

内置CFRP圆管的 方钢管高强混凝土结构的 静力性能研究

李帼昌 张壮南 王春刚 著



科学出版社

内置 CFRP 圆管的方钢管高强 混凝土结构的静力性能研究

李帼昌 张壮南 王春刚 著

科学出版社

北 京

序

方钢管混凝土构件,由于钢管约束了管内混凝土,提高了混凝土的抗压强度和塑性,且与梁的连接比较方便,施工快捷,可广泛用于高层建筑中。

方钢管混凝土构件的不足之处是:钢管对核心混凝土的紧箍作用不均匀,因而核心混凝土抗压强度的提高和塑性性能的发展不如圆形截面好,尤其是在地震作用下,仍表现出脆性破坏。

作者在混凝土中放置一个 CFRP 圆管,把核心混凝土分成两部分,中心是 CFRP 圆管包裹的混凝土,这部分混凝土在 CFRP 圆管的约束下,强度和塑性大大增加。这就改变了方钢管混凝土构件的工作性能,使其性能趋近于圆形截面构件,不但提高了强度,而且提高了抗震性能,是改善方钢管混凝土构件基本性能最好的方法,很有发展前途。

作者对此进行了系列化的研究工作,主要包括:系统总结了有关内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土结构的研究成果;针对各类受力构件,通过试验和有限元分析的方法研究了对内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土构件的受力机理、力学性能、设计理论及设计方法等进行了阐述;研究了不同 CFRP 配置率、含钢率、偏心率和长细比等参数对构件性能的影响,并与相应的方钢管混凝土构件的力学性能进行了对比分析;构件工作性能的研究,包括轴压短柱的理论分析和试验研究,轴压中长柱的工作机理分析、承载力计算和试验研究,轴压长柱的工作机理分析、承载力计算及试验研究,纯弯构件的工作机理、抗弯承载力、抗弯刚度的计算分析与试验研究,单向偏压短柱的理论分析、承载力计算与试验研究,单向偏压中长柱的理论分析、承载力计算与试验研究,双向偏心受压短柱的工作机理研究、承载力计算与试验研究,双向偏压中长柱的有限元分析、承载力计算与试验研究等。

本书内容丰富完整,具有系统性、理论性和实用性,为这一新结构的发展和应用作出了贡献,是一本有价值的科学技术参考书。本书可供土木工程专业的师生、科研人员和工程技术人员参考。

钟善桐

2011 年 8 月 11 日于哈尔滨

前 言

近年来,约束混凝土相关理论与实践工作在对钢管混凝土和 CFRP(碳纤维增强塑料)约束混凝土技术的研究和开发中得以发展和成熟。内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土是在这种背景下发展起来的一种新型组合结构,它由外钢管、夹层混凝土、CFRP 内管以及内核混凝土四部分组成,将圆钢管混凝土与方钢管混凝土的优点结合在一起。这种组合结构充分发挥了钢材、混凝土和 CFRP 三种材料的优点,提高了构件的承载力,改善了高强混凝土和 CFRP 圆管的脆性,还可以节约材料、降低成本,是一种很有发展前景的结构。

本书是作者及其课题组多年研究工作所取得成果的总结,遵循由易到难,由简单到复杂的过程,力求将内容讲解清晰明了,使读者能够举一反三、灵活应用,从中取得收获。全书共分为 20 章,系统总结了有关内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土结构的研究成果。针对不同种类的受力构件,首先详细描述课题组完成的相关试验研究工作,然后对内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土构件的受力机理、力学性能、设计理论及其方法建议等进行阐述。主要内容包括:绪论,轴压短柱试验研究,轴压短柱的理论分析,轴压短柱极限承载力研究,轴心受压短柱补充研究,轴压中长柱试验研究,轴压中长柱的工作机理分析与承载力计算方法,轴压长柱试验研究,轴压长柱工作机理分析及承载力计算,纯弯构件试验研究,抗弯承载力与抗弯刚度计算分析,纯弯构件工作机理分析及承载力计算,单向偏压短柱试验研究,单向偏压短柱理论分析与承载力计算,单向偏压中长柱试验研究,单向偏压中长柱理论分析与承载力计算,双向偏心受压短柱试验研究,双向偏心受压短柱工作机理研究与承载力计算,双向偏压中长柱试验研究,双向偏压中长柱有限元分析与承载力计算等。

本书的研究成果是在国家自然科学基金资助下完成的,在编写过程中参考并引用了已公开发表的文献资料和相关教材与书籍的部分内容并得到了许多专家和朋友的帮助,在此表示衷心的感谢。

在课题研究过程中,研究生邢娜、石钧吉、罗江龙、韩刘、侯东旭、杨野、郎葵、杨志坚等协助作者完成了大量的试验、计算及分析工作,他们均对本书的完成作出了重要贡献。作者在此对他们付出的辛勤劳动和对本书面世所作的贡献表示诚挚的谢意。

由于作者的水平有限,书中难免存在不足之处,某些观点和结论也不够完善,恳请读者批评指正!

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 钢管混凝土结构及其特点	1
1.2 方钢管混凝土结构的特点和发展概况	3
1.2.1 方钢管混凝土结构的特点	3
1.2.2 方钢管混凝土的发展概况	3
1.3 CFRP 的应用及发展概况	5
1.3.1 CFRP 加固技术特点	5
1.3.2 国外 CFRP 约束混凝土发展概况	6
1.3.3 国内 CFRP 约束混凝土发展概况	8
1.4 钢管-CFRP-混凝土组合结构研究进展	9
1.5 本书研究的内容	9
参考文献	10
第 2 章 轴压短柱试验研究	14
2.1 引言	14
2.2 试验概况	14
2.2.1 试验设计	14
2.2.2 试件的材料力学性能指标	15
2.2.3 试件的制作	17
2.2.4 试验装置和试验方法	18
2.3 试验现象	19
2.4 试验结果分析	20
2.4.1 破坏形态	20
2.4.2 试验曲线对比分析	21
2.5 本章小结	27
参考文献	27
第 3 章 轴压短柱的理论分析	28
3.1 受力性能分析	28
3.1.1 核心混凝土的受力特点	28
3.1.2 外围混凝土的受力特点	28

3.2	荷载-应变曲线全过程分析	30
3.3	试件的承载力提高率	31
3.4	三种材料协调工作性能	31
3.5	轴压短柱的非线性有限元分析	32
3.5.1	引言	32
3.5.2	钢材的材料模型	32
3.5.3	混凝土的材料模型	35
3.5.4	CFRP 材料模型	41
3.5.5	短柱有限元分析过程	41
3.5.6	有限元分析结果	44
3.6	轴压短柱工作机理分析	47
3.7	本章小结	49
	参考文献	49
第 4 章	轴压短柱极限承载力研究	50
4.1	极限承载力计算公式推导	50
4.2	极限承载力计算公式验证	51
4.3	承载力设计指标	52
4.3.1	轴压组合弹性模量	52
4.3.2	轴压组合强度标准值	53
4.3.3	轴压组合强度设计值	53
4.3.4	轴压组合比例极限强度和比例极限应变	53
4.4	本章小结	54
	参考文献	54
第 5 章	轴心受压短柱补充研究	55
5.1	试验研究	55
5.1.1	试验设计与试件制作	55
5.1.2	试验装置及试验方法	57
5.1.3	试验结果及分析	59
5.2	轴压荷载-变形关系曲线有限元计算	67
5.2.1	材料本构模型	68
5.2.2	有限元计算模型	72
5.2.3	有限元计算结果与试验结果对比分析	76
5.3	工作机理研究	78
5.3.1	核心混凝土截面应力场分析	78
5.3.2	钢管应力分析	81
5.3.3	CFRP 应力分析	82

5.3.4 钢管、混凝土和 CFRP 圆管相互作用研究	84
5.3.5 最优 CFRP 含量研究	85
5.4 本章小结	86
参考文献	87
第 6 章 轴压中长柱试验研究	88
6.1 试件概况	88
6.1.1 试件设计	88
6.1.2 试件制作	89
6.1.3 材料力学性能试验检测	91
6.1.4 试验设备及加载制度	92
6.2 试验结果及分析	94
6.2.1 试验现象简述	94
6.2.2 构件的极限承载力	94
6.2.3 荷载与纵向变形的关系分析	95
6.2.4 荷载与横向变形的关系分析	100
6.2.5 对构件轴心受压性能的影响因素分析	101
6.3 轴压中长柱试验曲线全过程分析	102
6.4 本章小结	104
参考文献	104
第 7 章 轴压中长柱的工作机理分析与承载力计算方法	105
7.1 引言	105
7.2 混凝土的套箍强化	105
7.3 荷载与应力关系分析	106
7.4 N/N_u 与横向变形系数的关系	107
7.5 基本假设	110
7.6 计算公式推导	111
7.6.1 双等效计算方法	111
7.6.2 单等效计算方法	114
7.7 试验验证	116
7.8 本章小结	119
参考文献	120
第 8 章 轴压长柱试验研究	121
8.1 试验概况	121
8.1.1 试件的设计	121
8.1.2 试件的制备	121
8.2 试验材料	123

8.2.1	试验材料取样	123
8.2.2	钢管的力学性能指标	124
8.2.3	混凝土的力学性能指标	124
8.2.4	CFRP 的力学性能指标	124
8.3	试验测试	125
8.3.1	加载装置及测量方法	125
8.3.2	加载方式和加载制度	125
8.3.3	应变片的布置	126
8.4	轴压长柱试验现象与分析	127
8.4.1	试验现象	127
8.4.2	影响构件极限承载力的因素	128
8.4.3	构件荷载与长宽比关系曲线分析	129
8.4.4	荷载与挠度关系曲线分析	129
8.4.5	荷载-纵向应变关系曲线分析	132
8.4.6	组合材料协调工作性能分析	134
8.5	本章小结	136
第 9 章	轴压长柱工作机理分析及承载力计算	137
9.1	引言	137
9.2	普通方钢管高强混凝土轴压长柱的受力全过程分析	137
9.3	内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱的受力全过程分析	138
9.4	内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土柱的延性分析	139
9.4.1	钢管混凝土延性的影响因素	139
9.4.2	影响内置 CFRP 圆管方钢管高强混凝土柱延性的因素	140
9.5	轴压长柱承载力计算	141
9.5.1	基本假设	141
9.5.2	计算公式推导	141
9.5.3	试验计算公式的验证	145
9.6	本章小结	146
	参考文献	146
第 10 章	纯弯构件试验研究	147
10.1	引言	147
10.2	试件的制作	147
10.3	试验材料的选用	148
10.3.1	钢材强度的确定	148
10.3.2	碳纤维材料性能的确定	149

10.4 纯弯试验加载	149
10.4.1 观测设计	149
10.4.2 试验加载	150
10.5 纯弯构件试验过程及分析	150
10.5.1 试件的破坏过程及破坏形态	150
10.5.2 试验全过程	155
10.5.3 应变分析	158
10.6 试验结果分析	161
10.6.1 挠度分析	164
10.6.2 中性轴的确定	164
10.6.3 试件各项指标对其抗弯性能的影响	166
10.7 本章小结	167
第 11 章 抗弯承载力与抗弯刚度计算分析	169
11.1 引言	169
11.2 受弯构件极限承载力计算分析	169
11.2.1 国内外有关规范抗弯承载力计算公式	169
11.2.2 理论结果与试验结果的比较分析	171
11.3 受弯构件抗弯刚度计算	172
11.3.1 国内外有关规范抗弯刚度计算公式	172
11.3.2 理论结果与试验结果的比较分析	173
11.4 本章小结	174
参考文献	175
第 12 章 纯弯构件工作机理分析及承载力计算	176
12.1 纯弯构件工作机理分析	176
12.2 纯弯试件强度承载力计算	177
12.2.1 公式推导	177
12.2.2 试验验证	181
12.3 本章小结	183
参考文献	183
第 13 章 单向偏压短柱试验研究	184
13.1 试验概况	184
13.2 试件设计	184
13.3 试验设备与加载制度	185
13.3.1 加载装置及测量方法	185
13.3.2 加载方式及加载制度	186
13.4 偏压短柱试验现象	187

13.5 偏压短柱结果分析	188
13.5.1 试件承载力分析	188
13.5.2 试件延性分析	192
13.5.3 试件抗弯刚度分析	194
13.5.4 试件应变分析	195
13.5.5 内外管协调工作情况分析	198
13.6 本章小结	202
参考文献	202
第 14 章 单向偏压短柱理论分析与承载力计算	203
14.1 大小偏心受压的界定	203
14.1.1 偏心受压构件相对界限受压区高度	203
14.1.2 中和轴变化规律	205
14.2 大小偏心受压构件正截面承载力公式	207
14.2.1 约束混凝土强度的确定	207
14.2.2 偏压承载力公式的推导	207
14.2.3 偏压承载力公式的验证	210
14.3 偏心受压构件承载力计算的折减系数法	211
14.4 本章小结	213
参考文献	214
第 15 章 单向偏压中长柱试验研究	215
15.1 试件设计	215
15.2 试验方法	215
15.3 试验结果及分析	216
15.3.1 破坏形态	216
15.3.2 承载力分析	218
15.3.3 试件延性分析	219
15.3.4 CFRP 含量对极限承载力的影响	220
15.3.5 偏心距对极限承载力的影响	221
15.3.6 长细比对极限承载力的影响	222
15.3.7 试件应变分析	224
15.4 本章小结	228
参考文献	228
第 16 章 单向偏压中长柱理论分析与承载力计算	229
16.1 偏压中长柱全过程分析	229
16.2 单向偏压中长柱强度承载力计算	231
16.2.1 承载力公式推导	231

16.2.2 试验验证	233
16.3 本章小结	234
参考文献	234
第 17 章 双向偏心受压短柱试验研究	235
17.1 引言	235
17.2 试验设计与试件制作	235
17.3 试验装置与试验方法	237
17.4 试验结果与分析	237
17.4.1 试验破坏特征	238
17.4.2 双向偏压短柱的承载力分析	241
17.4.3 双向偏心受压短柱的应变分析	242
17.4.4 双向偏压试件的平截面假定验证	244
17.4.5 双向偏心受压短柱的破坏过程分析	246
17.5 本章小结	247
参考文献	248
第 18 章 双向偏心受压短柱工作机理研究与承载力计算	249
18.1 引言	249
18.2 有限元计算	249
18.2.1 有限元计算模型	249
18.2.2 接触和边界条件	249
18.2.3 加载方式	250
18.2.4 有限元计算结果与试验结果对比分析	251
18.3 工作机理研究	254
18.3.1 双向偏心受压试件荷载-挠度关系曲线全过程分析	254
18.3.2 核心混凝土截面应力场分析	254
18.3.3 钢管应力分析	259
18.3.4 CFRP 应力分析	260
18.4 双向偏心受压构件承载力计算方法研究	261
18.5 本章小结	263
参考文献	263
第 19 章 双向偏压中长柱试验研究	264
19.1 试验概况	264
19.1.1 试件设计	264
19.1.2 试件制作	265
19.1.3 试件材料力学性能指标	266
19.2 试验装置及试验方法	268

19.3	试验结果与分析	269
19.3.1	破坏形态	269
19.3.2	试件加载过程挠度曲线	273
19.3.3	试件极限承载力分析	276
19.3.4	荷载-横向挠度分析	276
19.3.5	平截面假定验证	280
19.3.6	试件应变分析	283
19.3.7	钢管、CFRP 圆管荷载-泊松比曲线	288
19.3.8	影响因素分析	289
19.4	本章小结	290
第 20 章	双向偏压中长柱有限元分析与承载力计算	291
20.1	引言	291
20.2	双向偏压构件有限元分析	291
20.2.1	材料的本构关系模型	291
20.2.2	有限元计算模型的建立	291
20.2.3	有限元模拟结果与试验结果比较分析	293
20.2.4	内置 CFRP 钢管混凝土计算荷载-挠度曲线与试验曲线的比较	294
20.2.5	方钢管混凝土计算荷载-挠度曲线与试验曲线的比较	296
20.3	双向偏压构件荷载-变形关系分析	297
20.3.1	方钢管混凝土压弯构件荷载-变形关系全过程分析	298
20.3.2	内置 CFRP 圆管方钢管混凝土压弯构件荷载-变形关系全过程分析	302
20.4	破坏形态	310
20.5	纯弯构件有限元分析	311
20.5.1	边界条件	311
20.5.2	试件破坏形态	312
20.5.3	计算结果与试验结果比较分析	313
20.6	实用计算方法	315
20.6.1	参数分析	315
20.6.2	双向偏压构件强度承载力简化计算	317
20.6.3	双向偏压构件稳定承载力简化计算	318
20.7	本章小结	321
	参考文献	321

第 1 章 绪 论

1.1 钢管混凝土结构及其特点

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的试件,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,即钢管对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,塑性和韧性大为改善。按截面形式不同,分为圆钢管混凝土、方钢管混凝土、矩形钢管混凝土和多边形钢管混凝土^[1~4]等,工程中几种常用的截面形式如图 1.1 所示。

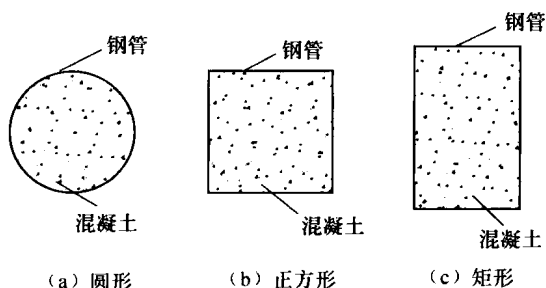


图 1.1 常见的钢管混凝土截面形式

钢管混凝土结构是从型钢混凝土结构和螺旋箍柱发展而来的,它是由普通混凝土填入钢管内而形成的组合结构。钢管混凝土的基本原理为:①借助钢管对核心混凝土的套箍作用,使核心混凝土处于三向受压状态,从而使核心混凝土具有更高的抗压强度和压缩变形能力;②借助内填混凝土的支撑作用,增强钢管壁的几何稳定性,改变空钢管的失稳模态,从而提高其承载力。钢管和混凝土的受力状态如图 1.2 所示。

钢管混凝土具有以下几个特点:

1) 承载力高

对于薄壁钢管来说,其临界承载力极不稳定,因为它对局部缺陷很敏感。在钢管中填充混凝土形成钢管混凝土后,钢管约束了混凝土,在轴心受压荷载作用下,混凝土三向受压,延缓了受压时的纵向开裂。而混凝土的存在却可以避免或延缓薄壁钢管过早地发生局部屈曲。分析证明^[1]:钢管混凝土中的核心混凝土,由于钢

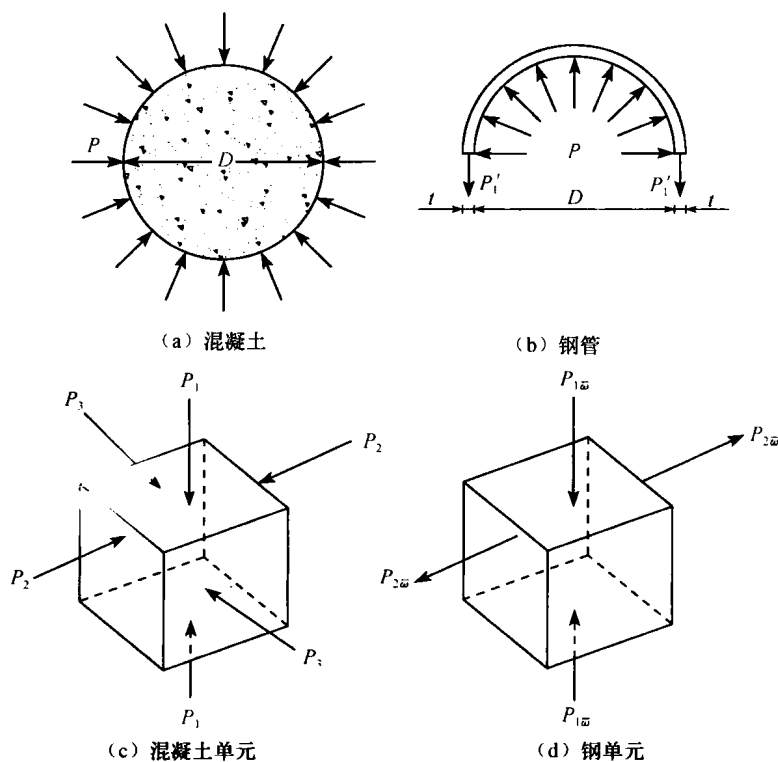


图 1.2 钢管和混凝土的受力状态图

管产生的紧箍效应,抗压强度可提高一倍;而整个试件的抗压承载力约为钢管和核心混凝土单独承载力之和的 1.7~2.0 倍。另外,钢管混凝土试件抗剪和抗扭性能也很好。

2) 塑性和韧性好

钢管混凝土中,核心混凝土在钢管的约束下,不但在使用阶段改善了它的弹性性质,而且在破坏时具有很大的塑性变形。钢管混凝土试件受压破坏时,可以压缩到原长的 2/3,呈多折腰鼓形破坏,完全没有脆性破坏的特征。此外,这种结构在承受冲击荷载和振动荷载时,也具有很好的韧性。由于钢管混凝土具有良好的塑性和韧性,因而抗震性能好。

3) 施工方便

与钢筋混凝土柱相比,可节省模板费用,加快施工速度,且可适应先进的泵灌混凝土工艺。与钢结构试件相比,钢管混凝土的构造简单,焊缝少,易于制作。钢管混凝土本身的施工特点符合现代施工技术工业化的要求,可大量节约人工费用,降低工程造价^[5]。

4) 耐火性能较好

由于组成钢管混凝土的钢管和核心混凝土具有相互贡献、协同互补、共同工作的特点,从而使这种结构具有较好的耐火性能。有实验数据表明:钢管混凝土柱达到一级耐火三小时要求,与钢柱相比可节约防火涂料 $1/2 \sim 2/3$ ^[6],随着管径的增大,节约得更多,因此降低了造价。

5) 经济效果好

采用钢管混凝土可以很好地发挥钢材和混凝土两种材料的特性和潜力,使材料得到更为充分和合理的应用。大量工程实际^[7,8]表明:采用钢管混凝土的承压试件比普通钢筋混凝土试件可节约混凝土 50%左右,约减轻结构自重 50%,钢材用量略高或约相等;和钢结构相比,可节约钢材 50%左右。

另外,钢管混凝土又是在高层建筑和大跨度桥梁中应用高强混凝土的一种最有效和最经济的结构形式^[9]。这是因为:①钢管对核心混凝土的套箍作用,能有效克服高强混凝土的脆性;②钢管内无钢筋骨架,便于浇灌高强混凝土,而且因有钢管分隔,与管外楼盖梁板结构的普通混凝土互不干扰,无交错浇灌的麻烦;③钢管外面无混凝土保护层,能充分发挥高强混凝土的承载能力。

1.2 方钢管混凝土结构的特点和发展概况

1.2.1 方钢管混凝土结构的特点

方钢管混凝土结构除具有圆钢管混凝土结构的强度高、质量轻、塑性好、耐疲劳、耐冲击等优越的力学性能外,还具有其独特的优点^[10,11]。方钢管混凝土梁柱节点形式简单,施工时容易处理,其结构试件之间的交贯线在一个平面内,便于加工,施工工期短,成本低,特别是在桁架结构中,这种节点优势体现得更加明显。采用方钢管混凝土框架结构,可以满足建筑灵活布局的要求,可以提供较大的建筑空间,满足各种功能要求,也可以构成丰富多变的立面造型^[12]。从结构方面,采用方钢管混凝土结构形式提高了结构的整体力学性能和抗震性能。与圆形截面钢管混凝土受压试件相比,方形钢管混凝土受压试件截面的相对惯性矩较大,其稳定性性能好;方钢管混凝土与矩形钢管混凝土相比,两主轴方向的惯性矩相同,更适于双向受弯试件,有利于梁柱连接。

1.2.2 方钢管混凝土的发展概况

近年来,采用方形钢管混凝土结构的高层建筑在国内外都得到了较快的发展。例如,在国内,位于广州的新中国大厦,地上高度 201.8m,上部结构部分柱为带约束拉杆的方形钢管混凝土组合试件,核心筒地下室部分采用带约束拉杆异形(T

形、L 形)钢管混凝土组合试件;广州市的名汇商城和康王路的地下人防工程等均采用方钢管混凝土柱作为其竖向受力试件。在国外,如日本东京新宿广场塔楼,地上 31 层,柱子全部采用方钢管混凝土试件,此外还有新大阪菲尼克斯威尔大厦和淀川六番馆等。

O'Shea 和 Bridge 为研究核心混凝土对方钢管力学性能的影响规律,进行了 29 个方形空钢管和钢管混凝土轴压短柱的试验研究。结果表明:在方形钢管中填充混凝土与否对方钢管的极限承载力影响较大^[13]。2000 年,Uy^[14]对薄壁方形钢管混凝土短柱(其板件的宽厚比在 40~100)在轴向荷载和弯矩作用下的承载力性能进行了研究。随后,又与 Liang^[15]共同采用有限元分析方法,对方形钢管混凝土柱中钢管管壁局部屈曲后的力学性能进行了理论研究,分析了各种因素如几何缺陷、残余应力及宽厚比对钢管壁局部屈曲后性能的影响。2001 年,Uy^[16]还分别对由四块薄钢板焊接而成的空方钢管柱和在空方钢管柱内(内涂油脂)灌素混凝土而成的钢管混凝土柱,在轴心压力作用下钢管壁的局部屈曲及屈曲后的力学性能进行了试验对比研究。同时对方钢管高强混凝土的力学性能进行了试验研究,且提出了极限抗压强度的数值计算模型,对方钢管混凝土柱在持续荷载作用下的长期静力特性进行了研究。日本的 Susantha 等^[17]研究了核心混凝土在各种截面形状钢管约束下的应力-应变关系。

大量的试验结果和理论分析结果表明:方钢管混凝土轴心受压短柱的承载力和钢管与混凝土的相对强度、钢管与混凝土的相对截面面积等因素有关。陶忠等^[18]基于 ACI(1992 年)方法,提出一种适合于长期荷载作用下方钢管混凝土试件变形计算的方法,理论结果和试验结果基本吻合。韩林海^[8]在深入研究方钢管混凝土力学性能的基础上,提出了方钢管试件承载力的简化计算公式,同时他通过对试验结果的拟合分析,得到不同长细比的方钢管混凝土轴心受压柱的承载力简化计算公式。蔡健等^[19]分析了方形钢管混凝土在轴压下的受力机理,提出了方形钢管约束下核心混凝土的等效单轴受压本构关系。基于试验结果,讨论确定了所提出的本构关系的几个关键参数和强度指标,即峰值应变修正系数、钢管有效侧向压应力系数、峰值时钢管的横向应力等。韩林海等^[20]在确定了组成方钢管混凝土的钢材和核心混凝土应力-应变关系模型的基础上,利用数值解法成功地计算出钢管混凝土轴心受压时的荷载-变形全过程关系曲线,较为深入地认识了其力学性能。吕西林等^[21]通过试验研究了钢管混凝土柱的抗震性能,得出了如下结论:方钢管混凝土柱具有良好的抗震性能,其抗震性能受到柱的宽厚比、钢管内填充的混凝土强度、轴压比和不同的加载制度的影响。

方钢管混凝土材料同圆钢管混凝土相比具有多种独特优点,因此其应用前景广阔,发展潜力巨大。关于方钢管高强混凝土的研究还不够深入,仍需进行大量的研究。

1.3 CFRP 的应用及发展概况

1.3.1 CFRP 加固技术特点

FRP(fiber reinforced polymer)是指以纤维或其制品作为增强材料的一种复合材料,它以树脂基体为分散介质,以增强材料为分散相,二者有机组合所制成的复合材料^[22]。近年来在国内外土木工程中的应用日趋广泛。目前,常用的 FRP 材料主要是树脂基体的玻璃纤维(GFRP)、碳纤维(CFRP)、芳纶纤维(AFRP)^[23]。FRP 的主要特点^[24,25]:①抗拉强度高;②抗腐蚀性和耐久性好;③自重轻,施工方便;④热膨胀系数与混凝土相近;⑤弹性模量小;⑥抗剪强度低。常见的约束形式有 FRP 管约束、外包 FRP 布约束、纤维丝缠绕约束等。

当混凝土受到轴向压缩荷载时会产生侧向膨胀。在 CFRP 约束混凝土中,这种膨胀会使 CFRP 产生环向拉伸变形和拉伸应力,从而反过来对混凝土产生约束。对于 CFRP 这种线弹性材料,其中的环向拉应力会随着混凝土的侧向膨胀应变的增大而线性增大,对混凝土产生的约束压力也会随之线性增大。这是 CFRP 约束混凝土区别于钢管或者钢箍筋约束混凝土的最大特点。在钢管或者钢箍筋约束混凝土中,钢管或钢筋在环向应变不断增加时会发生屈服,其拉应变增大,而拉应力保持屈服强度不变,因此对混凝土产生的约束压力保持恒定。

用 CFRP 对旧有混凝土柱结构件进行修复加固时,一般是先将纤维布沿柱子环向缠绕,然后用环氧树脂将纤维布与旧有混凝土黏结而成为 CFRP 约束混凝土柱。CFRP 约束混凝土,具有承载能力高、自重轻、防腐性能好和美观等优点,被越来越广泛地应用于旧有结构加固和新建结构承重构件,已经取得良好的经济、建筑效果。

除了直接应用于建筑结构的维修加固外,预制 CFRP 管还可以替代钢管而被应用于柱结构,即在其核心中浇灌混凝土后而成为所谓的 CFRP 管约束混凝土柱。该类柱特点是利用 CFRP 和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用,即 CFRP 管对混凝土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,塑性和韧性性能大为改善。同时由于混凝土的存在可以避免或延缓 CFRP 管过早地发生局部破坏,从而可以保证其材料性能的充分发挥;另外,在 CFRP 管约束混凝土柱的施工过程中,CFRP 管还可以作为浇注其核心混凝土的模板。总之,通过 CFRP 和混凝土组合而成为 CFRP 管约束混凝土柱,不仅可以弥补两种材料各自的缺点,而且能够充分发挥二者的优点。

为了合理分析 CFRP 管约束混凝土的力学性能,进一步研究其承载力计算方法,国外学者多年来对 CFRP 管约束混凝土柱力学性能和设计方法开展了深入细