

新型钢—混凝土组合结构 抗震性能研究与 基本力学性能分析

刘阳冰 杨庆年 王爽●著

XINXING GANG-HUNNINGTU ZUHE JIEGOU
KANGZHEN XINGNENG YANJIU YU
JIBEN LIXUE XINGNENG FENXI



西南大学出版社

新型钢—混凝土组合结构 抗震性能研究与 基本力学性能分析

刘阳冰 杨庆年 王 爽○著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

新型钢—混凝土组合结构抗震性能研究与基本力学性能分析 / 刘阳冰, 杨庆年, 王爽著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5643-5813-6

I. ①新… II. ①刘… ②杨… ③王… III. ①钢筋混凝土结构—组合结构—抗震性能—研究 ②钢筋混凝土结构—组合结构—力学性能—性能分析 IV. ①TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 238824 号

新型钢-混凝土组合结构抗震性能研究与基本力学性能分析

刘阳冰 杨庆年 王 爽 / 著

责任编辑 / 杨 勇

助理编辑 / 王同晓

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印张 22.75 字数 424 千

版次 2017 年 9 月第 1 版 印次 2017 年 9 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5813-6

定价 88.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

随着科技的发展和社会需求的变化,建筑结构向高层次、高强度和组合结构发展,结构体系的选择将根据建筑的外观和功能效果以及可造性来决定,进而使得结构体系更为多样化,结构材料更具多样性。在 20 世纪 80 年代以前,我国的高层建筑大多采用钢筋混凝土的结构形式,但随着建筑高度的不断增加和使用功能的日趋复杂,单一的结构形式已不能满足建筑设计的要求。钢-混凝土组合结构同时具有钢结构和混凝土结构的优点,得到了迅速的发展和越来越广泛的应用,成为目前高层建筑领域内应用较多的一种结构形式。

虽然钢-混凝土组合结构在我国得到迅速的发展和越来越广泛的应用,但目前国内外大部分组合结构还未经过强震检验,对结构抗震性能的研究亦不够充分。本书采用理论分析、试验研究和数值模拟等方法,对新型钢-混凝土组合结构的抗震性能、破坏模式、地震易损性以及新型双钢板混凝土组合结构的受力和变形性能等问题进行系统的研究。主要工作和取得的成果有:

(1) 在已有方钢管混凝土构件试验和理论研究的基础上,通过理论分析和大量的参数分析,提出了一种方钢管混凝土柱塑性屈服面的快速确定方法。对现有方钢管混凝土柱和钢-混凝土组合梁的三折线弯矩-曲率关系曲线进行了修正,提出了适用于钢-混凝土组合梁和方钢管混凝土柱弹塑性分析的四折线弯矩-曲率本构曲线。

(2) 在已有圆钢管混凝土试验和理论研究的基础上,分别采用纤维模型法和实体有限元法对圆钢管混凝土框架结构进行了静力和动力弹塑性对比分析,结果表明两种模型化方法均具有较好的适用性,且是否考虑钢管与核心混凝土间的黏结滑移对计算结果无明显影响。该结论为纤维模型中钢管与核心混凝土之间应变协调符合平截面假定的合理性提供了一定的理论依据。

(3) 进行了钢-混凝土组合框架结构抗震性能分析,较为系统地对比了五种不同类型框架结构的受力、变形性能以及破坏状态,为组合框架结构的抗震设计提供参考。

(4) 对钢梁-圆钢管混凝土柱框架结构和组合梁-方钢管混凝土柱框架结构的“强柱弱梁”问题进行了分析,讨论了柱和梁的极限弯矩比与梁柱线刚度比对结构破坏机制的影响。提出了钢管混凝土柱组合框架“强柱弱梁”的设计公

式,为组合框架结构的设计提供参考。

(5)给出了一种基于性能的结构地震易损性分析方法。定义了结构整体和楼层的四个极限破坏状态,提出了基于结构极限破坏状态确定结构抗震性能水平限值的方法。对两个不同类型的钢-混凝土组合框架结构进行了地震易损性分析,对结构的易损性能进行了评估。讨论了地震需求变异性的影响,研究了基于全概率和半概率的结构地震易损性分析方法的差异和转化关系。

(6)对组合框架-混凝土核心筒结构的抗震性能进行了弹塑性地震反应分析和参数影响分析。研究了框架伸臂梁连接方式,梁柱截面、核心筒厚度等参数对结构变形和受力性能的影响,探讨了组合框架-混凝土核心筒结构的地震破坏模式,分析了结构变形和外框架剪力随地震作用增大的变化规律,可为结构的设计提供参考。对比了 Pushover 方法和弹塑性时程方法计算结果的差别,讨论了 Pushover 方法的适用性。

(7)进行了8片双钢板-混凝土组合墙的轴心受压试验,研究了不同钢材强度和栓钉间距对钢板局部屈曲、整体破坏形态以及承载能力的影响规律。建立了组合剪力墙的有限元分析模型并对试验结果进行了分析。在试验研究和数值分析的基础上,对可能影响墙钢板局部屈曲的各种因素进行了参数影响分析。

本书编写分工为:南阳理工学院刘阳冰编写1、2、3、4、5、6章,南阳理工学院杨庆年编写第7、10章,南阳理工学院王爽编写8、9章。全书最后由刘阳冰统一修订与统稿。在本书的撰写过程中,感谢刘晶波教授给予的有益指导,感谢陈芳、廖元鑫、曹天峰等研究生参与本书部分内容的研究工作,感谢孙浩、牛箫蕾为本书部分插图所付出的辛勤劳动。

本书中的研究工作得到了国家自然科学基金项目(50978141)、教育部博士学科点新教师基金项目(20110191120032)、河南省高等学校重点科研资助项目(16B560005)、南阳理工青年学术骨干项目和博士科研启动基金项目等课题的支持,特此致谢。

作者虽然长期从事组合结构和抗震工程领域的科研与教学工作,但由于水平有限和知识面的局限性,书中难免存在不妥和疏漏之处,敬请批评指正。

著者

2017年6月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 钢-混凝土组合框架结构研究现状	4
1.2.1 钢-混凝土组合框架的试验研究	4
1.2.2 钢-混凝土组合框架的计算研究	7
1.3 框架-核心筒结构体系研究现状	9
1.3.1 剪力墙弹塑性分析模型	10
1.3.2 试验研究现状	13
1.3.3 理论研究	15
1.4 结构抗震分析方法综述	17
1.4.1 静力分析方法	17
1.4.2 反应谱分析法	17
1.4.3 动力时程分析法	18
1.4.4 静力弹塑性 (Pushover) 分析方法	18
1.5 结构地震易损性分析研究	19
1.6 本书的主要研究内容	22
1.6.1 研究对象和方法	22
1.6.2 研究内容	22
参考文献	24
2 基于截面的钢-混凝土组合构件弹塑性模型化方法	34
2.1 方钢管混凝土柱弹塑性模型	34
2.1.1 弹性单元参数的确定	35
2.1.2 单元截面塑性屈服面与极限面	36
2.1.3 考虑材料变化的屈服面简化确定方法	46
2.1.4 弯矩-曲率骨架曲线	47

2.1.5	滞回模型	52
2.2	CFSST 柱弹塑性模型的试验验证	53
2.2.1	单调加载试验验证	53
2.2.2	往复荷载试验验证	55
2.3	钢-混凝土组合梁弹塑性模型	56
2.3.1	弹性单元基本参数的确定	56
2.3.2	弯矩-曲率骨架曲线与滞回模型	56
2.4	钢-混凝土组合梁弹塑性模型试验验证	59
2.5	小 结	60
	参考文献	61
3	基于纤维模型的钢-混凝土组合构件弹塑性模型	63
3.1	概 述	63
3.2	基于纤维模型的组合构件弹塑性模型	63
3.2.1	纤维模型简介	63
3.2.2	操作平台及纤维划分	64
3.2.3	材料强度取值规定	65
3.2.4	材料本构关系模型	65
3.2.5	材料的 $F-D$ 曲线拟合	68
3.2.6	材料的 $F-D$ 滞回关系	70
3.3	基于实体模型的组合构件弹塑性模型	71
3.3.1	实体模型简介	71
3.3.2	材料本构关系模型	72
3.3.3	单元类型选取及网格划分	73
3.3.4	边界及荷载添加	74
3.3.5	界面接触处理	75
3.4	弹塑性模型验证	76
3.4.1	静力弹塑性分析验证	76
3.4.2	动力弹塑性分析验证	81
3.5	小 结	83
	参考文献	83

4 钢-混凝土组合框架结构体系抗震性能分析	85
4.1 结构及材料模型	85
4.2 结构的弹性分析	87
4.2.1 单元弹性参数确定	87
4.2.2 模态分析	88
4.2.3 弹性内力和变形计算分析	89
4.2.4 多遇地震下弹性时程反应分析	102
4.3 弹性分析小结	106
4.4 钢-混凝土组合框架结构弹塑性动力时程分析	107
4.4.1 弹塑性位移结果分析	108
4.4.2 内力和结构破坏状态	110
4.5 小 结	114
参考文献	115
5 钢-混凝土组合框架的“强柱弱梁”问题分析	117
5.1 相关规范规定及研究意义	117
5.1.1 各国规范关于“强柱弱梁”问题的相关规定	117
5.1.2 研究意义	120
5.2 Pushover 与动力弹塑性时程分析方法对比分析	121
5.2.1 计算模型	122
5.2.2 Pushover 方法概述	122
5.2.3 不同侧向荷载分布形式结果比较	125
5.2.4 动力弹塑性时程分析方法概述	127
5.2.5 动力弹塑性时程分析	128
5.2.6 Pushover 与动力时程分析结果对比	133
5.3 结构破坏机制	139
5.4 SB-CFCST 框架结构破坏机制影响因素参数分析	140
5.4.1 参数定义	140
5.4.2 极限弯矩比影响	142
5.4.3 线刚度比对破坏机制的影响	159
5.4.4 不同轴压比下的适用性讨论	167

5.5 CB-CFSST 框架结构破坏机制影响参数分析	174
5.5.1 极限弯矩比（强度比）影响	175
5.5.2 线刚度比影响	180
5.6 小 结	181
参考文献	182
6 钢-混凝土组合结构性能水平限值确定方法	184
6.1 基于性能的整体结构地震易损性分析方法	184
6.2 基于结构极限破坏状态的性能水平限值的确定方法	187
6.3 结构计算模型及侧向荷载分布形式	189
6.3.1 计算模型	189
6.3.2 不同侧向荷载分布形式的比较	191
6.4 钢-混凝土组合框架结构量化指标限值	194
6.4.1 顶点位移角限值	195
6.4.2 楼层极限破坏状态的定义	196
6.4.3 层间位移角限值	197
6.4.4 量化指标小结	200
6.5 小 结	200
参考文献	201
7 基于性能的钢-混凝土组合框架地震易损性分析	203
7.1 结构-地震动系统的随机性	204
7.1.1 结构分析中的随机性	204
7.1.2 结构分析中的随机变量	205
7.2 结构-地震动随机样本生成	206
7.2.1 蒙特卡洛方法	206
7.2.2 结构模型	206
7.2.3 结构随机样本	207
7.2.4 地震波选取	209
7.2.5 结构-地震动样本生成	210
7.3 结构的概率地震需求分析	211
7.4 基于性能的结构易损性曲线的形成	216

7.4.1	基于设防水准的易损性曲线	216
7.4.2	不同量化指标易损性曲线比较	217
7.4.3	钢-混凝土组合框架结构易损性能比较	221
7.4.4	地震需求变异性讨论	223
7.5	基于全概率的结构易损性曲线	225
7.5.1	结构抗震性能水平的随机性问题	225
7.5.2	概率抗震性能水平分析	226
7.5.3	基于全概率的结构易损性曲线	228
7.6	基于概率的单体组合结构震害指数确定方法	230
7.6.1	震害指数	230
7.6.2	组合结构震害指数确定方法	231
7.6.3	算例分析	232
7.7	小 结	234
	参考文献	235
8	钢-混凝土组合框架-混凝土核心筒地震反应分析	237
8.1	框架伸臂梁连接方式	237
8.1.1	结构模型及材料模型	237
8.1.2	连接方式对结构变形性能的影响	239
8.1.3	连接方式对结构受力性能的影响	242
8.2	参数分析计算模型	248
8.2.1	结构刚度特征值	248
8.2.2	模型选取	249
8.3	结构变形规律分析	250
8.3.1	框架梁截面的影响	250
8.3.2	框架柱截面的影响	255
8.3.3	核心筒厚度的影响	256
8.3.4	楼层数的影响	257
8.3.5	结构刚度特征值对最大层间位移角分布的影响	258
8.4	外框架剪力及剪力分担率	259
8.4.1	框架梁截面的影响	259

8.4.2	框架柱截面的影响	261
8.4.3	核心筒厚度的影响	262
8.4.4	楼层数的影响	263
8.4.5	结构刚度特征值对框架最大剪力位置的影响	264
8.5	结构静力弹塑性分析模型	265
8.5.1	混凝土核心筒弹塑性分析模型	265
8.5.2	计算模型的选取	267
8.5.3	塑性铰布置	267
8.5.4	弹塑性分析模型验证	268
8.6	组合框架-混凝土核心筒结构弹塑性地震反应 Pushover 分析	272
8.6.1	结构破坏模式	272
8.6.2	结构变形比较	274
8.6.3	外框架承担剪力分析	277
8.7	组合框架-混凝土核心筒结构弹塑性地震反应动力时程分析	280
8.8	小 结	286
	参考文献	287
9	新型双钢板-混凝土组合墙轴心受压性能试验研究	289
9.1	双钢板-混凝土组合墙研究背景和现状	289
9.1.1	研究背景	289
9.1.2	研究现状	290
9.2	双钢板-混凝土组合墙轴心受压性能试验方案设计	295
9.2.1	试验目的	295
9.2.2	试件设计及制作	296
9.2.3	试验方案	308
9.3	双钢板-混凝土剪力墙轴心受压性能试验结果及分析	310
9.3.1	试验过程及现象描述	310
9.3.2	试验结果分析	321
9.4	有限元数值模拟和距厚比限值分析	327
9.4.1	双钢板-混凝土组合剪力墙有限元模型	327
9.4.2	荷载-位移曲线	336

9.4.3 距厚比限值分析	339
9.5 小 结	344
参考文献	345
10 结论与展望	348
10.1 主要成果及结论	348
10.2 研究工作展望	351

1 绪论

1.1 研究背景

地震是自然界中危害最严重的灾害之一,破坏能力强,对人类危害极大,也是大部分工程结构的关键控制荷载之一。我国是一个地震频发的国家,6度以及6度以上地震区几乎遍及全国各个省和自治区,约有一半城市位于基本烈度7度和7度以上地区^[1]。2010年智利8.8级地震和海地7.3级地震,2008年我国汶川8.0级地震和1976年唐山7.8级地震等均造成了人员的巨大伤亡、房屋的大量破坏和倒塌,从而引发了一系列社会问题和经济问题。

建筑物是人类日常生活的空间,地震造成建筑物的倒塌破坏必将给人类造成严重灾害。据世界主要地震资料统计,世界上130多次伤亡巨大的地震中,95%以上的人员伤亡是由于建筑物倒塌所致^[2-5]。随着科技的发展和社会需求的变化,高层建筑结构向高层次、高强度和组合结构发展,结构体系的选择将根据建筑的功能效果和外观以及建筑的可造性来决定,进而使得结构体系更为多样化,结构材料更具多样性。在20世纪80年代以前,我国的高层建筑大多采用钢筋混凝土的结构形式,但随着建筑高度的不断增加和使用功能的日趋复杂,单一的结构形式已不能满足建筑设计的要求。由钢-混凝土组合梁或组合柱作为主要受力构件的组合结构体系兼有钢结构施工速度快和混凝土结构刚度大等优点,以及结构自重轻、抗震性能好、施工速度快、环保以及综合经济效益好,符合国家十三五规划对建筑行业的发展战略^[6]。因此,钢-混凝土组合结构得到了迅速的发展和越来越广泛的应用,成为目前高层、超高层建筑领域内应用较多的一种结构形式^[7-11]。近年来,国内建成或在建的高层及超高层建筑数量已达数百幢之多,其中除少数仍采用传统的钢筋混凝土结构形式外,大多数尤其是超高层建筑往往采用钢-混凝土组合结构形式。例如上海金茂大厦、深圳中兴研发大楼、广州珠江新城西塔、大连国贸中心、天津富润中心等高层建筑或超高层建筑都全部或部分采用钢-混凝土组合结构形式。

钢-混凝土组合结构是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构。钢-混凝土组合结构是指将钢结构与混凝土结构通过某种方式组合在一起共同工作的一种结构形式，两种结构材料组合后的整体工作性能要明显优于两者性能的简单叠加。钢-混凝土组合构件主要有钢-混凝土组合梁、钢-混凝土组合柱和钢-混凝土组合墙。钢-混凝土组合梁是由钢梁和混凝土板通过抗剪连接件连成整体而共同受力的横向承重构件，钢-混凝土组合柱包括钢管混凝土柱和型钢混凝土柱。实际应用中，为了节约钢材和降低造价，大多数多层和小高层钢结构房屋常采用钢-混凝土组合柱代替钢柱。组合柱在我国目前又以钢管混凝土柱为首选形式。钢-混凝土组合构件可应用于各种结构体系中从而形成组合框架结构体系、组合框架-剪力墙体系、组合框架-核心筒体系、组合框筒结构体系等。

近年来建成的高层建筑大部分采用了框架-剪力墙（核心筒）结构形式，随着建筑高度的日益增加，底部剪力墙需要承担的竖向荷载越来越大，为了保证剪力墙的延性，需要较厚的剪力墙才能满足轴压比的限值和混凝土强度等级的相关要求，而过厚的墙体不仅施工复杂、浪费空间，而且增加结构自重、地震作用以及基础造价，还相应地引起外框架柱尺寸增大，此时结构的整体成本和规模均难以控制。因此，剪力墙结构形式的优化成为超高层建筑结构发展的关键之一^[12]。为改善剪力墙延性，提高结构抗震性能，国内外学者提出了很多改进措施，这些改进措施大多是通过钢与混凝土的有效组合，形成组合剪力墙，如中部配置型钢的钢骨混凝土剪力墙、内嵌钢板的混凝土剪力墙、单侧钢板混凝土剪力墙以及双钢板混凝土剪力墙等。对于前三种剪力墙，在工程应用中存在着混凝土开裂难控制，裂缝外露以及施工相对比较困难等不足；而双钢板混凝土剪力墙是解决上述不足的有效途径之一，且作为一种新型结构其具有结构强度高、抗震性能好、施工方便快捷等特点，已在国内外核电站厂房结构和特种结构中得到广泛应用，近年来逐渐应用于城市道路桥梁、高层建筑等许多领域，是改善混凝土剪力墙抗震性能的重要发展方向之一，已成为工程研究的热点^[13]。

钢-混凝土组合结构同钢筋混凝土结构相比，可以减轻自重，减小地震作用，减小构件截面尺寸，增加有效使用空间，增加构件和结构的延性等；同钢结构相比，可以减小用钢量、降低造价、提高刚度、增加稳定性和整体性，增强结构的防火性和耐久性等。近年来，钢-混凝土组合结构在我国的应用实践表明，这一结构体系具有显著的技术经济效益和社会效益，适合我国基本

建设的国情,已成为结构体系的重要发展方向之一。

钢-混凝土组合结构是由钢、混凝土两种材料性能完全不同的结构组成,其抗震性能研究比钢结构和钢筋混凝土结构更复杂。虽然组合结构较少经历地震考验,缺乏震害资料,但在美国和日本均有由钢框架或型钢混凝土框架与钢筋混凝土筒体(或剪力墙)组成的混合结构的局部破坏记录,破坏的原因除了地震动较大之外,还与结构布置、结构设计以及构造措施等有很大关系。同样,由于我国很多城市位于地震高烈度区,钢-混凝土组合结构也可能在强震作用下发生破坏,因此钢-混凝土组合结构抗震性能的研究是不能忽略的。

国内外对钢-混凝土组合结构的基本构件^[14-17](钢-混凝土组合梁、钢管混凝土柱等)和不同类型组合构件的节点^[15,18-21]在静载和反复荷载作用下的力学性能进行了大量的理论和试验研究,提出了一些用于组合构件弹塑性分析的力学模型。但是由于组合构件的多样性、受力的复杂性以及试验手段、条件的限制,或由于试验目的的局限,这些力学模型具有一定的局限性,是否适用于钢-混凝土组合结构整体弹塑性分析都需要进一步研究。通过对钢-混凝土组合构件弹塑性模型的研究可以为组合结构整体性能的分析奠定基础。

钢-混凝土组合结构作为继钢结构和混凝土结构之后发展起来的一种重要结构形式,当前最重要的一个发展方向是从构件层次的研究转移到结构体系的研究上来,以便为实际的工程应用提供理论基础和可靠的技术保证。虽然钢-混凝土组合结构在工程中得到了广泛的应用,但对钢-混凝土组合结构整体抗震性能尚未开展系统研究^[22-27],关于整体结构的抗震性能与试验研究工作还较为滞后。在我国,随着社会经济的发展,为满足建筑的要求,组合结构体系日趋多样化,建筑平面布置与竖向体型也越来越复杂,这就给高层建筑结构分析和设计提出了更高的要求。国内还没有出台有关高层钢-混凝土组合结构的抗震设计规程或规范,对其抗震性能研究也尚不够充分与完善,与之相应的试验工作开展的也不多,存在的主要抗震性能问题没能很好地解决,如各种组合结构的变形性能、受力机制、破坏状态、易损性能等。

由于对钢-混凝土组合结构抗震性能的研究开展不充分、设计依据不足,目前已建成的组合结构绝大部分分布在抗震设防烈度较低的城市。近年来,钢-混凝土组合结构已逐渐在我国高烈度区开始应用,如何确保这种新型的结构体系在强地震作用下的安全性是一个亟待解决的问题。因此,对钢-混凝土

组合结构体系的抗震性能、易损性能以及新型组合结构形式基本力学性能开展系统和深入的研究，确定优良的组合结构抗震体系，提出实用的设计方法和建议，以及对组合结构的地震易损性进行评估，均具有重要的意义。

1.2 钢-混凝土组合框架结构研究现状

欧洲规范 4 (EC4) ^[28] 中对钢-混凝土组合框架作了如下定义：一个组合结构框架是指结构中的部分或全部梁、柱为组合构件，而其余的构件均为钢构件的框架结构。其中，不考虑结构中其他类型构件的使用，例如混凝土、预应力混凝土构件及砖石砌块等。与钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土框架相比，由此定义的组合框架性能比较接近钢框架。目前，我国研究人员和结构工程师普遍采用的组合结构定义为：将钢结构与混凝土结构通过某种方式组合在一起共同工作的一种结构形式。因此，主要承重构件为钢-混凝土组合构件的结构，为钢-混凝土组合结构。因此，组合框架结构的范围也随之扩大。本书所指钢-混凝土组合框架结构均采用此定义，考虑主要承重构件（梁和柱）部分或全部为钢-混凝土组合构件，而其余构件为钢筋混凝土构件或钢构件的框架结构。下面分别从试验研究和计算分析两个方面介绍钢-混凝土组合框架结构（钢管混凝土框架和组合梁框架）的研究现状。

1.2.1 钢-混凝土组合框架的试验研究

对于常用的钢-混凝土组合结构体系来讲，钢-混凝土组合框架是其基本结构，广泛应用于钢-混凝土组合框架结构、钢-混凝土组合框架-核心筒结构、组合框筒结构等多种结构体系中。组合框架作为组合结构的基本结构有不同的类型，如钢管混凝土柱框架、型钢混凝土框架、组合梁框架等。目前对钢管混凝土框架和型钢混凝土框架的试验研究相对较多，但对组合梁框架尤其是组合梁-钢管混凝土柱框架的试验研究工作较少^{[27, 29-31][49]}。

对于钢梁-钢管混凝土柱框架结构，目前开展的低周反复水平荷载试验研究主要有：钟善桐、张文福等^[32]对 4 个钢梁-圆钢管混凝土柱单层单跨框架进行了恒定轴力和水平往复荷载共同作用下的试验研究。研究了轴压比、长细比、梁柱线刚度、钢材的屈服弯矩比对滞回曲线形状的影响。结果表明，试

件的侧向力和位移的滞回环很饱满,刚度退化缓慢,表现出很大的延性和很高的抗震耗能能力。李斌等^[33]进行了工字梁-单层单跨圆钢管混凝土柱平面框架的试验研究,实测结果表明,钢管混凝土框架具有良好的变形能力,曲线形状饱满,无捏拢现象,基本无刚度、强度退化现象。李忠献等^[34]对一榀 2 跨 3 层钢梁-圆钢管混凝土柱框架结构模型,进行恒定竖向荷载和低周反复水平荷载共同作用下的抗震性能试验研究。结果表明:框架的变形能力、承载能力、延性、耗能能力等性能均满足延性框架的抗震要求,由此可以得到钢管混凝土框架结构的抗震性能优于钢筋混凝土框架结构和钢框架结构。王来、王铁成等^[35]设计了一榀 2 跨 3 层钢梁-方钢管混凝土柱框架模型,通过拟静力试验研究了框架在低周反复水平荷载作用下的滞回性能,并进一步探讨了承载力、延性、耗能及变形能力、刚度退化和破坏机制等性能。王文达、韩林海等^[36]进行了 4 组 12 榀钢梁-圆形及方形截面钢管混凝土柱平面框架在恒定轴力和水平往复荷载共同作用下的试验研究,研究了柱截面形状、含钢率、轴压比、梁柱线刚度比等变化时钢梁-钢管混凝土柱平面框架的力学性能及破坏规律。结果表明,钢管混凝土框架具有良好的抗震耗能能力。王静峰,王海涛等^[37]进行了 2 榀两层单跨钢管混凝土柱与钢梁单边高强螺栓端板连接框架试件的拟静力试验,研究柱截面类型和端板类型对框架破坏形式和抗震性能的影响。Matsui^[38]和 Morino、Kawaguchi 等^[39,40]进行了单层单跨的 H 型钢梁-方钢管混凝土柱平面框架在反复荷载作用下的试验研究。上述试验研究得到的钢管混凝土框架的滞回曲线饱满,稳定性好,没有明显的刚度退化现象,说明此类结构体系具有良好的抗震性能。

对于钢梁-钢管混凝土柱框架结构,开展的振动台试验研究主要有:童菊仙等^[41]对一个 5 层 2 跨两开间的方钢管混凝土柱-钢梁框架结构,进行了无侧向耗能支撑和有侧向耗能支撑两种结构体系的动力特性试验和地震模拟振动台试验。许成祥等^[42]对一个单跨 8 层两开间钢管混凝土柱-钢梁框架结构模型进行了模拟地震振动台试验。研究了模型结构在地震作用下加速度、位移和应变反应。黄囊云、周富霖^[43]进行了 2 跨 5 层钢骨混凝土梁-圆钢管混凝土柱平面框架振动台试验研究。以上试验结果均表明,根据现行规范所设计的钢管混凝土柱框架能满足地震区的抗震设防要求,具有较好的抗震性能。

钢-混凝土组合梁框架的试验研究主要有:Kuniaki 等^[44]分别对单层单跨的钢框架和组合梁-钢框架两种形式的平面框架进行了低周反复荷载试验和拟动力试验研究,研究了混凝土楼组合作用对框架结构性能的影响。试验