利用纤维模型法对构件截面条带划分，确定非线性程序。并计算了组合柱的偏压极限承载力结果和理论计算相吻合。

1.3.3 压弯、弯剪、扭转

构件类型分为内配十字型钢的钢管混凝土构件、内配工字型钢的钢管混凝土构件以及钢管内配 T 形钢构件。

关萍等(2003)^[50]对内配工字型钢的钢管混凝土柱构件进行了受弯试验，对试验的破坏结果进行了分析，探究了影响构件抗弯承载力的主要因素。

赵同峰和王连广(2008)^[51]利用合成法和有限条带法编制了程序 YWZT，用于对方钢管-钢骨混凝土构件的压弯分析，最后由算例与试验结果比较吻合，并根据此程序分析了长细比、套箍率变化对压弯承载力的影响。对数值计算结果回归分析，推出压弯承载力计算公式。

陈颖和朱美春(2010)^[52]利用叠加法对内配十字型钢的方钢管混凝土柱的正截面承载力进行了推导。把组合柱分为钢骨部分和方钢管混凝土部分，再由结构塑性理论的下限定理，任意分配钢骨部分和钢管混凝土部分所承担的轴力并求出相应各部分的受弯承载力，则两者之和的最大值即为在该给定轴力心处的受弯承载力，最后给出了一个算例对公式进行验证。

史艳莉等(2010)^[53]用 ABAQUS 软件分别建立了圆形、方形及矩形钢管混凝土构件

横向受剪时的三维有限元数值分析模型，并根据此理论模型，进行了 108 个矩形钢管混凝土构件纯剪受力时的参数分析，各参数对剪力和剪应变关系的影响。参数对剪力和剪应变关系的影响：随着钢材强度、混凝土强度的提高抗剪承载力提高，但对曲线的形状影响不明显，含钢率对构件抗剪承载力有明显提高，但曲线后期强化刚度增加截面高宽比对构件的抗剪承载力降低但对曲线形状影响不大。最后推导出抗剪承载力的计算公式。

王文达等(2010)^[54]基于 ABAQUS 软件，建立了矩形、圆形及方形的钢管混凝土构件在纯扭矩作用下的数值模拟模型，并与已完成的方形和圆形构件的扭转试验得出的结果曲线对理论模型进行了对比验证。在此模型的基础上，对影响矩形构件扭转力学性能的因素进行了分析，结果表明混凝土强度及钢材强度只对扭矩-扭转角关系曲线的数值有影响，对其形状无明显影响。在文中最后建议了仅适用于矩形钢管混凝土纯扭构件的抗扭承载力计算公式。

关萍等(2003)^[55]通过对 2 根内配工字型钢的钢管混凝土柱进行的单调压弯试验，试验在轴压比一定，配骨指标为参数变量进行分析，探究了内配工字型钢的钢管混凝土压弯构件具有较好的延性和承载力。

刘晓等(2010)^[56]文章主要研究了内配工字型钢的钢管混凝土构件的受弯力学性能，试验设计了五根尺寸不尽相同的抗弯构件，进过对实验结果的对比和分析，试验明确了构件在弯矩作用下的工作和破坏模式，并由结果对比得出各截面尺寸对构件的影响，最后根据统一理论给出钢管钢骨高强混凝土抗弯承载力计算公式。

赵同峰等(2007)^[57]基于内配工字型钢的矩形钢管混凝土构件在抗弯中中和轴位置的不同，破坏模式也不同，用改进的叠加法计算受弯构件正截面承载力即钢骨和矩形钢管按照实际受力分析不需要反复计算片便可以得到要求的计算精度，但公式的正确性未经过验证。

鞠开林等(2011)^[58]设计制作了九根钢管-T 形钢骨截面的混凝土短柱，探讨了这种构件的极限承载力和影响其受力性能的主要因素。试验采用分级加载，每级加载为预计极限承载力的十分之一，随着施加荷载的增大，试件钢管壁最后呈剪切破坏，混凝土呈局部屈曲形态。通过试验结果的对比和理论分析，增大套箍系数，就增强了外部钢管对内部核心混凝土的约束作用，因而可以提高构件的延性和极限承载力。增大配骨指标刚度和延性都有所增加。

国内外研究者对内配型钢的钢管混凝土构件的力学性能已有不少的研究和相关报道，但主要集中在轴心受压和偏心受压两个方面，对扭转和剪切性能的分析相对较少，在研究的内置工字形钢的钢管混凝土构件多是试验研究，并没有系统的有限元分析和理论分析。在利用有限元分析软件对构件进行分析时，多是利用 ANSYS 等有限元分析软件，目前还没有利用 ABAQUS 对内配工字形钢的钢管混凝土构件进行分析。综上所述，本课题开展对内配型的钢管混凝土构件的力学性能分析十分必要。

1.4 本文的主要研究工作

要使内配型钢的钢管混凝土这种新型结构在工程中应用，有必要对此类新型构件的基本力学性能进行研究，对其在各种截面形式在不同荷载下的极限承载力给出实用计算方法。本文在大量阅读钢管混凝土和内配型钢的钢管混凝土的相关文献后，对本文的研究内容，借鉴了其他研究者的研究方法，利用了一些相关的研究成果，对本课题进行了较为深入的研究探讨。

本文采用了有限元分析软件 ABAQUS 对内配型钢的钢管混凝土构件进行了简单受力的有限元分析模拟，研究了各主要参数对四种不同截面形式（内配工字型钢的圆钢管混凝土、内配十字型钢的圆钢管混凝土、内配工字型钢的方钢管混凝土和内配十字型钢的方钢管混凝土）构件承载力的影响规律。本文所做的具体工作如下：

(1) 建立了内配型钢的钢管混凝土轴压短柱模型，有限元模拟与试验结果吻合良好，并对其进行了参数分析，得到了构件各参数对此类新型构件轴压力学性能的影响规律。并且基于钢管混凝土轴压短构件极限承载力计算公式回归分析得到了此类新型构件的轴压承载力计算方法。

(2) 建立了内配型钢的钢管混凝土轴压长柱模型，有限元模拟与试验结果吻合良好，并对其进行了参数分析，得到了构件各参数对此类新型构件轴压力学性能的影响规律。并且基于钢管混凝土轴压长构件极限承载力计算公式回归分析得到了此类新型构件的轴压长柱承载力计算方法。

(3) 建立了内配型钢的钢管混凝土构件受弯模型，有限元模拟与试验结果吻合良好，并对其进行了参数分析，得到了构件各参数对此类新型构件受弯力学性能的影响规律。并且基于钢管混凝土受弯构件极限承载力计算公式回归分析得到了此类新型构件的抗弯承载力计算方法。

(4) 建立了内配型钢的钢管混凝土压弯模型，有限元模拟与试验结果吻合良好，并对其进行了参数分析，得到了构件各参数对此类新型构件压弯力学性能的影响规律。并且基于钢管混凝土压弯构件极限承载力计算公式回归分析得到了此类新型构件的压弯承载力计算方法。

第 2 章 内配型钢的钢管混凝土轴心受压构件的力学性能

2.1 引言

本章的主要内容是利用 ABAQUS 有限元分析软件，对模拟的内配型钢的钢管混凝土轴压短柱进行了力学性能分析。介绍了本文中运用到的有限元材料模型和单元类型，描述了内配型钢的钢管混凝土构件的建模过程。对此种新型钢管混凝土构件进行了大量的参数分析，得到了相关参数对内配型钢的钢管混凝土短柱轴压构件极限承载力的影响规律。并在此基础上，本章对内配型钢的钢管混凝土轴压短柱构件的力学性能进行了分析讨论，给出了内配型钢的钢管混凝土轴压短柱的极限承载力使用计算方法。

2.2 有限元建模

本文使用 ABAQUS 有限元分析软件对相关构件进行模拟和有限元分析。ABAQUS 有限元分析软件是一款工程模拟软件。它包括一个丰富的可模拟任意形状的单元库，包括：金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料等。ABAQUS 不但可以模拟和分析机械、结构的固体力学问题，还可以研究土力学，热传导等热/力耦合、流/力耦合以及热/电耦合等问题。软件在丰富了材料的单元库的同时也给操作者提供了更为方便简捷的操作系统，对模型的建模和模型之间的装配，切分，边界条件等步骤更为方便和简单，而且 ABAQUS 在进行结果有限元计算时能够选择合适的荷载增量步，大大的节省了计算时间，提高了效率。

2.2.1 材料模型

本文模拟的构件为内配型钢的钢管混凝土。其中用到的材料模型主要包括内配型钢和外部钢管的钢材材料模型，钢管内部核心混凝土的混凝土材料模型，以及大刚度材料模型。

1 钢材材料模型

钢材是一种弹塑性材料。本文中内配型钢的钢管混凝土采用的钢材材料模型对低碳钢使用二次塑流模型，高强钢使用线性强化模型。

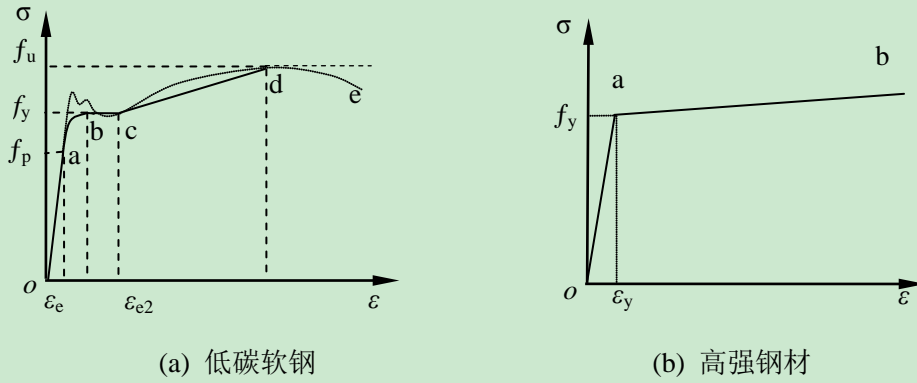


图 2.1 常温下低碳钢与高强钢的材料本构关系曲线

图 2.1 所示为常温下低碳钢和高强钢的本构关系曲线。图 2.1(a)中虚线是低碳钢材的实际应力-应变曲线，实线是简化后的应力-应变，其中， f_p 、 f_y 和 f_u 分别为钢材的比例极限、屈服极限和抗拉强度极限。图 2.1(b)所示的是高强钢的应力-应变关系，称之为双线性模型。图中分为弹性段和强化段，其中强化段的弹性模量值取值为 $0.01E_s$ ， E_s 为钢材的弹性模量（韩林海，2007^[5]）。钢材的弹性模量 E_s 值的大小定义为 210000MPa，泊松比为 0.3。

2 混凝土材料模型

ABAQUS中对混凝土的材料模型的定义包括混凝土受压和受拉两方面。其中定义受拉软化的方法有两种：使用核心混凝土受拉时的应力应变关系和ABAQUS中的GFI应力-断裂能来定义（利用混凝土受拉时产生裂缝所需要的能量即断裂能来衡量核心混凝土受拉）。本文对内部核心混凝土受拉的定义使用了第二种方法，断裂能 G_f 和破坏应力 σ_0 来模拟混凝土的受拉破坏。其中，断裂能的取值按Hillerborg(1976)^[59]中提出的方法求得，破坏应力的表达式采用沈聚敏等(1993)^[60]中提出的： $\sigma_p=0.26(1.25f'_c)^{2/3}$ ，式中， σ_p 为峰值拉应力， f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

对内配型钢的钢管混凝土构件内部核心混凝土受压时的应力应变关系使用韩林海(2007)^[5]提出的单轴受压模型：

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

其中 $x=\epsilon/\epsilon_0$ ， $y=\sigma/\sigma_0$ ； $\sigma_0=f'_c$ ， $\epsilon_0=\epsilon_c+800\xi^{0.2}10^{-6}$ ， $\epsilon_c=(1300+12.5f'_c)10^{-6}$ 。

$$\eta = \begin{cases} 2 & (\text{圆形钢管混凝土}) \\ 1.6+1.5/x & (\text{方、矩形钢管混凝土}) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \cdot 10^{-5})^{[0.25+(\epsilon-0.5)^7]} \cdot (f'_c)^{0.5} \cdot 0.5 & (\text{圆形钢管混凝土}) \\ \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}} & (\text{方、矩形钢管混凝土}) \end{cases} \quad (2.3)$$

混凝土的弹性模量取 $E_c = \sqrt{4730(f'_c)}$ (f'_c 为核心混凝土圆柱体抗压强度, 单位 MPa),

泊松比取 0.2。

3 加载板

对加载板的材料定义为刚度大无塑性变形的弹性材料, 弹性模量 E_c 取为 10^{12} MPa, 泊松比取 0.00001。

2.2.2 单元模型、接触和边界条件

模型中钢管和内配型钢采用四节点壳单元S4, 核心混凝土和端垫板采用实体单元C3D8。在选取构件钢管的单元类型时, 进行了内部型钢采用不同单元类型的对比, 分别用壳单元和实体单元进行了模拟, 发现不同单元类型对模拟结果及精度并无太大影响, 但是用壳体单元可以简化建模过程以及节省运算时间, 因此本文对内部型钢用壳单元。并设置使用壳单元厚度方向9个积分点的Simpson积分来满足壳体的精度要求。

内配型钢与核心混凝土之间的轴向作用力主要为表现为型钢与混凝土之间的化学粘结力, 可以用ABAQUS软件的库伦摩擦模型来定义二者之间的接触, 同时也可使用内配型钢Embedded region整体嵌入进混凝土内部, 这种嵌入方式不考虑内配型钢与核心混凝土之间的相对滑移。为了验证内配型钢与混凝土之间的相互作用对模拟结果的影响进行对比模拟(模拟对比曲线见图2.2), 由图2.2可以看到采用Embedded region的接触方式得出的荷载值略大于采用库伦摩擦接触方式的荷载值。但考虑到采用库伦摩擦模型, 但两种不同的接触方式的荷载-位移曲线结果并无太大差异, 考虑到采用实体建立模型的库伦接触方式建模过程较为繁复而直接使用嵌入较为简单, 因此本文进行参数分析时使用Embedded region方式建立模型。

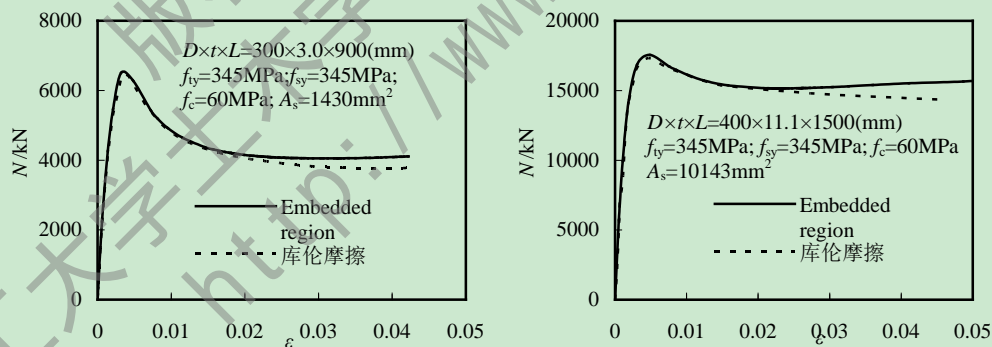


图2.2 不同接触方式的计算结果比较

钢管和混凝土之间的接触按王文达等(2010)^[54]中考虑钢管和内部核心混凝土二者之间的相互作用。钢管和加荷垫板以及内配型钢和加荷垫板采用Shell-to-solid coupling的方式进行约束, 混凝土和加荷垫板使用绑定约束Tie来保证加荷垫板和构件的各个部件之间没有相对滑移。

模型采用底端固定约束, 顶部自由的边界条件, 加载方式采用位移加载并直接作用在顶部自由端加载板上。

2.2.3 单元划分与有限元算法

对模拟构件的网格划分采用试验网格的方法。由于模拟构件的大小、尺寸及重要程度都不尽相同。因此对于要重点分析及提取数据的构件，应当对构件的网格进行适当的合理细化，追求输出数据的精确。而且在划分网格时注意不同材料的 Part 在组合成一个整体构件时，应当使二者接触位置的网格尽量一致，有利于有限元计算收敛，增快计算速度，提高工作效率。

2.2.4 ABAQUS 建模

1 单元类型

内配型钢的钢管混凝土短柱的内部核心混凝土和加载板采用 C3D8 实体单元，内配型钢和外部混凝土使用 S4R 壳体单元。

2 材料本构

本节中的内配型钢、钢管和核心混凝土以及加载板的材料性质均使用 2.2.1 节中描述的材料模型定义。

3 接触

内配型钢和混凝土之间采用 Embedded region 整体嵌入，钢管和混凝土切向考虑库伦摩擦，定义库伦摩擦系数为 0.6，法向定义硬接触 Hard。内配型钢和钢管由于使用壳单元建立模型因此与加载板之间的接触定义为 Shell-to-solid coupling，混凝土与加载板之间 Tie 约束。

4 加载及边界条件

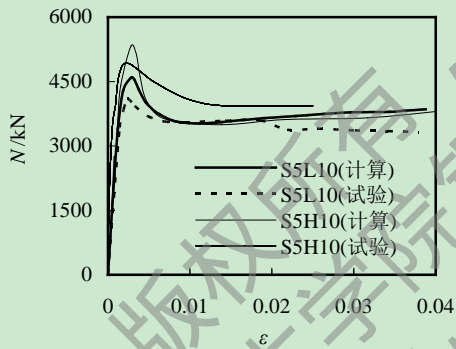
底端固定，上部为自由端。加载方式为位移加载，直接作用与顶部自由端加载板上。

2.2.5 模型验证

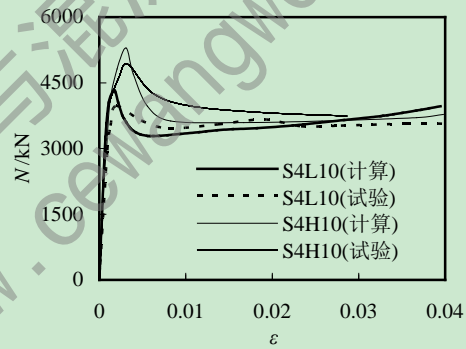
为了验证建模方法的准确性，对国内外相关文献以及试验的试验结果与有限元模拟值进行对比。给出了文献王清湘等(2003)^[62]、朱美春等(2006)^[27]和何益斌等(2010)^[36]所做的内配工字型钢（十字型钢）的圆（方）钢管混凝土轴心受压短柱荷载-应变关系曲线的试验结果与本文模拟结果比较，见图 2.3。试验构件的具体参数详见表 2.1。

表 2.1 内配型钢的钢管混凝土轴压短试件试验参数

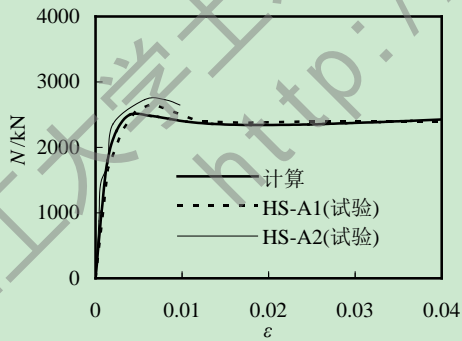
试件编号	$D(B) \times t \times L(\text{mm})$	$f_{ty}(\text{MPa})$	$f_{sy}(\text{MPa})$	$f_c(\text{MPa})$	$A_s(\text{mm}^2)$	数据来源
S5L10	195×5.5×585	288	338	48.4	2860	朱美春等 (2006) ^[27]
S5H10	195×5.5×585	288	338	70.8	2860	
S4L10	195×4.5×585	288	338	48.4	2860	
S4H10	195×4.5×585	288	338	70.8	2860	
S5L10I	195×5.5×585	288	338	48.4	1430	
S4L10I	195×4.5×585	288	338	48.4	1430	
HS-A1	166×2.7×576	318	288	47.9	2324	王清湘等 (2003) ^[62]
HS-A2	166×2.7×576	318	288	47.9	2324	
HS-B1	166×3.7×576	318	288	47.9	2324	
HS-B2	166×3.7×576	318	288	47.9	2324	
HS-C1	216×3×760	269	288	47.9	2324	
HS-C2	216×3×760	269	288	47.9	2324	
HS-D1	216×3×760	269	314	47.9	3570	
HS-D2	216×3×760	269	314	47.9	3570	
SC-1	219×4.0×876	337	318	43.6	2996	何益斌等 (2010) ^[36]
SC-2	219×4.0×876	337	303	43.6	3578	
SC-3	219×4.0×876	337	308	43.6	4278	
SC-5	219×5.6×876	289	303	43.6	3578	
SC-6	219×4.0×876	337	303	53.1	3578	
SC-9	219×4.0×876	337	303	43.6	3578	



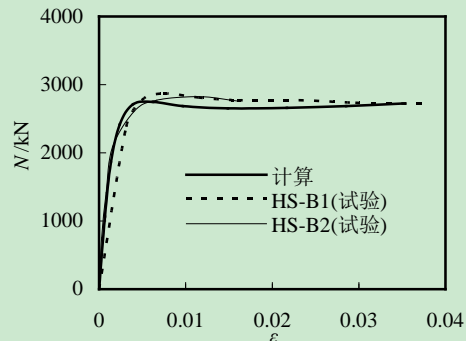
(a) S5L10 和 S5H10



(b) S4L10 和 S4H10



(c) HS-A1 和 HS-A2



(d) HS-B1 和 HS-B2

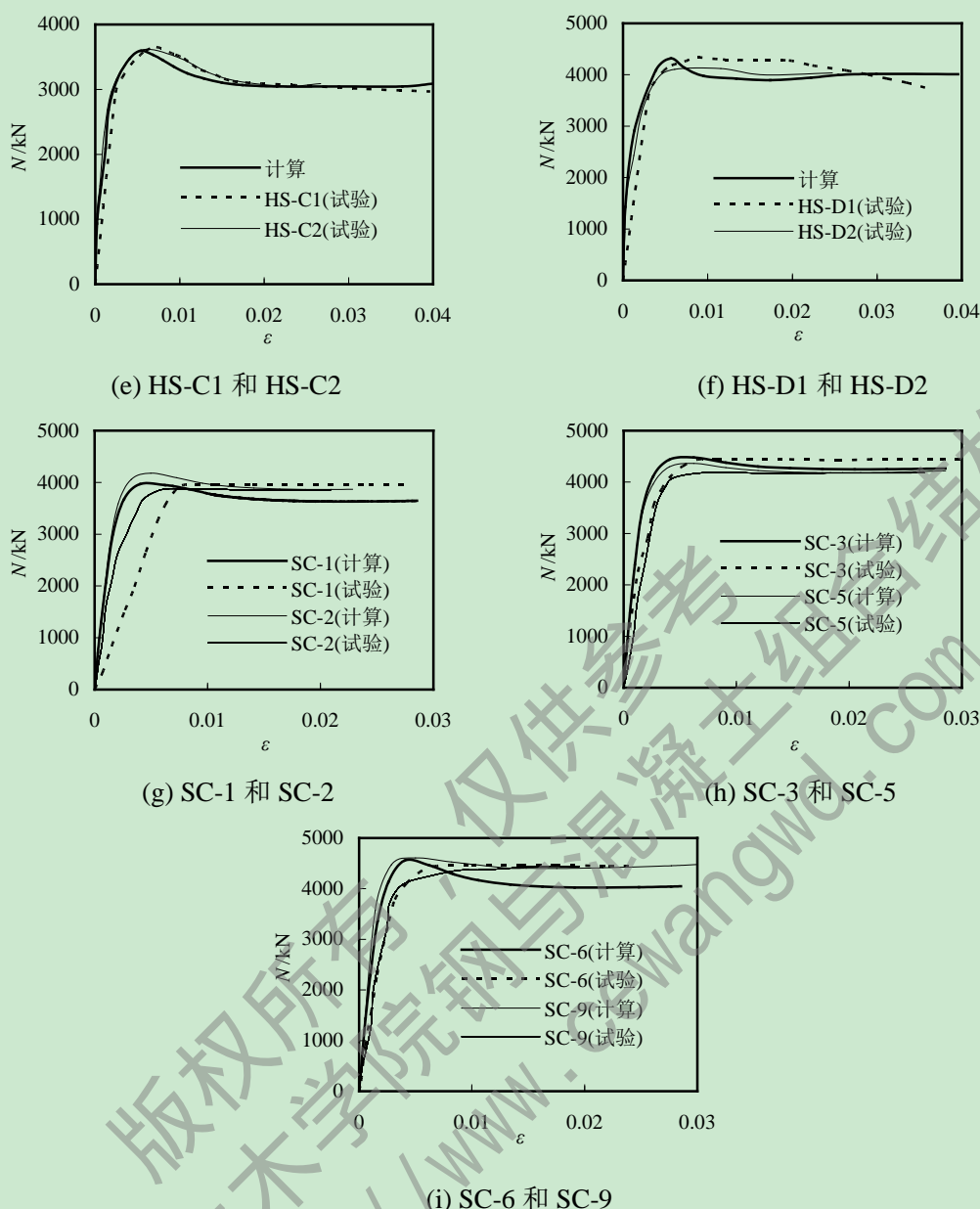


图 2.3 内配型钢的钢管混凝土轴压短柱试件模拟结果与试验结果曲线对比

由图 2.3 的试验和模拟曲线对比可知，总体来说内配型钢的钢管混凝土轴压构件的模拟曲线与试验曲线基本吻合，模拟效果较好。

2.3 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱的力学性能

为了研究内配型钢的钢管混凝土短柱这种新型构件工作机理，本文设计模拟了两组 6 个标准轴压短柱试件的对比算例。两组模拟试件为 Y 组：Y1 圆钢管混凝土、Y2 内配工字型钢的圆钢管混凝土、Y3 内配十字型钢的圆钢管混凝土短柱和 F 组：F1 方钢管混凝土、F2 内配工字型钢的方钢管混凝土、F3 内配十字型钢的钢管混凝土短柱。其中，Y 组和 F 组的构件截面积相同，钢管含钢率和型钢含钢率相同且两组内配型钢的面积相同。具体参数设置如下：

Y组，选取柱子截面为 $D \times t \times L = 500\text{mm} \times 11.1\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ；C60混凝土；钢管Q345；内配型钢Q345；钢管含钢率0.10；内配型钢含钢率0.06。

F组，选取柱子截面为 $B \times t \times L = 443\text{mm} \times 11.1\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ；C60混凝土；钢管Q345；内配型钢Q345；钢管含钢率0.10；内配型钢含钢率0.06。

2.3.1 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱的力学性能分析

1 破坏模态分析

根据对两组模拟构件的有限元结果提取可以得到不同截面形式的钢管混凝土轴压短柱及其组成部件的最终破坏模态，如下图2.4所示。

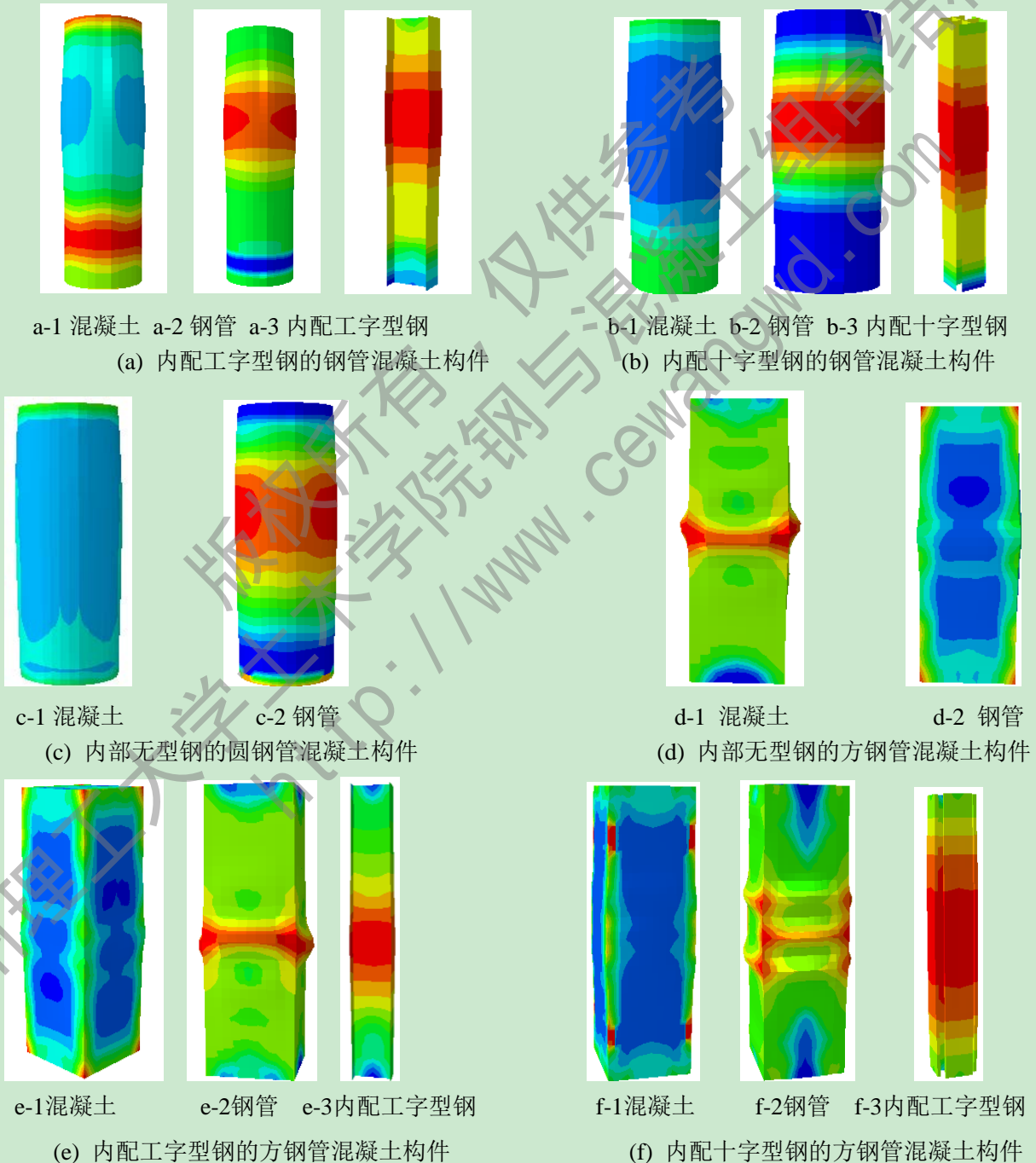


图 2.4 不同截面形式的钢管混凝土构件破坏形式

在有限元理论模拟中由于不考虑实际试验中由于试件焊接、加载仪器等造成的试件初始缺陷和偶然偏心等的影响，所以由图 2.4 可见本文模拟中的构件的破坏形态均为典型的压屈型破坏。

经对比可以看出，圆钢管构件的最终破坏形态是外钢管整体向外变形，构件中部屈曲最大，而方钢管构件是中部急速凸曲，产生较大的变形，这是由于圆钢管比方钢管对混凝土的约束效应要大。方钢管对混凝土的约束主要集中在四个棱角而圆钢管则在整个钢管范围内。但是圆钢管和方钢管混凝土构件在最终的破坏形式上都是近似相同的，且不论内部是否配有型钢以及型钢的截面形式。内配的型钢不论外包钢管的截面形式所发生的破坏形态都是近似一致的，发生了压屈型破坏，而且由于内部混凝土的约束作用，不用担心型钢的平面外失稳，这就极大的释放了型钢的承载能力。对两组钢管混凝土构件来说，都是钢管向外产生了凸曲，内部混凝土被压碎从而宣告试件的破坏。由此可以初步判断内配不同型钢的构件最终的破坏形态和受力机理应该是一致的。

内配型钢的钢管混凝土构件在受到竖向的轴心压力时，由于底部固定，在顶部施加荷载，顶部受力集中到构件中部，使得构件中部向外发生凸曲，部分向外凸出。构件最终破坏时试件顶端和底端横向变形较小，中部的纵向应力最大且向外发生了明显的凸曲变形。通过模拟构件在轴心荷载作用下受压的全过程可以得知，在在加载初期，构件处于弹性阶段，此时构件外形无明显变化，构件在纵向的位移近乎为零，且柱体并未出现屈曲；随着轴向施加荷载的增大，构件进入弹塑性阶段，此时可以看到构件中钢管开始向外鼓出，构件的纵向位移开始不断增大，随后构件达到极限荷载，钢管向外鼓出变形且发展迅速，承载力开始急剧下降，最后试件破坏。

2 约束力分析

图 2.5 给出了三种构件在极限承载力时刻，钢管与核心混凝土之间的约束力云图。可以看到约束力沿整个构件总长度方向均匀分布，由两端向中间约束力逐渐增大。内部配有型钢的 Y2、Y3 比 Y1 中钢管对混凝土的约束力要大，说明内配型钢的存在使得钢管对混凝土的约束作用具有一定的加强，提高了钢管对混凝土点的约束效应。

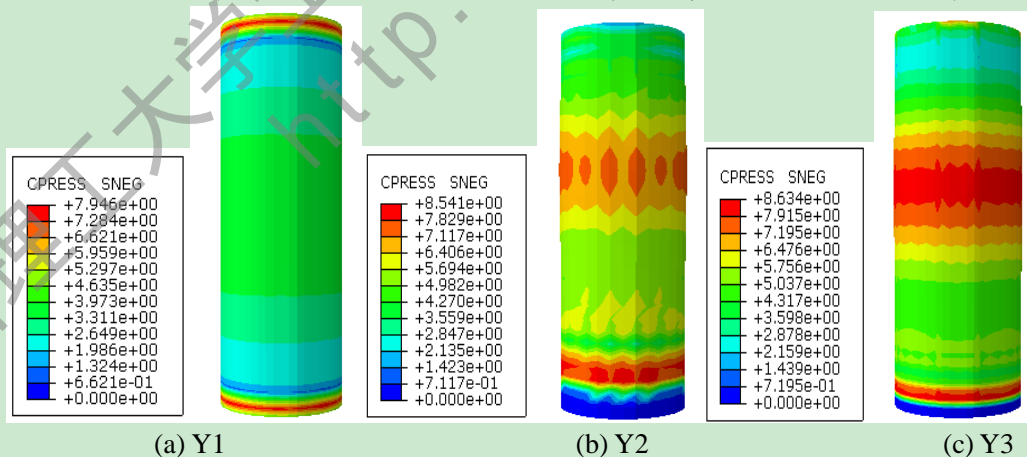


图 2.5 Y2 构件约束力分布图

在图 2.5 中，Y1 和 Y3 的约束力分布总体上较为均匀，Y2 则呈现出沿中性轴对称的分布现象。经过分析认为，由于 Y2 构件的截面形式并非全截面对称，内配工字型钢

的翼缘和腹板的不等距使得钢管对混凝土的约束力呈现半对称分布。这也说明截面形式对构件的承载力是具有一定影响的。

3 承载力分析

通过对两组模拟构件的数据整理得到各个构件及构件组成所承担荷载的荷载-位移曲线，见图 2.6。

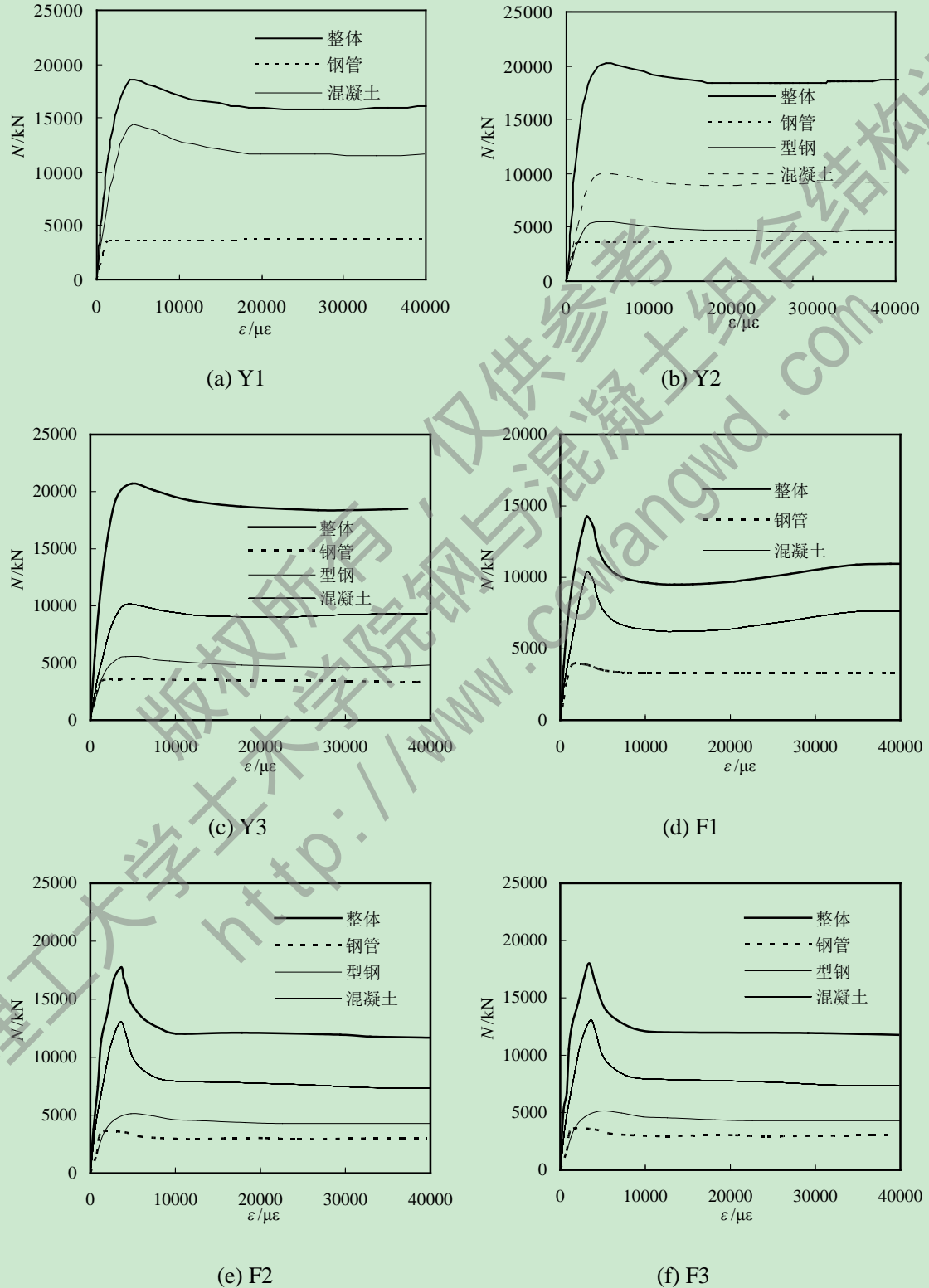


图 2.6 构件及其组成部件承担荷载的荷载-位移曲线

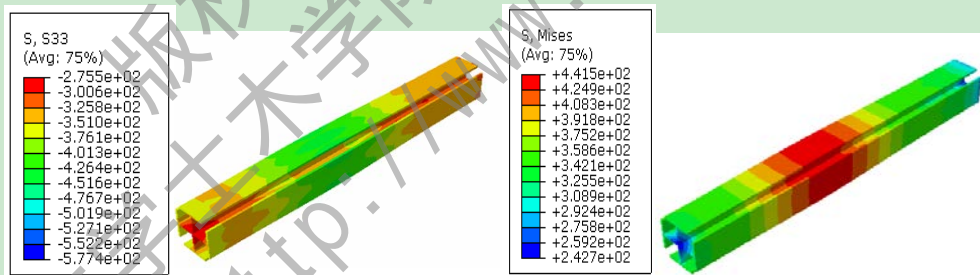
由 Y1 和 F1 构件的荷载-位移曲线对比, 两个构件的截面积以及钢管和内配型钢的截面含钢率都相同, 只是外包钢管形式不同, 但 Y1 要大于 F1 的整体承载力。这是由于圆钢管对混凝土约束效应均匀分布在钢管周围, 而方钢管对核心混凝土约束则主要体现在方形截面的四角。将 Y2、Y3 和 F2、F3 分别与 Y1 和 F1 对比, 可以看到内部无型钢的构件的承载力明显小于内部配有型钢的构件, 并且对于内配不同形式的型钢构件来说, 型钢和钢管的承载力近似相等, 整体差别不大, 但外部为圆钢管的构件型钢的承载力略大于相对应方形截面的型钢承载力。对构件的整体承载力而言, 圆形截面构件要大于对应的方形截面构件, 而且不论是圆形截面还是方形截面, 内配十字型钢构件的承载力均要略大于内配工字型钢构件。

由图 2.6 可以看出, 相同毛截面面积的钢管混凝土承载力要明显小于内配型钢的钢管混凝土构件。这说明钢管混凝土短柱在内部加入型钢之后, 产生了 $1+1>2$ 的效应, 这是由于钢管混凝土构件中内配型钢的存在, 使其对混凝土剪切斜裂缝的产生具有一定的影响, 增强了混凝土的承载力, 而且内配型钢使钢管对核心混凝土的约束作用也具有一定程度的加强, 因而内配型钢的钢管混凝土构件的承载力要大于相同面积的钢管混凝土构件承载力。

4 构件受压过程的应力分布情况及相互作用机理分析

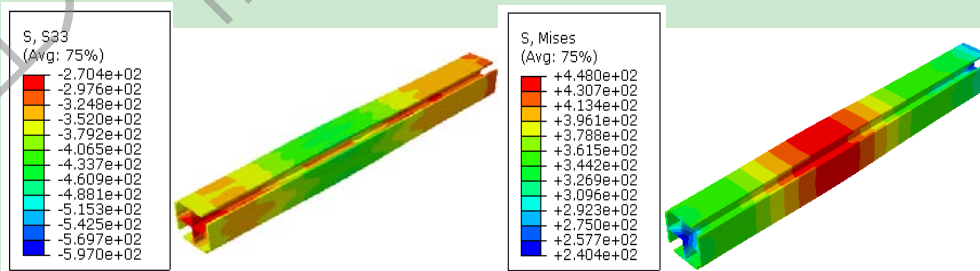
利用 ABAQUS 有限元分析软件, 定义型钢和核心混凝土为库伦摩擦接触, 可以对所模拟试件的各个部分承担的荷载分别输出, 能够更准确的分析构件在加载过程中各部分的所起到的作用以及受力状态。

现以内配十字型钢的钢管混凝土构件即 Y2 和 F2 为例, 提取了构件中钢管、型钢以及核心混凝土在极限承载力时刻的应力分布图, 见图 2.7~2.9。



(a) Y2 内十字型钢的纵向(S33)应力云图

(b) Y2 内十字型钢的等效(Mises)应力云图



(c) Y2 内十字型钢的纵向(S33)应力云图

(d) Y2 内十字型钢的等效(Mises)应力云图

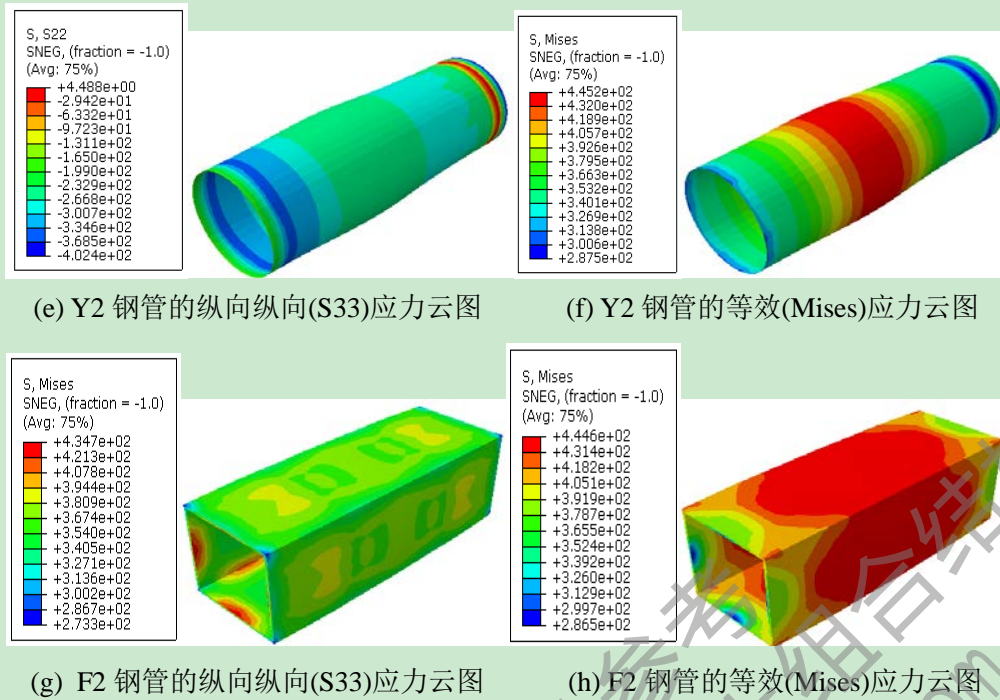


图 2.7 Y2-F2 构件型钢和钢管应力分布图

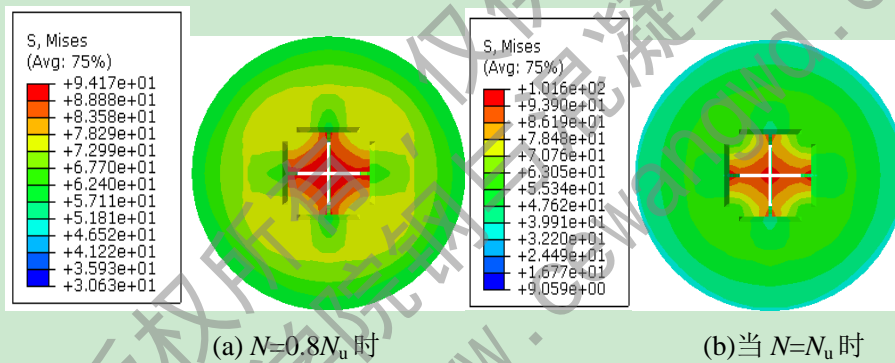


图 2.8 Y2-构件核心混凝土纵向应力分布图

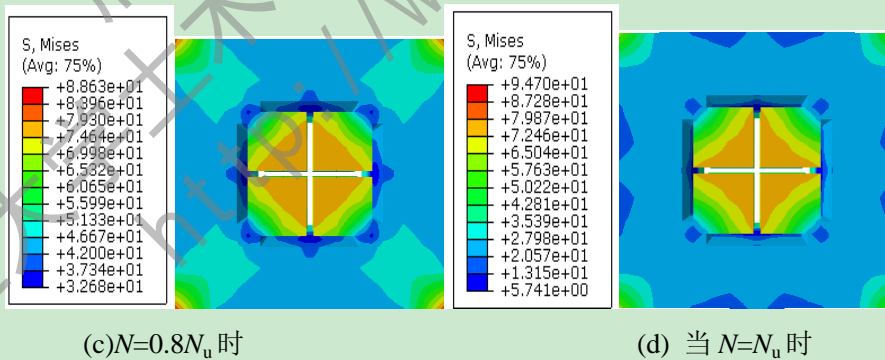


图 2.9 F2 构件核心混凝土等效力分布图

图 2.7 为构件 F2 在极限荷载作用下沿构件长度二分之一截面的内配型钢和钢管的纵向和等效力分布图,图 2.7~2.9 是核心混凝土分别在 $0.8N_u$ 和 N_u 荷载情况下的纵向和等效力分布图。

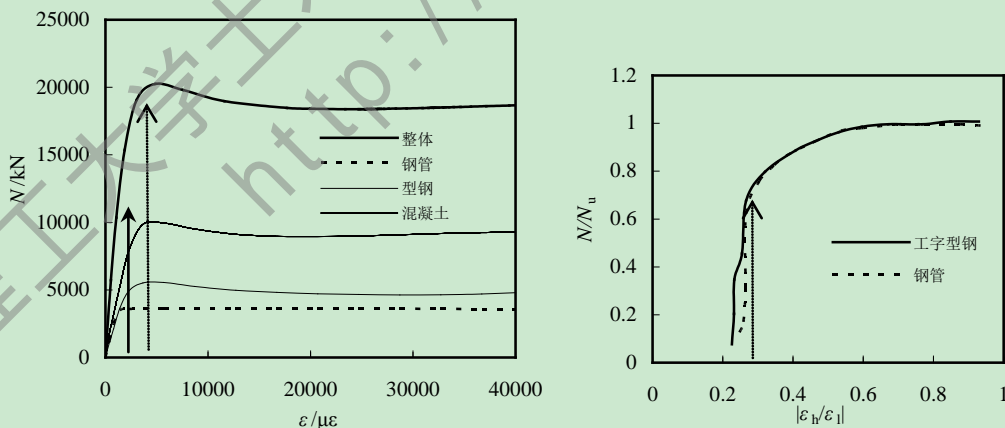
由图 2.7 可知,由于端部效应的影响,内配型钢和钢管的纵向应力呈现出由两端向中间不断递减并且对称分布的现象。而且在内配型钢的纵向应力云图中可以看到,型钢翼缘处的应力值要大于型钢其他部位,这应该是由于型钢的翼缘和核心混凝土接触,产

生了应力集中现象。通过 Mises 应力云图可知，在构件达到极限承载力时，内配型钢和外部钢管已经进入了屈服阶段。

通过对图 2.8~2.9 的分析，可以知道当 Y2 构件在 $0.8N_u$ 时，核心混凝土的纵向应力和等效应力基本相同，而且由于型钢的约束作用使得，十字型钢内的混凝土产生了类似钢管约束混凝土的约束效应，使型钢内混凝土的纵向应力和等效应力在截面中应力最大。而且在图 2.8~2.9 中，F2 构件的四个边角出现了明显的应力集中，这也解释说明了在前文承载力分析中为何在相同截面积的情况下，Y2 承载力要大于 F2 承载力的原因：圆钢管对混凝土约束效应均布分布在钢管周围，而方钢管对核心混凝土约束则主要体现在方形截面的四角。

为了更好的了解内配型钢的钢管混凝土短柱在轴压下工作机理，提取了试件内钢管、混凝土和内配工字型钢各构件的荷载-应变曲线以及外部钢管和内配型钢在破坏时凸曲表面的横向、纵向应变比值 $|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 与相对荷载 (N/N_u) 的关系曲线，见图 2.10 所示。

在钢管和内部型钢进入塑性阶段时，混凝土还没有达到其极限应力，钢材屈服后构件的承载力主要由混凝土承担，且随荷载增加，混凝土的应力不断增大，当应力达到其极限应力时，构件也随之达到了其极限承载力 N_u 。通过对图 2.10 分析发现在构件荷载达到 $0.67N_u$ 即 14066kN（图 2.10 所示黑色箭头数值， N_u 为极限荷载）之前，钢管和型钢处于弹性工作阶段，而且由图 2.10(b) 的 $N/N_u-|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 曲线也可以看到钢管和内配工字型钢在荷载小于 $0.7N_u$ 时钢管和内配型钢的横向应变与纵向应变比值 $|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 在 0.3 左右，图 2.10(b) 箭头所示，接近钢材泊松比，这也说明此时钢管和型钢处于弹性工作阶段。此后如图 2.10(a) 所示，随着荷载的增加，钢管和型钢进入弹塑性阶段并在构件承载力达到 $0.8N_u$ 即 16362kN 左右达到屈服极限，此后进入到塑性阶段。由图 2.10(b) 也可看到构件在 $0.65N_u$ 到 $0.8N_u$ 之间时 $|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 值随着荷载的增加而缓慢增大，直至加载到 $0.8N_u$ 后，钢管和内配型钢 $N/N_u-|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 值随着荷载的增加而迅速增大，这也说明试件在达到 $0.8N_u$ 后，钢管和型钢已经进入到塑性阶段。



(a) Y2 构件及其不同部件的荷载-应变曲线 (b) Y2 构件钢管和内配型钢的 $N/N_u-|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 曲线

图 2.10 Y2-构件荷载-应变曲线及 $N/N_u-|\varepsilon_h/\varepsilon_l|$ 曲线

2.3.2 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱的参数分析

2.3.2.1 参数设置及概况

对于内配型钢的钢管混凝土新型构件来说,影响轴压短柱构件承载力的因素主要有三部分:(1)材料性质对构件承载力的影响包括混凝土的屈服强度,钢管和内配型钢的屈服强度;(2)由于钢管对核心混凝土具有较强的约束效应,因此钢管的截面含钢率对于构件的承载力应该有较强的影响;(3)内配型钢也承担了构件整体承载力的一部分,且由于型钢和混凝土的相互作用,对构件承载力的影响也比较大。下面就这三部分主要参数进行分析,本节的参数分析主要采用 ABAQUS 有限元软件对内配型钢标准构件进行分析,有限元建模采用前文经过模型验证的模型方法,对典型构件使用变化一个参数,固定其余参数的方法。

其主要需要变动的参数为:(1)钢管的钢材屈服强度;(2)内配型钢的钢材屈服强度;(3)核心混凝土抗压强度;(4)钢管的截面含钢率;(5)内配型钢的截面含钢率;(6)内配型钢的截面形式,主要分为工字型钢和十字型钢两类。在进行内配型钢的圆钢管混凝土短柱参数分析时构建基本参数选取的标准构件参数为柱子截面为 $D \times t \times L = 500\text{mm} \times 11.1\text{mm} \times 1500\text{mm}$,混凝土 C60;钢管 Q345;内配型钢 Q345;钢管含钢率 0.10;内配型钢含钢率 0.06。其中,在设置内配型钢的截面含钢率时,参考冶金部行业标准《钢骨混凝土设计规范》YB9082-97^[64]中将型钢含钢率定为 2%~15%,在建设部行业标准《型钢混凝土组合结构技术规程》JGJ138-2001^[65]中定为不宜小于 4%,且不宜大于 10%,因此本文设置标准构件的型钢截面含钢率为 0.06,在 0.04 至 0.10 之间变化,每次增加 0.02。截面尺寸为 $D(B) \times t \times L = 500(500)\text{mm} \times 11.1\text{mm} \times 1500\text{mm}$ 。构件具体的参数设置见表 2.2 和 2.3。其中钢管的截面含钢率 $\alpha = A_s/A_c$;型钢的截面含钢率 $\rho = A_a/A_c$; A_s 为钢管截面面积, A_a 为内配型钢截面面积, A_c 为核心混凝土的截面面积, f_{sy} 钢管屈服强度, f_{ay} 内配型钢屈服强度, f_c 为混凝土轴心抗压强度。

表 2.2 内配型钢的圆钢管混凝土短柱参数设置

试件编号	$D \times t \times L$ (mm)	f_{sy} (MPa)	f_{ay} (MPa)	f_c (MPa)	A_a (mm ²)	α	ρ	变量
A1	500×11.1×1500	235	345	C60	10143.96	0.10	0.06	变量 f_{sy}
A2	500×11.1×1500	345	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
A3	500×11.1×1500	390	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
A4	500×11.1×1500	420	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
B1	500×11.1×1500	345	235	C60	10143.96	0.10	0.06	变量 f_{ay}
B2	500×11.1×1500	345	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
B3	500×11.1×1500	345	390	C60	10143.96	0.10	0.06	
B4	500×11.1×1500	345	420	C60	10143.96	0.10	0.06	
C1	500×11.1×1500	345	345	C40	10143.96	0.10	0.06	变量 f_c
C2	500×11.1×1500	345	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
C3	500×11.1×1500	345	345	C80	10143.96	0.10	0.06	
C4	500×11.1×1500	345	345	C100	10143.96	0.10	0.06	

D1	500×5.7×1500	345	345	C60	10607.72	0.05	0.06	钢管含钢率 α
D2	500×11.1×1500	345	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
D3	500×16.0×1500	345	345	C60	9732.104	0.15	0.06	
D4	500×20.7×1500	345	345	C60	9345.083	0.20	0.06	
E1	500×11.3×1500	345	345	C60	6881	0.10	0.04	型钢含钢率 ρ
E2	500×11.1×1500	345	345	C60	10143.96	0.10	0.06	
E3	500×10.9×1500	345	345	C60	13297.04	0.10	0.08	
E4	500×10.7×1500	345	345	C60	16346.41	0.10	0.10	

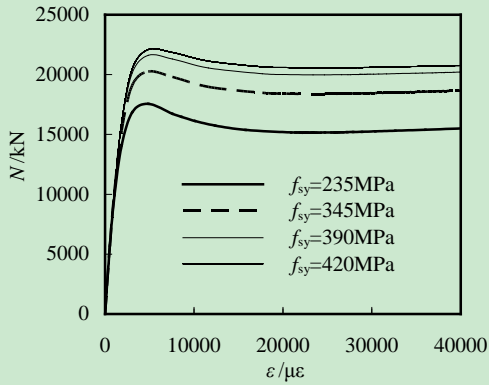
表 2.3 内配型钢的方钢管混凝土短柱参数设置

试件编号	$D \times t \times L$ (mm)	f_{sy} (MPa)	f_{ay} (MPa)	f_c (MPa)	A_a (mm ²)	α	ρ	变量
A1	500×11.1×1500	235	345	C60	12922.24	0.10	0.06	变量 f_{sy}
A2	500×11.1×1500	345	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
A3	500×11.1×1500	390	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
A4	500×11.1×1500	420	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
B1	500×11.1×1500	345	235	C60	12922.24	0.10	0.06	变量 f_{ay}
B2	500×11.1×1500	345	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
B3	500×11.1×1500	345	390	C60	12922.24	0.10	0.06	
B4	500×11.1×1500	345	420	C60	12922.24	0.10	0.06	
C1	500×11.1×1500	345	345	C40	12922.24	0.10	0.06	变量 f_c
C2	500×11.1×1500	345	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
C3	500×11.1×1500	345	345	C80	12922.24	0.10	0.06	
C4	500×11.1×1500	345	345	C100	12922.24	0.10	0.06	
D1	500×5.7×1500	345	345	C60	13513.02	0.05	0.06	钢管含钢率 α
D2	500×11.1×1500	345	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
D3	500×16.0×1500	345	345	C60	12386.99	0.15	0.06	
D4	500×20.7×1500	345	345	C60	11904.56	0.20	0.06	
E1	500×11.3×1500	345	345	C60	8765.79	0.10	0.04	型钢含钢率 ρ
E2	500×11.1×1500	345	345	C60	12922.24	0.10	0.06	
E3	500×10.9×1500	345	345	C60	16938.91	0.10	0.08	
E4	500×10.7×1500	345	345	C60	20823.45	0.10	0.10	

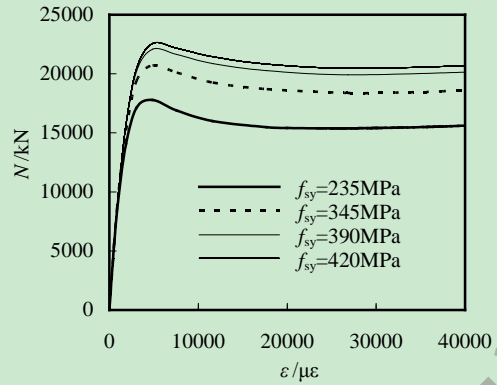
2.3.2.2 参数对承载力影响

(1) 钢管屈服强度 f_y

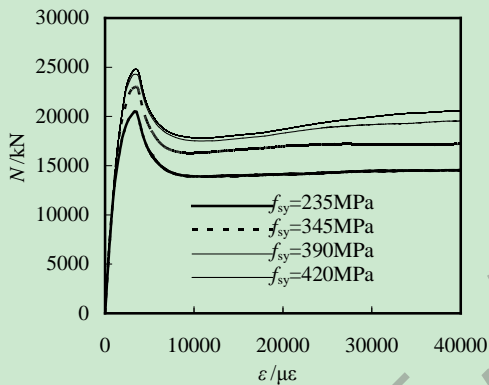
由图 2.11 可以看出,在其他参数不变的相同条件下,轴压构件的承载力随着钢管屈服强度的提高而增大。并且由钢材 Q235 变化到 Q345 时构件的承载力变化幅度比较大,此后随着钢材强度提高,承载力总体遵从逐渐增大的趋势,但增大幅度逐渐减小:钢管钢材强度从 $f_y=235\text{MPa}$ 到 $f_y=345\text{MPa}$,承载力提高了约 20%,从 $f_y=235\text{MPa}$ 到 $f_y=390\text{MPa}$,承载力提高了约 26%,从 $f_y=235\text{MPa}$ 到 $f_y=420\text{MPa}$,承载力提高了约 30%。综合考虑经济和钢材材料的因素,建议在工程中使用 Q345 可以在保证构件承载力的同时满足经济和工程的要求。



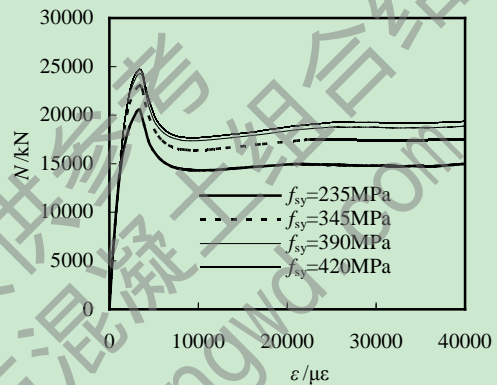
(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件



(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件



(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

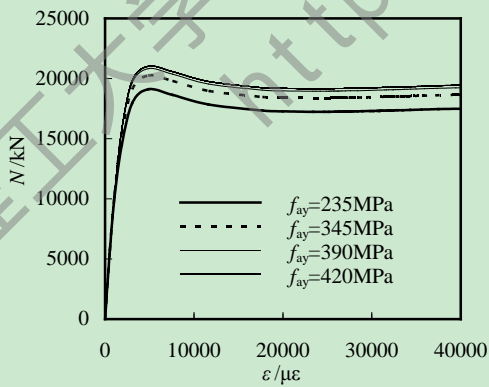


(d) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

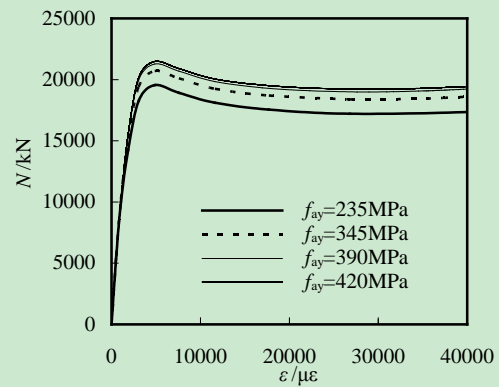
图 2.11 钢管钢材屈服强度对构件荷载-应变曲线的影响

(2) 型钢的钢材屈服强度 f_{sy}

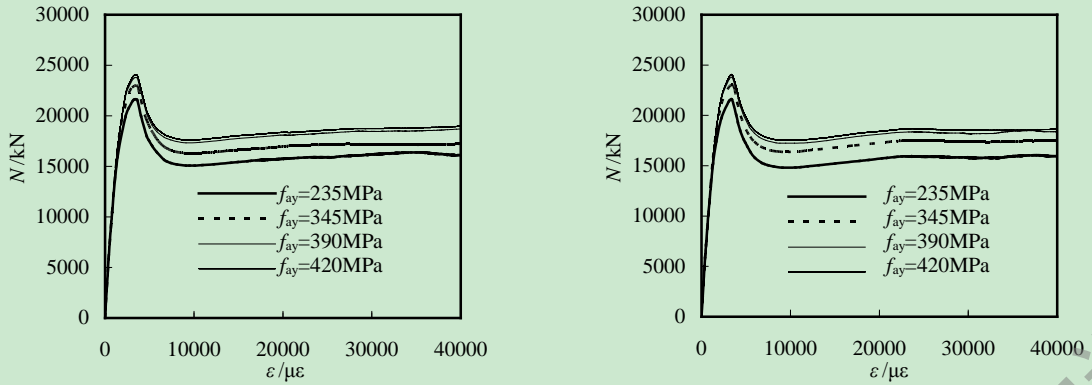
图 2.12 为型钢的钢材屈服强度对承载力影响曲线，可看到由于型钢强度的提高，构件的承载力有所提升。型钢强度变化造成承载力提升的主要原因是由于型钢在整体构件中阻碍或者延缓核心混凝土裂缝的发展进而在一定程度上提高构件的承载力，还有随着型钢强度的提高，型钢本身可以承担的承载力大大增加也提高了整体构件的承载力。



(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件



(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件



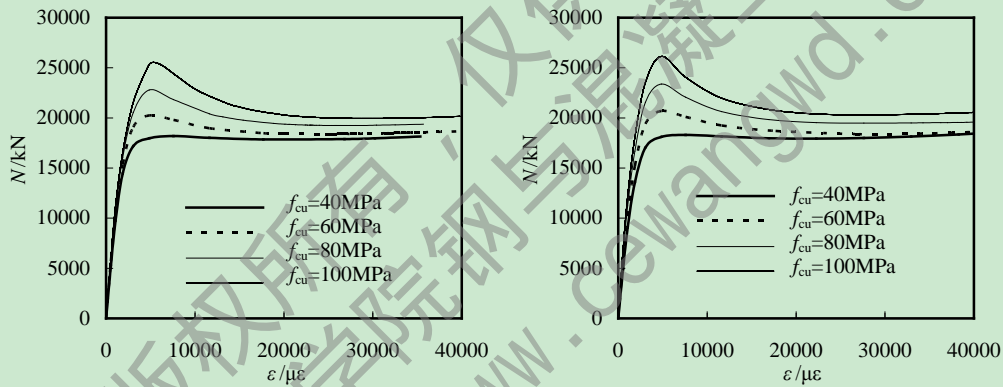
(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

(d) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

图 2.12 型钢钢材屈服强度对构件荷载-应变曲线的影响

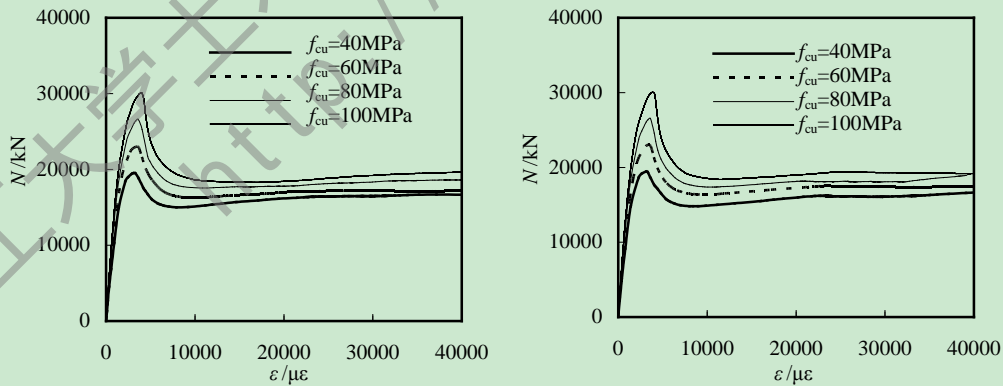
和图 2.11 对比，型钢强度提高所增长的承载力值小于钢管强度对承载力的影响，说明对于内配型钢的钢管混凝土新型构件，钢管对混凝土的约束作用是提高承载力的主要原因。

(3) 核心混凝土强度 f_{cu}



(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件

(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件



(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

(d) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

图 2.13 混凝土抗压强度对构件荷载-应变曲线的影响

在内配型钢的钢管混凝土轴压短柱中，内部核心混凝土是受力的主要部件。由图 2.13 可知，混凝土由 C40 到 C60，承载力提高了 13%，混凝土由 C40 到 C80，承载力提

高了 26%，混凝土由 C40 到 C100，承载力提高了 40%。由此可知混凝土抗压强度的提高对构件承载力的影响较大，且承载力随着抗压强度的提高而增大幅度较为一致。

(4) 钢管的截面含钢率 α

钢管对构件来说，主要起到约束混凝土，从而提高混凝土承载力的约束作用。由图 2.14 可知，钢管含钢率对构件承载力具有较大的影响。提高钢管的含钢率可以增强钢管对混凝土的约束作用，从而可以较大幅度的提高构件的承载力。

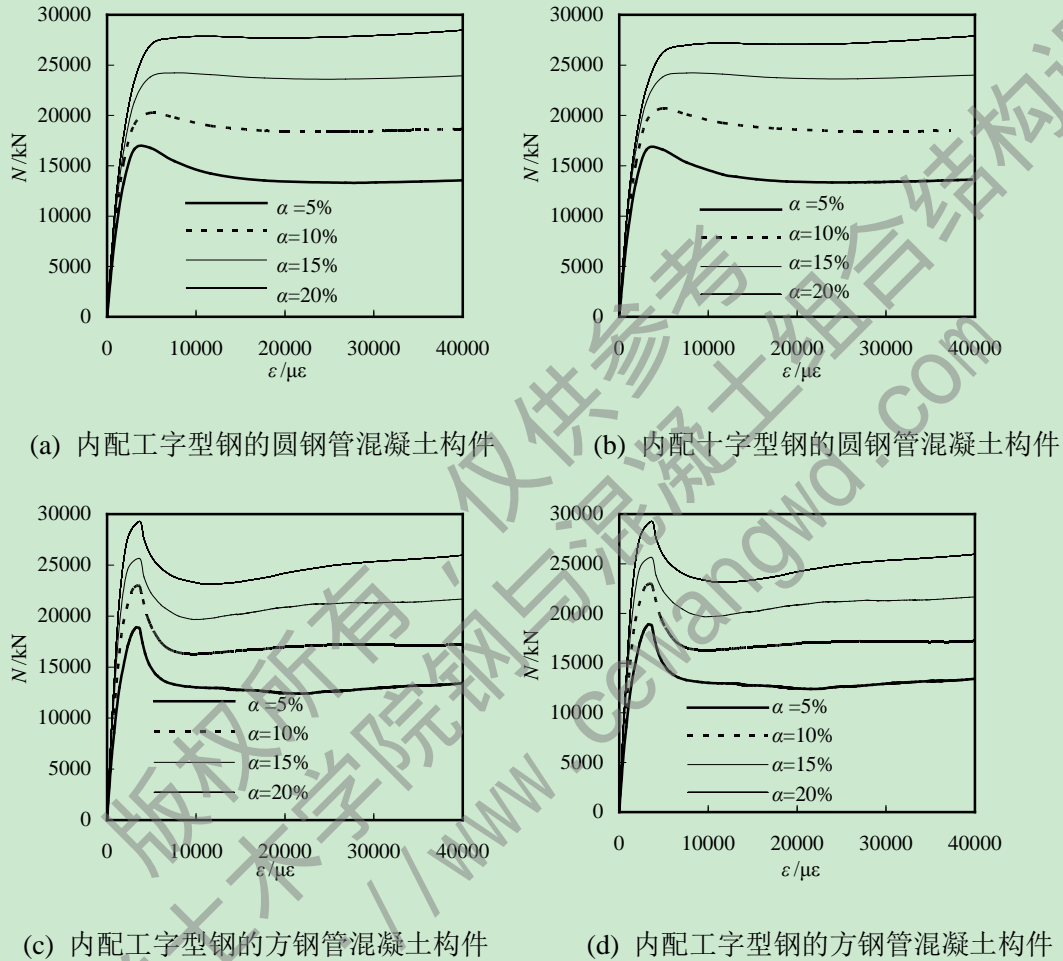


图 2.14 钢管含钢率对构件荷载-应变曲线的影响

(5) 内配型钢的截面含钢率 $\square\square$

内配型钢对构件承载力的贡献主要体现在对核心混凝土的作用和其本身所能够承担的承载力。图 2.15 和图 2.14 对比所示，型钢含钢率的增大，对承载力主要体现在型钢本身所承担的承载力。

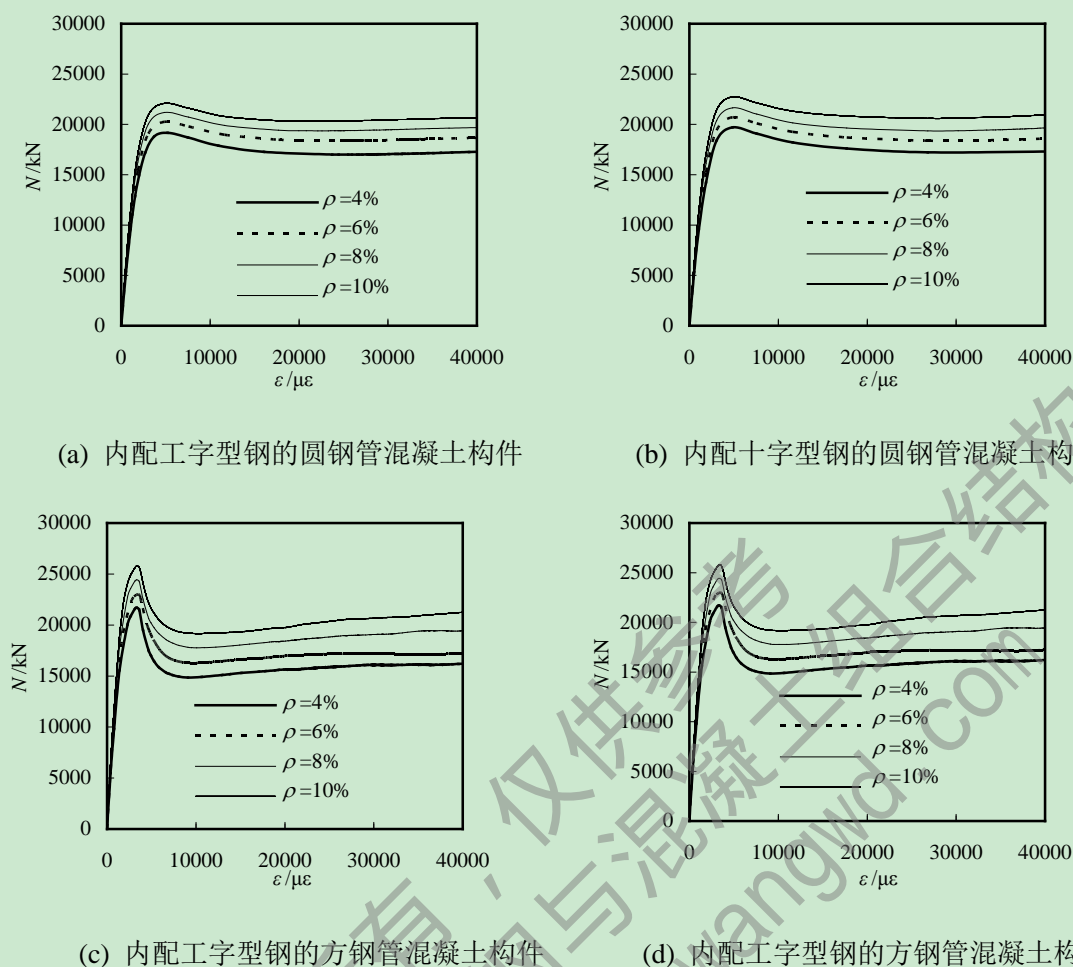


图 2.15 内配型钢含钢率对构件荷载-应变曲线的影响

2.3.3 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱极限承载力简化计算

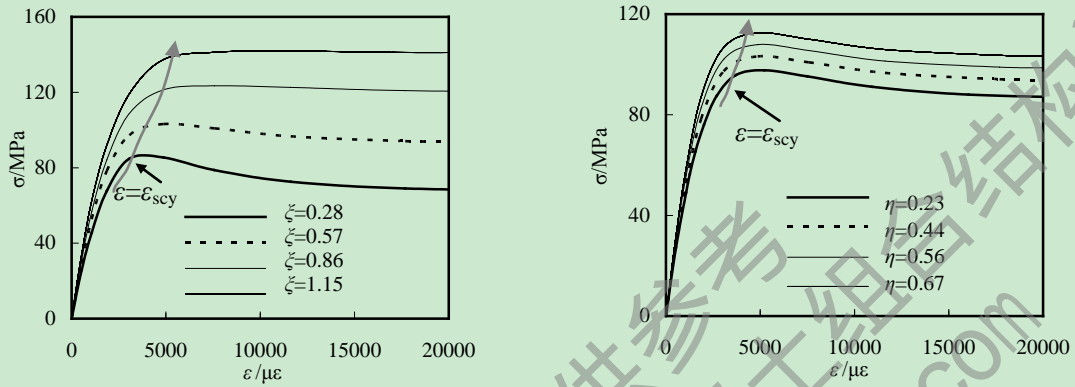
在前文中已经对内配型钢的钢管混凝土轴压短柱的工作机理进行了较为深入的受力和研究，更加明确了内配型钢、钢管和核心混凝土三者的受力机理和相互作用。但是，目前国内外对于这种新型构件的研究还不够全面，没有形成较为简约和合理的承载力设计计算方法，而且由于内配型钢的钢管混凝土轴压短柱由于截面形式的多样性和参数的复杂性，所以以往的研究人员所提出的极限承载力计算公式很难全面的反映出构件内部之间的相互作用以及各个相关参数对承载力的影响。因此，本文将在前人研究的基础上，并依据相关的模拟结果，得到基于回归分析的内配型钢的钢管混凝土轴压短柱极限承载力近似计算公式；并再最后对其他研究学者基于不同理论所建立的极限承载力公式进行比较分析。

通过前文的分析，可以知道这种新型轴压短柱构件的极限承载力和混凝土强度、钢材强度、钢管的截面含钢率以及型钢的截面含钢率等有关。为了体现内配型钢对核心混凝土约束作用，因此本文综合参考了文献韩林海(2005)^[5]中体现钢管对混凝土起约束作用的约束效应系数的定义，和文献肖阿林(2009)^[67]中内配型钢对混凝土承载力的贡献。

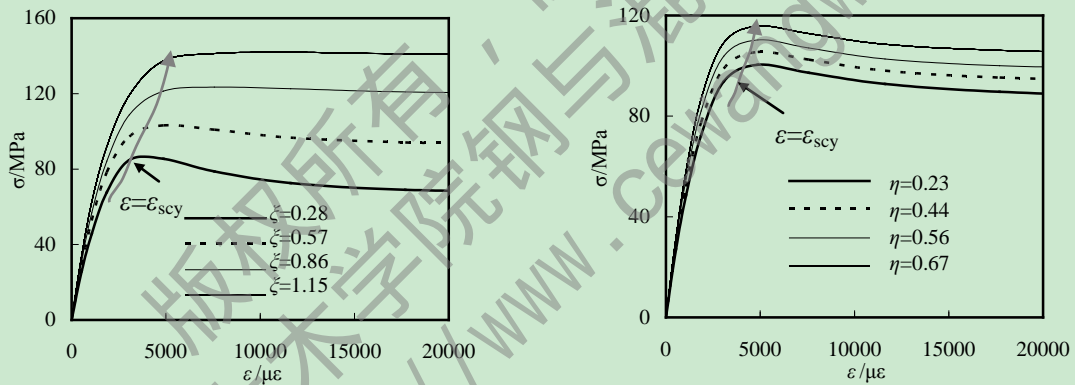
现提出了一个加强系数 η 作为型钢和钢管对混凝土的贡献参数，其表达式为：

$$\eta = \frac{\rho f_{ay}}{f_{cu}} \quad (2.4)$$

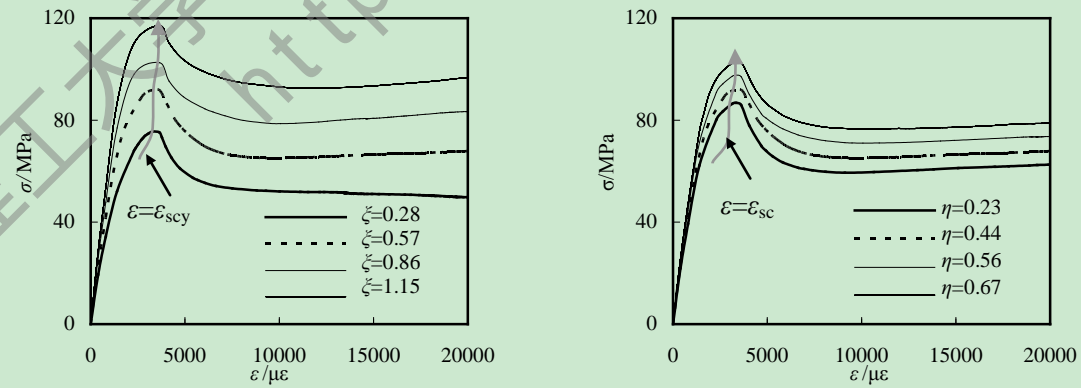
国内外研究学者的相关试验结果表明，对内配型钢的钢管混凝土此类新型构件，随着构件物理和集合特性参数的变化，其荷载-变形关系曲线的下降趋势不尽相同。因此，为合理确定内配型钢的钢管混凝土柱的轴压承载力，需要先确定构件的强度指标。



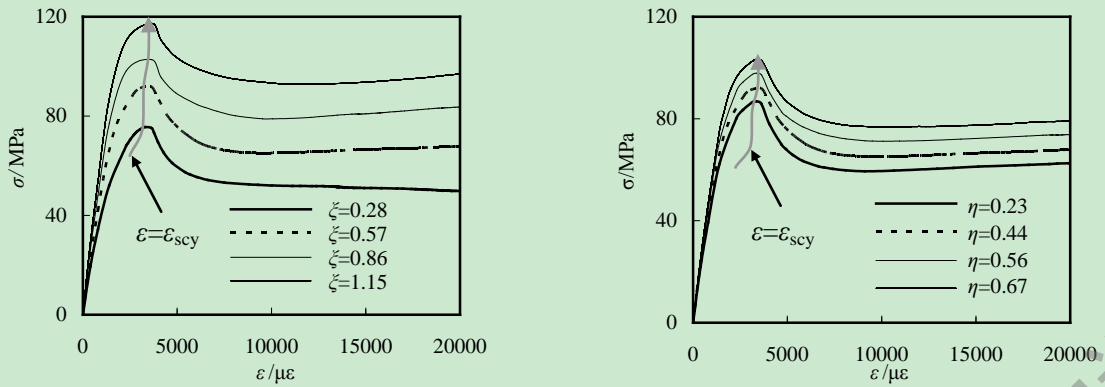
(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土



(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土



(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土



(d) 内配十字型钢的方钢管混凝土

图 2.16 内配型钢的钢管混凝土轴压 $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线

图 2.16 给出内配型钢的钢管混凝土轴压短柱通过数值计算得到的在不同参数下 C60 混凝土的 $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线。通过图示可以看出，对应于不同的 ζ 值， $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线总体趋势不同，而 η 则对曲线整体走势影响不大但对 ε_{scy} 值的大小具有一定影响作用。

在确定 ε_{scy} 时依据：

- (1) $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线的弹塑性阶段基本上在应变为 ε_{scy} 左右时结束。
- (2) 曲线在 ε_{scy} 以前应力增长相对缓慢；在其之后，增长速度较快，有些 $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线可能会出现下降段。

在计算参数范围内，内配型钢的圆钢管混凝土的 ε_{scy} 值在 $2400\sim 4760\mu\varepsilon$ 范围内变化，内配型钢的方钢管混凝土 ε_{scy} 值在 $2500\sim 4900\mu\varepsilon$ 范围内变化，当约束效应系数 ζ 值较小时， $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线可能出现下降段， η 值仅对 ε_{scy} 数值大小有所影响，对 $\sigma_{sc}-\varepsilon$ 关系曲线的趋势影响不大。

以及参考韩林海(2007)^[5]等文献中对钢管混凝土轴压承载力指标的计算公式，最后确定出内配型钢的钢管混凝土轴压强度承载力指标 ε_{scy} 的计算公式：

- 1) 内配工字型钢的圆钢管混凝土

$$\varepsilon_{scy}=1300+12.5 f_c'+(600+33.3 f_c')\times\zeta^{0.2}+46.5 f_c'\eta^{0.3} \quad (2.5)$$

- 2) 内配十字型钢的圆钢管混凝土

$$\varepsilon_{scy}=1300+12.5 f_c'+(600+33.3 f_c')\times\zeta^{0.2}+47.2 f_c'\eta^{0.3} \quad (2.6)$$

- 3) 内配工字型钢的方钢管混凝土

$$\varepsilon_{scy}=1300+12.5 f_c'+(570+33.3 f_c')\times\zeta^{0.2}+34.2 f_c'\eta^{0.3} \quad (2.7)$$

- 4) 内配十字型钢的圆钢管混凝土

$$\varepsilon_{scy}=1300+12.5 f_c'+(570+33.3 f_c')\times\zeta^{0.2}+34.9 f_c'\eta^{0.3} \quad (2.8)$$

参考韩林海^[5]等相关文献，根据轴压强度承载力指标并且通过对数值计算结果进行分析，可以通过计算回归出内配型钢的钢管混凝土短柱组合轴压强度标准值 f_{scy} ，令 $\gamma_c=f_{scy}/f_{ck}$ ，则可以通过回归分析得到 γ_c 与 η 的关系，见下图 2.17。

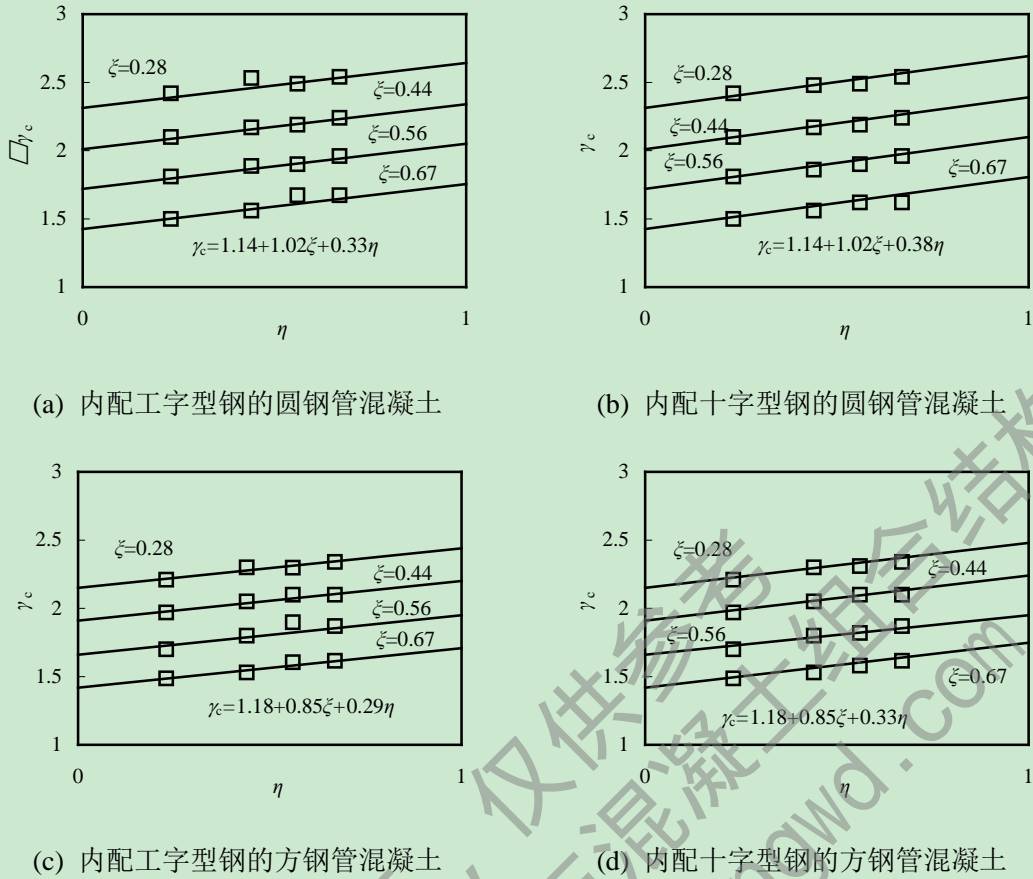


图 2.17 内配型钢的钢管混凝土 γ_c - η 关系曲线

由此可以得到组合轴压强度标准值 f_{scy} 的简化计算方法：

1) 内配工字型钢的圆钢管混凝土：

$$f_{scy} = (1.14 + 1.02\zeta + 0.33\eta) \times f_{ck} \quad (2.5-1)$$

2) 内配十字型钢的圆钢管混凝土：

$$f_{scy} = (1.14 + 1.02\zeta + 0.38\eta) \times f_{ck} \quad (2.5-2)$$

3) 内配工字型钢的方钢管混凝土：

$$f_{scy} = (1.18 + 0.85\zeta + 0.29\eta) \times f_{ck} \quad (2.6-1)$$

4) 内配十字型钢的方钢管混凝土：

$$f_{scy} = (1.18 + 0.85\zeta + 0.33\eta) \times f_{ck} \quad (2.6-2)$$

式中： f_{ck} 为混凝土的轴心抗压强度标准值。

内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱构件强度承载力可以按照下式计算：

$$N_0 = f_{scy} A_{sc} \quad (2.7)$$

式中： N_0 ——内配型钢的钢管混凝土轴心受压构件的强度承载力；

A_{sc} ——内配型钢的钢管混凝土构件的组合截面面积， $A_{sc} = A_s + A_a + A_c$

f_{scy} ——内配型钢的钢管混凝土构件组合轴压强度标准值。

2.3.4 内配型钢的钢管混凝土轴心受压短柱承载力计算方法的比较

目前研究学者对此类新型构件极限承载力的计算方法主要基于两种理论。(1) 采用

叠加方法，建立基于叠加原理的极限承载力计算公式；(2) 采用极限平衡理论。叠加方法主要是将这种新型构件拆开并分解为如图 2.16 的两种形式。这两种形式都是基于各个组成部分之间的相互作用，考虑对各个组成部分的影响系数。然后将影响系数乘以对应部件的承载力，在将各部分相加而得到构件的整体极限承载力。极限平衡理论则不管加载中间过程如何变化，只通过结构处于极限状态时的平衡条件计算出结构极限状态时的荷载值。它不需要确定各种材料的本构关系并且跳过了受力复杂的中间弹塑性阶段。

王清湘等(2004)^[42]利用了方法一对这种新型构件的极限承载力进行了推导。钢管混凝土短柱轴压承载力计算公式简化表达式为：

$$N_0=f_c A_c(1+\alpha\theta) \quad (2.8-1)$$

$$\theta=f_{ty} A_t/f_c A_c \quad (2.8-2)$$

当在钢管混凝土中加入型钢后，考虑到型钢和混凝土之间的相互作用，将 α 建议取值 2，因此提出此种新型轴压短柱构件的极限承载力计算公式为：

$$N_0=f_c A_c(1+2\theta+\rho) \quad (2.8-3)$$

$$\rho=f_{sy} A_s/f_c A_c \quad (2.8-4)$$

其中，式中符号：

N_0 -构件的极限承载力；

α -与混凝土等级有关的系数，对 C50 及其以下的混凝土去 $\alpha=2$ ，对 C80 混凝土 $\alpha=1.7$ 介于 C50~C80 之间，按差值法取值；

A_c 、 A_t 、 A_s -核心混凝土截面面积、钢管截面面积和内配型钢截面面积；

f_c 、 f_{ty} 、 f_{sy} -混凝土轴心抗压强度、钢管钢材屈服强度和型钢钢材屈服强度；

θ 、 ρ -钢管的截面含钢率、型钢的截面含钢率。

此外，还有尧国皇等(2007)^[66]同样基于叠加理论推导了此种新型构件的极限承载力计算公式：

内配型钢的圆钢管混凝土柱：

$$N_0=(1.14+1.02\xi) f_{ck} A_{sc}+(f_{yc}-f_{ck}) A_{sg} \quad (2.9)$$

内配型钢的方钢管混凝土柱：

$$N_0=(1.18+0.85\xi) f_{ck} A_{sc}+(f_{yc}-f_{ck}) A_{sg} \quad (2.10-1)$$

$$\xi=f_y A_s/f_{ck} A_c \quad (2.10-2)$$

式中： A_{sc} 为构件的柱截面面积； A_{sg} 为内配型钢的截面面积； f_{yc} 为内配型钢屈服强度； f_{ck} 为混凝土立方体抗压强度标准值； ξ 为圆钢管混凝土的截面约束效应系数； f_y 为钢管钢材屈服强度； A_s 为钢管截面面积； A_c 为混凝土截面面积。

肖阿林(2009)^[67]中基于极限平衡理论，最终得到极限承载力计算公式：

$$N_0=f_c A_c(1.195+1.831\theta)+A_s f_{sy} \quad (2.11-1)$$

$$\theta=f_{ty} A_t/f_c A_c \quad (2.11-2)$$

式中， N_0 为轴压短柱截面承载力； f_{sy} 、 A_s 分别为型钢的屈服强度和截面面积； f_c 、 A_c 为核心混凝土的轴心抗压强度和截面面积； f_{ty} 、 A_t 为钢管的屈服强度和截面面积。

本文及其他研究学者对此种新型的内配型钢的钢管混凝土构件基于不同的理论提

出了不尽相同的轴压短柱极限承载力计算公式,为了检验本文提出公式的准确性和合理性,以及比较此类新型构件不同计算公式的计算结果。表 2.4 和图 2.18 列出了本文所收集到的轴压短柱承载力的试验结果与各个计算公式的计算结果的比较。

表 2.4 计算结果与试验数值的比较

试件编号	试验结果	式 2.7	式 2.8	式 2.10	式 2.11	数据来源	
NS-A1	2350	2105	2141	1873	1999	王清湘等 (2003) ^[62]	
NS-A2	2100	2105	2141	1873	1999		
NS-B1	2640	2411	2400	2114	2189		
HS-A1	2700	2507	2504	2281	2449		
HS-A2	2650	2507	2504	2281	2449		
HS-B1	2835	2808	2684	2530	2641		
HS-B2	2862	2808	2684	2530	2641		
HS-C1	3640	3507	3580	3184	3441		
HS-C2	3550	3507	3580	3184	3441		
HS-D1	4130	3881	4194	3601	3860		
HS-D2	4330	3881	4194	3601	3860		
HS-E1	2358	2270	2063	1888	2002		
SJ1-1	1976	2204	2201	1828	1803		杨包生等 (2008) ^[37]
SJ1-2	1955	2204	2201	1828	1803		
SJ2-1	2578	2529	2522	2167	2163		
SJ2-2	2626	2529	2522	2167	2163		
SJ3-1	2403	2270	2261	2021	1947		
SJ3-2	2396	2270	2261	2021	1947		
SJ4-1	2766	2718	2706	2388	2373		
SJ4-2	2804	2718	2706	2388	2373		
SC-1	3992	3857	4113	3409	4029	肖阿林 (2009) ^[67]	
SC-2	3900	3949	4228	3523	4157		
SC-3	4504	4126	4446	3728	4359		
SC-5	4186	4185	4388	3758	4259		
SC-6	4463	4270	4647	3859	4573		
SC-7	3545	3548	3717	3057	3645		
SC-8	3140	3141	3164	2585	3078		
SC-9	4386	4387	4228	3914	4157		

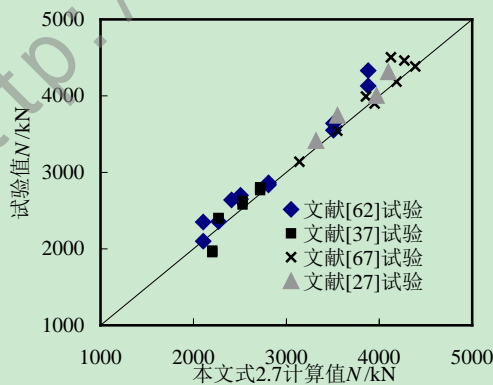


图 2.18 本文计算方法 2.7 的计算值与试验值对比关系图

由表 2.4 和图 2.18 的结果比较可知,计算公式 2.10 的计算结果较试验值相比,偏于保守,而本文提出的公式 2.7 的计算结果与试验数值较为吻合。

2.4 内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱的力学性能

内配型钢的钢管混凝土柱具有自重小、承载力高的特点，与传统钢筋混凝土相比，较小的截面尺寸和构件自重就可以承担相对较大的荷载，在现代工程上具有广泛的应用前景。但在实际工程中，结构构件的长细比较大，短柱的研究不足以充分满足为工程提供指导条件，因此，在短柱的基础上对内配型钢的钢管混凝土轴压长构件进行力学性能的分析研究就显得尤为重要。

目前，国内外研究学者对这种新型构件的轴压长柱的研究已经做了较多的工作，本文借鉴前人的研究方法和理论，对此类新型的轴压长柱构件进行一定的受力机理分析并利用大量的参数分析拟合出简化承载力计算公式，对工程实践具有一定指导作用。

2.4.1 有限元模型

内配型钢的钢管混凝土构件轴压长柱模型中的单元类型、材料模型和接触模型参照文中 2.2.4 的叙述。

荷载施加与边界条件与轴压短构件有所不同，对内配型钢的钢管混凝土轴压长柱构件采用一段自由，一段固定的边界条件，并在自由端施加荷载。在施加荷载时，参考韩林海(2007)^[5]的研究方法，在加载时，考虑构件具有千分之一构件长度的初始挠度，近似偏压构件的方法进行加荷。构件顶端采用线位移加载的方式并施加 U1 和 U2 的端约束，底端约束 U1、U2 和 U3。

本文分别对文献肖阿林等(2008)^[35]、朱美春(2005)^[63]、肖阿林(2009)^[67]的轴压长柱构件进行了模拟，模拟计算结果与试验结果对比曲线详见图 2.19，构件的具体参数详见表 2.5。

表 2.5 轴压长柱试件试验参数

试件编号	$D(B) \times t(\text{mm})$	λ	$f_{iy}(\text{MPa})$	$f_{sy}(\text{MPa})$	$f_c(\text{MPa})$	$A_s(\text{mm}^2)$	数据来源
HM-1	168×3.7	28	318	288	47.9	2324	肖阿林等 (2008) ^[35]
HM-2	168×3.7	28	318	288	47.9	2324	
HL-1	168×3.7	40	318	288	47.9	2324	
HL-2	168×3.7	40	318	288	47.9	2324	
A-21	195×4.5	21	338	289	48.4	2866	朱美春等 (2005) ^[63]
A-32	195×4.5	32	338	289	48.4	2866	
LC1	219×4.0	32	269	303	36.8	2324	肖阿林 (2009) ^[67]
LC2	216×4.0	40	269	303	36.8	3570	
LC3	219×4.0	48	337	303	36.8	3578	
LC4	219×4.0	40	337	303	53.1	3578	
LC5	219×4.0	40	337	318	39.0	2996	
LC6	219×4.0	32	337	308	39.0	4278	
LC7	219×2.1	32	308	303	39	3578	
LC8	219×2.1	40	308	303	36.8	3578	
LC9	219×5.6	32	289	303	39	3578	
LC10	219×5.6	40	289	303	39	3578	

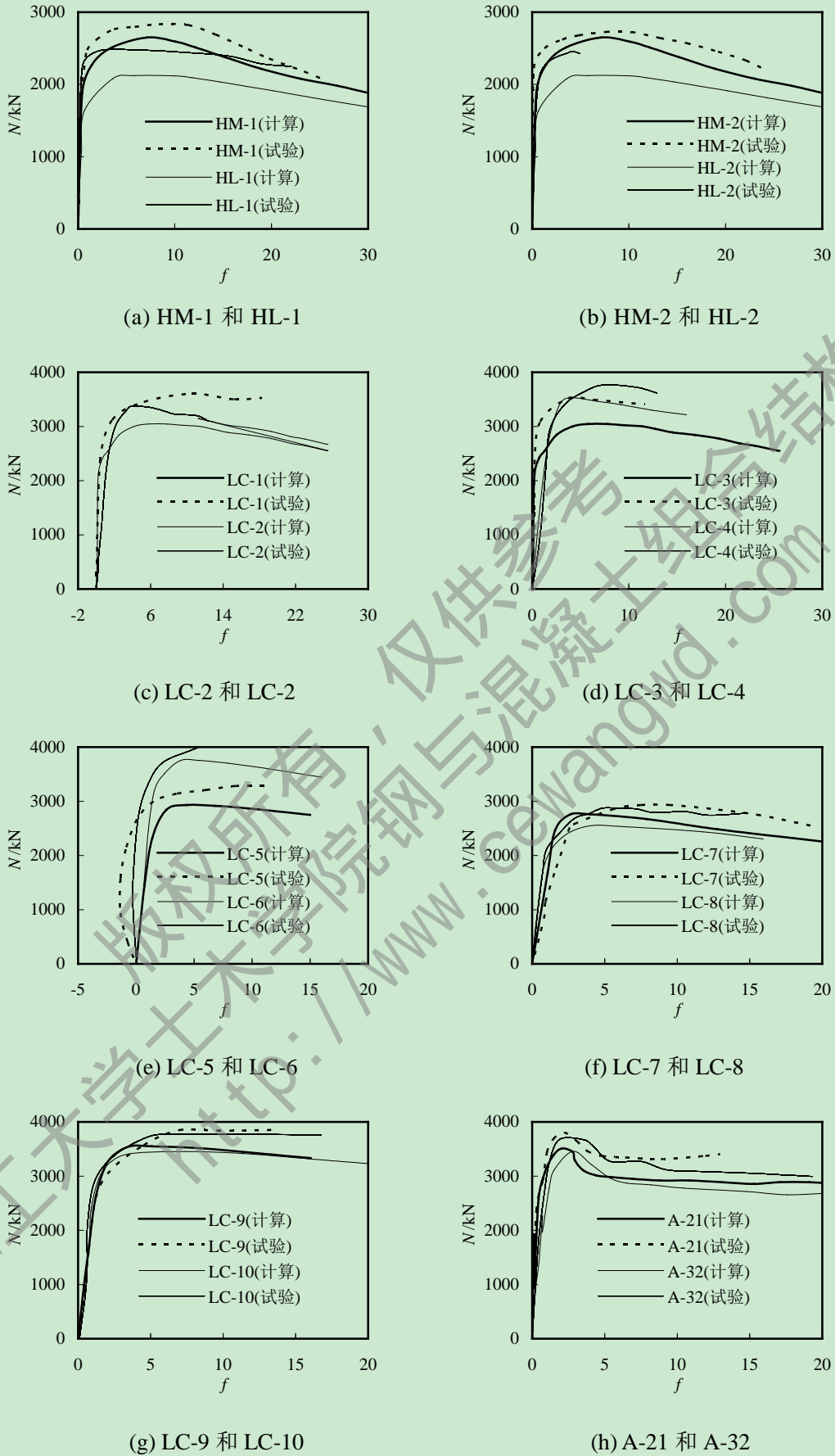


图 2.19 内配型钢的钢管混凝土轴压长柱试件模拟结果与试验结果对比曲线

由图 2.19 的试验和模拟曲线对比可知, 总体来说内配型钢的钢管混凝土轴压长构件

的模拟曲线与试验曲线基本吻合，模拟效果较好。轴压长柱构件的试验值与模拟值曲线相比，在构件的加载初始阶段曲线吻合较好，但随着荷载的增加，后期试验数值偏大。初步分析，造成这种问题的原因可能是在试验过程中，构件的实际端部约束条件和初始挠度与有限元模拟的假定条件不符，使得理论模拟并不能严格完全的按照试验进行边界条件的模拟，从而造成了一定的偏差。

2.4.2 内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱的力学性能分析

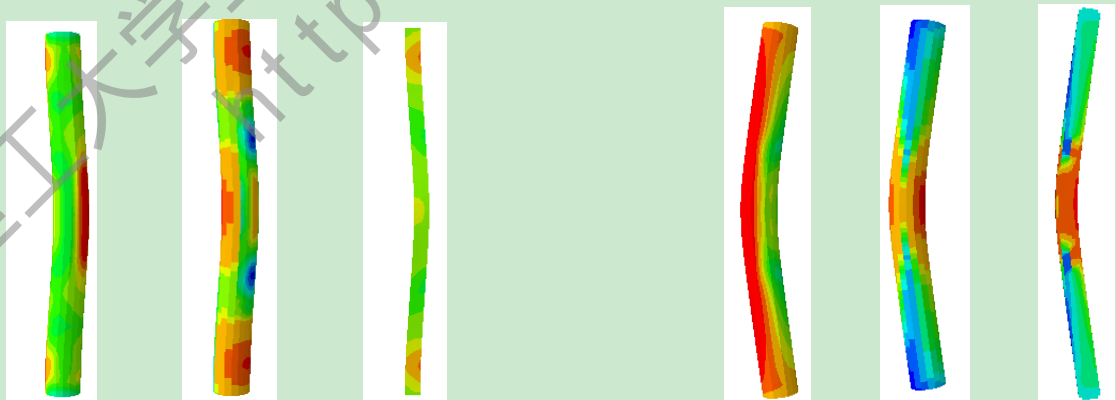
在研究长柱的力学性能时，就涉及到一个重要的参数指标 λ 。文献肖阿林等(2008)^[35]中利用结构稳定理论，根据构件承载力由稳定控制时的稳定验算条件得出此种新型长柱,发生强度破坏的临界长细比 λ_0 和失稳破坏的临界长细比 λ_p ，并且偏于保守的取 $\lambda_0=16$ ， $\lambda_p=110$ 。

为方便比较，本文选取标准构件尺寸 $D(B)\times t=500\text{mm}\times 11.1\text{mm}$ ，混凝土 C60；钢管 Q345；内配型钢 Q345；钢管含钢率 0.10；内配型钢含钢率 0.06， $\lambda=40$ 的内配型钢的圆钢管和方钢管混凝土构件进行分析。为方便叙述，对两组构件进行编号：C-Y1 圆钢管混凝土、C-Y2 内配工字型钢的圆钢管混凝土、C-Y3 内配十字型钢的圆钢管混凝土、C-F1 方钢管混凝土、C-F2 内配工字型钢的方钢管混凝土、C-F3 内配十字型钢的方钢管混凝土。

1 破坏模态分析

根据对模拟构件的有限元结果提取可以得到不同截面形式的钢管混凝土轴压短柱及其组成部件的最终破坏模态，如下图2.20所示。

由图可以看出，所有构件在最终的破坏形态都近似一致，都是跨中挠度较大，且发生破坏的部位都集中在构件的中截面处，钢管发生了严重的屈曲，在方钢管混凝土构件中这一现象尤为明显。从内配型钢的破坏形态可以看出，型钢的变形和构件的总体变形基本一致，与短柱试件的破坏形态相比，长柱型钢在发生破坏时并没有出现型钢翼缘的局部屈曲现象。



a-1 混凝土 a-2 钢管 a-3 内配工字型钢

(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件

b-1 混凝土 b-2 钢管 b-3 内配十字型钢

(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件

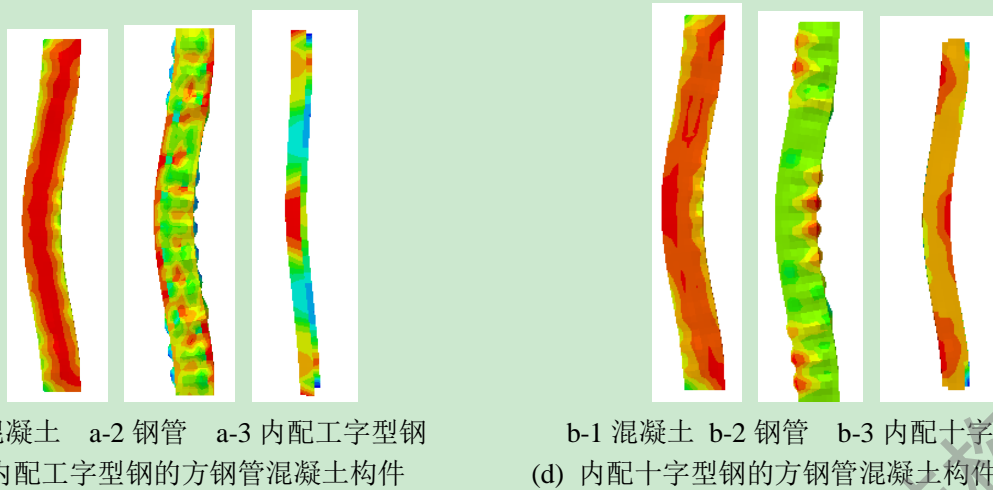


图 2.20 轴压长柱破坏形态

经过不同截面形式的构件对比可以看出，圆钢管构件的最终破坏形态是外钢管整体向外变形，构件中部屈曲最大，而方钢管构件是中部急速凸曲，产生较大的变形，这是由于圆钢管比方钢管对混凝土的约束效应要大。方钢管对混凝土的约束主要集中在四个棱角而圆钢管则在整個钢管范围内。但是圆钢管和方钢管混凝土构件在最终的破坏形式上都是近似相同的，且不论内部是否配有型钢以及型钢的截面形式。内配的型钢不论外包钢管的截面形式所发生的破坏形态都是近似一致的，而且由于内部混凝土的约束作用，型钢没有发生平面外失稳，极大的释放了型钢的承载能力。由此可以初步判断内配不同型钢的构件最终的破坏形态和受力机理应该是一致的。

内配型钢的钢管混凝土长构件在受到竖向的轴向压力时，考虑到初始偏心的影响，考虑千分之一的偏心距。构件由于底部固定，在顶部施加偏心荷载，使得构件中部向外发生凸曲，一侧受拉，另一侧受压。构件最终破坏时试件顶端和底端横向变形较小，中部的纵向应力最大且向外发生了明显的凸曲变形。通过模拟构件在轴心荷载作用下受压的全过程可以得知，在加载初期，构件处于弹性阶段，此时构件外形无明显变化，构件在纵向的位移近乎为零，且柱体并未出现屈曲；随着轴向施加偏心荷载的增大，构件中部慢慢向外发生凸曲，最后中部挠度不断变大，最终破坏。

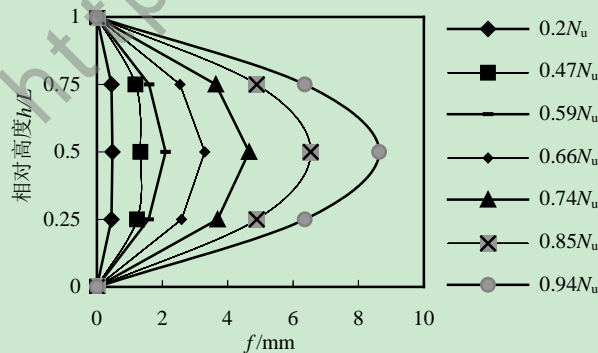


图 2.21 内配十字型钢的圆钢管混凝土轴压长柱在不同荷载下的侧向挠度曲线

图 2.21 所示为在有限元模拟内配十字型钢的圆钢管混凝土轴压长柱构件在不同相对高度处的荷载-挠度曲线。与相关文献肖阿林(2009)^[67]中对轴压长柱试验结果描述较为

相同：在加载中后期，构件的挠度曲线基本符合正弦半波曲线。

2 构件受压过程的应力分布情况及相互作用机理分析

通过对 C-Y 和 C-F 两组轴压长构件的数据整理得到各个构件的荷载-挠度曲线，见图 2.22。

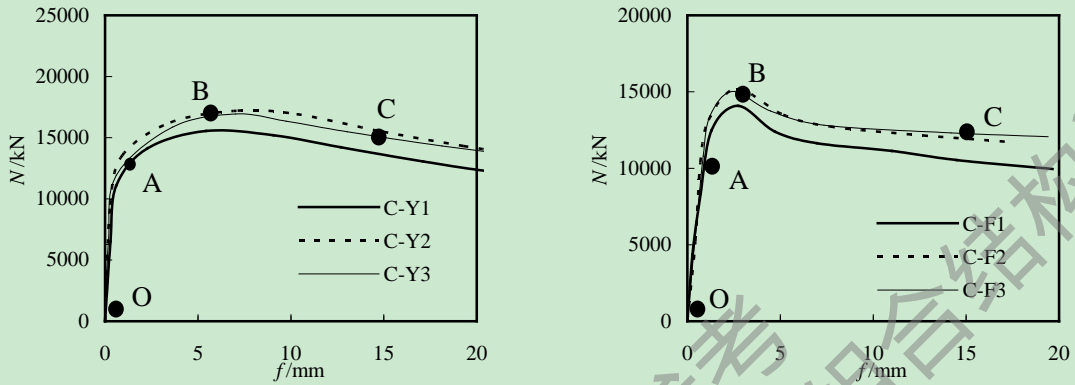
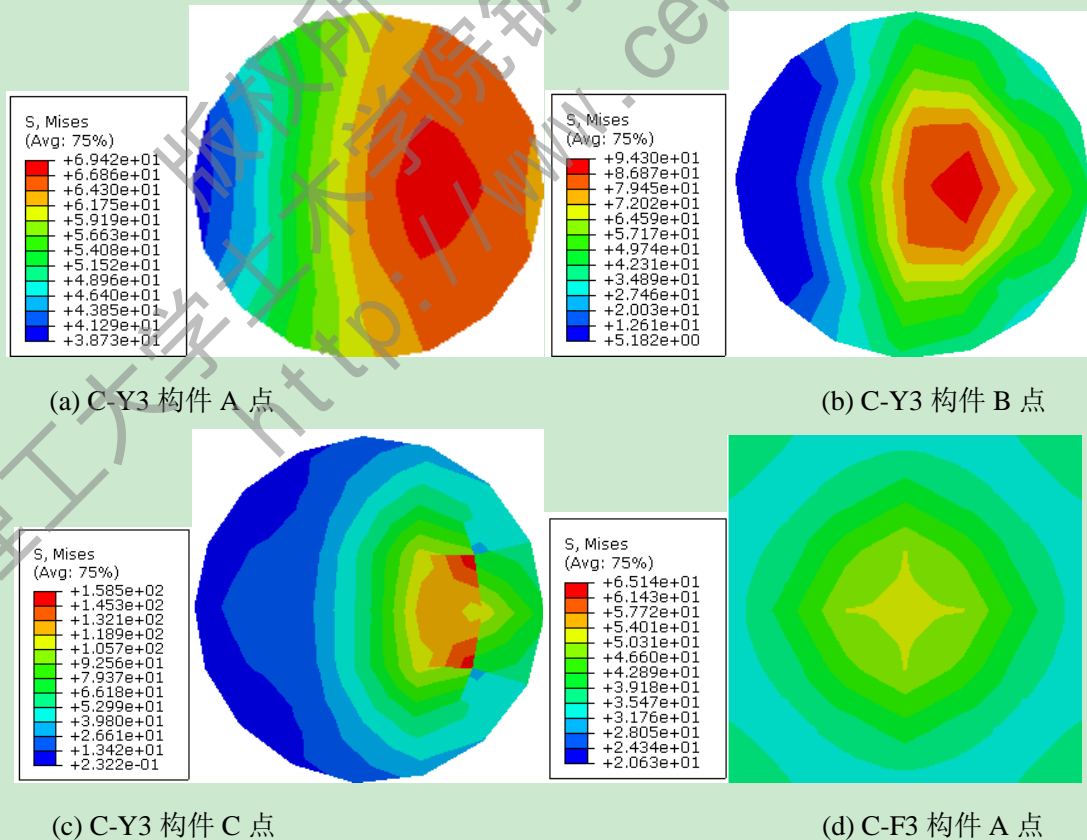
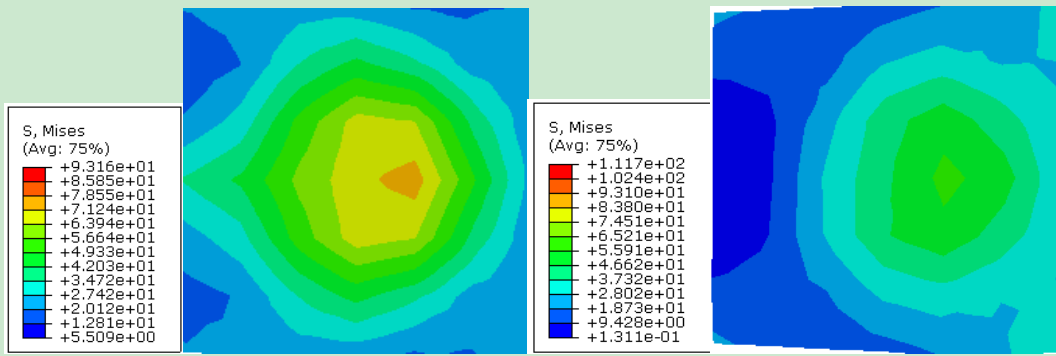


图 2.22 C-Y 和 C-F 两组轴压长柱荷载-侧向挠度曲线

由图可知，内配型钢的钢管混凝土轴压长柱构件在达到极限承载力后，与短柱相比，下降趋势更为明显。且如图 2.22 所示，内配型钢的钢管混凝土构件在构件达到极限承载力时的侧向挠度值要大于内部无型钢的钢管混凝土构件。图 2.23 为 C-Y3 和 C-F3 构件核心混凝土跨中截面在不同时期的应力云图，其中 OA 段为轴压长构件的弹性阶段，AB 为弹塑性阶段，BC 为塑性阶段。

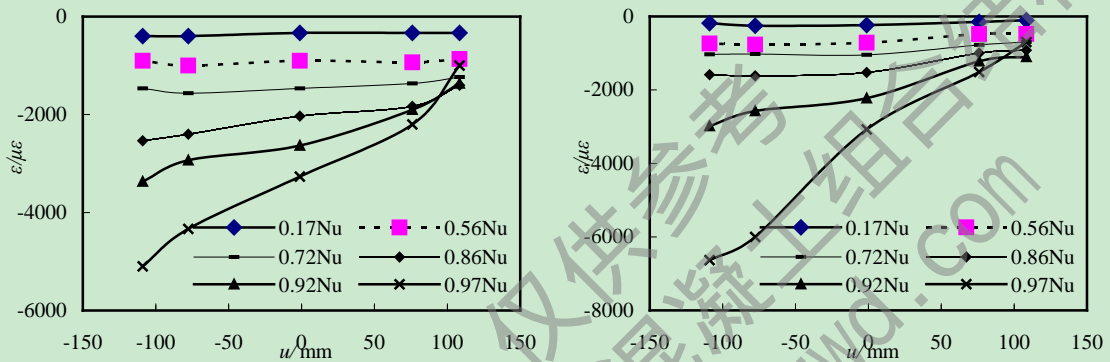




(e) C-F3 构件 B 点

(f) C-Y3 构件 C 点

图 2.23 C-Y3 和 C-F3 构件核心混凝土跨中截面应力云图



(a) C-Y3 构件

(b) C-F3 构件

图 2.24 C-Y3 和 C-F3 构件钢管中截面荷载-纵向应变关系图

由图 2.23 和 2.24 可以看出，在加载初期纵向应变全截面受压，各位置的应变变化相差不大且变化较为均匀，随着荷载的增加和挠曲变形的发展，轴压长构件在各个位置之间的应变的变化不断变大，挠曲内侧的压应变不断增长且增大速度不断变快，但外侧压应变的增长变化开始变慢（表现为截面曲率增大），在接近极限承载力时，附加弯矩使得试件的挠曲外侧压应变减小并转而受拉，最后达到极限承载力后，据截面中线最远的纵向拉压应变均达到屈服。而且由图 2.24 的变化也可看出，内配型钢的钢管混凝土轴压长构件在达到极限承载力之前，柱截面纵向应变沿截面高度的变化基本符合平截面假定。

3 参数分析

由前文中内配型钢钢管混凝土轴压长柱的模型验证可以看到，总体上有限元模拟曲线与实验结果曲线吻合良好，可以有效的模拟此类构件。

为了明确各参数对内配型钢的钢管混凝土轴压长柱力学性能的影响规律，有必要采用该理论模型对此类构件进行一定参数范围内的理论分析。令内配型钢的钢管混凝土构件的轴压稳定承载力为 $N_{u, cr}$ ，那么可以得到稳定系数 $\varphi = N_{u, cr} / N_u$ 。为了得到各个相关参数对长柱稳定系数 φ 的影响，现通过阅读相关文献及对构件受力机理的分析，确定基本构件形式为内配工字和十字型钢的圆、方形钢管混凝土构件，材料参数为钢管的钢材屈服强度 f_y 、核心混凝土的抗压强度 f_{cu} 、型钢的钢材屈服强度 f_{sy} 、钢管的截面含钢率 α 和

内配型钢的截面含钢率 ρ 以及长细比 λ 。

参数分析的变化范围为：钢材屈服强度 $f_y=235\text{MPa}\sim 420\text{MPa}$ ；核心混凝土的抗压强度 $f_{cu}=40\text{MPa}\sim 100\text{MPa}$ ；型钢的钢材屈服强度 $f_{sy}=235\text{MPa}\sim 420\text{MPa}$ ；钢管的截面含钢率 $\alpha=5\%\sim 20\%$ ；内配型钢的截面含钢率 $\rho=4\%\sim 10\%$ 。构件长细比 $\lambda=10\sim 200$ 。

本节共计算了1256个内配型钢的钢管混凝土模型，为了明细各个参数对长细比的影响数值及趋势，对数据进行了归纳整合，具体如图2.25~2.29所示。

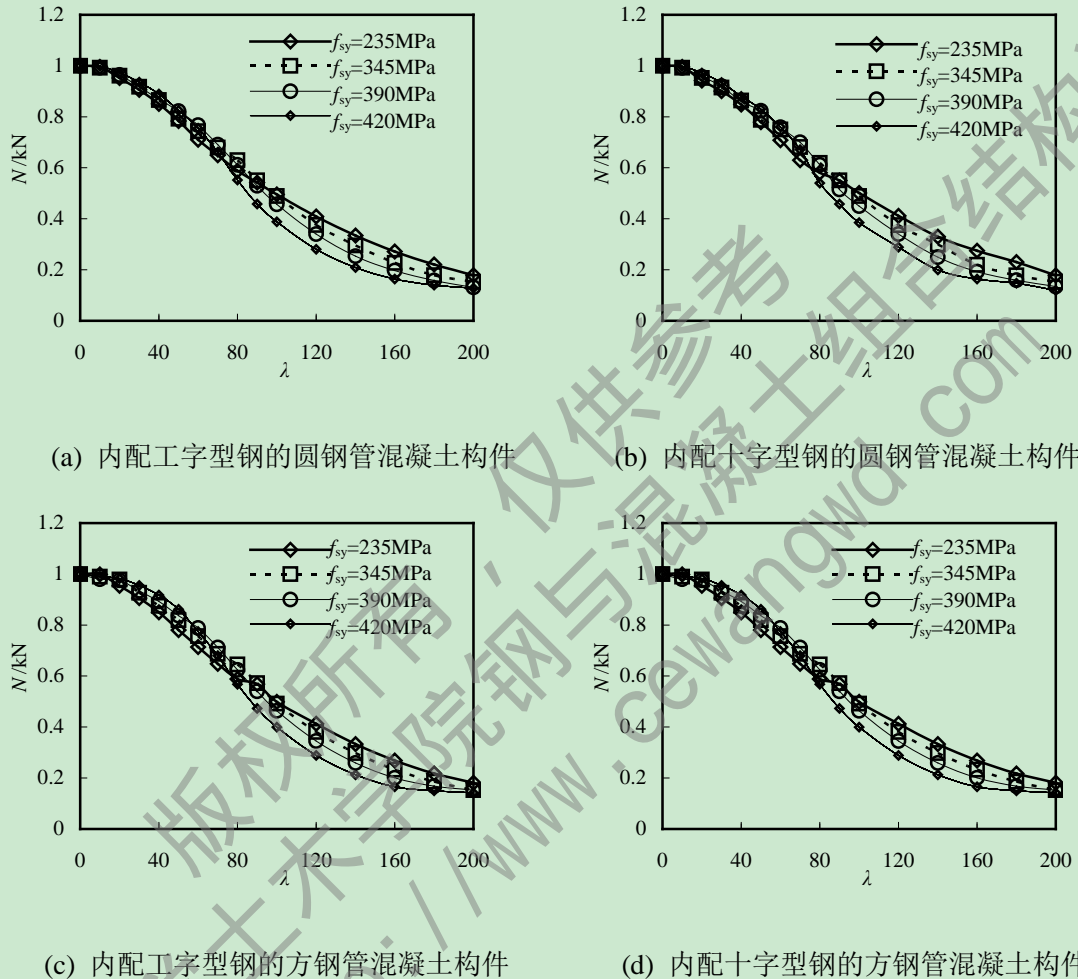
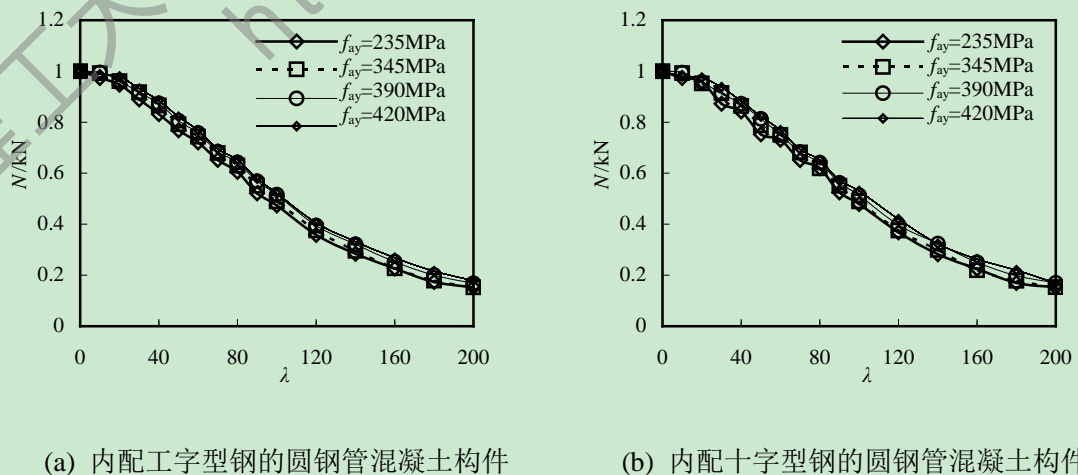
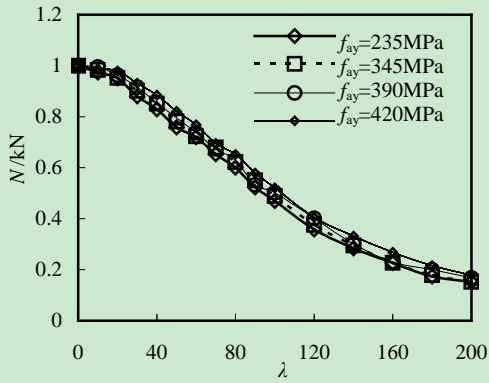
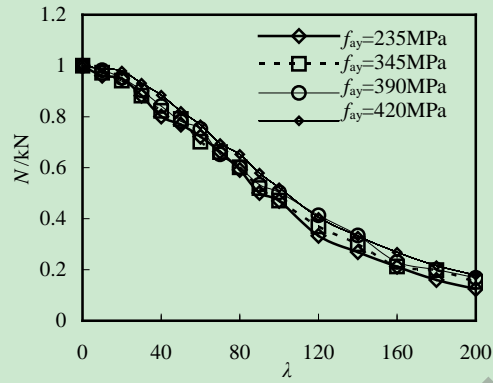


图 2.25 钢管钢材强度对内新型长柱构件 φ - λ 关系曲线的影响



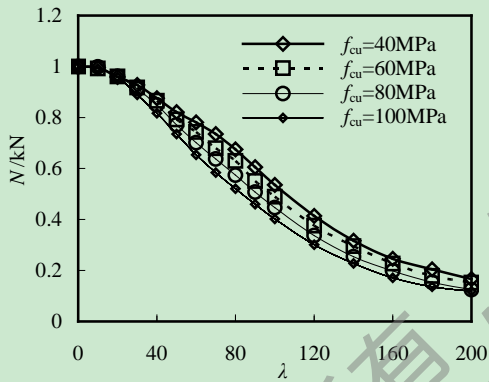


(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

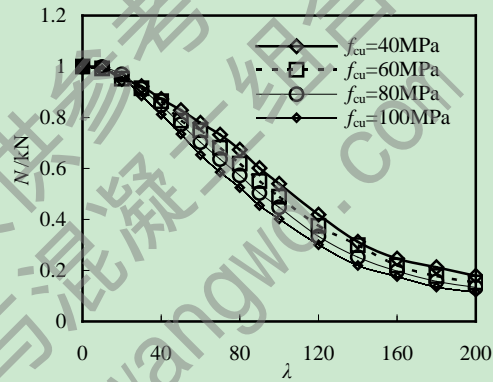


(d) 内配十字型钢的方钢管混凝土构件

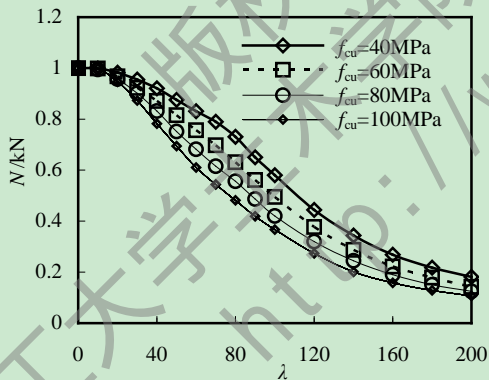
图 2.26 型钢钢材强度对新型长柱构件 φ - λ 关系曲线的影响



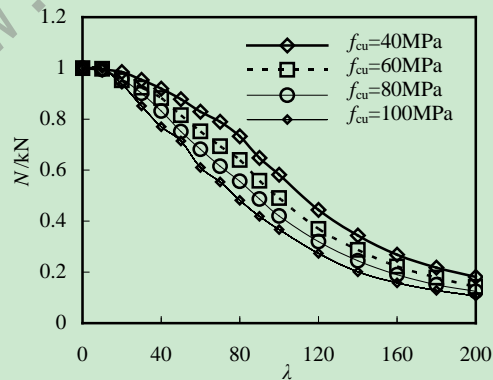
(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件



(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件

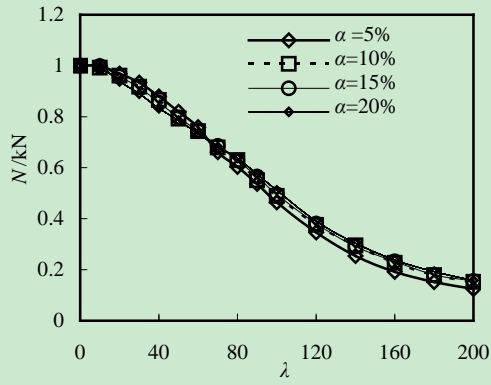


(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

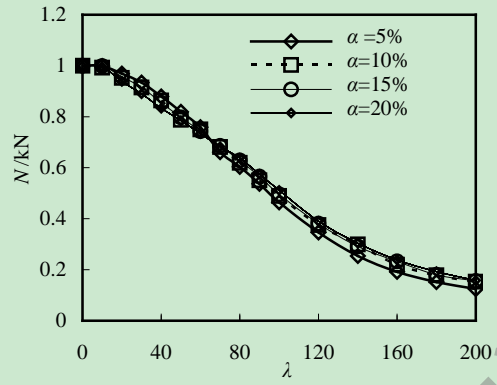


(d) 内配十字型钢的方钢管混凝土构件

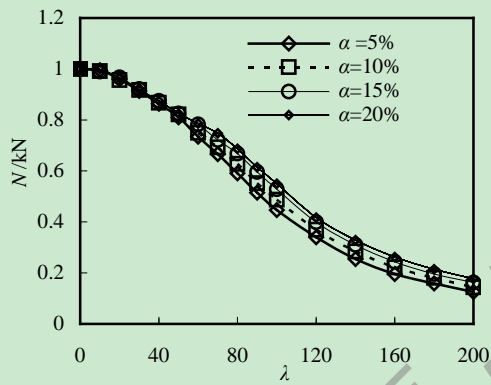
图 2.27 混凝土强度对新型长柱构件 φ - λ 关系曲线的影响



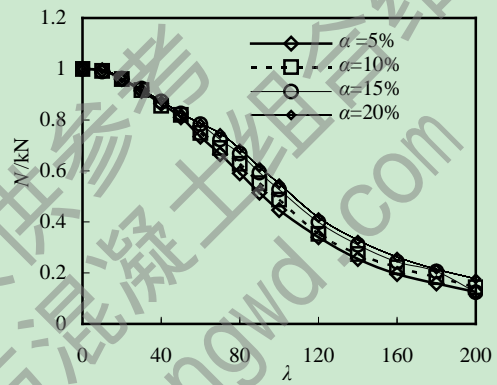
(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件



(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件

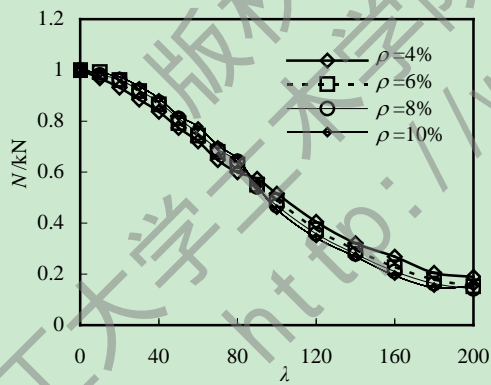


(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

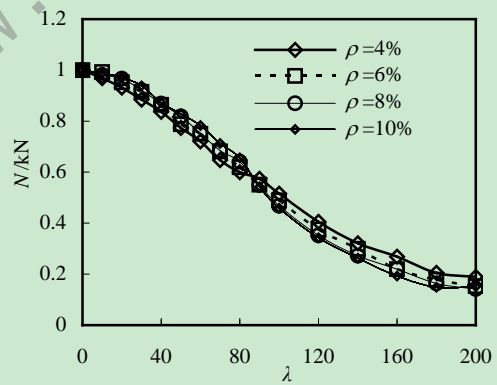


(d) 内配十字型钢的钢管混凝土构件

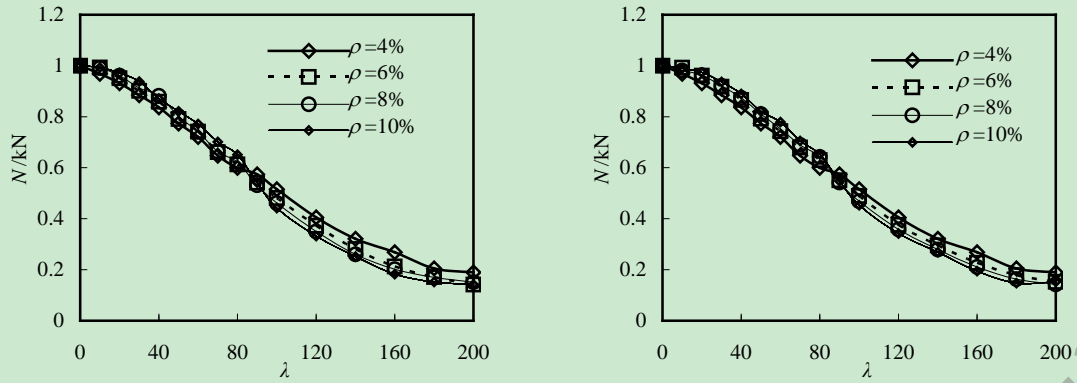
图 2.28 钢管含钢率对新型长柱构件 φ - λ 关系曲线的影响



(a) 内配工字型钢的圆钢管混凝土构件



(b) 内配十字型钢的圆钢管混凝土构件



(c) 内配工字型钢的方钢管混凝土构件

(d) 内配十字型钢的方钢管混凝土构件

图 2.29 型钢含钢率对新型长柱构件 φ - λ 关系曲线的影响

由上图 2.25-2.29 可知：

(1) 长细比是影响内配型钢的钢管混凝土轴压长柱承载力的主要因素。通过各个参数对构件的 φ - λ 影响曲线，可以看到当长细比较小时即 $\lambda \leq 16$ 时，稳定系数 φ 值近似没有变化，这也表明文献肖阿林等(2008)^[35]中取 $\lambda=16$ 作为短柱和长柱的分界点是较为合理的；在此之后，稳定系数随着长细比的增大而逐渐降低，且降低趋势逐步增大。

(2) 在所有的相关参数对内配型钢的圆、方形钢管混凝土轴压长柱构件承载力稳定系数的影响中，影响规律大体相近，但数值差别较大。内配不同型钢的圆形和方形钢管混凝土长柱各自相比，内配型钢的形式对构件承载力稳定系数有一定影响，但数值差距不大。

(3) 在所有相关参数对构件稳定系数的影响中，钢管钢材强度、混凝土强度对稳定系数影响较大，钢管截面含钢率对稳定系数有一定的影响，相比之下，内配型钢的屈服强度和内配型钢含钢率对稳定系数的影响则没有这么明显。

2.4.3 内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱稳定承载力简化计算

通过前文对该类构件的大量数值计算的结果进行分析，可以发现内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱的界限长细比与构件破坏状态有较为直接的关系。随着新型组合柱长细比的增大，内配型钢的钢管混凝土柱的极限承载力有强度破坏变化到稳定破坏，大致过程可以分为三个阶段：强度破坏、弹塑性失稳破坏和弹性失稳破坏。此类组合构件的 φ - λ 关系曲线可用图 2.30 所示描述。

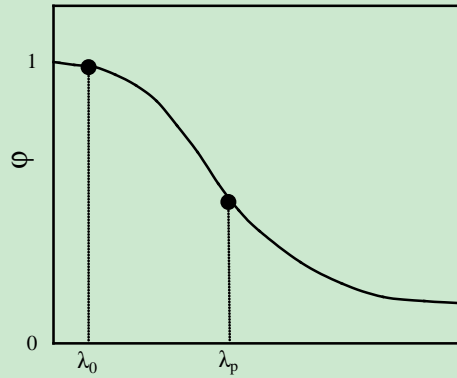


图 2.30 φ - λ 关系曲线

图 2.30 所示，内配型钢的钢管混凝土轴心受压长柱的 φ - λ 关系曲线大致可以分为三个阶段：当 $\lambda \leq \lambda_0$ 时，此时 $\varphi=1$ ，构件发生破坏属于强度破坏；当 $\lambda_0 < \lambda < \lambda_p$ 时，稳定系数不为 1，此时组合构件发生弹塑性失稳，内配型钢的钢管混凝土新型构件截面处于弹塑性阶段；当 $\lambda > \lambda_p$ 时，轴压组合住发生弹性失稳。其中 λ_0 为内配型钢的钢管混凝土柱的弹塑性失稳界限长细比， λ_p 为弹性失稳界限长细比。

参考韩林海(2007)^[5]中的研究成果，基于其在钢管混凝土长柱稳定承载力分析的理论基础上，通过对大量的参数变量的数值模拟结果进行回归分析，得到考虑内部型钢的钢管混凝土柱的弹塑性失稳界限长细比 λ_0 和弹性失稳界限长细比 λ_p ：

$$\lambda_0 = \begin{cases} \pi \sqrt{(420\xi + 530) / f_{scy}} & (\text{内配型钢的圆钢管混凝土}) \\ \pi \sqrt{(220\xi + 450) / f_{scy}} & (\text{内配型钢的方钢管混凝土}) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\lambda_p = \begin{cases} 1743 \sqrt{f_{ay}} & (\text{内配型钢的圆钢管混凝土}) \\ 1811 \sqrt{f_{ay}} & (\text{内配型钢的方钢管混凝土}) \end{cases} \quad (2.12)$$

其中 $\eta = \rho f_{ay} / f_{cu}$ ；内配型钢的圆钢管混凝土 $f_{scy} = (1.14 + 1.02\xi + 0.33\eta) \times f_{ck}$ ；内配型钢的方钢管混凝土 $f_{scy} = (1.118 + 0.85\xi + 0.29\eta) \times f_{ck}$ 。

图 2.30 的 φ - λ 关系曲线可以用下述公式表示：

$$\varphi = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_0) \\ a\lambda^2 + b\lambda + c & (\lambda_0 < \lambda \leq \lambda_p) \\ d / (\lambda + 35)^2 & (\lambda > \lambda_p) \end{cases} \quad (2.13)$$

其中：

$$\begin{aligned} a &= [1 + (35 + 2 \times \lambda_p - \lambda_0) \times e] / (\lambda_p - \lambda_0)^2 \\ b &= e - 2a\lambda_p \\ c &= 1 - a\lambda_p^2 - b\lambda_0 \\ e &= -d / (\lambda_p + 35)^3 \end{aligned}$$

对于内配型钢的圆钢管混凝土:

$$d=4657[2.79+\ln(235/f_{ay})]\times[25/(f_{ck}+5)]^{0.3}\times(\alpha/0.1)^{0.05}\times(\eta/0.1)^{0.03} \quad (2.14)$$

对于内配型钢的方钢管混凝土:

$$d=4810[2.81+\ln(235/f_{ay})]\times[25/(f_{ck}+5)]^{0.3}\times(\alpha/0.1)^{0.05}\times(\eta/0.1)^{0.03} \quad (2.15)$$

由此,可以得到内配型钢的钢管混凝土轴心受压柱的稳定承载力 $N_{u, cr}$ 的计算公式

$$N_{u, cr}=\varphi\times N_u=\varphi\times f_{scy}A_{sc} \quad (2.16)$$

对于式 2.16,当 $\varphi=1$ 时,构件发生强度破坏,承载力公式与轴压短柱极限承载力公式 2.2 相同。

此外,文献[67]基于组合切线模量和叠加切线模量得到了内配型钢的钢管混凝土轴压长柱稳定承载力的求解方法 2.17 和 2.18,最后基于试验数据的变化建立了实用计算公式 2.19:

$$N_{u, cr}=\pi^2 E_{sc} I_{sc} / L_0^2 \quad (2.17)$$

$$N_{u, cr}=\pi^2 (E_t^I I_t + E_s^I I_s + E_c^I I_c) / l_0^2 \quad (2.18)$$

$$\varphi_l = 1 - 0.08(L_0/D - 4)^{1/2} \quad (2.19-1)$$

$$N_{u, cr} = \varphi_l N_0 \quad (2.19-2)$$

式中, E_{sc} 为组合材料的切线模量, E_t^I 、 E_s^I 、 E_c^I 分别为外部钢管、内配型钢和混凝土的切线模量, I_t 、 I_s 、 I_c 分别为外部钢管、内配型钢和混凝土的截面惯性矩, φ_l 为长细比折减系数, N_0 为内配型钢的钢管混凝土短柱轴压承载力计算公式见 2.11。图 2.31 为内配型钢的钢管混凝土轴压长柱承载力各计算方法的计算值对比曲线和本文推导的实用公式 2.16 与试验值对比曲线。

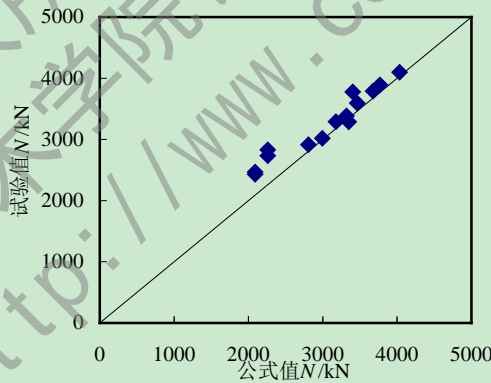


图 2.31 本文式 2.16 的计算值与文献[67]试验值对比关系图

由图 2.31 可见,本文提出的内配型钢的钢管混凝土轴压长柱承载力计算方法可以较为准确的计算其承载力,本文提出的公式 2.16 较接近于试验结果,吻合良好。

2.5 本章小结

通过本章的研究,可以得到如下结论:

- (1) 通过有限元分析软件 ABAQUS 对内配型钢的钢管混凝土此类新型构件进行了

数值分析，得到的模拟结果与实验结果对比吻合情况较好。

(2) 对不同截面形式的内配型钢的钢管混凝土轴压构件的力学性能进行了较为深入的工作机理的研究，并且进行了截面形式对于构件轴压承载力影响的研究，并得到了相关结论。

(3) 采用有限元法分析了不同参数对于此类新型构件的影响，并且基于对构件的参数分析和相关的钢管混凝土轴压理论得到了简化计算公式。

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 内配型钢的钢管混凝土压弯构件的力学性能

3.1 引言

本章的主要内容是利用 ABAQUS 有限元分析软件,对模拟的内配型钢的钢管混凝土构件进行了纯弯和压弯的力学性能分析。介绍了本文中运用到的有限元材料模型和单元类型,描述了内配型钢的钢管混凝土构件的建模过程。对此种新型钢管混凝土纯弯和压弯构件进行了大量的参数分析,并在此基础上本章对内配型钢的钢管混凝土压弯构件的力学性能进行了分析讨论,给出了内配型钢的钢管混凝土压弯构件的实用计算方法。

3.2 有限元建模

3.2.1 有限元建模过程

内配型钢的钢管混凝土构件轴压长柱模型中的单元类型、材料模型和接触模型参照文中 2.2.4 的叙述。

荷载施加与边界条件与轴压短构件有所不同,对内配型钢的钢管混凝土受弯构件采用两端铰接的边界条件,并在端部施加弯矩荷载。

3.2.2 有限元模型验证

为了验证该有限元模型的合理性,分别对文献韦灼彬等(1998)^[68]、卢辉和韩林海(2004)^[69]、陶忠(1998)^[70]、杨有福和韩林海(2001)^[71]的圆形、方形及矩形钢管混凝土受弯构件以及赵大洲(2003)^[73]中内配十字型钢的圆钢管混凝土受弯构件进行了模拟,试验数据见表 3-1 和 3-2,模拟计算结果与试验结果对比曲线详见图 3.1。

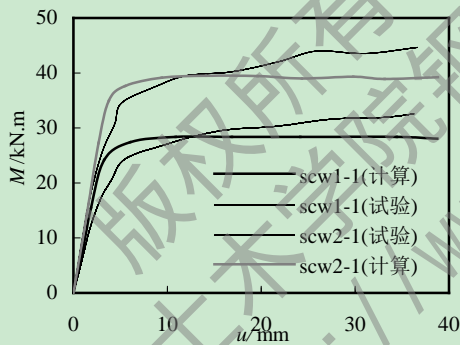
表 3-1 钢管混凝土纯弯试件参数

试件编号	$D(B) \times t \times L(\text{mm})$	$f_{ty}(\text{MPa})$	$f_c(\text{MPa})$	数据来源
Scw1-1	120×3.84×1100	330	18.34	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw1-2	120×3.84×1100	330	23.64	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw1-3	120×3.84×1100	330	23.64	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw1-4	120×3.84×1100	330	23.64	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw2-1	120×5.86×1100	321	20.98	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw2-2	120×5.86×1100	321	20.98	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw2-3	120×5.86×1100	321	26.80	韦灼彬等(1998) ^[68]
Scw2-4	120×5.86×1100	321	26.80	韦灼彬等(1998) ^[68]
100-1	100×1.9×1400	282	81.3	卢辉等(2004) ^[69]
100-2	100×1.9×1400	282	81.3	卢辉等(2004) ^[69]
100-3	100×1.9×1400	282	81.3	卢辉等(2004) ^[69]
200-1	200×1.9×1400	282	81.3	卢辉等(2004) ^[69]
200-2	200×1.9×1400	282	81.3	卢辉等(2004) ^[69]

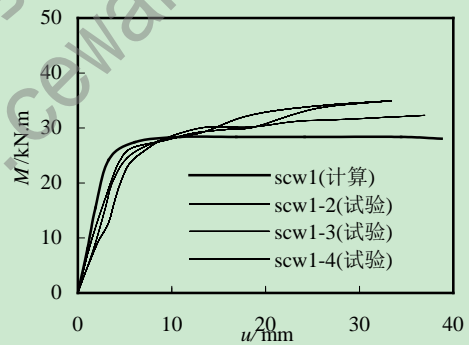
200-3	200×1.9×1400	282	81.3	卢辉等(2004) ^[69]
Rb1-1	120×120×3.84×1100	330.1	27.3	陶忠(1998) ^[70]
Rb2-1	120×120×3.84×1100	330.1	35.2	陶忠(1998) ^[70]
Rb2-2	120×120×3.84×1100	330.1	35.2	陶忠(1998) ^[70]
Rb2-3	120×120×3.84×1100	330.1	35.2	陶忠(1998) ^[70]
Rb3-1	120×120×5.86×1100	321.1	31.3	陶忠(1998) ^[70]
Rb3-2	120×120×5.86×1100	321.1	31.3	陶忠(1998) ^[70]
Rb4-1	120×120×5.86×1100	321.1	40	陶忠(1998) ^[70]
Rb4-2	120×120×5.86×1100	321.1	40	陶忠(1998) ^[70]
Rb5-1	150×120×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb5-2	150×120×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb6-1	120×90×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb6-2	120×90×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb7-1	150×90×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb7-2	150×90×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb8-1	120×60×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]
Rb8-2	120×60×2.93×1100	293.8	34.5	杨有福等(2001) ^[71]

表 3-2 内配十字型钢钢管混凝土受弯试件参数

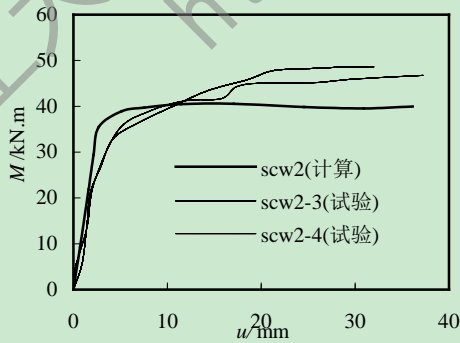
试件编号	$D \times t$	$I_x(\text{mm}^2)$	$f_{ty}(\text{MPa})$	$f_{sy}(\text{MPa})$	$f_c(\text{MPa})$	$A_s(\text{mm}^2)$	数据来源
HC0-0	218×4.0	2085759	269	288	74.3	2324	赵大洲(2003) ^[73]
HC2-0	218×4.0	5001411	269	314	74.3	3570	赵大洲(2003) ^[73]



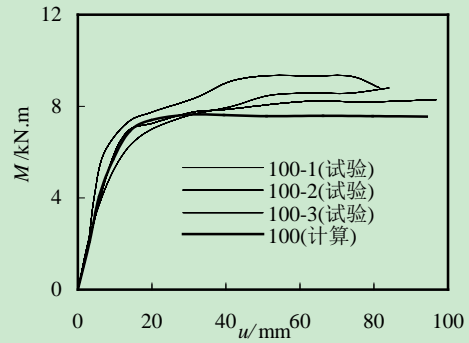
(a) scw1-1 和 scw2-1



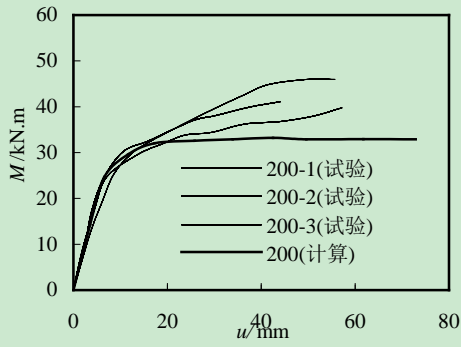
(b) scw1-2、scw1-3 和 scw1-4



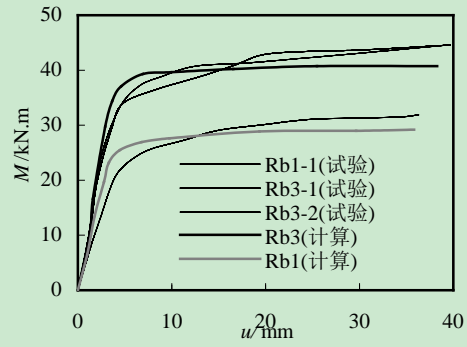
(c) scw2-3 和 scw2-4



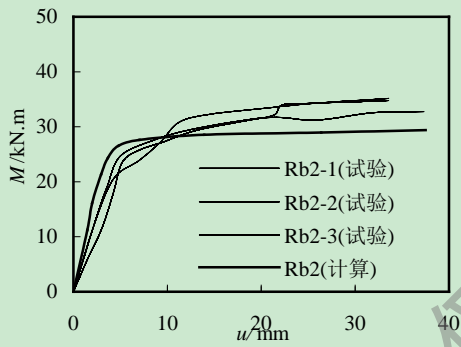
(d) 100-1、100-2 和 100-3



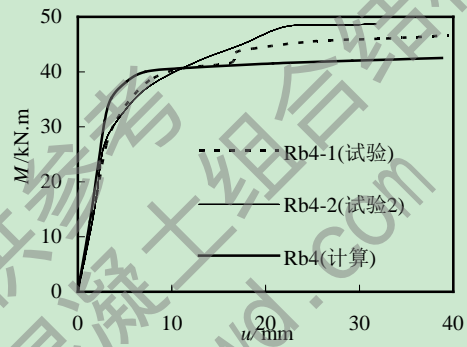
(e) 200-1、200-2 和 200-3



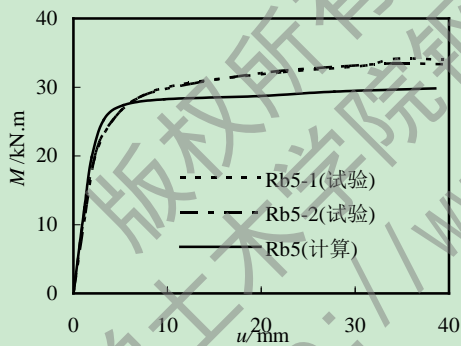
(f) Rb1-1、Rb3-1 和 Rb3-2



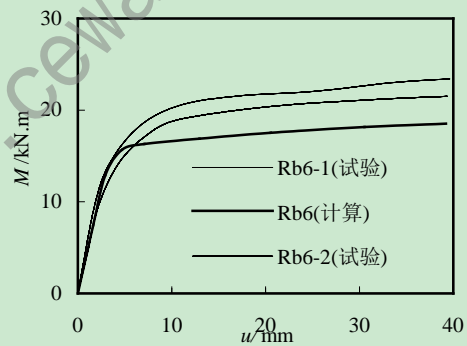
(g) Rb2-1、Rb2-2 和 Rb2-3



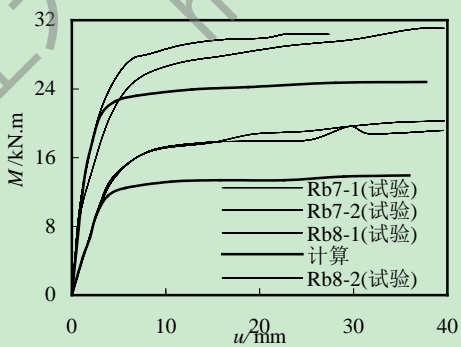
(h) Rb4-1 和 Rb4-2



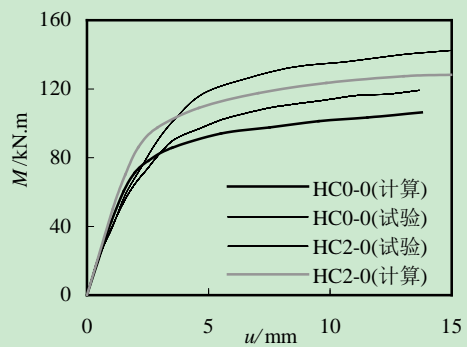
(i) Rb5-1 和 Rb5-2



(j) Rb6-1 和 Rb6-2



(k) Rb7-1 和 Rb7-2



(l) HC0-0 和 HC2-0

图 3.1 试验结果与模拟结果比较曲线

由图 3.1 可以看到, 本文建立的有限元模型计算结果和相对应的试验曲线关系弯矩-挠度曲线即 $M-u$ 曲线吻合情况较好, 可以看出本文建立的钢管混凝土纯弯模型可以进行内配型钢的钢管混凝土此类新型构件的有限元分析。

3.3 内配型钢的钢管混凝土纯弯构件的力学性能分析

在研究内配型钢钢管混凝土纯弯构件的力学性能时, 为方便比较, 选取标准构件尺寸 $D(B) \times t = 500\text{mm} \times 11.1\text{mm}$, 混凝土 C60; 钢管 Q345; 内配型钢 Q345; 钢管含钢率 0.10; 内配型钢含钢率 0.06, $\lambda=20$ 的内配型钢的圆钢管和方钢管混凝土构件进行分析。为方便叙述, 对两组构件进行编号: CW-Y1 圆钢管混凝土、CW-Y2 内配工字型钢的圆钢管混凝土、CW-Y3 内配十字型钢的圆钢管混凝土、CW-F1 方钢管混凝土、CW-F2 内配工字型钢的方钢管混凝土、CW-F3 内配十字型钢的方钢管混凝土。

3.3.1 内配型钢的钢管混凝土受弯构件的力学性能分析

1 破坏模态分析

根据对模拟构件的有限元结果提取可以得到不同截面形式的钢管混凝土受弯构件及其组成部件的最终破坏模态, 如下图 3.2 所示。

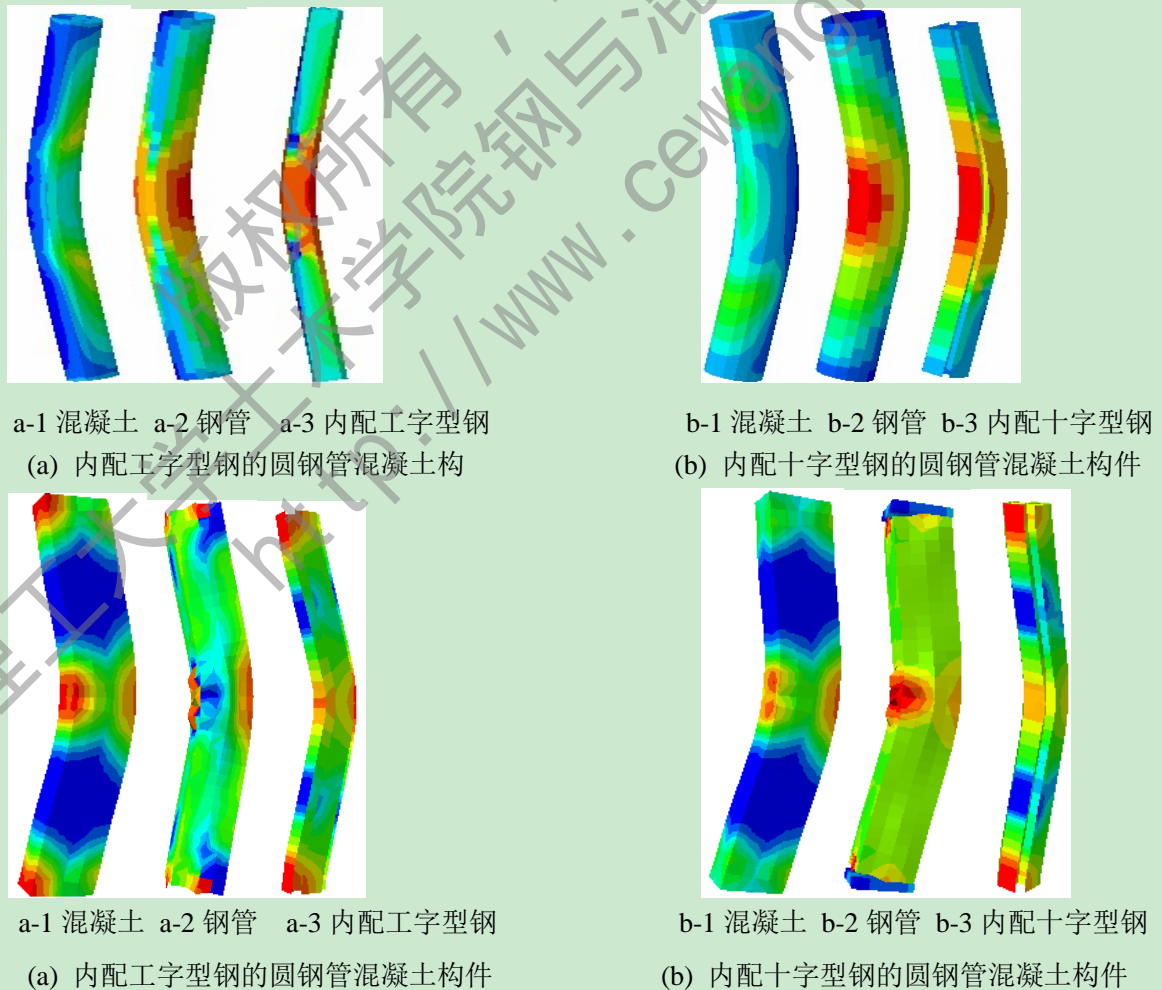


图 3.2 内配型钢的钢管混凝土受弯构件破坏形式

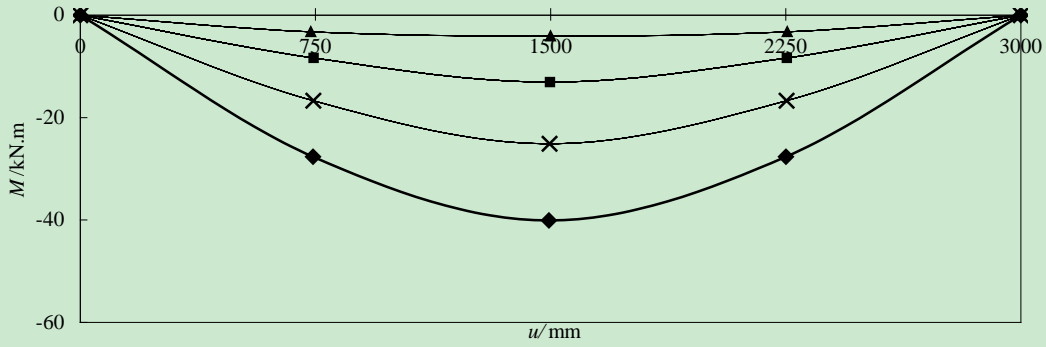


图 3.3 受弯构件挠度沿长度方向的分布

模拟结果表明，内配型钢的钢管混凝土受弯构件最终表现的破坏形式与钢管混凝土构件的破坏特征较为一致。表现出了较为明显延性破坏特征，且在构件的受压区出现了局部钢管外凸的现象。图 3.3 所示为内配型钢的钢管混凝土受弯典型构件的挠度沿构件长度方向分布曲线，与相关文献中纯弯构件的试验结果描述较为相同：构件的挠度曲线基本符合正弦半波曲线。

2 承载力分析

对内配工字型钢的钢管混凝土受弯构件来说，由于工字型钢的截面特性，再施加外部弯矩的时候，构件可以绕强轴(x 轴)弯曲也可以绕弱轴(y 轴)弯曲，如图 3.4。因此对于内配型钢的钢管混凝土受弯构件的研究有必要对工字型钢的强轴和弱轴弯曲同时进行计算和分析，以确定构件绕不同方向弯曲时的受力性能和极限抗弯承载力。

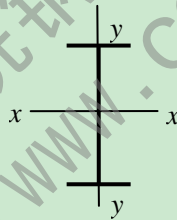
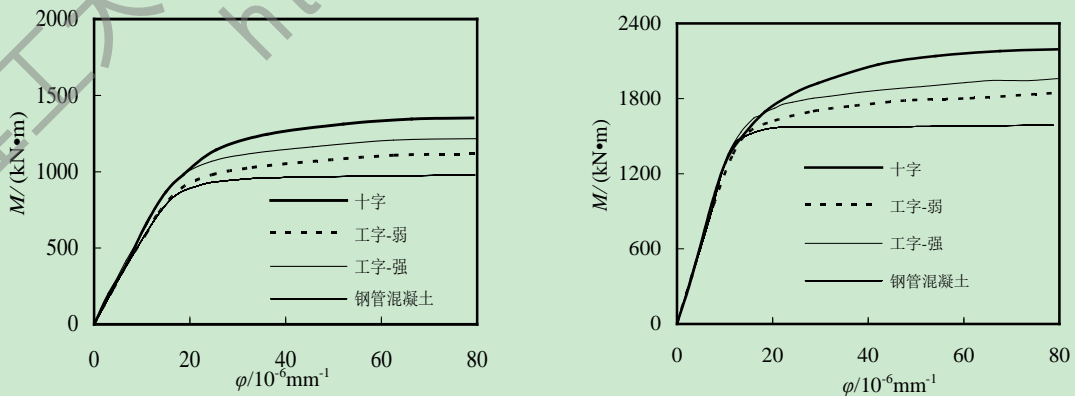


图 3.4 工字型钢截面

通过对两组构件的进行数值模拟，整理得到各个构件的弯矩(M)和曲率(φ)的关系曲线，见下图 3.5。



(a) 内配型钢的圆钢管混凝土受弯构件

(b) 内配型钢的方钢管混凝土受弯构件

图 3.5 受弯构件 $M-\varphi$ 曲线

由图 3.5 可见, 不论截面形式如何不同的内配型钢的钢管混凝土构件在受弯初期, 构件处于弹性变形阶段, 曲率 (φ) 的增长速度与弯矩 (M) 的增长速度相比, 明显滞后。此时构件中受拉区的混凝土尚在初始开裂阶段, 还未开裂。当钢管和内配型钢达到钢材的屈服应变以后, 受弯构件曲率 (φ) 的增长速度要快于弯矩 (M) 的增长速度, 此时受弯构件步入弹塑性阶段。并且从图中内配型钢的钢管混凝土受弯构件和钢管混凝土受弯构件的 $M-\varphi$ 曲线对比可以看出, 钢管混凝土受弯构件在进入到弹塑性后构件承担的弯矩荷载可以继续增长, 但增长幅度较小, 但内配型钢的钢管混凝土受弯构件不论内部型钢形式和加载方向的不同, 在弹塑性阶段仍能承担较大的弯矩荷载且增长幅度较钢管混凝土受弯构件相比较较大, 这主要是由于钢管和核心混凝土存在约束效应以及钢管混凝土对内配型钢的约束效应, 从而提高了新型构件的受弯承载力而且由于内配型钢的存在, 增加了构件的抗弯刚度, 延缓了构件在弹塑性阶段由于变形过大而导致的破坏从而提高了构件的延性。

内配型钢的不同截面形式对构件的 $M-\varphi$ 曲线主要影响在构件的弯矩承载力和弹塑性阶段延性的变化。十字型钢由于截面特性没有强弱轴之分以及型钢内部对混凝土的类似钢管约束混凝土的约束作用, 从而高于其他构件的弯矩承载力。工字型钢的强轴弯矩承载力要大于弱轴加载的弯矩承载力。

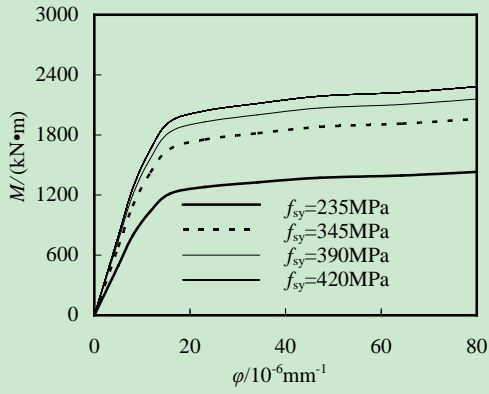
3.3.2 内配型钢的钢管混凝土受弯构件的参数分析

为了明确各参数对内配型钢的钢管混凝土受弯构件力学性能的影响规律, 有必要采用该理论模型对此类构件进行一定参数范围内的理论分析。现通过阅读相关文献及对构件受力机理的分析, 确定基本构件形式为内配工字和十字型钢的圆、方形钢管混凝土构件, 材料参数为钢管的钢材屈服强度 $f_y=345\text{MPa}$ 、核心混凝土的抗压强度 $f_{cu}=60\text{MPa}$ 、型钢的钢材屈服强度 $f_{sy}=345\text{MPa}$ 、钢管的截面含钢率 $\alpha=10\%$ 和内配型钢的截面含钢率 $\rho=6\%$ 以及长细比 $\lambda=20$ 。

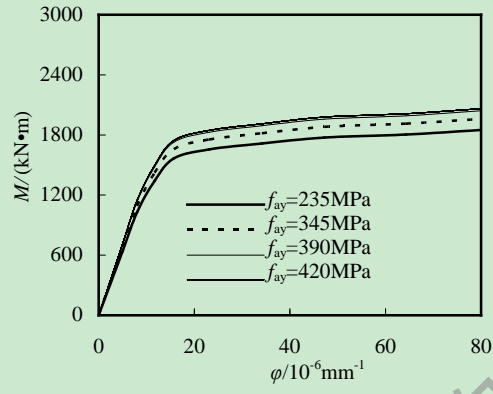
参数分析的变化范围为:

钢材屈服强度 $f_y=235\text{MPa}\sim 420\text{MPa}$; 核心混凝土的抗压强度 $f_{cu}=40\text{MPa}\sim 100\text{MPa}$; 型钢的钢材屈服强度 $f_{sy}=235\text{MPa}\sim 420\text{MPa}$; 钢管的截面含钢率 $\alpha=5\%\sim 20\%$; 内配型钢的截面含钢率 $\rho=4\%\sim 10\%$ 。其中, 由于加载方式和截面形式的差异, 在内配工字型钢的钢管混凝土构件中, 又细分了强轴加载荷弱轴加载。

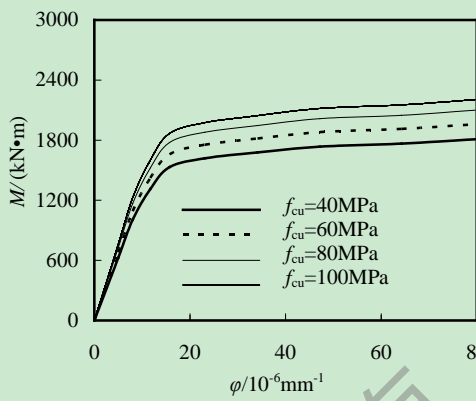
本节共计算了 104 个内配型钢的钢管混凝土模型, 为了明细各个参数对长细比的影响数值及趋势, 对数据进行了归纳整合, 具体如下图 3.6~3.11 所示。



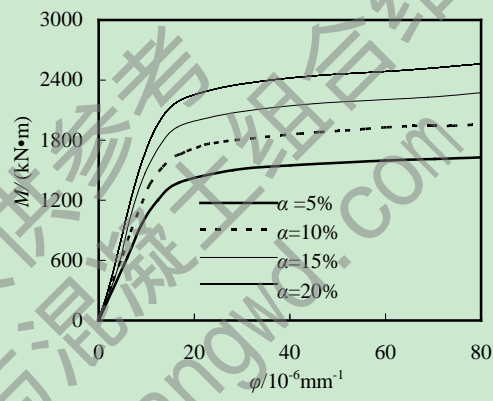
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{ay}



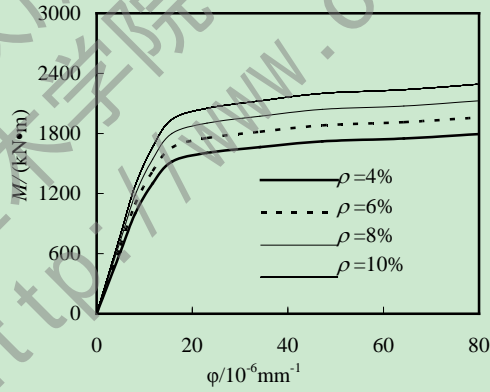
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}

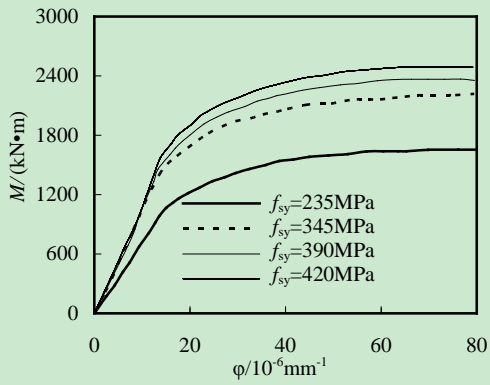


(d) 钢管截面含钢率 α

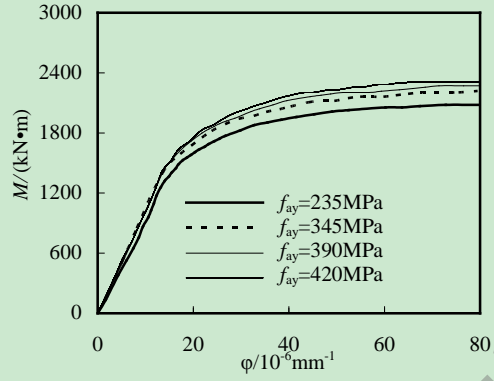


(e) 型钢截面含钢率 ρ

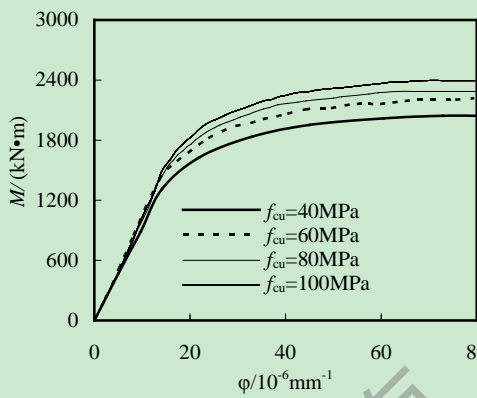
图 3.6 各参数对内配工字型钢的方钢管混凝土受弯构件(强轴) $M-\phi$ 曲线的影响



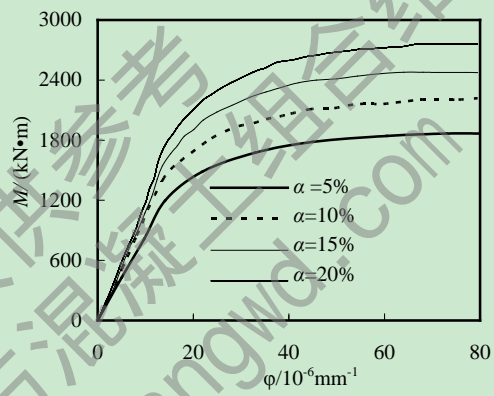
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{sy}



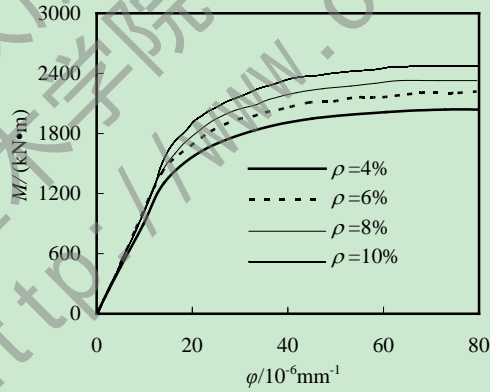
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}

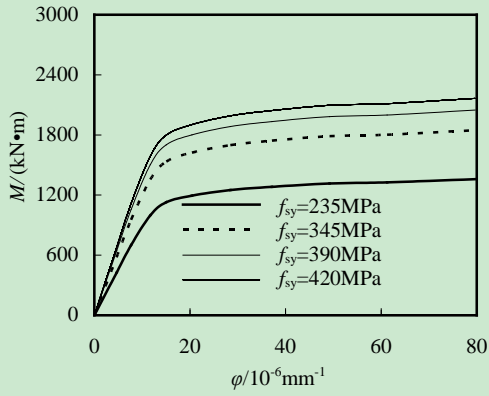


(d) 钢管截面含钢率 α

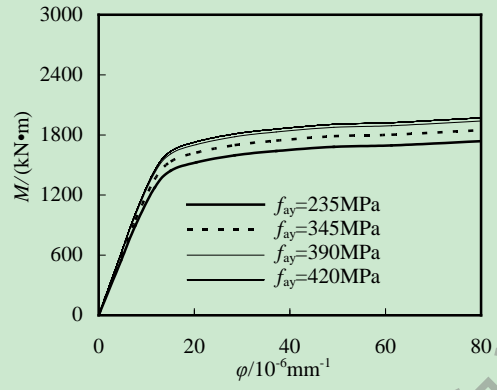


(e) 型钢截面含钢率 ρ

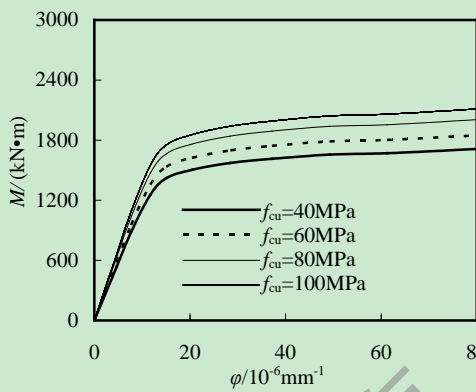
图 3.7 各参数对内配十字型钢的方钢管混凝土受弯构件 $M-\phi$ 曲线的影响



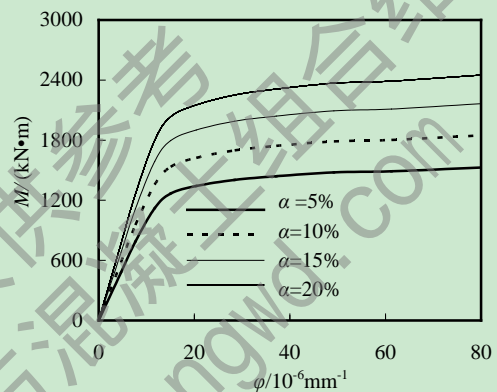
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{sy}



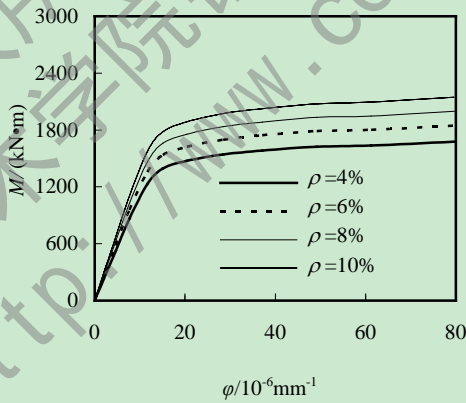
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}

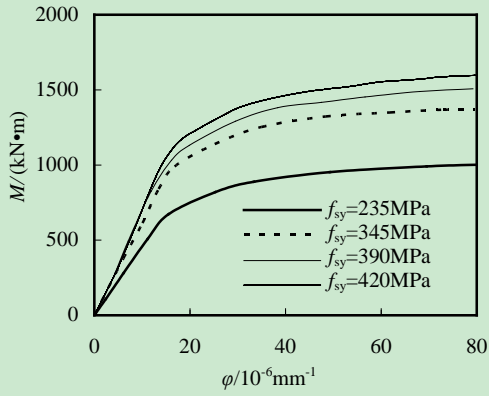


(d) 钢管截面含钢率 α

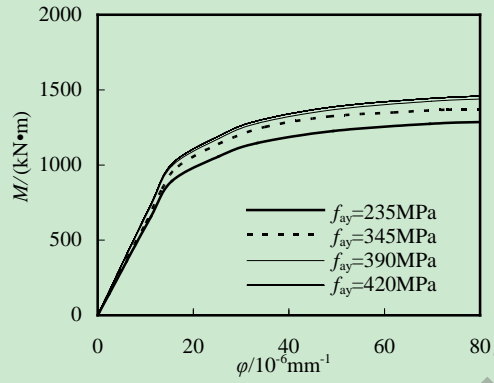


(e) 型钢截面含钢率 ρ

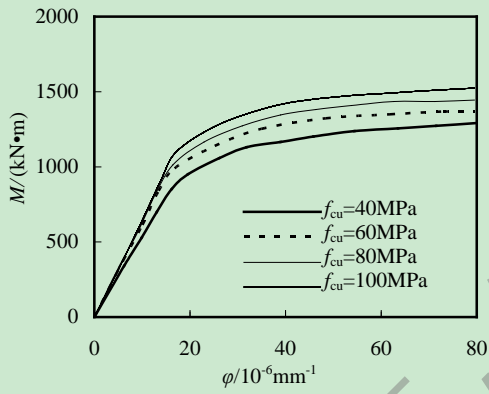
图 3.8 各参数对内配工字型钢的方钢管混凝土受弯构件(弱轴) $M-\phi$ 曲线的影响



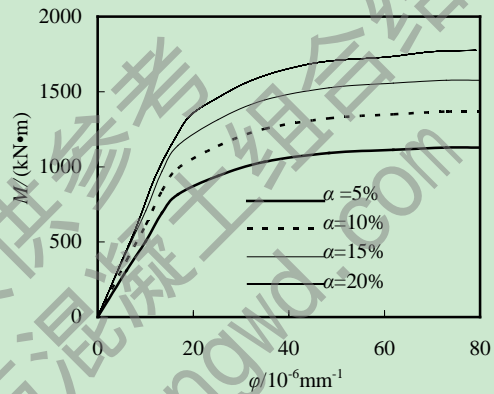
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{sy}



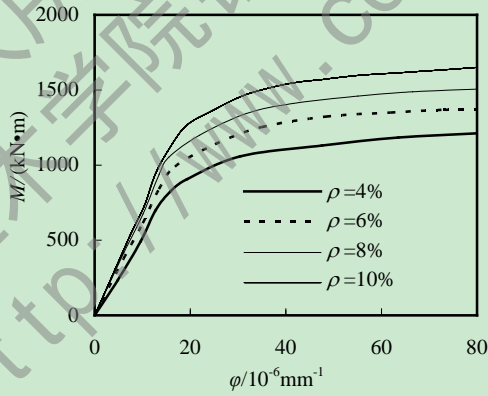
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}

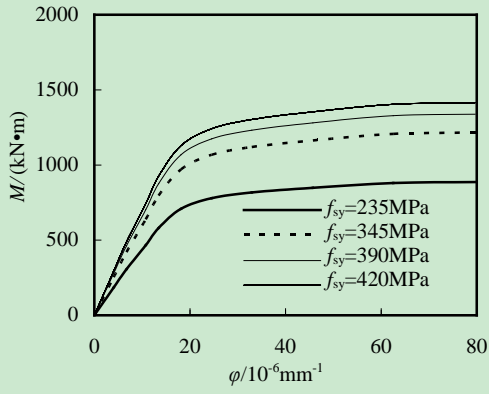


(d) 钢管截面含钢率 α

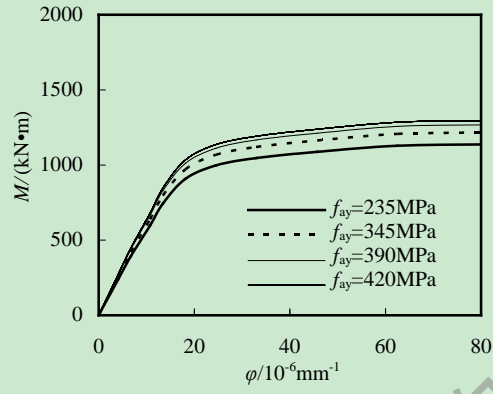


(e) 型钢截面含钢率 ρ

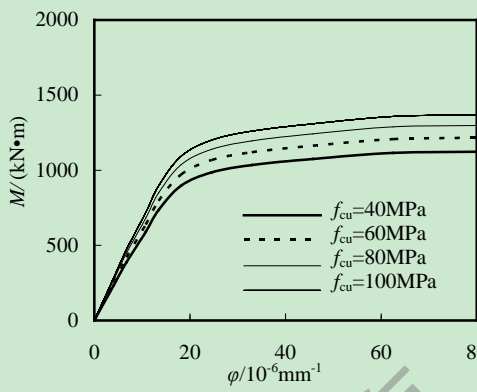
图 3.9 各参数对内配十字型钢的圆钢管混凝土受弯构件 $M-\phi$ 曲线的影响



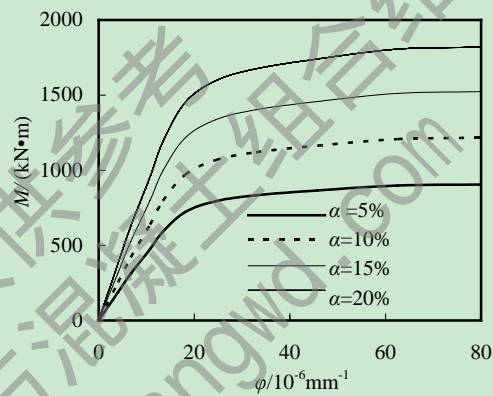
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{sy}



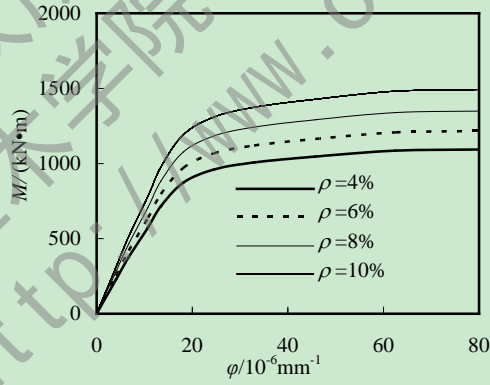
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}



(d) 钢管截面含钢率 α



(e) 型钢截面含钢率 ρ

图 3.10 各参数对内配工字型钢的圆钢管混凝土受弯构件(强轴) $M-\phi$ 曲线的影响

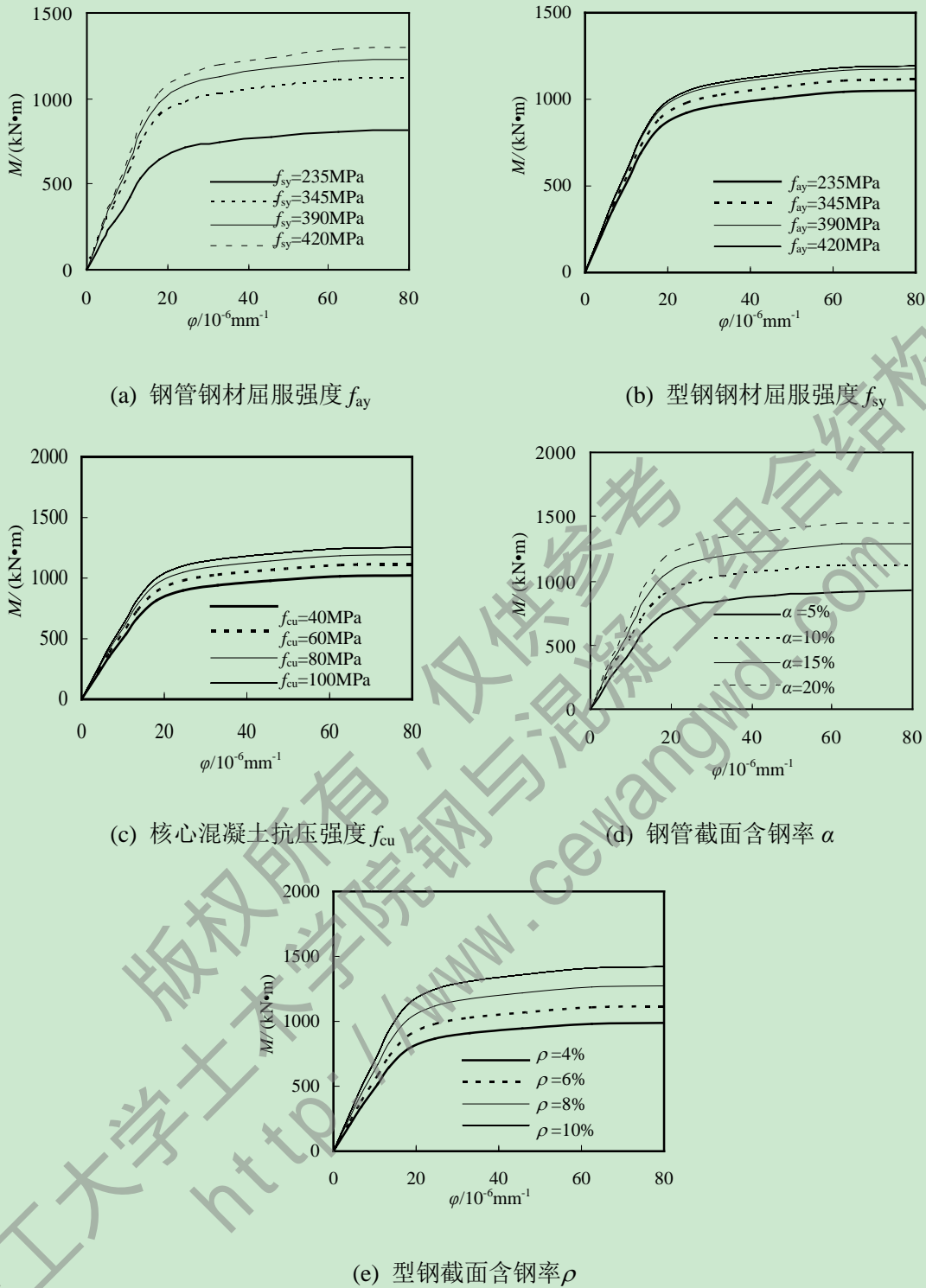


图 3.11 各参数对内配工字型钢的圆钢管混凝土受弯构件(弱轴) $M-\phi$ 曲线的影响

由上图 3.6-3.11 可知:

截面形式和加载方式对内配型钢的钢管混凝土构件受弯承载力数值的影响较大, 内配不同型钢的圆形和方形钢管混凝土受弯构件相比, 构件极限承载力按工字型钢(弱轴)构件、工字型钢(强轴)构件和十字型钢构件的顺序依次升高。

在相关的所有参数对内配型钢的圆、方形钢管混凝土构件受弯承载力的影响中, 影响规律大体相近, 但数值差别较大。内配不同型钢的圆形和方形钢管混凝土受弯构件各

自相比, 钢管钢材强度 f_{ay} 和钢管截面含钢率 α 对构件受弯承载力影响最大, 而核心混凝土抗压强度 f_{cu} 、型钢钢材屈服强度 f_{sy} 和型钢截面含钢率 ρ 的影响则相对较小。经初步分析, 由于 f_{ay} 、 α 和 f_{cu} 的提高从而提高了钢管对核心混凝土的约束作用 ξ 从而提高了构件的受弯承载力, 但是随着核心混凝土抗压强度 f_{cu} 的提高受弯承载力也相应的增加, 但增长幅度与 f_{ay} 和 α 相比较小。

3.3.3 内配型钢的钢管混凝土受弯构件实用计算方法

通过前文对该类受弯构件的大量数值计算的结果进行分析, 可以发现各个参数对内配型钢的钢管混凝土受弯构件的影响。不管内配型钢的形式以及加载方向的不同, 内配型钢的钢管混凝土受弯构件的破坏大致过程可以分为三个阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。此类组合构件典型的跨中弯矩和跨中曲率($M-\phi$)关系曲线可用图 3.12 所示描述。

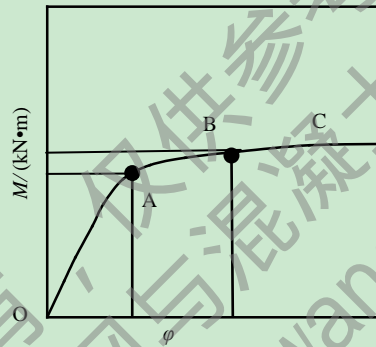


图 3.12 纯弯构件典型弯矩-曲率($M-\phi$)关系曲线

$M-\phi$ 曲线各阶段工作特征:

(1) 弹性阶段: 如图 3.12 所示 OA 段为构件受弯时的弹性阶段, 这一阶段中 $M-\phi$ 曲线近似一条直线, 此时内配型钢的钢管混凝土受弯构件的中和轴与截面形心轴应该基本重合, 且钢管和型钢均处于弹性受力阶段。

(2) 弹塑性阶段: 图 3.12 中 AB 段为构件受弯时的弹塑性阶段, 随着弯矩荷载的增加, 受拉区的钢管和型钢进入弹塑性阶段并且逐渐屈服, 构件截面产生应力重分布, 此时构件的中和轴逐渐偏移, 向受压区移动, 受拉区不断扩大。

(3) 强化阶段: 图中 BC 段为构件受弯时的弹塑性阶段, 随着弯矩荷载的不断增大, 受弯构件的钢管和型钢钢材也已经进入屈服阶段, 此时受拉区的钢管和型钢钢材开始进入到强化阶段, 此后, M 继续增加, 但增长速率不断减小, 近似呈现线性增长的特征。

通过前文所进行的大量参数分析, 计算了不同钢材强度、混凝土强度以及不同钢管和型钢含钢率情况下内配型钢的钢管混凝土构件的抗弯承载力 M_u 。参考韩林海(2007)^[5] 中的研究成果, 基于其在钢管混凝土受弯构件分析的理论基础上, 通过对大量的计算结果分析后得出, M_u 主要和钢管对混凝土的约束效应系数 ζ , 抗压强度指标 f_{scy} 以及型钢对混凝土的约束效应系数 η 有关。

通过对计算结果的回归分析, 可以得到内配型钢的钢管混凝土构件的抗弯强度承载力计算系数 γ_m 的表达式。

内配十字型钢的圆钢管混凝土:

$$\gamma_m = 1.1 + 0.48 \ln(\zeta + 0.1) + 0.31\eta \quad (3.1-1)$$

内配工字型钢的圆钢管混凝土:

$$\gamma_m = 1.1 + 0.48 \ln(\zeta + 0.1) + 0.23\eta \quad (3.1-2)$$

内配十字型钢的方钢管混凝土:

$$\gamma_m = 1.04 + 0.48 \ln(\zeta + 0.1) + 0.35\eta \quad (3.1-3)$$

内配工字型钢的方钢管混凝土:

$$\gamma_m = 1.04 + 0.48 \ln(\zeta + 0.1) + 0.22\eta \quad (3.1-4)$$

这样就可以导出内配型钢的钢管混凝土构件抗弯强度承载力计算公式:

$$M_u = \gamma_m \times f_{scy} \times W_{scm} \quad (3.2)$$

其中, W_{scm} 为内配型钢的钢管混凝土净截面模量, $W_{scm} = I / (H/2)$; I 为内配型钢的钢管混凝土截面惯性矩。

参考刘晓等(2010)^[72]对内配工字型钢的钢管混凝土受弯构件截面模量的相关研究成果即将内配型钢和外包的钢管混凝土构件的截面模量叠加得到内配型钢的钢管混凝土组合构件的截面模量。圆钢管混凝土截面惯性矩为 $I_a = \pi D^4 / 64$, 方钢管混凝土截面的惯性矩 $I_a = B^4 / 12$ 。内配工字型钢和十字型钢可以通过计算或者查型钢表可以分别得到型钢绕强轴和弱轴的惯性矩。因此将两者叠加计算就可以得到内配型钢的钢管混凝土构件的截面模量计算公式:

$$W_{scm} = (I_a + I_s) / (H/2) \quad (3.3)$$

式中: I_a 为钢管混凝土的截面惯性矩; I_s 为内配型钢的惯性矩; H 为圆形截面的直径或方形截面的边长; 当构件绕内配工字型钢强轴转动时 $W_{scm} = (I_a + I_{sx}) / (H/2)$, 当构件绕内配工字型钢弱轴转动时 $W_{scm} = (I_a + I_{sy}) / (H/2)$, I_{sx} 为工字型钢绕强轴时的惯性矩, I_{sy} 为工字型钢绕弱轴时的惯性矩。

3.4 内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能

3.4.1 有限元建模过程

内配型钢的钢管混凝土构件轴压长柱模型中的单元类型、材料模型和接触模型参照文中 2.2.4 的叙述。

对内配型钢的钢管混凝土压弯构件的边界条件定义为一端固定一端自由, 自由端为施加荷载端。荷载施加采用分步加载的方式, 即将荷载的施加分为 Step-1 竖向位移荷载和 Step-2 水平位移荷载。

3.4.2 有限元模型验证

为了验证该有限元模型的合理性, 本文分别对文献陶忠(1998)^[70]的方形钢管混凝土压弯构件以及赵大洲(2003)^[73]中内配十字型钢的钢管混凝土压弯构件进行了模拟, 试验数据见表 3-3 和 3-4, 模拟计算结果与试验结果对比曲线详见图 3.13。

表 3-3 方钢管混凝土压弯试件参数

试件编号	$B \times t \times L$ (mm)	e/r	f_{ty} (MPa)	f_c (MPa)	数据来源
scp1-1-1	120×3.84×1100	0.25	330	18.93	陶忠(1998) ^[70]
scp1-1-2	120×3.84×1100	0.5	330.1	18.93	陶忠(1998) ^[70]
scp1-1-4	120×3.84×1100	0.83	330.1	18.93	陶忠(1998) ^[70]
Scp2-1-2	120×5.86×1100	0.25	321.1	23.55	陶忠(1998) ^[70]
Scp2-1-3	120×5.86×1100	0.5	321.1	23.55	陶忠(1998) ^[70]
Scp2-1-4	120×5.86×1100	0.83	321.1	23.55	陶忠(1998) ^[70]

表 3-4 内配十字型钢的圆钢管混凝土压弯试件参数

试件编号	$D \times t$	I_x (mm ²)	f_{ty} (MPa)	f_{sy} (MPa)	f_c (MPa)	A_s (mm ²)	数据来源
HC10	218×4.0	2085759	269	288	74.3	2324	赵大洲(2003) ^[73]
HC12	218×4.0	5001411	269	314	74.3	3570	赵大洲(2003) ^[73]

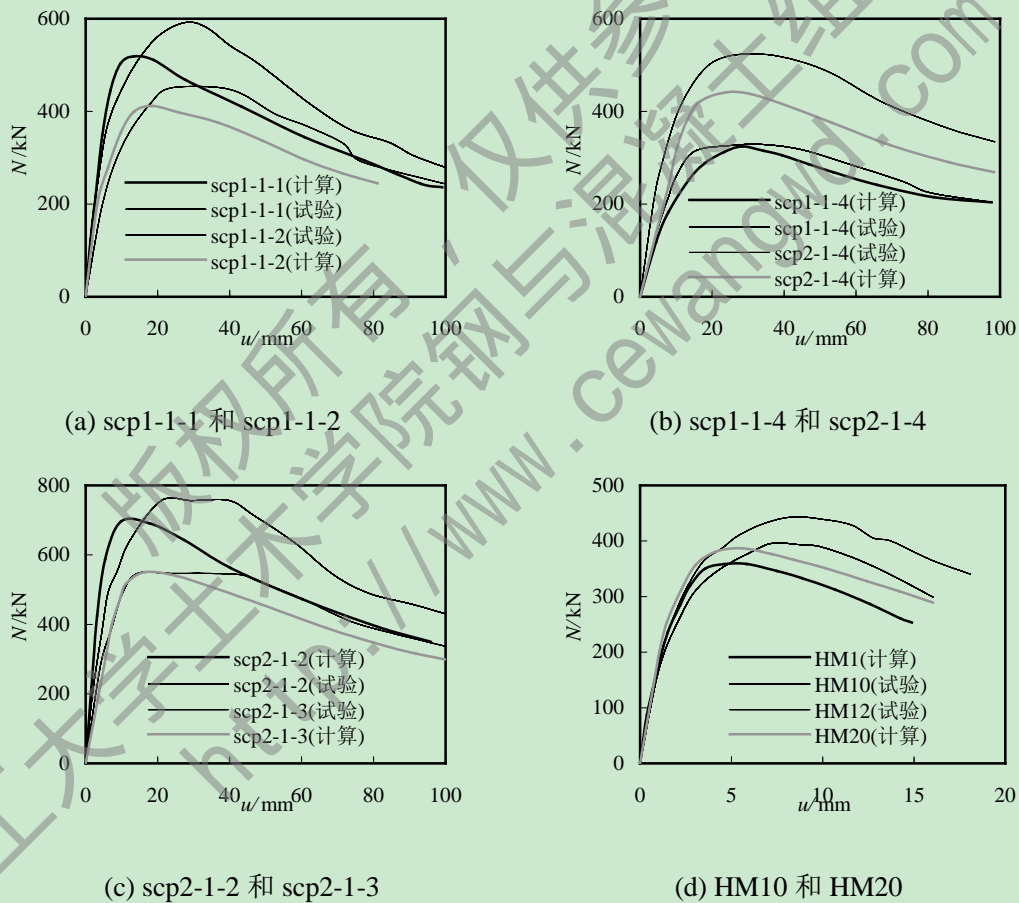


图 3.13 试验结果与模拟结果比较曲线

由图 3.13 可以看到,本文建立的有限元模型计算结果和相对应的试验曲线关系荷载-挠度曲线即 $N-u$ 曲线吻合情况较好,可以看出本文建立的钢管混凝土压弯模型可以进行内配型钢的钢管混凝土此类压弯构件的有限元分析。

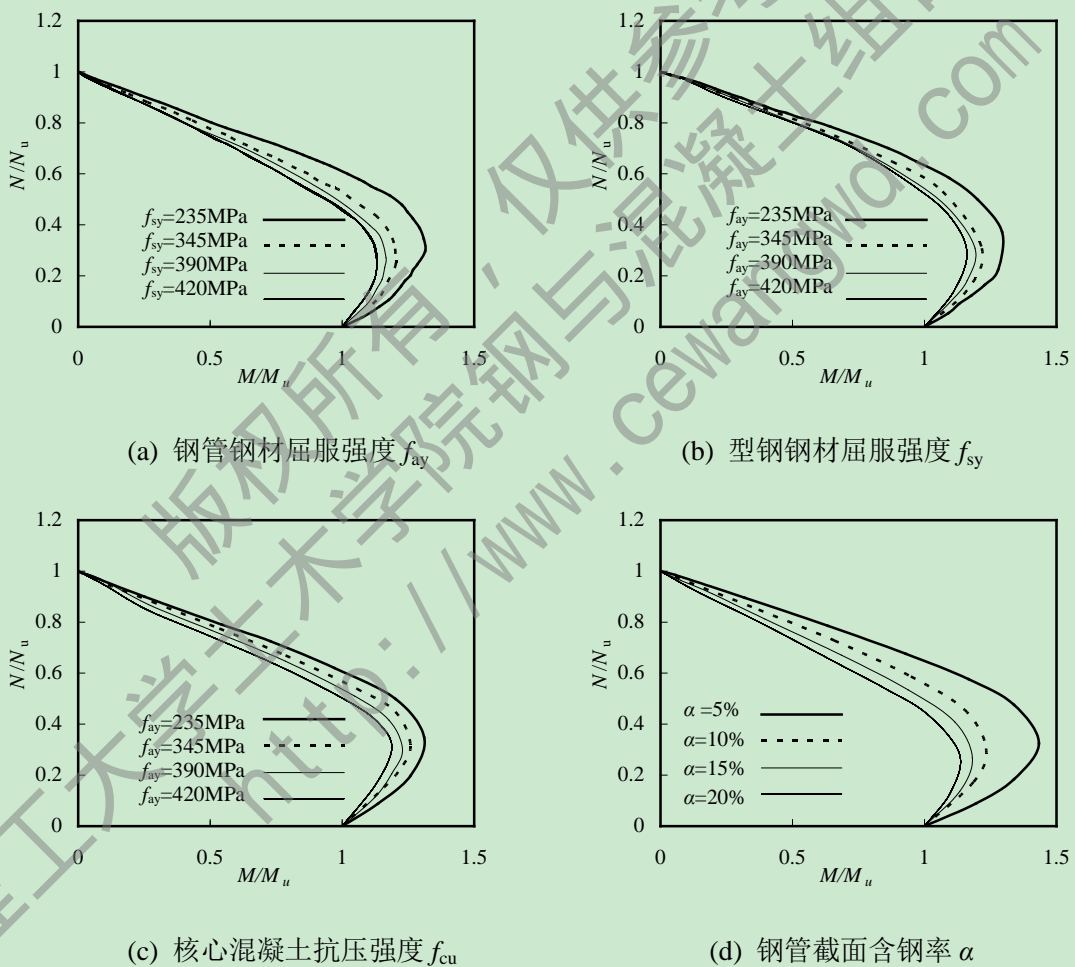
3.4.3 内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能研究

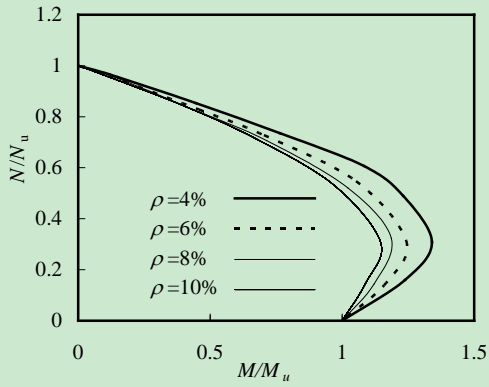
为了明确各参数对内配型钢的钢管混凝土压弯构件力学性能的影响规律,有必要采

用该理论模型对此类构件进行一定参数范围内的理论分析。现通过阅读相关文献及对构件受力机理的分析，确定基本构件形式为内配工字和十字型钢的圆、方形钢管混凝土构件，材料参数为钢管的钢材屈服强度 $f_y=345\text{MPa}$ 、核心混凝土的抗压强度 $f_{cu}=60\text{MPa}$ 、型钢的钢材屈服强度 $f_{sy}=345\text{MPa}$ 、钢管的截面含钢率 $\alpha=10\%$ 和内配型钢的截面含钢率 $\rho=6\%$ 以及长细比 $\lambda=10$ 。

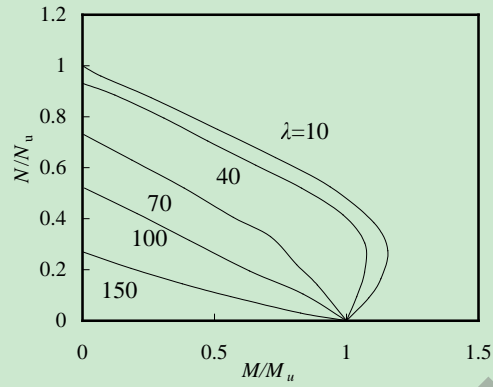
参数分析的变化范围为：钢材屈服强度 $f_y=235\text{MPa}\sim 420\text{MPa}$ ；核心混凝土的抗压强度 $f_{cu}=40\text{MPa}\sim 100\text{MPa}$ ；型钢的钢材屈服强度 $f_{sy}=235\text{MPa}\sim 420\text{MPa}$ ；钢管的截面含钢率 $\alpha=5\%\sim 20\%$ ；内配型钢的截面含钢率 $\rho=4\%\sim 10\%$ ；考虑到长细比对压弯构件的影响取长细比 $\lambda=10\sim 150$ 。其中，由于加载方式和截面形式的差异，在内配工字型钢的钢管混凝土构件中，又细分了强轴加载荷弱轴加载。

本节共计算了104个内配型钢的钢管混凝土模型，为了明细各个参数对构件的影响数值及趋势，对数据进行了归纳整合，具体如下图3.14~3.17所示。



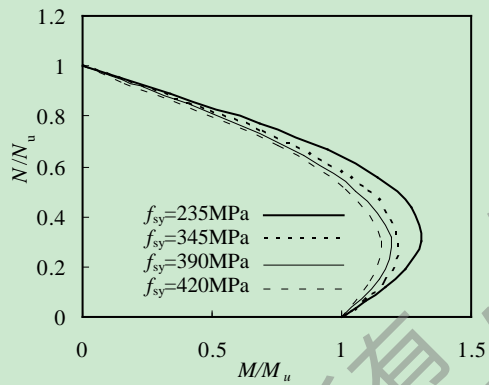


(e) 型钢截面含钢率 ρ

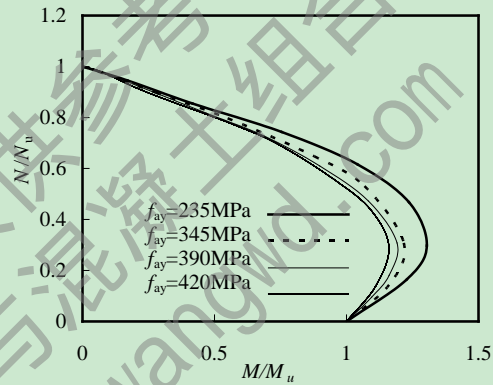


(f) 长细比 λ

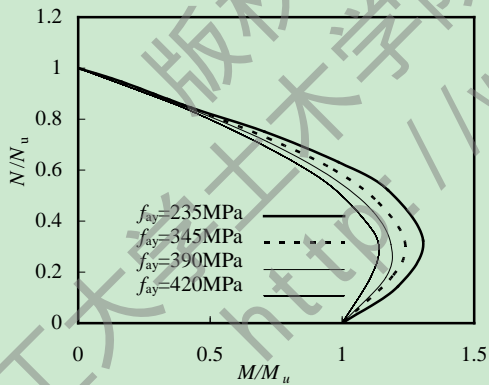
图 3.14 各参数对内配工字型钢的方钢管混凝土压弯构件 N/N_u - M/M_u 曲线的影响



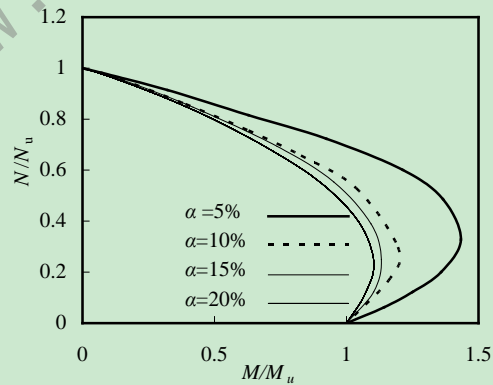
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{ay}



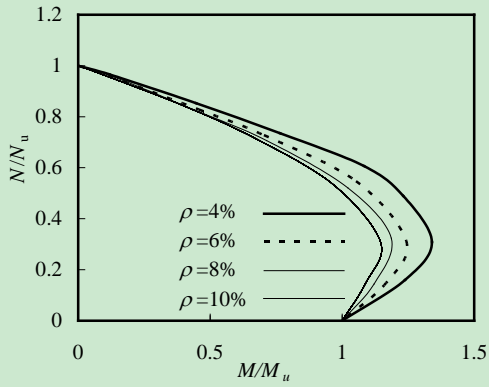
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



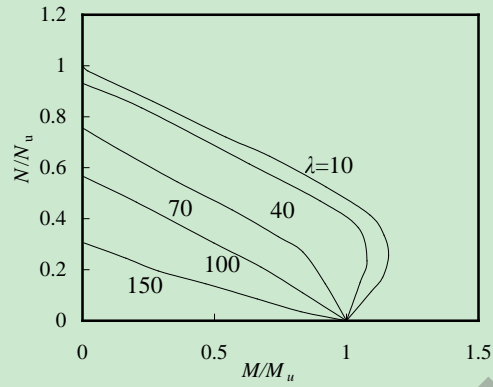
(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}



(d) 钢管截面含钢率 α

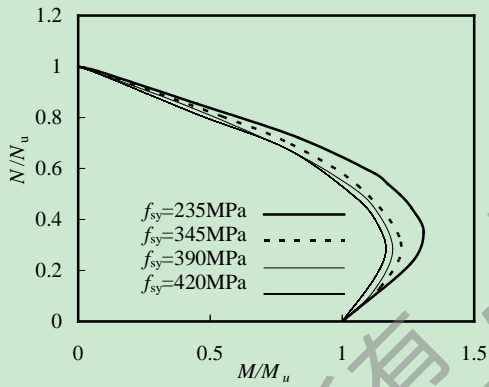


(e) 型钢截面含钢率 ρ

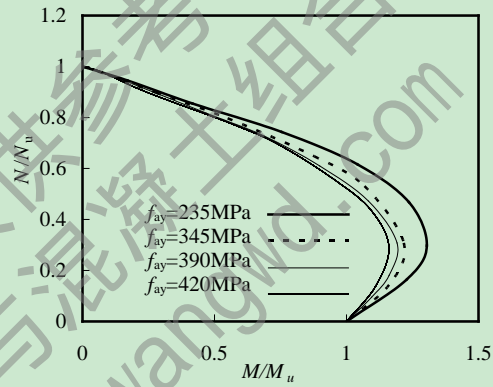


(f) 长细比 λ

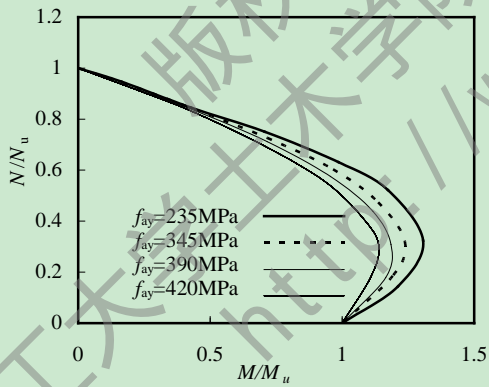
图 3.15 各参数对内配工字型钢的圆管混凝土压弯构件 $N/N_u - M/M_u$ 曲线的影响



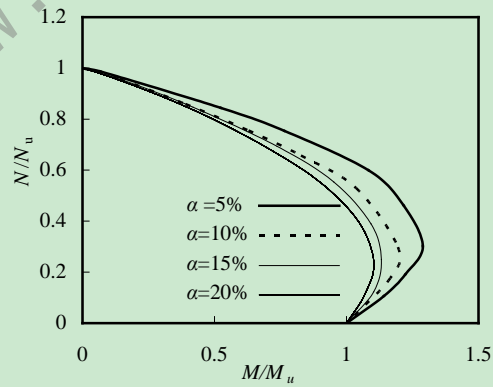
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{ay}



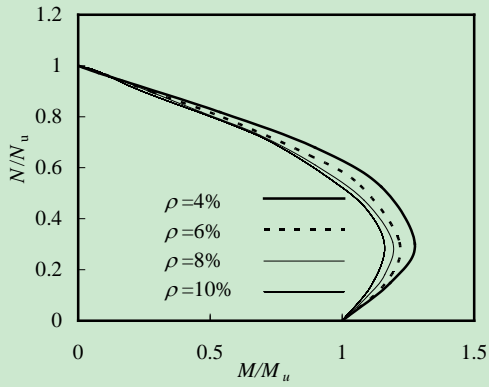
(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



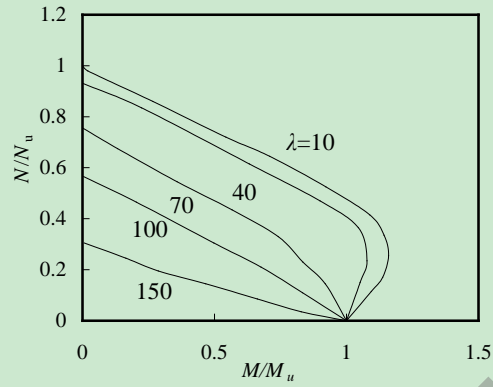
(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}



(d) 钢管截面含钢率 α

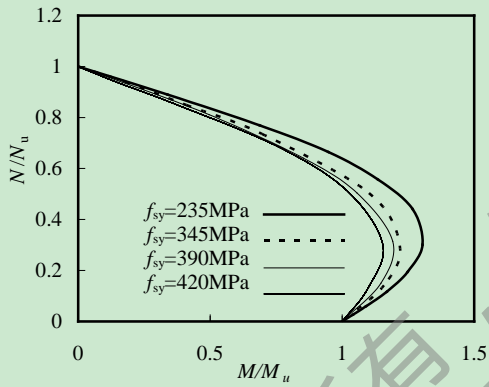


(e) 型钢截面含钢率 ρ

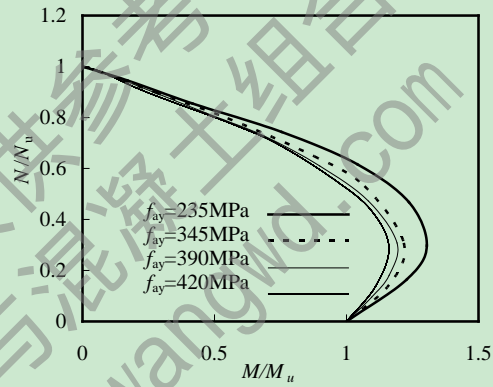


(f) 长细比 λ

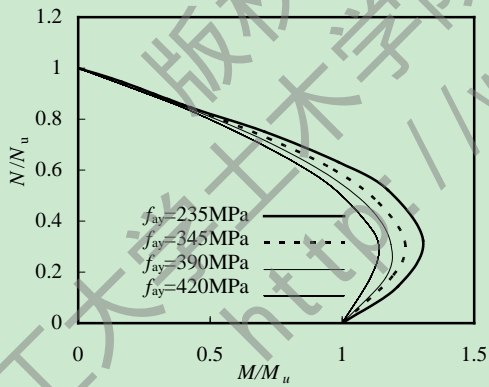
图 3.16 各参数对内配十字型钢的方钢管混凝土压弯构件 $N/N_u - M/M_u$ 曲线的影响



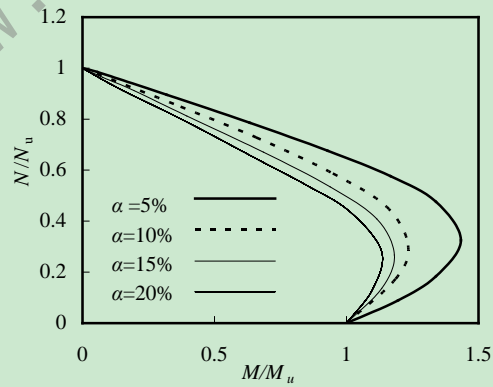
(a) 钢管钢材屈服强度 f_{ay}



(b) 型钢钢材屈服强度 f_{sy}



(c) 核心混凝土抗压强度 f_{cu}



(d) 钢管截面含钢率 α

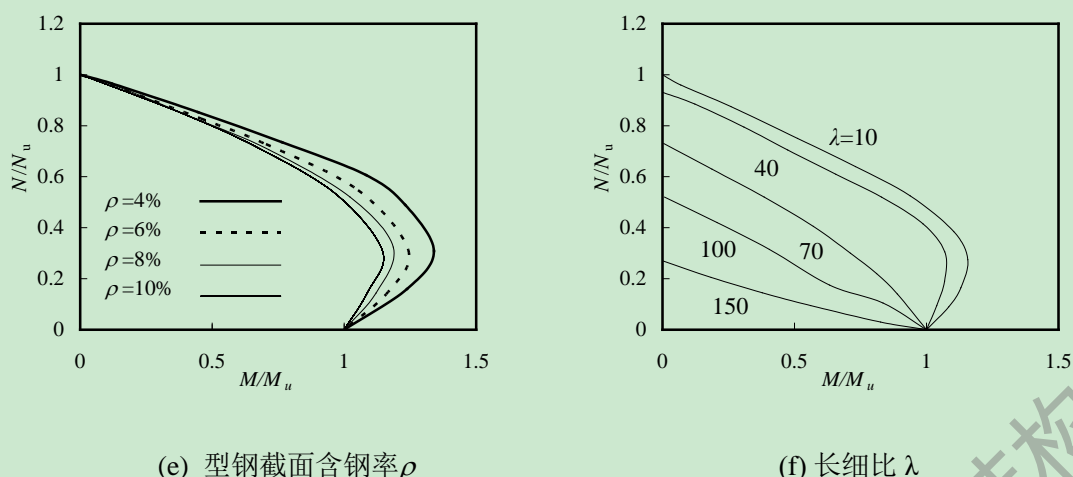


图 3.17 各参数对内配十字型钢的圆管混凝土压弯构件 $N/N_u-M/M_u$ 曲线的影响

通过对该类压弯构件的大量数值计算的结果进行分析，可以发现各个参数对内配型钢的钢管混凝土压弯构件的影响。因此可以得到内配型钢的钢管混凝土压弯构件的典型 $N/N_u-M/M_u$ 强度关系曲线，见图 3.18。

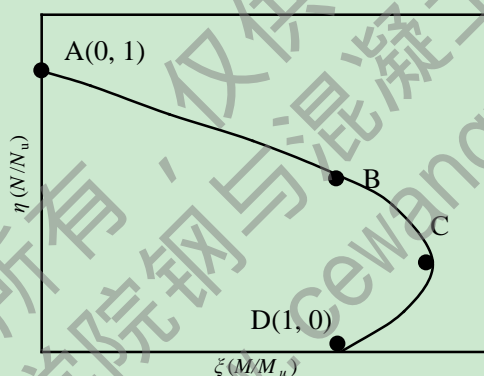


图 3.18 内配型钢的钢管混凝土压弯构件的典型 $N/N_u-M/M_u$ 强度关系曲线

由图 3.14-3.17 可以看出，内配型钢的钢管混凝土压弯构件 $N/N_u-M/M_u$ 曲线都有一个临界点 C（如图 3.18 所示），这和钢管混凝土压弯构件类似。在固定其他参数，单一变量的情况下，随着钢材强度、钢材截面含钢率的增大，C 点的横坐标 ζ 和纵坐标 η 都不断减小；而混凝土强度等级 f_{cu} 则是随着 f_{cu} 的提高，C 点的横坐标 ζ_0 和纵坐标 η_0 都有增大的趋势。这就说明随着钢管和型钢的钢材强度以及截面含钢率的提高，钢管和型钢对构件的约束力加强，而相应的混凝土对构件受力的影响变小；而随着 f_{cu} 的提高，混凝土对构件受力的影响作用变大。因此，内配型钢的钢管混凝土构件的力学性能和钢管混凝土以及钢筋混凝土构件较为相像。

从图 3.14-3.17 中可以得到长细比 λ 对于构件 $N/N_u-M/M_u$ 的影响规律。随着 λ 的增大内配型钢的钢管混凝土压弯构件的极限承载力逐渐降低，这是由于长细比的增大，二阶效应对构件的影响逐渐增大。 λ 增大，C 点的横坐标 ζ_0 和纵坐标 η_0 都不断减小，且临界点 C 在 $N/N_u-M/M_u$ 强度曲线中越来越不明显。

通过前面所做的大量的数值计算，对计算结果进行回归分析如下图 3.19-3.22，可以

推导出 ξ_0 和 η_0 的计算公式:

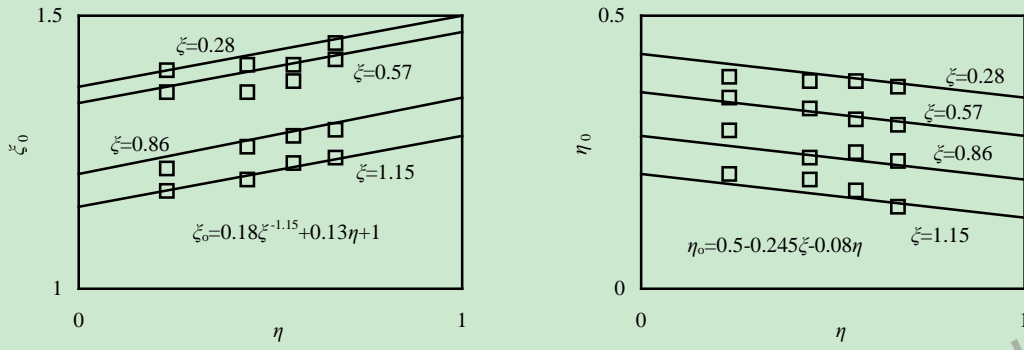


图 3.19 内配工字型钢的圆钢管混凝土 ξ_0 - η 和 η_0 - η 关系曲线

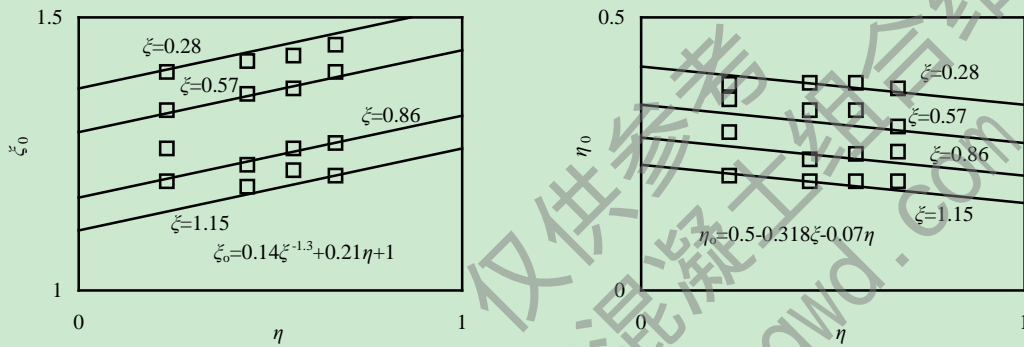


图 3.20 内配工字型钢的方钢管混凝土 ξ_0 - η 和 η_0 - η 关系曲线

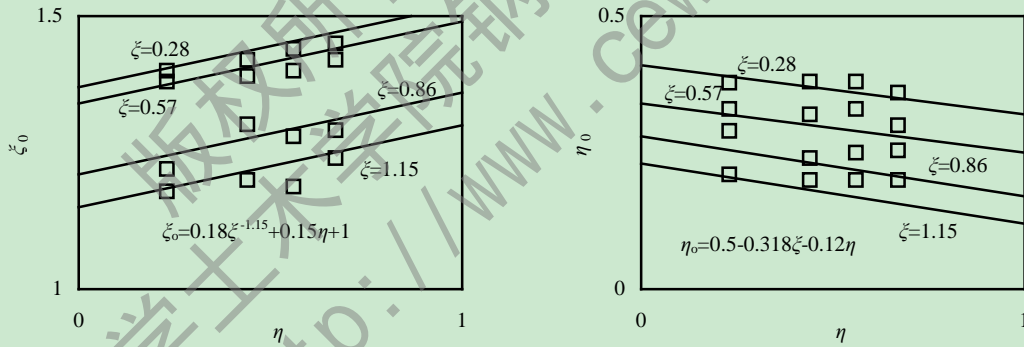


图 3.21 内配十字型钢的圆钢管混凝土 ξ_0 - η 和 η_0 - η 关系曲线

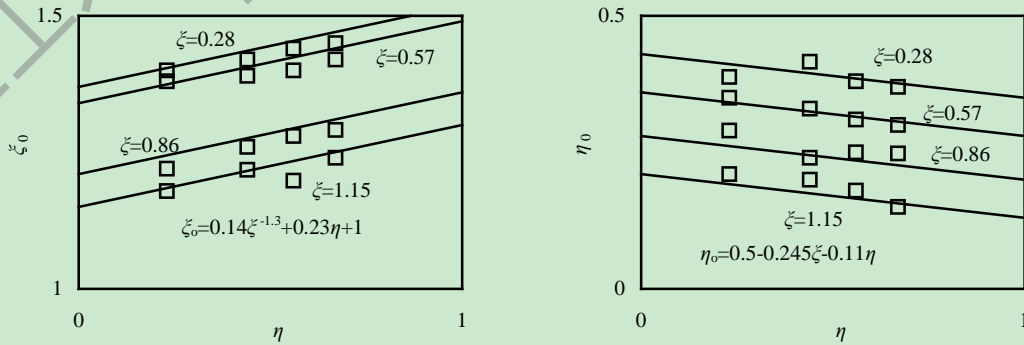


图 3.22 内配十字型钢的方钢管混凝土 ξ_0 - η 和 η_0 - η 关系曲线

(1) 内配工字型钢的圆钢管混凝土

$$\zeta_o = 0.18\zeta^{-1.15} + 0.13\eta + 1 \quad (3.4-1)$$

$$\eta_o = 0.5 - 0.245\zeta - 0.08\eta \quad (3.4-2)$$

(2) 内配工字型钢的方钢管混凝土

$$\zeta_o = 0.14\zeta^{-1.3} + 0.23\eta + 1 \quad (3.4-3)$$

$$\eta_o = 0.5 - 0.318\zeta - 0.07\eta \quad (3.4-4)$$

(3) 内配十字型钢的圆钢管混凝土

$$\zeta_o = 0.18\zeta^{-1.15} + 0.15\eta + 1 \quad (3.4-5)$$

$$\eta_o = 0.5 - 0.245\zeta - 0.11\eta \quad (3.4-6)$$

(4) 内配十字型钢的方钢管混凝土

$$\zeta_o = 0.14\zeta^{-1.3} + 0.21\eta + 1 \quad (3.4-7)$$

$$\eta_o = 0.5 - 0.318\zeta - 0.12\eta \quad (3.4-8)$$

由图3.18所示的内配型钢的钢管混凝土压弯构件的典型 N/N_u - M/M_u 曲线，可以近似分为直线段 AB 和曲线 BCD，其中曲线 BCD 可以用抛物线的函数形式表示。

1) A-B 段：

$$N/N_u + a \times (M/M_u) = 1 \quad (3.5)$$

2) B-C-D 段：

$$-b(N/N_u)^2 - c(N/N_u) + (M/M_u) = 1 \quad (3.6)$$

上式中：

$$a = 1 - 2\eta_o$$

$$b = (1 - \zeta_o) / \eta_o^2$$

$$c = 2(\zeta_o - 1) / \eta_o$$

N_u 为内配型钢的钢管混凝土构件轴压强度承载力； M_u 为内配型钢的钢管混凝土构件抗弯承载力。

参考韩林海(2007)^[5]中长细比对钢管混凝土压弯构件的影响方程可得到内配型钢的钢管混凝土压弯构件 N/N_u - M/M_u 影响方程：

$$N/\varphi N_u + aM/dM_u = 1 \quad (N/N_u \geq 2\varphi^3\eta_o) \quad (3.7-1)$$

$$-b(N/N_u)^2 - c(N/N_u) + (M/dM_u) = 1 \quad (N/N_u < 2\varphi^3\eta_o) \quad (3.7-2)$$

$$a = 1 - 2\varphi^2\eta_o \quad b = (1 - \zeta_o) / (\varphi^3\eta_o^2) \quad c = 2(\zeta_o - 1) / \eta_o$$

$$d = 1 - 0.4(N/N_u)$$

$1/d$ 是考虑由于二阶效应而对弯矩的放大系数。其中， $N_E = E_{sc}A_{sc}/\lambda^2$ 为欧拉临界力； φ 为轴心受压稳定系数。

3.5 本章小结

通过本章的研究，可以得到如下结论：

(1) 通过有限元分析软件 ABAQUS 对内配型钢的钢管混凝土此类新型构件进行了数值分析，得到的模拟结果与实验结果对比吻合情况较好。

(2) 采用有限元法分析了不同参数对于此类新型受弯和压弯构件的影响，并且基于对构件的参数分析和相关的钢管混凝土理论得到了简化计算公式。

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>

结论与展望

结论

本文对内配型钢的钢管混凝土构件在简单受力状态下的力学性能进行了分析，对构件进行了大量的参数分析，并提出了相应的实用简化计算公式。基于本文的研究，现得到以下结论：

(1) 建立了内配型钢的钢管混凝土构件进行了轴心受压短柱、轴心受压长柱、受弯和压弯受力状况的有限元模型。通过有限元计算结果与相关试验结果的对比，验证了模型与试验结果吻合较好，并且利用该模型对四种不同截面形式的此类构件进行了力学性能研究，分析了在简单受力状态下此类新型构件的受力机理以及截面形式对构件相应承载力的影响。

(2) 利用有限元法对四种不同截面形式的内配型钢的钢管混凝土构件进行了大量的参数分析，得到了各个参数对构件在相应荷载作用下的影响规律，确定了此类新型构件中内配型钢对在不同荷载作用下的构件的作用影响。

(3) 基于本文所做的大量的参数分析和前人的研究成果的基础上，结合钢管混凝土的相关知识，对内配型钢的钢管混凝土此类新型构件在不同荷载作用下的极限承载力进行了一定的研究，并提出了相应的简化计算方法。

展望

内配型钢的钢管混凝土构件力学性能非常复杂，本文仅研究了其简单力学性能及相关设计方法，为了更深入的认识此类新型构件，更好的指导工程使用，笔者认为应该在一下几个方面开展工作：

(1) 本文对压弯构件中的加载路径没有做深入的分析，尚有待于更全面的分析内配型钢的钢管混凝土压弯构件不同加载路径对构件极限承载力的影响。

(2) 结构在实际工程中通常会受到多种作用力同时作用，因此研究此类新型钢管混凝土构件在复合受力时的力学性能和设计方法对工程实践具有较大的指导作用，更好的应用于工程。

(3) 结构在工作过程中可能会承受地震作用，研究其在地震作用的破坏形态、耗能性能及阻尼特性等动力性能是其推广应用的重要前提。

(4) 由于此类构件中型钢被混凝土包裹，这种新型组合柱的防火性能较钢管混凝土相比有明显提高。因此深入研究内配型钢的钢管混凝土组合柱在火灾过程中及火灾后的力学性能，建立组合柱耐火极限的计算模型，确定防火设计方法具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 2-6: 128-152.
- [2] 聂建国, 樊健生. 广义组合结构及其发展展望[M]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 1-8.
- [3] 张正国. 组合结构[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1989, 1-14.
- [4] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 1-127.
- [5] 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.
- [6] 田宏伟, 赵均海, 魏锦. 圆钢管混凝土轴压长柱的极限承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 74-79.
- [7] 金伟良, 张翔, 陈驹. 薄壁圆钢管混凝土轴压试验研究[J]. 混凝土, 2010, 33(1): 7-9.
- [8] 刘鹏, 王栋, 陈伟, 孙晓燕. 圆钢管混凝土轴压短柱的研究[J]. 工业建筑, 2010, 32(6): 34-36.
- [9] Jerome F. Hajjar, Brett C. Gourley. Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength[J]. Journal of Structure Engineering November, 1996: 1327-1336.
- [10] Saw H S, Richard Liew J Y. Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(4): 121-147.
- [11] O'Shea Martin D, Russell Q. Bridge Design of Circular Thin-Walled Concrete Filled Steel Tubes[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(11): 1295-1303.
- [12] 崔清洋, 张颖. 钢管混凝土构件的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 29(1): 19-21.
- [13] 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.
- [14] 方小丹, 林轶, 钱稼茹. 压弯作用下钢管混凝土短柱受剪承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 36-44.
- [15] Tomii M, Sakino K, Xiao Y, Watanabe K. Earthquake Resisting Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Short Columns Confined by Steel Tube. Proceeding of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin: Harbin Architectural and Civil Engineering Institute, 1985: 119-125.
- [16] 刘界鹏, 张小冬, 张素梅. 圆钢管约束钢骨高强混凝土短柱轴压力学性能[J]. 建筑结构学报, 2009, Sup2: 242-248.
- [17] Zhang Sumei, Liu Jiepeng. Seismic Behavior and Strength of Square Tube Confined Reinforced-Concrete (STRC) Columns[J]. Journal of Constructional Steel research, 2007, 63(9): 1194-1207.
- [18] Zhang Sumei, Guo Lanhui, Ye Zaili, Wang Yuyin. Behavior of Steel Tube and Confined High Strength Concrete for Concrete-Filled RHS Tubes[J]. Advances in Structural Engineering, 2005, 8(5): 101-116.
- [19] 周绪红, 刘界鹏, 张素梅. 钢管约束型钢高强混凝土压弯构件的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 2-11.
- [20] Zong Zhouhong, Bijaya Jaishi, Ge Jiping, Ren Weixin. Dynamic Analysis of a Half-through

- Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(1): 3-15.
- [21] 陶忠, 于清. 新型组合结构柱(试验、理论与方法) [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [22] Zhao Xiaoling, Grzebieta R. Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS inner and SHS outer) Tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2002, 40(2): 199-213.
- [23] 蔡少怀, 焦占拴. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 1997, 18(6): 20-25.
- [24] 黄宏, 陶忠, 韩林海. 圆中空夹层钢管混凝土纯弯力学性能研究[J]. *工业建筑*, 2006, 36(11): 15-19.
- [25] 陈宗平, 张喜德, 苏宜声, 赵鸿铁. 一种新型混凝土异形柱-型钢混凝土异形柱的概念体系初探 [J]. *工业建筑*, 2006, 32(2): 25-27.
- [26] Eurocode4. Design of Composite Steel and Concrete Structures. London: European Committee for Standardization. 1994, 26-50.
- [27] 朱美春, 王清湘, 冯秀峰. 轴心受压钢骨-方钢管自密实高强混凝土短柱的力学性能研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(6): 35-41.
- [28] 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. *重庆科技学院学报*, 2009, 11(4): 76-78.
- [29] 朱美春, 王清湘, 刘士润, 朱耀国. 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.
- [30] 徐亚丰, 赵敬义, 刘娜. 低周反复荷载下钢骨-钢管混凝土柱的延性分析[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2009, 25(4): 689-693.
- [31] Kato Ben. Column curves of steel-concrete composite members[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1996, 39, 2: 121-135.
- [32] Wang Qingxiang, Zhao Dazhou, Guan Ping. Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(7): 907-915.
- [33] 邓远征, 王清湘. 钢骨-钢管混凝土轴压短柱承载力研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(Sup1): 290-293.
- [34] 何益斌, 刘文竞, 黄频, 易小红. 基于双剪统一强度理论的轴心受压钢骨-钢管混凝土短柱承载力研究[J]. *工业建筑*. 2007, 37(Sup1): 663-664.
- [35] 肖阿林, 何益斌, 黄频, 郭健. 钢骨-钢管高强混凝土长柱稳定承载力分析[J]. *华中科技大学学报*, 2008, 25(1): 61-64.
- [36] 何益斌, 肖阿林, 郭健, 周海兵. 钢骨-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): 29-33.
- [37] 杨包生, 李斌, 吴波, 闫炳成. 钢骨-钢管混凝土组合柱轴压承载力试验和有限元分析[J]. *内蒙古科技大学学报*, 2008, 27(3): 268-270.
- [38] Zhu Meichun, Yu Zhiwu, Shi Caijun, Kamal Henri Khayat and Xie Youjun. Behavior and Strength of Square Steel Tube Columns Filled with Steel-reinforced self-compacting high-strength Concrete[J]. *Proceedings of 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self Consolidating Concrete*. Paris: RILEM Publication SARL, 2005: 589-598.

- [39] 王连广, 赵同峰, 李宏男. 方钢管-钢骨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): 64-71.
- [40] 何益斌, 肖阿林, 郭健, 周海兵, 黄频. 钢骨钢管自密实高强混凝土偏压柱力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 102-109.
- [41] 闫长旺, 贾金青, 余芳, 姜睿. 钢骨高强混凝土短柱抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(Sup1): 234-238.
- [42] 王清湘, 赵大洲, 关萍. 轴心受压钢骨-钢管混凝土组合短柱力学性能研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 36-40.
- [43] 赵同峰, 欧阳伟, 李冬松. 方钢管钢骨混凝土双偏压柱试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(8): 87-91.
- [44] 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.
- [45] 刘晓, 王连广, 王建森. 钢管-钢骨高强混凝土偏压短柱正截面承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24(1): 77-80.
- [46] 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, 2009, 25(4): 712-716.
- [47] 王连广, 刘晓, 常江. 钢管钢骨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.
- [48] 秦国鹏, 王连广, 吴迪. GFRP管钢骨混凝土偏压构件非线性分析[J]. 混凝土, 2009, 8(8): 8-11.
- [49] 刘晓, 王兵, 李光. 钢管钢骨高强混凝土偏压承载力非线性分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 25(2): 286-289.
- [50] 关萍, 王清湘, 赵大洲. 钢骨-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.
- [51] 赵同峰, 王连广. 方钢管-钢骨高强混凝土压弯承载力计算[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 122-125.
- [52] 陈颖, 朱美春. 钢骨-方钢管混凝土柱正截面承载力计算[J]. 混凝土, 2010, 25(7): 11-14.
- [53] 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, 24(3): 109-111.
- [54] 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.
- [55] 关萍, 王清湘, 赵德深. 钢骨-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): 329-332.
- [56] 刘晓, 王连广, 王兵. 钢管钢骨高强混凝土抗弯构件试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10): 1651-1654.
- [57] 赵同峰, 王连广, 吴少敏. 矩形钢管-钢骨高强混凝土梁抗弯承载力计算[J]. 东北大学学报, 2007, 28(9): 1338-1341.
- [58] 鞠开林, 蔡振兴, 梁明华. 钢骨-T形截面钢管混凝土短柱力学性能试验[J]. 长江大学学报, 2011, 8(5): 114-116.

- [59] Hillerborg A, Modeer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6), 773-782.
- [60] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 朱美春. 钢管-方钢管自密实高强混凝土柱力学性能研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2005.
- [64] 冶金部行业标准. 《钢管混凝土设计规范》(YB9082-97). 北京: 冶金工业出版社, 2007, 1-150.
- [65] 建设部行业标准. 《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ138-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2009, 1-80.
- [66] 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.
- [67] 肖阿林. 钢管-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.
- [68] 韦灼彬, 陶忠, 韩林海. 方钢管混凝土纯弯构件力学性能及承载力的研究[J]. *工业建筑*, 1998, 10(10): 6-9.
- [69] 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, 10(1): 1-5.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 刘晓, 王连广, 王兵. 钢管钢骨高强混凝土抗弯构件试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(10): 1651-1655.
- [73] 赵大洲. 钢管-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.

致 谢

时光匆匆如流水，转眼便到了毕业时节，硕士论文的完成也随之进入了尾声。从开始进入课题到论文的顺利完成，一直都离不开老师、同学、朋友给我的帮助，在这里请接受我诚挚的谢意！

三年来，王文达老师对我的学习和研究都非常严格，并给予了悉心的指导，使我受益匪浅。王老师宅心仁厚，不慕荣利，对学生认真负责，在他的身上，我们可以感受到一个学者的严谨和务实，这些都让我们获益良多，并且将终生受用无穷。这些都将会成为我不断前行的动力和标杆。

感谢课题组的王景玄师兄、11级和12级的师弟师妹们对本文撰写的帮助。

感谢我的父母，给予了我生命并竭尽全力给予了我接受教育的机会，养育之恩没齿难忘。感恩之情难以用语言量度，谨以最朴实的话语致以最崇高的敬意。

感谢本文所引用参考文献作者所做的工作！感谢国家自然科学基金(51268035)和甘肃省建设科技攻关项目(JK2012-42)对本论文的资助！

王亚伟
2013年5月

附录A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

在校期间发表的学术论文：

- [1] 史艳莉, 王亚伟, 王文达. 内配型钢的圆钢管混凝土轴压短柱力学性能分析. 工程抗震与加固改造 (录用)。

在学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剪扭复合受力工作机理研究，参加人，2013.1-2016.12。
- [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，参加人，2012.7-2014.12。