

SPECIAL-SHAPED CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS
—TEST, THEORY AND METHOD

异形钢管混凝土柱 ——试验、理论和方法

◎任庆新 刘艳华 著



中国建筑工业出版社

异形钢管混凝土柱

——试验、理论和方法

任庆新 刘艳华 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

异形钢管混凝土柱——试验、理论和方法/任庆新, 刘艳华著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-112-17471-3

I. ①异… II. ①任…②刘… III. ①钢管混凝土柱-异形柱-研究 IV. ①TU375.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 256370 号

本书论述了作者近年来在异形钢管混凝土柱方面取得的阶段性试验研究、理论分析和实用计算方法结果, 主要包括: 钢管混凝土斜柱、锥形钢管混凝土柱、椭圆形钢管混凝土柱及异形钢管混凝土柱。每种异形钢管混凝土柱均进行了相应的试验研究, 分析了其力学表现; 并在此基础上建立了有限元分析模型, 模拟结果得到了试验结果的验证; 同时基于验证过的有限元分析模型, 进行了大量参数分析; 最后基于试验研究和理论分析, 建议了各种异形钢管混凝土柱承载力实用计算方法。

本书内容较为系统和完善, 可供高等院校土建类专业教师、研究生、本科生和有关工程技术人员参考。

* * *

责任编辑: 万 李
责任设计: 张 虹
责任校对: 李欣慰 党 蕾

异形钢管混凝土柱——试验、理论和方法

任庆新 刘艳华 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 字数: 242 千字

2014 年 11 月第一版 2014 年 11 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-17471-3

(26277)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

钢管混凝土具有承载力高、塑性和韧性好、施工方便、耐火性能较好、经济效果好等特点,因而被越来越广泛地应用于单层和多层工业厂房柱、设备构架柱、各种支架、栈桥柱、地铁站台柱、送变电杆塔、桁架压杆、桩、空间结构、高层和超高层建筑以及桥梁结构中,取得了良好的经济效益和社会效益。

近年来,随着钢管混凝土结构应用范围的不断扩大,异形钢管混凝土柱也已出现在一些典型工程中,这些结构由于设计新颖、奇特、美观,且设计师及投资方不希望改变建筑效果,给结构设计及施工带来很大难题。本书的研究工作可提供钢管混凝土斜柱、锥形钢管混凝土柱、椭圆形钢管混凝土柱和异形钢管混凝土柱分析理论和设计方法,补充和完善钢管混凝土结构形式,满足有关工程设计及施工需要,为有关地方标准及国家规范的制订提供参考。

本书所涉及内容的研究工作得到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金、住房和城乡建设部科技计划项目、辽宁省博士启动基金、辽宁省教育厅科学技术研究项目等科研课题的资助。

本书由沈阳建筑大学任庆新和沈阳农业大学刘艳华共同撰写,合作完成。

感谢沈阳建筑大学的贾连光教授、王庆利教授、任德斌教授,完成本书相关研究工作的研究生均是与他们协作指导的。

作者的研究生郭俊峰、默亚卿、吕艳波、李颀、方达、孙明海、高磊、吕天文、李林、刘绍鹏、刘明哲、于万卿、刘雪峰、董建胜、李爽、关永彬、敦文栋、陈晓友、王亮等参与了本书的试验并进行了部分文字处理和插图绘制等工作,在此表示感谢。

最后作者特别感谢恩师清华大学的韩林海教授,在从事钢管混凝土结构的研究过程中,一直得到恩师的指导和资助,否则完成本书所涉及的研究工作是不可能的。

由于作者水平和阅历有限,书中一定会存在不足和疏漏之处,恳请读者给予批评指正。随着课题研究工作的深入,作者期待对本书论述内容作进一步的完善和充实。

主要符号表

A_c	混凝土横截面面积
A_s	钢管横截面面积
A_{sc}	钢管混凝土横截面面积, $A_{sc}=A_c+A_s$
E_c	混凝土弹性模量
E_s	钢材弹性模量
f_{ck}	混凝土抗压强度标准值
f_{cu}	混凝土立方体抗压强度
f_c'	混凝土圆柱体抗压强度
f_y	钢材屈服强度
f_u	钢材极限强度
H	高度
N	轴力
N_{ue}	实测极限承载力
N_{uc}	预测极限承载力
SI	强度系数
t	钢管壁厚
γ_s	泊松比
Δ	轴向变形
Δ_{ue}	极限荷载对应的轴向变形
$\Delta_{85\%}$	荷载下降到极限荷载的 85% 时对应的轴向变形
ϵ	应变
ϵ_l	纵向应变
ϵ_t	横向应变
ϵ_y	钢的屈服应变

目 录

第 1 章 绪言	1
1.1 钢管混凝土的特点	1
1.2 钢管混凝土的应用	2
1.3 本书主要研究内容	2
本章参考文献	3
第 2 章 钢管混凝土斜柱	4
2.1 引言	4
2.2 试验研究	4
2.2.1 试验概况	4
2.2.2 试验装置	6
2.2.3 试验方法	7
2.2.4 试验现象、结果与分析	7
2.3 理论分析	15
2.3.1 概述	15
2.3.2 材料的本构关系模型	15
2.3.3 单元类型选取	18
2.3.4 单元网格划分	18
2.3.5 模型边界条件	21
2.3.6 非线性方程的求解	22
2.3.7 算例验证	22
2.3.8 应力云图分析	24
2.3.9 有限元拓展分析	32
2.4 实用计算方法	40
2.4.1 概述	40
2.4.2 国内外相关规程承载力设计公式简介	40
2.4.3 承载力计算与比较	44
2.5 本章小结	45
本章参考文献	46
第 3 章 锥形钢管混凝土柱	47
3.1 引言	47
3.2 方锥形钢管混凝土柱	47
3.2.1 试验研究	47
3.2.2 理论分析	55

3.2.3 实用计算方法	63
3.3 圆锥形钢管混凝土柱	66
3.3.1 试验研究	66
3.3.2 理论分析	73
3.3.3 实用计算方法	82
3.4 本章小结	84
本章参考文献	85
第4章 椭圆形钢管混凝土柱	86
4.1 引言	86
4.2 轴心受压	86
4.2.1 试验研究	86
4.2.2 理论分析	93
4.2.3 实用计算方法	104
4.3 偏心受压	105
4.3.1 试验研究	105
4.3.2 理论研究	112
4.3.3 实用计算方法	122
4.4 本章小结	124
本章参考文献	124
第5章 异形钢管混凝土柱	126
5.1 引言	126
5.2 试验研究	126
5.2.1 试验概况	126
5.2.2 试验装置	129
5.2.3 试验方法	129
5.2.4 试验现象、结果与分析	130
5.3 理论分析	139
5.3.1 有限元模型	139
5.3.2 受力全过程分析	142
5.3.3 有限元拓展分析	147
5.4 实用计算方法	150
5.5 本章小结	152
本章参考文献	152

第 1 章 绪 言

1.1 钢管混凝土的特点

钢管混凝土是一种在钢管内灌注混凝土而形成的组合结构，充分利用了钢管和混凝土两种材料在接触受力过程中的相互作用，具有如下特点：

(1) 承载力高

钢管内填充混凝土后，在轴心受压荷载作用下，钢管约束了混凝土，使混凝土三向受压，延缓了混凝土受压时表现出的纵向开裂；而钢管内混凝土的存在也可以有效避免或延缓薄壁钢管过早的局部屈曲，正因为如此，钢管和混凝土才可以在相互弥补各自劣势的情况下同时充分发挥两者各自的优势，从而使两者合一形成的钢管混凝土具有较高的承载力，数据上显著高于钢管混凝土结构中钢管和核心混凝土的单独承载力之和。

(2) 塑性和韧性好

混凝土是种脆性材料，高强度混凝土的脆性表现更为明显，其工作性能的可靠度也因此大大降低。但是钢管混凝土中的混凝土在钢管的约束下，不但改善了混凝土使用阶段的弹性性质，而且使混凝土在破坏时仍然具有很好的塑性变形能力。鉴于钢管混凝土较高的塑性和韧性，其抗震性能也同样优越。

(3) 施工方便

与传统的钢筋混凝土柱相比，采用钢管混凝土柱的情况下，不需要绑扎钢筋、支模和拆模等繁琐工序，使得工期大大缩短。而且在钢管内一般也无需再配置受力钢筋，这样灌注混凝土时的难度大大降低，同时也更容易保证混凝土的密实度。尤其在采用免振自密实混凝土、泵送混凝土和高位抛落不振捣混凝土等建筑施工工艺时，施工优越性更加明显。此外，与钢筋混凝土预制构件相比，可以节省构件预制场地；与钢结构构件相比，通常情况下，钢管混凝土的构造更简单。

(4) 防火性能较好

主要表现在抗火能力突出以及火灾作用后较高的可修复性。火灾发生时，在高温作用下，核心混凝土升温较慢且承载力较高，而外包钢管的承载力会逐渐下降，并在钢管应力重分配后，将卸下的荷载传递给混凝土。正是这种混凝土与钢管之间协同互补、相互贡献和共同工作的优势，使钢管混凝土的防火性能及灾后可修复性较为优越。

(5) 经济效果好

钢管混凝土可较好地同时发挥钢材与混凝土两种材料的优点和潜力，能够使它们的力学性能得到更为合理和充分的利用，因此，一般情况下，采用钢管混凝土结构都能取得良好的经济效果。

1.2 钢管混凝土的应用

钢管混凝土结构能适应现代工程结构向高耸、重载、大跨发展以及承受恶劣自然条件的需要,符合工业化背景下现代工程建筑施工技术的要求,因而在单层和多层工业厂房柱、地铁站台柱、高层和超高层建筑以及桥梁结构等诸多实际工程中得到了越来越广泛的应用。

(1) 单层和多层厂房柱、设备构架柱、支架柱和栈桥柱

各类钢管混凝土厂房柱在 20 世纪 70 年代左右开始逐渐得到推广应用,例如辽宁省本溪钢铁公司某车间、辽宁省沈海热电厂以及上海宝钢某电炉废钢车间等诸多工业建筑中格构式钢管混凝土柱得到了较多的应用。

在各种工业平台或构筑物中,常采用轴心受压构件作为下部支柱,因此支柱承受的荷载往往较大,这样使得钢管混凝土构架柱、支架柱和栈桥柱在这些情况下的应用较为普遍。

(2) 地铁站台柱、送变电杆塔、桩、空间结构

地铁的站台柱通常承受的压力很大,故采用承载力较高的钢管混凝土柱时,可有效减小柱截面面积,扩大地下结构使用空间。钢管混凝土结构在 20 世纪 60 年代左右,逐渐在我国的地铁车站工程中被推广应用起来。

对于档距较大的高压输电杆塔等结构,钢管混凝土构件可用来作为有效承受荷载的立柱。

钢管混凝土桩技术在宝钢三期工程中被成功试验并推广,同时实践表明,在东南沿海软土地基上的高层建筑、桥梁与码头等重要建筑物的基础中,钢管混凝土桩具有良好的应用和推广价值。

(3) 多高层和超高层建筑

在多、高层和超高层建筑中,钢管混凝土结构可用作柱结构和抗侧力体系,常见的构件截面形式包括方形、矩形和圆形。

(4) 桥梁结构

在我国,钢管混凝土已在桥梁结构中得到较为广泛的应用,取得了较好的社会效益和经济效益,积累了许多宝贵的工程实践经验。根据实际工程中钢管混凝土发挥材料的作用和施工作用的差异,目前钢管混凝土桥梁可分为钢管混凝土拱桥和钢管混凝土劲性骨架拱桥。

1.3 本书主要研究内容

钢管混凝土的相关研究和应用日益丰富,本书所涉及的异形钢管混凝土柱是在本领域专家、学者、同行等研究基础上进行的补充和延伸,主要研究内容如下:

(1) 进行了 6 个圆形钢管混凝土短斜柱和 10 个矩形钢管混凝土短斜柱的试验研究,并在此基础上建立了有限元计算分析模型,采用验证的有限元计算分析模型进行了大量相关参数分析,最后建议了圆形钢管混凝土短斜柱和矩形钢管混凝土短斜柱承载力实用计算方法。

(2) 进行了 12 个方锥形钢管混凝土柱和 12 个圆锥形钢管混凝土柱的试验研究,并在

此基础上建立了有限元计算分析模型,采用验证的有限元计算分析模型进行了大量相关参数分析,最后建议了方锥形钢管混凝土柱和圆锥形钢管混凝土柱承载力实用计算方法。

(3) 进行了8个椭圆形钢管混凝土柱轴心受压和10个椭圆形钢管混凝土柱偏心受压的试验研究,并在此基础上建立了有限元计算分析模型,采用验证的有限元计算分析模型进行了大量相关参数分析,最后建议了椭圆形钢管混凝土柱轴心受压和偏心受压承载力实用计算方法。

(4) 进行了4个圆形钢管混凝土短柱、8个三角形钢管混凝土短柱、8个扇形钢管混凝土短柱、8个D形钢管混凝土短柱、8个1/4圆形钢管混凝土短柱、8个1/2圆形钢管混凝土短柱的试验研究,并在此基础上建立了有限元计算分析模型,采用验证的有限元计算分析模型进行了大量相关参数分析,最后建议了三角形钢管混凝土短柱、扇形钢管混凝土短柱、D形钢管混凝土短柱、1/4圆形钢管混凝土短柱和1/2圆形钢管混凝土短柱承载力实用计算方法。

本章参考文献

- [1] 钟善铜. 钢管混凝土统一理论: 研究与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构 (修订版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [4] 聂建国. 钢—混凝土组合结构原理与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 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.
- [7] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [8] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构—试验、理论和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 王元丰. 钢管混凝土徐变 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 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.

第2章 钢管混凝土斜柱

2.1 引言

随着钢管混凝土结构应用范围的不断扩大,钢管混凝土斜柱已出现在一些典型工程中,如北京国家体育场、广州新电视塔、四川广电中心、北京南站及河北开元环球中心等,但以往的研究大多集中在直柱方面,斜柱方面涉及较少。

刘创等对国家体育场工程的矩形钢管永久模板混凝土斜柱(矩形截面)的施工过程进行了分析和探讨。郭彦林等揭示了广州新电视塔细腰段(圆形截面)群柱失稳破坏的机理。金刚等采用预应力悬挑梁和钢管混凝土斜柱(圆形截面)方式进行了铁岭体育馆的钢屋盖及大悬挑平台结构设计。傅剑平等进行了钢管混凝土斜柱(圆形截面)抗剪环-环梁节点受力性能试验研究。任庆新等进行了钢管混凝土斜柱(方形截面)轴压工作机理分析,初步揭示了钢管和混凝土的组合作用及破坏特点。周晓飞等采用钢管混凝土斜柱(圆形截面)支撑进行了上海港国际客运中心综合客运楼钢结构设计。金振士等介绍了世博演艺中心劲性钢管斜柱(矩形截面)内的混凝土施工质量控制技术。方小丹等对采用钢管混凝土斜柱(圆形截面)的广州西塔进行了抗震设计。Han 等进行了钢管混凝土短斜柱(方形截面)的试验研究,并建议了承载力计算公式。

综上所述,目前有关钢管混凝土斜柱的研究大多集中在施工控制和结构设计方面,且工程建设标准中尚缺乏钢管混凝土斜柱直接的设计规定,有必要对钢管混凝土斜柱进行试验研究,分析其破坏形态及倾斜角度对其承载力的影响。鉴于此,本章在方钢管混凝土短斜柱试验研究的基础上,进行了6个圆钢管混凝土短斜柱、10个矩形钢管混凝土短斜柱在竖向荷载作用下力学性能的试验研究,同时采用ABAQUS有限元软件进行了相应的有限元拓展分析,探讨了倾斜角度对圆、矩形钢管混凝土短斜柱抗压力学性能的影响,建议了圆、矩形钢管混凝土短斜柱强度承载力计算式。

2.2 试验研究

2.2.1 试验概况

1. 试件设计与制作

参考实际工程,按照约束效应系数相等的原则,共设计了16个试件,其中包括6个圆形截面试件和10个矩形截面试件。试验参数包括倾斜角度、截面类型和是否灌注混凝土,试件的高径(宽)比取为3,详细设计情况见表2-1。

试件情况一览表

表 2-1

截面 类型	序号	试件 编号	$D \times D(B) \times L$ (mm)	$\theta (^{\circ})$	N_{ue} (kN)		SI	DI	$\bar{\epsilon}_u (\mu\epsilon)$
					实测	平均			
圆形	1	ic1-1	200×200×600	0	3458	3466	1	1.51	8867
	2	ic1-2	200×200×600	0	3474			1.54	
	3	ic2-1	200×200×600	9	3439			1.59	
	4	ic2-2	200×200×600	9	3227	3333	0.96	1.57	10488
	5	ich1-1	200×200×600	9	772			1.68	
	6	ich1-2	200×200×600	9	754			1.65	
矩形	7	ir1-1	200×150×600	0	2895	2949	1	1.60	5770
	8	ir1-2	200×150×600	0	3003			1.57	
	9	ir2-1	200×150×600	9	2870			1.62	
	10	ir2-2	200×150×600	9	2705	2787	0.95	1.59	6489
	11	ir3-1	200×150×600	9	2773			1.63	
	12	ir3-2	200×150×600	9	2698			1.66	
	13	irh1-1	200×150×600	9	484	505	0.17	1.79	4077
	14	irh1-2	200×150×600	9	525			1.81	
	15	irh2-1	200×150×600	9	512			1.83	
	16	irh2-2	200×150×600	9	485	499	0.16	1.85	5108

注：编号 ic 代表圆钢管混凝土短斜柱，ich 代表圆钢管短斜柱；ir 代表矩形钢管混凝土短斜柱，irh 代表矩形钢管短斜柱。编号-前面的数字分别代表不同组，-后面的数字分别代表同一组的不同试件。矩形截面构件中 ir2、irh1 分别为两组沿矩形截面强轴倾斜的短斜柱，ir3、irh2 分别为两组沿矩形截面弱轴倾斜的短斜柱。

试件高度为 600mm，钢管壁厚为 3.72mm，圆钢管混凝土短斜柱直径为 200mm，矩形钢管混凝土短斜柱长边为 200mm，短边为 150mm，如图 2-1 所示。

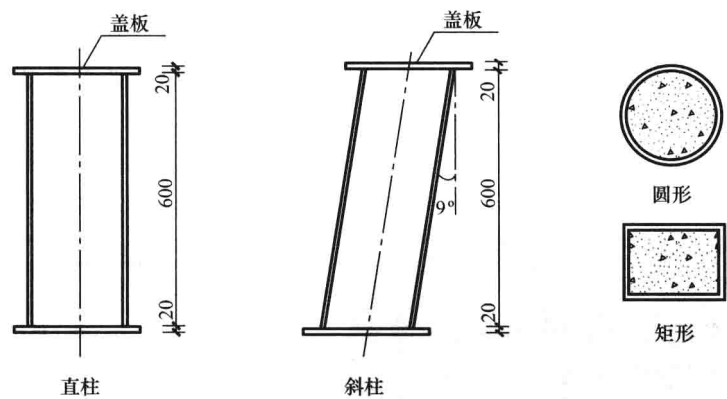


图 2-1 试件尺寸及截面 (mm)

圆钢管混凝土短斜柱的钢管由一块钢板卷制焊接而成，矩形钢管混凝土短斜柱的钢管由四块钢板相互垂直拼焊而成。首先按长度要求做出空钢管，并保证空钢管两端截面的平整。同时钢管上下两端分别设有边长为 250mm 和 300mm、厚度为 20mm 的方形盖板，灌注混凝土前将下端的方形盖板先行焊好，另一端待混凝土灌注以后再进行焊接，上下盖板与空钢管的几何中心对中。

灌注混凝土时先将焊好的钢管竖立，然后从顶部灌入混凝土，没有采用任何振捣方

式。自然养护两周后，凿去柱顶的浮浆层，并用高强环氧砂浆将混凝土表面与钢管表面抹平，然后再焊上另一盖板。

2. 材料力学性能指标

钢材材性试验按国家标准《金属材料 室温拉伸试验方法》GB/T 228—2002（现行标准为《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》GB/T 228.1—2010）中的相关规定进行，把试件所用钢板做成标准拉伸件进行测试。通过拉伸试验测得钢板的厚度、屈服强度、极限强度、弹性模量以及泊松比分别为：3.72mm、380.6MPa、519.1MPa、 1.92×10^5 MPa 和 0.282。

钢管中浇灌自密实混凝土，按 C60 进行设计，水胶比为 0.34，砂率为 0.48，配合比为水：196kg/m³；水泥：440kg/m³；粉煤灰：143kg/m³；砂：738kg/m³；石：800kg/m³。采用原材料如下：普通硅酸盐水泥；河砂，中砂；石灰岩碎石，石子粒径 5~25mm；II 级粉煤灰；普通自来水；高效减水剂的掺量为胶凝材料质量的 1%。混凝土坍落度为 268mm，坍落流动度为 373mm，混凝土浇灌时内部温度为 22℃，比环境温度约低 1℃。L 形仪实验测得新拌混凝土平均流速为 51mm/s。

混凝土立方体抗压强度和弹性模量分别由同条件下成型养护的立方体试块和棱柱体试块测得。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2002，混凝土立方体试块达到 28d 时抗压强度为 62.1MPa，弹性模量为 33700MPa，试验时立方体抗压强度为 74.4MPa。

2.2.2 试验装置

本次试验在沈阳建筑大学结构工程实验室开展。其中圆、矩形钢管混凝土短直柱试验在 5000kN 压力试验机上进行。试验前，用打磨机将钢管混凝土短直柱试件两端打磨平整，然后将试件直接放在压力试验机上进行一次压缩试验。试验照片和量测装置如图 2-2 所示。为了准确地测量竖向荷载作用下短直柱试件的轴向变形，在每个试件的钢管外部中截面处沿轴向及环向各设四对电阻应变片，同时沿试件轴向设置两个电测位移计以同步测定圆、矩形钢管混凝土短直柱试件的轴向变形。应变和位移均采用 IMP 数据采集系统自动采集。

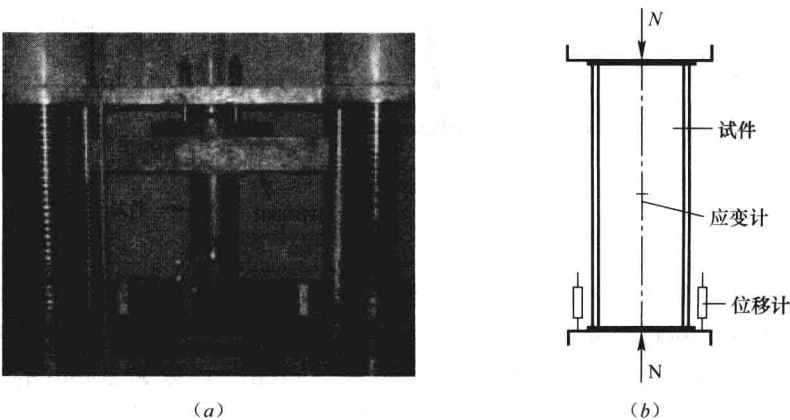


图 2-2 短直柱试验装置
(a) 试验照片；(b) 量测装置

圆、矩形钢管混凝土短斜柱试验在 5000kN 自反力架上进行。试验前，用打磨机将钢管混凝土短斜柱试件两端打磨平整，然后将试件直接放在自反力架上进行一次压缩试验。试验照片和量测装置如图 2-3 所示。短斜柱的下端通过高强度螺栓与刚性台座相连，模拟嵌固边界条件；上端侧面设置了可保证试件能沿竖向移动、而限制其发生水平位移的刚性侧向支撑。支撑和 1000kN 压力传感器相连，可测量竖向荷载 N_v 施加过程中产生的水平反力 N_h 。试验过程中，竖向荷载 N_v 采用固定于反力架横梁上的 5000kN 千斤顶施加。为了准确测量试件的竖向变形，在每个短斜柱的钢管外部中截面处沿轴向及环向各设四对电阻应变片，同时沿试件竖向设置两个电测位移计用以同步测定圆、矩形钢管混凝土短斜柱试件的竖向变形。应变和位移均采用 IMP 数据采集系统自动采集。

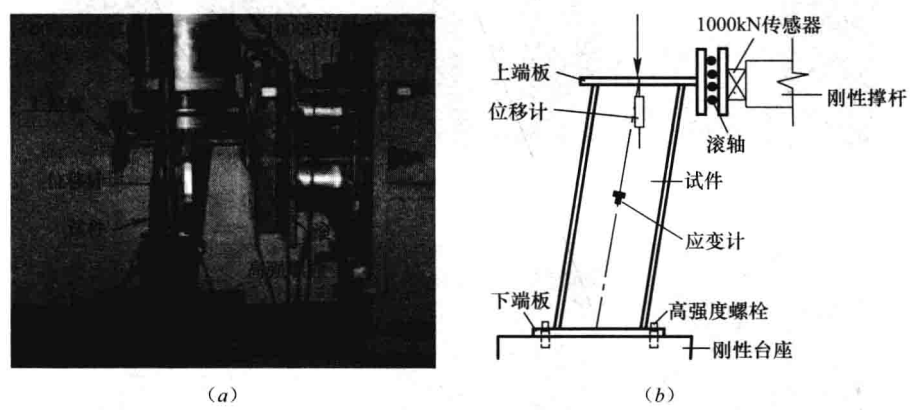


图 2-3 短斜柱试验装置
(a) 试验照片；(b) 量测装置

2.2.3 试验方法

1. 加载制度

正式加载前先进行预加载，预加载值约为预计极限荷载的 15%，加到预定值后持荷 2~3min，然后卸载。正式加载采用分级加载制，在小于 60% 预计极限荷载范围内，每级荷载约为预计极限荷载的 1/10；超过此范围后，每级荷载约为预计极限荷载的 1/20。每级荷载的持荷时间约为 2min，接近破坏时慢速连续加载。当加载到试件接近破坏时，荷载增加缓慢甚至下降，而位移增加却很大，达到下列条件之一时即停止加载：①当荷载降低到峰值荷载的 65% 以下；②钢管焊缝发生破坏。

2. 量测内容
- 试验需要量测的内容有：
- (1) 试件竖向荷载，由 5000kN 压力传感器量测；
 - (2) 试件竖向变形，由竖向位移计量测；
 - (3) 试件横向荷载，由 1000kN 压力传感器量测；
 - (4) 试件的纵向应变，由纵向电阻应变片量测；
 - (5) 试件的横向应变，由横向电阻应变片量测。

2.2.4 试验现象、结果与分析

1. 试验现象与结果

试验时对其全过程进行了观测，在受荷初期，试件未有可见变形。随着竖向荷载增加，

圆形钢管混凝土短柱有整体变粗的趋势，端部由于端板的约束，变粗程度较小，试验后期钢管混凝土短直柱、短斜柱均发生斜剪破坏，而钢管短斜柱倾斜方向两侧外鼓、其他两侧内凹；矩形钢管混凝土短柱未达极限荷载时便有 1~2 处微鼓，达到极限荷载后发展加快，破坏处四面钢管均向外凸曲，截面几乎与轴线垂直，总体上仍属斜剪破坏，钢管短柱长边发生外鼓、短边发生内凹破坏，破坏截面同样有与轴线垂直的趋势，如图 2-4 所示。从图 2-4 中可以看出，矩形钢管混凝土短柱钢管的局部凸曲程度较圆形钢管混凝土短柱严重。

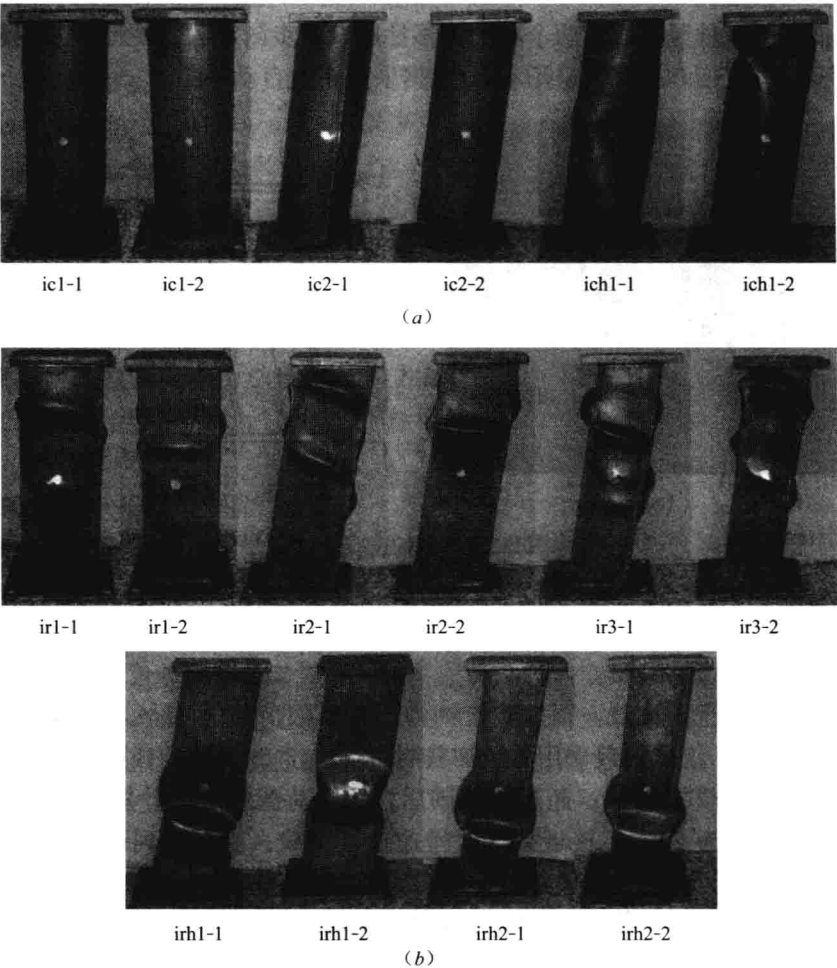


图 2-4 试件的破坏形态
(a) 圆形截面；(b) 矩形截面

试验后将四个钢管混凝土短柱典型试件剖开，其中包括圆形钢管混凝土直柱 ic1-1、圆形钢管混凝土斜柱 ic2-2、矩形钢管混凝土直柱 ir1-1 及矩形钢管混凝土斜柱 ir2-2，观察各试件核心混凝土的破坏情况，如图 2-5 所示。

在各钢管混凝土短柱试件外部钢管的局部凸曲部位，对应的内部核心混凝土被压碎，致使钢管产生的屈服变形较大，试件外表面多处出现鼓曲，同时钢管也无法对内部核心混凝土提供足够的约束作用，使得矩形钢管混凝土短柱的核心混凝土产生局部脱落的现象。此外，矩形钢管混凝土短斜柱与矩形钢管混凝土短直柱相比，核心混凝土破坏情况差别不

明显。圆形钢管混凝土短柱试件外部钢管屈服变形较小，内部核心混凝土脱落现象不明显，但有一条明显的斜剪破坏痕迹，造成了圆形钢管混凝土短柱上下端部发生微型鼓曲，圆形钢管混凝土短斜柱与圆形钢管混凝土短直柱相比，核心混凝土破坏情况差别亦不明显。另外，在内部核心混凝土压碎部位的周围有细小的、分布较均匀的裂缝。

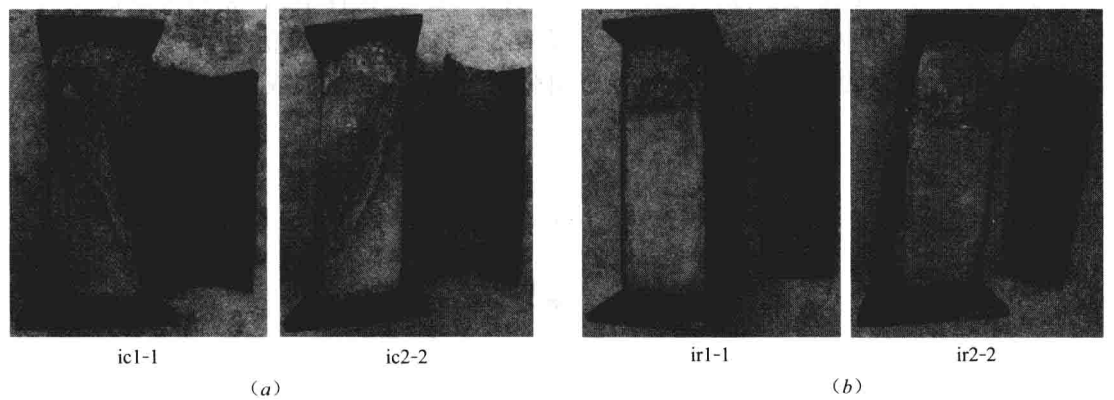


图 2-5 核心混凝土的破坏形态
(a) 圆形截面；(b) 矩形截面

图 2-6 给出了圆形和矩形钢管混凝土短柱的竖向荷载 (N_v)-竖向位移 (Δ) 关系曲线。由图 2-6 可知，圆、矩形钢管混凝土短斜柱与同类钢管混凝土短直柱相比，竖向荷载-竖向位移关系曲线线形类似，分为弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段、水平阶段及卸载阶段。从曲线上看，钢管混凝土短斜柱的初始斜率及承载力较短直柱有稍许降低，短斜柱填充混凝土后其初始斜率及承载力提高程度明显。无论短直柱还是短斜柱，圆形钢管混凝土试件的竖向荷载-竖向位移曲线线形均比矩形钢管混凝土试件的竖向荷载-竖向位移曲线线形饱满光滑，而且矩形钢管混凝土短柱外钢管多易开裂，这也进一步说明了与矩形钢管混凝土试件相比，圆形钢管混凝土试件的外钢管可以为核心混凝土提供更好的套箍作用，使核心混凝土更好地处于三向受压状态。

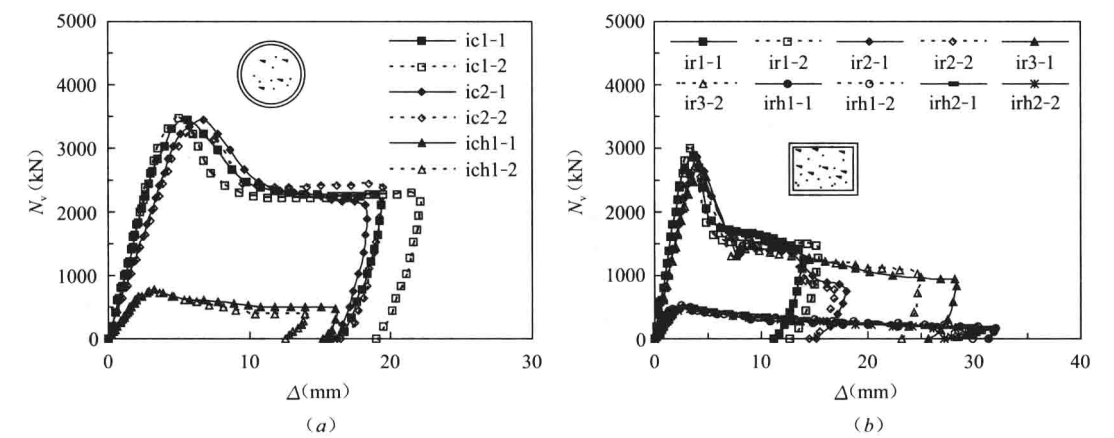


图 2-6 N_v - Δ 关系曲线
(a) 圆形截面；(b) 矩形截面

图 2-7 给出了圆形和矩形钢管混凝土短斜柱典型试件 ic2-2、ir2-2 和 ir3-2 的竖向荷载 (N_v)-水平反力 (N_h) 关系曲线。短斜柱与短直柱的重要区别之一就是产生了水平反力, 由图 2-7 可以看出, 上升段竖向荷载与水平反力几乎成线性增加关系, 极限荷载附近斜率有所下降。当竖向荷载达到极限承载力后下降时, 水平荷载也随之下降。试件 ic2-2 竖向荷载最大值为 3227kN, 此时对应的水平反力为 502kN; 试件 ir2-2 竖向荷载最大值为 2705kN, 此时对应的水平反力为 401kN。试件 ir3-2 竖向荷载最大值为 2698kN, 此时对应的水平反力为 388kN。极限荷载以前, 竖向荷载与水平反力近似成 $\tan\theta$ 关系。

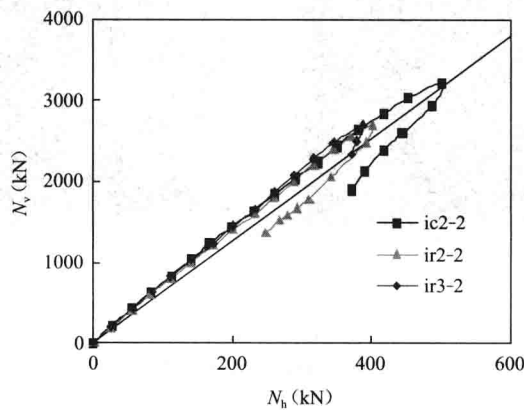


图 2-7 竖向荷载 (N_v)-水平反力 (N_h) 关系曲线

图 2-8 和图 2-9 给出各组圆、矩形钢管混凝土短斜柱试件的竖向荷载 (N_v)-纵向应变 (ϵ_l) 关系曲线和竖向荷载 (N_v)-横向应变 (ϵ_t) 关系曲线, 图中纵向应变为正, 横向应变为负。各组圆、矩形钢管混凝土短斜柱试件的荷载-应变关系曲线的线形与相同圆、矩形钢管混凝土短直柱试件的荷载-位移曲线相似, 基本呈上升、下降或平缓的趋势, 仍然分为弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段、水平阶段及卸载阶段。而且由图 2-8 和图 2-9 可以看出, 竖向荷载作用下加荷初期各试件的荷载-应变曲线有较好的线性增加关系, 此后荷载-应变曲线呈非线性增加关系, 直至达到极限荷载。随后荷载随变形的发展而快速下降, 接着进入平缓段, 在此阶段, 应变发展很快, 但荷载的降低幅度则趋于平缓。

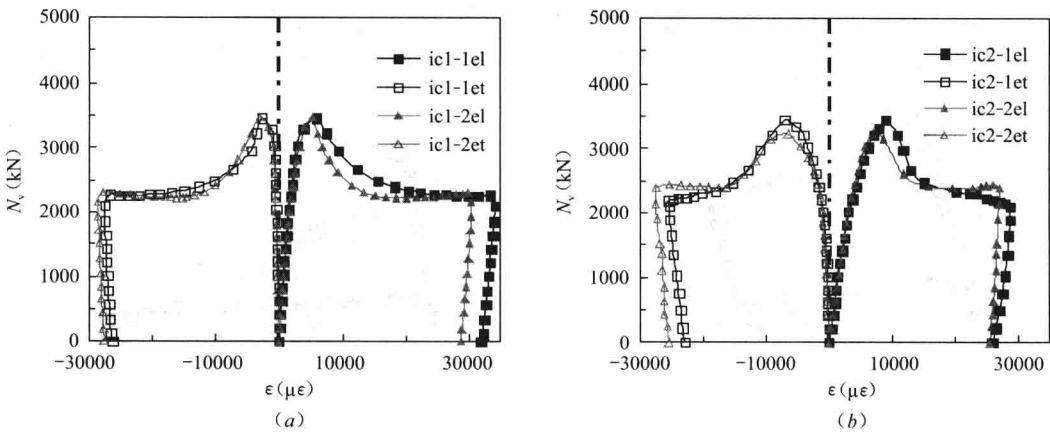


图 2-8 圆钢管混凝土短斜柱荷载 (N)-应变 (ϵ) 关系曲线 (—)
(a) ic1; (b) ic2