


# 可恢复功能 波形钢板-混凝土组合剪力墙

## 抗震性能与设计方法研究

KEHUIFU GONGNENG BOXINGGANGBAN - HUNNINGTU ZUHE JIANLIQIANG  
KANGZHEN XINGNENG YU SHEJI FANGFA YANJIU

王 威 苏三庆 著

陕西新华出版传媒集团  
 陕西科学技术出版社  
Shaanxi Science and Technology Press

# 可恢复功能波形钢板 - 混凝土组合剪力墙 抗震性能与设计方法研究

王 威 苏三庆 著

陕西新华出版传媒集团  
陕西科学技术出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

可恢复功能波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能与设计方法研究 / 王威, 苏三庆著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2019. 8

ISBN 978 - 7 - 5369 - 7596 - 5

I. ①可… II. ①王… ②苏… III. ①钢板-混凝土结构-框架剪力墙结构-防震设计 IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 156069 号

## 内容提要

本书较全面系统地阐述了高层、超高层建筑结构中关键受力构件剪力墙的可恢复功能抗震设计方法,创新性地提出了高层建筑中一种新型组合剪力墙结构构件——波形钢板-混凝土组合剪力墙,以克服平钢板-混凝土剪力墙中钢板侧向刚度差、钢板与混凝土易剥离的缺点。研究了波形钢板-混凝土组合剪力墙的抗震性能和破坏特征,建立了波形钢板与混凝土组合剪力墙的抗震设计方法。从抗震控制及消能减震角度出发,利用结构“保险丝”原理,提出剪力墙破坏的损伤控制机制和可恢复功能抗震设计方法,以达到震后功能快速恢复的目标。书中关于波形钢板剪力墙、波形钢板-混凝土组合剪力墙、混凝土与波形钢板界面黏结滑移、带可更换墙趾消能阻尼器的波形钢板及组合剪力墙有关的理论、试验、数值模拟、计算公式等内容均为本书作者提出。

本书可供结构工程、防减灾工程及防护工程专业的研究生及土木工程专业的高年级学生参考,也可供从事工程设计的人员参考。

## 可恢复功能波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能与设计方法研究

王 威 苏三庆 著

---

责任编辑 林成岗

封面设计 前程设计

---

出版者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社  
西安市曲江新区登高路 1388 号 陕西新华出版传媒产业大厦 B 座  
电话 (029)81205187 传真 (029) 81205155 邮编 710061  
http: //www. snstp. com

发 行 者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社  
电话(029)81205180 81206809

印 刷 陕西天地印刷有限公司  
规 格 880mm × 1230mm 16 开本

印 张 25. 25

字 数 630 千字

版 次 2019 年 8 月第 1 版  
2019 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5369 - 7596 - 5

定 价 68. 00 元

---

版权所有 翻印必究

## 前 言

近年来,随着建筑技术的不断进步,在我国发生的历次地震中,建筑结构倒塌和人员伤亡数量得到了有效的控制,但地震造成的建筑结构破坏严重、震后难以修复等灾害损失问题,依然对经济和社会影响巨大。震后重建速度慢,导致人们无法恢复正常的生产生活;有的需要修复,但修复周期过长,致使建筑功能得不到及时恢复。因此,对于建筑结构构件的性能设计,不仅要考虑遭受一次地震时能达到预定的性能目标,还要考虑设计一种具有可恢复功能的结构,使其在震后能尽快地恢复正常使用功能。传统抗震设防的目标也应从“大震不倒、保护生命财产安全方面”向“震后迅速恢复城市、居民正常生活秩序方向”发展。这就对建筑抗震提出了新的要求:需要提供一种可在地震之后迅速恢复功能的结构或构件。

2009年,美日学者在 NEES/E - Defense 美日工程第2阶段合作研究会议上,首次提出将“可恢复功能城市(Resilient City)”作为地震工程合作的大方向,标志着可恢复功能结构成为抗震研究的主流方向之一。可恢复功能抗震结构是指应用摇摆、自复位、可更换和附加耗能装置等技术,在遭受地震(设防或罕遇水准)作用时,保持可接受的功能、地震后不需修复或在部分使用状态下稍加修复即可恢复其使用功能的结构。

剪力墙作为高层建筑中重要的抗侧力构件,在结构中承担着大部分的水平荷载,是最关键的受力构件,在设计时通常是以弯曲破坏模式进行设计,以保证其具备一定延性,尽可能减小其在强地震作用下的损伤。然而,在超越设防烈度的地震作用下,钢筋-混凝土剪力墙根部或底部加强位置的混凝土往往易出现严重压溃、受压钢筋严重压屈的情况,这是不可避免的局部破坏。虽然这些损伤不会使结构倒塌,却会导致该类关键构件丧失抗震功能且不能修复,使整个结构不能恢复使用,从而造成巨大的经济损失。

为了解决剪力墙震后墙趾处易发生塑性破坏且难以修复的难题,本书作者近年来一直从事该项工作的研究,并提出一种新型组合剪力墙结构构件——波形钢板-混凝土组合剪力墙,以克服平钢板-混凝土剪力墙中钢板侧向刚度差、钢板与混凝土易剥离的缺点。本书作者研究了波形钢板-混凝土组合剪力墙的抗震性能和破坏特征,建立了组合剪力墙的抗震设计方法,从抗震控制及消能减震角度出发,利用结构“保险丝”原理,提出剪力墙破坏的损伤控制机制,以达到震后功能快速恢复的目标。

本书内容基于国家自然科学基金项目“可恢复功能波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能与设计方法研究”(项目编号51578449)的研究成果,内容包含了近几年来作者所开展的研究,主要如下:  
①波形钢板剪力墙抗震性能;②约束边缘构件与波形钢板剪力墙刚度匹配关系;③波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能;④正对称波形钢板阻尼器滞回性能;⑤反对称波形钢板阻尼器滞回性能;⑥波形钢板与混凝土界面黏结滑移性能;⑦带栓钉波形钢板与混凝土界面抗剪承载力;⑧带可更换

墙趾构件的波形钢板剪力墙抗震性能;⑨带可更换墙趾构件的波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能。

本书涉及的研究成果是作者与作者所指导的已毕业、在读研究生共同完成的。研究生包括硕士研究生兰艳、高敬宇、李元刚、张龙旭、李艳超、王鑫、任英子、黄思考、赵春雷、任坦、王俊、张恒、董晨阳、刘格炜、韩斌、梁宇建、向照兴、黄元昭、丁小波、仲凯、王万志、赵昊田,博士研究生宋江良等。在本书成稿修改过程中,以下研究生协助修改了部分内容:第1章,王俊、宋江良;第2章,任英子、仲恺、黄思考、向照兴;第3章,刘格炜、韩斌;第4章,张恒、向照兴、梁宇建;第5章,王俊、梁宇建、向照兴;第6章,赵春雷、刘格炜、董晨阳、丁小波;第7章,任坦、赵春雷、刘格炜、董晨阳、丁小波;第8章,任英子、韩斌、仲凯;第9章,王鑫、黄元昭、王万志;第10章,宋江良;参考文献,向照兴。此外,参加全书校稿工作的还有硕士生侯铭岳、范咪咪、王雅慧、赵昊田、宋鸿来、孙壮壮、李煜、徐善文、王冰洁、甄国凯,博士生权超超、罗麒锐等。全书由作者王威、苏三庆负责具体内容的修改和统稿。同济大学鲁正教授审阅了本书稿,并提出了宝贵的修改意见。在此向所有为此书付出辛劳和努力的人,一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不当与错误之处,敬请读者批评指正。

王威 苏三庆  
2019年4月于西安

---

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 可恢复功能防震结构概述	1
1.1.1 可恢复功能防震结构的设计理念	1
1.1.2 可恢复功能防震结构的设计方法	2
1.2 钢板剪力墙及其组合剪力墙的发展与应用	4
1.2.1 钢板剪力墙的发展及应用	4
1.2.2 钢板-混凝土组合剪力墙的发展及应用	8
1.3 钢-混凝土黏结滑移课题研究意义	10
1.3.1 型钢-混凝土黏结滑移研究综述	10
1.3.2 钢板-混凝土黏结滑移研究综述	11
1.4 本书主要研究内容	13
第 2 章 波形钢板剪力墙抗震性能试验研究	15
2.1 波形钢板剪力墙试验研究方案	15
2.1.1 试验目的	15
2.1.2 试件的设计与制作	15
2.1.3 材性试验	18
2.1.4 试验的加载	20
2.1.5 测点布置及测量内容	22
2.1.6 试验现象及试件破坏形态	23
2.2 波形钢板剪力墙抗震性能分析	26
2.2.1 滞回曲线和骨架曲线	26
2.2.2 特征荷载与位移	28
2.2.3 延性和耗能能力	29
2.2.4 刚度和承载力退化	31
2.2.5 波形钢板剪力墙应变分析	33
2.3 ABAQUS 有限元非线性数值分析	35
2.3.1 ABAQUS 有限元软件及非线性简介	35
2.3.2 ABAQUS 有限元模型的建立	36
2.3.3 ABAQUS 有限元模型的验证与分析	39
2.4 波形钢板剪力墙抗震性能参数分析	43

2.4.1	高厚比 $\beta$	44
2.4.2	波角 $\theta$	45
2.4.3	轴压比 $n$	46
2.5	钢板剪力墙约束边缘构件与内嵌钢板刚度匹配研究	48
2.5.1	模型的建立	48
2.5.2	H型钢柱不同翼缘宽度的数值模拟	50
2.6	本章小结	54
2.6.1	结论	54
2.6.2	展望	54
第3章	波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能	56
3.1	研究背景	56
3.1.1	钢板-混凝土组合剪力墙发展及应用	56
3.1.2	波形钢板-混凝土组合剪力墙的研究现状	57
3.2	波形钢板-混凝土组合剪力墙的试验研究	60
3.2.1	试验目的	60
3.2.2	试件的设计及制作	60
3.2.3	材性试验	63
3.2.4	试验加载及测点布置	64
3.2.5	试验现象及试件破坏形态分析	65
3.3	波形钢板-混凝土组合剪力墙的抗震性能分析	72
3.3.1	荷载-位移曲线	72
3.3.2	特征荷载和特征位移	73
3.3.3	延性和耗能能力分析	74
3.3.4	刚度和承载力退化	75
3.3.5	波形钢板应变分析	76
3.4	波形钢板-混凝土组合剪力墙的 ABAQUS 有限元模拟	78
3.4.1	ABAQUS 有限元模型的建立	78
3.4.2	ABAQUS 有限元分析结果	82
3.5	波形钢板-混凝土组合剪力墙的抗剪承载力研究	88
3.5.1	波形钢板抗剪承载力	88
3.5.2	波形钢板-混凝土组合剪力墙抗剪承载力	92
3.5.3	波形钢板-混凝土组合剪力墙的剪力分担率	94
3.5.4	理论计算结果与试验结果对比	96
3.5.5	波形钢板-混凝土组合剪力墙的设计建议	96
3.6	本章小结	96
3.6.1	结论	96
3.6.2	展望	97
第4章	正对称波形钢板阻尼器的滞回性能试验研究	98
4.1	试验研究	98

---

4.1.1	波形软钢阻尼器的构造设计	99
4.1.2	材性试验	100
4.1.3	试验加载方案及测点布置	101
4.1.4	试验现象	103
4.1.5	受力机理分析	107
4.2	受力性能分析	108
4.2.1	滞回曲线	108
4.2.2	骨架曲线	109
4.2.3	延性和承载力	109
4.2.4	耗能能力	110
4.2.5	等效刚度和承载力退化	112
4.2.6	应变分析	113
4.3	有限元分析	116
4.3.1	有限元模型的建立	116
4.3.2	应力云图与变形对比	117
4.3.3	滞回曲线与骨架曲线对比	118
4.3.4	参数拓展分析	119
4.4	钢框架弹塑性地震反应分析	136
4.4.1	设有波形软钢阻尼器的钢框架建模	136
4.4.2	钢框架的模态分析及其阻尼计算	137
4.4.3	地震波的选取与调整	138
4.4.4	多遇地震作用下的钢框架减震分析	140
4.4.5	罕遇地震作用下的钢框架减震分析	142
4.5	本章小节	143
4.5.1	结论	143
4.5.2	展望	144
<b>第5章</b>	<b>波形反对称钢板阻尼器的力学性能试验研究</b>	<b>145</b>
5.1	波形反对称钢板阻尼器的试验研究	145
5.1.1	材性试验	145
5.1.2	拟静力试验研究	147
5.2	波形反对称钢板阻尼器的有限元分析	154
5.2.1	有限元分析结果与试验结果的对比	154
5.2.2	几何拓展因素分析	163
5.3	波形反对称钢板阻尼器的受力机理分析	167
5.3.1	钢板阻尼器的受力机理分析	167
5.3.2	阻尼器的优化设计	171
5.4	本章小结	173
5.4.1	结论	173
5.4.2	展望	173

<b>第 6 章 波形钢板混凝土界面黏结滑移性能试验研究</b> .....	174
6.1 界面黏结滑移性能试验研究方案 .....	174
6.1.1 试验试件设计与制作 .....	174
6.1.2 试件测量与加载方案 .....	176
6.2 界面黏结滑移性能试验结果 .....	179
6.2.1 试验过程与现象 .....	179
6.2.2 破坏形态特征分析 .....	180
6.2.3 荷载滑移曲线特征分析 .....	183
6.2.4 特征荷载与滑移量 .....	185
6.3 界面黏结强度分析 .....	186
6.3.1 黏结强度影响因素分析 .....	186
6.3.2 特征黏结强度统计分析 .....	186
6.3.3 基准黏结滑移本构关系研究 .....	189
6.3.4 考虑位置函数的黏结滑移本构关系研究 .....	189
6.4 波形钢板应力应变分布规律 .....	193
6.4.1 波形钢板应变分布规律 .....	193
6.4.2 波形钢板应力分布规律 .....	201
6.5 波形钢板混凝土黏结滑移弹性力学公式的推导 .....	205
6.5.1 微滑移阶段与滑移阶段公式推导 .....	205
6.5.2 荷载下降阶段公式推导 .....	208
6.5.3 黏结滑移本构关系的建立与验证 .....	210
6.6 ANSYS 数值模拟分析界面黏结滑移性能 .....	212
6.6.1 单元选取 .....	212
6.6.2 材料本构模型 .....	214
6.6.3 黏结滑移本构在 ANSYS 中实现 .....	215
6.6.4 试件模型的建立 .....	215
6.6.5 模拟结果与试验对比分析 .....	217
6.7 本章小结 .....	229
6.7.1 结论 .....	229
6.7.2 展望 .....	230
<b>第 7 章 带栓钉波形钢板-混凝土黏结滑移性能试验研究与数值模拟</b> .....	231
7.1 带栓钉波形钢板-混凝土黏结滑移性能试验设计 .....	231
7.1.1 试件设计与制作 .....	231
7.1.2 试验加载及测量 .....	232
7.2 带栓钉波形钢板-混凝土黏结滑移性能试验结果分析 .....	233
7.2.1 试验过程与现象 .....	233
7.2.2 破坏形态特征分析 .....	234
7.2.3 荷载滑移曲线特征分析 .....	236
7.2.4 承载力影响因素分析 .....	239
7.2.5 黏结滑移曲线特征值的统计回归 .....	241
7.2.6 黏结滑移本构模型的建立 .....	242

7.2.7	波形钢板表面黏结滑移分布规律	244
7.2.8	荷载上升段栓钉应变分布图	246
7.3	带栓钉波形钢板-混凝土黏结滑移 ANSYS 模拟	247
7.3.1	带栓钉波形钢板-混凝土黏结滑移有限元模拟方法	247
7.3.2	有限元数值模拟结果分析	250
7.4	带栓钉波形钢板-混凝土剪力传递性能的 ABAQUS 模拟分析	258
7.4.1	单元的选择	258
7.4.2	模型本构关系	259
7.4.3	试件有限元模型的建立	261
7.4.4	有限元分析结果与试验对比分析	264
7.4.5	带栓钉波形钢板-混凝土抗剪滑移机理	270
7.5	带栓钉波形钢板-混凝土组合剪力墙的 ANSYS 有限元模拟	270
7.5.1	ANSYS 有限元模型的建立	271
7.5.2	黏结滑移本构的确定	273
7.5.3	ANSYS 有限元数值模拟结果分析	274
7.5.4	带栓钉波形钢板-混凝土组合剪力墙性能参数分析	280
7.5.5	带栓钉波形钢板-混凝土组合剪力墙的设计建议	284
7.6	带栓钉波形钢板-混凝土组合剪力墙 ABAQUS 有限元模拟	284
7.6.1	ABAQUS 有限元模型建立	285
7.6.2	有限元计算结果与试验对比分析	286
7.6.3	栓钉对波形钢板与混凝土组合效应的影响	293
7.6.4	带栓钉波形钢板-混凝土组合剪力墙受力性能参数分析	295
7.7	本章小结	301
7.7.1	结论	301
7.7.2	展望	302
第 8 章	带可更换墙趾构件的波形钢板剪力墙抗震性能研究	303
8.1	研究背景	303
8.1.1	波形钢板剪力墙研究现状	303
8.1.2	可更换剪力墙研究现状	303
8.1.3	本章主要研究内容	306
8.2	可更换波形钢板剪力墙试验方案	307
8.2.1	可更换剪力墙试件的设计及制作	307
8.2.2	材性试验	308
8.2.3	测量装置	309
8.2.4	试验加载	310
8.3	试验现象及分析	311
8.3.1	试验现象	311
8.3.2	滞回曲线	312
8.3.3	骨架曲线	312
8.3.4	延性和耗能能力	313
8.3.5	承载力退化	314

8.3.6	刚度退化	314
8.4	有限元分析	315
8.4.1	有限元模型	315
8.4.2	滞回曲线对比	316
8.4.3	骨架曲线对比	316
8.4.4	破坏特征对比	316
8.4.5	阻尼器与内嵌钢板匹配关系拓展分析	318
8.5	本章小结	319
8.5.1	结论	319
8.5.2	展望	320
第9章	带有可更换墙趾消能器组合剪力墙抗震性能试验研究	321
9.1	组合剪力墙墙趾可更换设计	321
9.1.1	剪力墙墙趾可更换设计理论	321
9.1.2	波形钢板-混凝土组合剪力墙墙趾可更换设计方法	322
9.1.3	带可更换墙趾消能器的波形钢板-混凝土组合剪力墙的承载力计算	326
9.2	带可更换墙趾消能器组合剪力墙试验研究	331
9.2.1	试验目的	331
9.2.2	试件的设计及制作	332
9.2.3	材性试验	338
9.2.4	试验加载及测点布置	339
9.2.5	数据处理	341
9.2.6	试验现象分析	343
9.3	带可更换墙趾消能器的波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能分析	349
9.3.1	荷载-位移曲线和骨架曲线	349
9.3.2	抗侧承载力结果	352
9.3.3	变形能力结果	353
9.3.4	耗能能力结果	354
9.3.5	刚度退化	359
9.3.6	承载力退化	361
9.3.7	可更换墙趾消能器变形	362
9.3.8	可更换墙趾消能器应变及内置波形钢板应变	365
9.4	带可更换墙趾消能器波形钢板混凝土剪力墙 ABAQUS 有限元模拟	369
9.4.1	ABAQUS 有限元模型建立	369
9.4.2	ABAQUS 有限元分析结果	372
9.5	本章小结	376
9.5.1	结论	376
9.5.2	展望	377
第10章	结论与展望	378
10.1	结论	378
10.2	展望	382
	参考文献	384

# 第1章 绪论

## 1.1 可恢复功能防震结构概述

传统的抗震设计理念是降低结构刚度,通过延性设计使结构在地震作用下不会发生脆性破坏,增大地震来临时逃生的可能性。这一措施虽然在一定程度上降低了地震造成的损失,但为了实现这一抗震目标,作为结构的主要抗侧力构件会进入塑性阶段,发生不可恢复的变形来耗散输入结构中的地震能量,从而导致结构在震后很长的一段时间内无法快速恢复其使用功能<sup>[1]</sup>。

如2011年新西兰基督城城区发生里氏6.3级地震<sup>[2]</sup>,对城区破坏严重,城市中的公共建筑大多中断使用功能,对灾后重建带来巨大的影响。近年来发生的几次地震表明,在满足传统抗震设计理念的同时,需要将地震后灾区的生产和生活的恢复也放在前期设计考虑的范围之内。

### 1.1.1 可恢复功能防震结构的设计理念

可恢复性(Resilience)的概念起源于机械力学,是指材料在没有断裂或完全变形的情况下,因受力而发生变形并储存恢复势能的能力<sup>[3]</sup>。在工程领域,Bruneau、Cimellaro等<sup>[4]</sup>从系统学的角度提出了涵盖技术、组织、社会和经济4个层面的可恢复性概念框架,体现了可恢复性的4大特点:鲁棒性、冗余性、灵活性和恢复高效性,如图1.1所示。

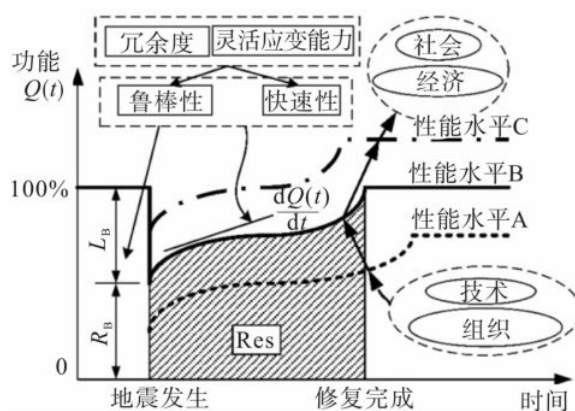


图1.1 地震可恢复功能示意<sup>[5]</sup>

图1.1中的性能水平A对应由传统抗震理念设计的建筑物,在地震发生后,处于性能水平A的建筑物由于其主要承重构件会出现不同程度的损伤且很难恢复到使用状态,所以导致其震后造成的间接损失较大。图1.1中的性能水平B是指地震来临时,以保证人们的生命安全为前提,在考虑抗震的同时,将震后恢复工作也考虑到前期设计范围内的建筑物,该建筑物在震后依旧能保证最基

本的使用功能,并经修复能快速回到原使用状态。若经修复后,建筑物能对原有缺陷有所改善,则此时的建筑物对应于图 1.1 中的性能水平 C。

图 1.1 中的纵坐标功能  $Q(t)$  表示在时间为  $t$  时,整个结构的正常使用状态。当  $Q(t) = 100\%$  时,表示结构未受到任何损伤;相反,当  $Q(t) = 0$  时,表示结构已完全退出工作。鲁棒性指的是结构在受到地震作用后的残余使用功能,即在地震发生的那一时刻( $t_{OE}$ )所对应的性能,如公式(1-1)所示。快速性指的是结构功能恢复的速度,即对应于图 1.1 中  $Q(t)$  随时间变化曲线的斜率,如公式(1-2)所示。冗余度指的是在结构设计时采取的多道防线。灵活应变能力指的是震后对资源调配的一个智能程度。结构的冗余度和灵活应变能力在一定程度上决定着结构的鲁棒性和快速性。

$$\text{鲁棒性}(\%) = Q(t_{OE}) \quad (1-1)$$

$$\text{快速性}(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (1-2)$$

### 1.1.2 可恢复功能防震结构的设计方法

结合目前科研团队所做的工作,可恢复功能防震的设计原理可分为 4 类<sup>[6]</sup>: 摇摆机制、自复位机制、可更换机制和耗能机制。其中,可更换机制和耗能机制是可恢复功能防震结构的核心机制,摇摆机制和自复位机制是通过特殊的构造将结构某一构件人工制造成一种可更换机制或耗能机制。

1) 摇摆机制通过适当放松上部结构与基础顶面的约束来实现,该措施使得接触面只能承受压力,不能承受拉力;地震发生时,在水平倾覆力矩的作用下,上部结构能在接触面处发生一定的向上移动,结构发生摇摆,而结构本身不发生太大的弯曲变形,进而在一定程度上避免了结构构件的损伤。例如,Sarti<sup>[7]</sup>等在 2015 年提出的摇摆柱-剪力墙混合系统,如图 1.2 所示。

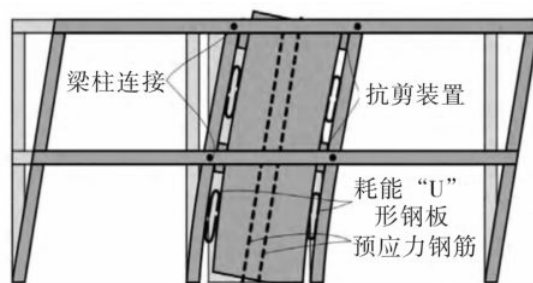


图 1.2 摇摆柱-剪力墙混合系统

2) 自复位技术可以减小或消除结构进入塑性阶段产生的残余变形,即当撤出外力作用时,结构的顶点位移可以慢慢恢复到零。其滞回曲线一般关于原点呈中心对称。通过在结构中添加自复位装置(预应力拉索、弹性框架等)并设计使其在一定地震水平下保持弹性,使结构可以在震后恢复原位,将自复位和摇摆机制、耗能机制组合,可以实现更高效的可恢复功能防震结构<sup>[8]</sup>。例如 2013 年 Clayton<sup>[9]</sup>提出的自复位剪力墙结构,如图 1.3 所示。

3) 耗能机制是将地震输入的能量集中在可更换的阻尼装置中,是可恢复功能防震结构兼顾结构安全和可恢复功能的另一个核心机制<sup>[10]</sup>。添加耗能装置后可以一定程度上减小结构的残余变形,同样会带来最大变形的减小。耗能机制一般只有在与可更换机制合作使用时,才能实现结构的震后可恢复性能。如图 1.3 中在剪力墙墙趾处添加的耗能装置。

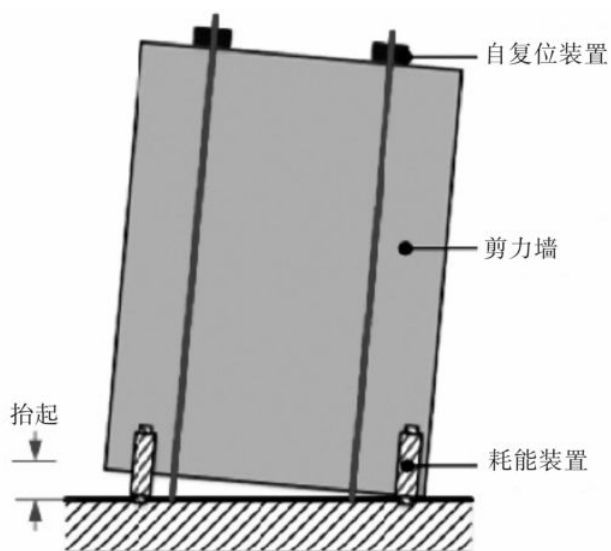


图 1.3 自复位耗能剪力墙

4)可更换机制要求在尽量减少对结构使用功能影响的前提下,实现可更换、易更换和快速更换,是可恢复功能防震结构的核心机制之一<sup>[11]</sup>。对于可更换,要求结构的耗能构件、结构柱或自复位构件与结构构件并行布置,使构件的更换不影响结构的正常功能;对于易更换,则要求可更换部件实现模块化设计和多级可更换,以便于更换;对于快速更换,要求结构在设计和构造上尽量将可更换部件集中设置,以减少维修时间和功能中断时间。例如,2017年陈聪<sup>[12]</sup>等人进行了10个连梁可更换构件的拟静力试验研究,可更换构件置于连梁中部,通过可更换连接与两端混凝土非屈服段相连。可更换构件采用剪切钢板形式,腹板为低屈服点钢材 BLY225,其余部位为普通钢材 Q235,可更换连接采用螺栓端板,如图 1.4 所示。

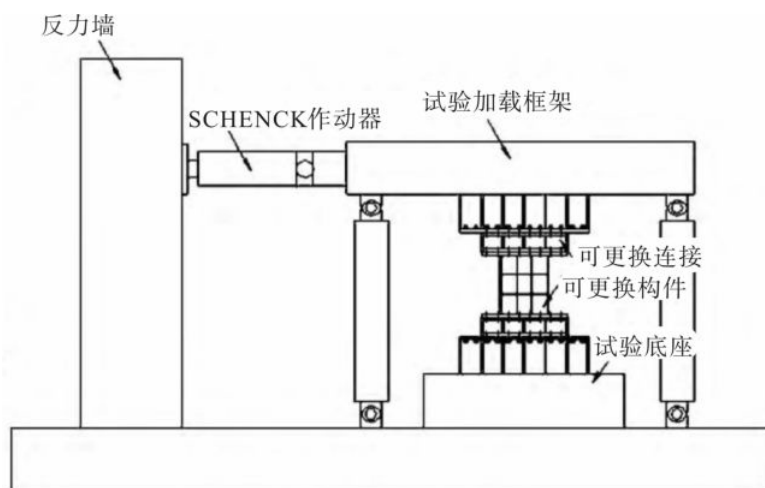


图 1.4 反复加载试验示意

2014年,毛苑君<sup>[13]</sup>等人将可更换技术应用于剪力墙中,在剪力墙墙趾处设置阻尼器安置腔,并添加阻尼器,从试件的试验现象、抗侧承载力、变形能力、阻尼变化等方面分析对比普通剪力墙和新型剪力墙的抗震性能。试件的结构形式如图 1.5 所示。

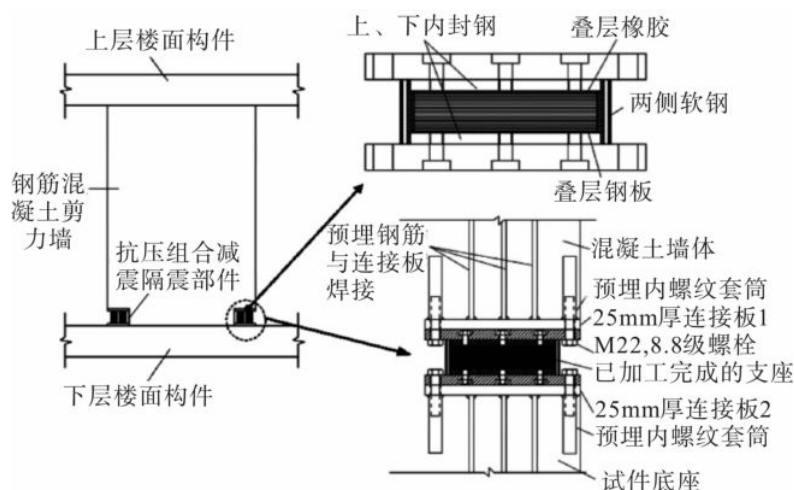


图 1.5 带墙脚可更换构件的剪力墙

## 1.2 钢板剪力墙及其组合剪力墙的发展与应用

随着高层、超高层建筑层出不穷,人们对建筑结构的可靠性越来越重视,对建筑结构的抗震性能需求也日益提升。我国高层建筑自 19 世纪 70 年代以来发展迅速,高层建筑现已成为我国城市建设的主流。基于高层和超高层建筑结构的发展现状,要求高层和超高层建筑结构既要具备较高的承载力,还应具备足够的抗侧刚度和延性,保证结构在水平荷载或水平地震作用下具备较好的抗变形能力和耗能能力。因此在超高层建筑物的设计时,尤其是在结构的重要部位,设计师常采用钢-混凝土组合结构形式,钢结构构件具有较好的抗震性能,与混凝土的组合效果较好,钢-混凝土组合结构是近年来研究的热点课题。

### 1.2.1 钢板剪力墙的发展及应用

20 世纪 80 年代,加拿大学者 Thorburn 等最早对非加劲钢板剪力墙进行了深入研究<sup>[14]</sup>,研究表明:平钢板剪力墙在受剪屈曲后具有一定的屈曲后强度,因此钢板剪力墙的极限承载力应大于屈曲时对应的承载力。平钢板剪力墙屈曲后强度是水平荷载作用时产生的斜向拉力带提供,在此基础上,Thorburn 提出了非加劲薄钢板剪力墙的“等效拉杆模型”(Strip Model)。该模型忽略前期钢板墙的弹性屈曲承载力,靠加载中产生的斜向拉压应力场来抵抗外力,与钢板墙的受力情况较为吻合;并提出了相关的计算公式,为钢板剪力墙的力学性能分析提供理论依据。

1991 年,Sabouri - Ghomi<sup>[15]</sup>等基于有限差分法对固定梁柱连接薄板剪力墙的动力响应进行了非线性分析。对钢板剪力墙的滞回特性进行分析,包括了腹板的剪切屈曲和塑性屈服,以及周围框架的塑性屈服对其滞回性能的影响。结果验证了弹性响应分析的正确性,并证明了滞回特性在周期动力荷载作用下抑制共振的有效性。

1998 年,Elgaaly 等<sup>[16]</sup>学者分别对 1:4 和 1:3 的薄钢板剪力墙进行了试验研究,并对试验结果进行了总结。他们建立了薄钢板剪力墙力学性能的解析模型,并给出了具体的计算模型,能够较好地描述钢板墙周围梁、柱以及焊接或螺栓连接等对墙体性能的影响。他们还对分析结果与实验结果进行了比较。

21 世纪初,清华大学郭彦林等<sup>[17]</sup>学者对钢板剪力墙展开了一系列研究,在对防屈曲钢板剪力

墙进行数值分析时,为了突出研究对象并使问题简化,采用了下述假定:框架梁、柱节点铰接,框架梁、柱的抗弯刚度无限大,忽略框架梁、柱的轴向变形的影响。研究表明:非加劲薄钢板剪力墙非线性主要体现在内嵌钢板首先屈曲,依靠拉力带发挥其屈曲后的强度,加劲钢板剪力墙屈曲形式分为整体屈曲、局部屈曲和相关屈曲3类。加劲钢板剪力墙有效地提高了钢板的抗侧刚度、承载力以及整体稳定性能,结构表现出较好的滞回性能。

根据现行规范 JGJ/T 380 - 2015《钢板剪力墙技术规程》<sup>[18]</sup>,将钢板剪力墙分为非加劲钢板剪力墙、加劲钢板剪力墙、防屈曲钢板剪力墙、钢板组合剪力墙及开缝钢板剪力墙等,其构造形式如图 1.6 所示。

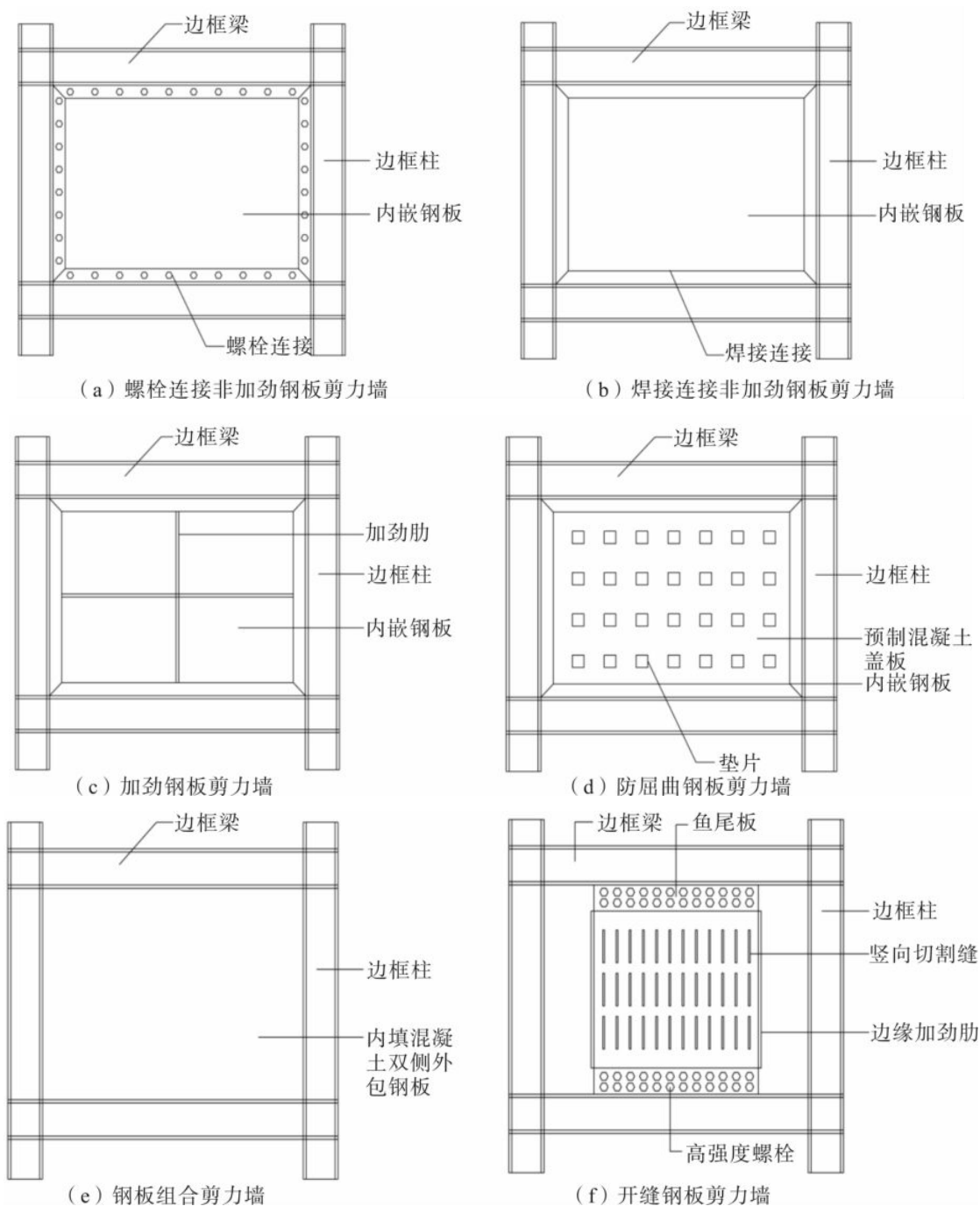


图 1.6 钢板剪力墙类型示意图

聂建国等<sup>[19]</sup>国内学者以天津津塔为研究背景,设计了2个2跨5层1:5缩尺的钢板剪力墙试件并进行了低周循环加载试验。研究结论为:非加劲钢板剪力墙容易发生钢板面外屈曲,滞回曲线呈现出明显的捏拢现象,而加劲钢板剪力墙无面外屈曲现象,滞回曲线呈现出饱满的纺锤形,如图1.7所示。

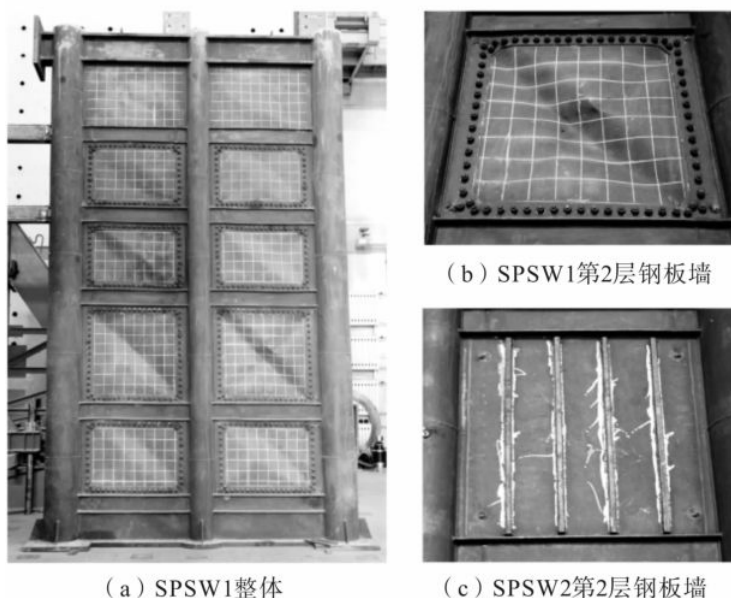


图 1.7 基于天津津塔的钢板剪力墙试验研究

2019年,于金光等<sup>[20]</sup>设计了3个单跨2层的平齐端板连接框架-钢板剪力墙,并对其进行了拟静力试验研究。研究了内嵌钢板形式分别为无加劲、纵横放置十字加劲和对角斜向放置十字加劲钢板墙的力学性能,其试件如图1.8所示。

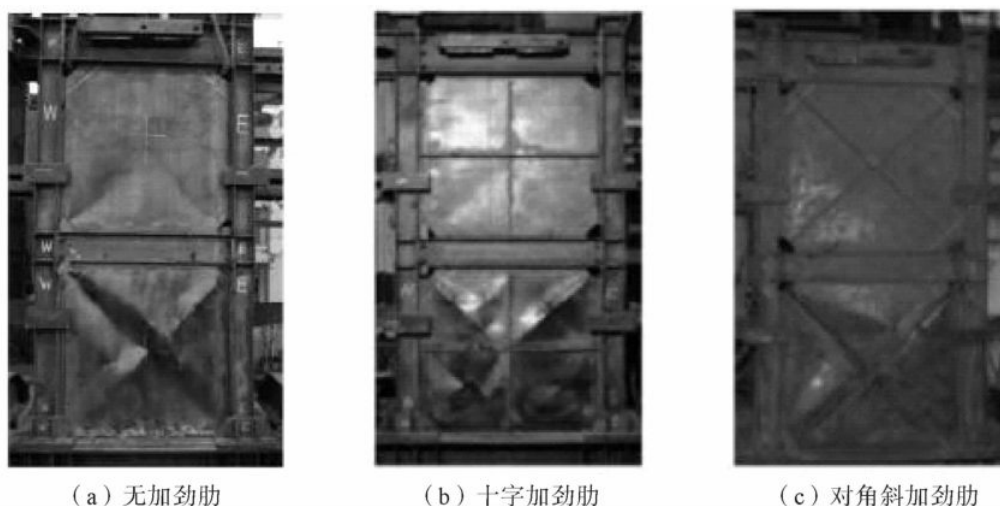


图 1.8 不同加劲肋样式的钢板剪力墙试验研究

波形钢板剪力墙是基于平钢板剪力墙发展起来的一种新型抗侧力构件,具有较高的平面外刚度以及整体稳定性。波形钢板剪力墙的提出,可以有效地解决平钢板平面外刚度较低等问题,提高结构的强度、刚度以及稳定性。

2005年,美国布法罗大学的 Berman 和 Bruneau 等<sup>[21]</sup>对波形钢板剪力墙进行了试验研究,波形钢板的波形沿板件的45°方向设置,如图1.9所示。研究结果表明:波形钢板可以有效地提高剪力