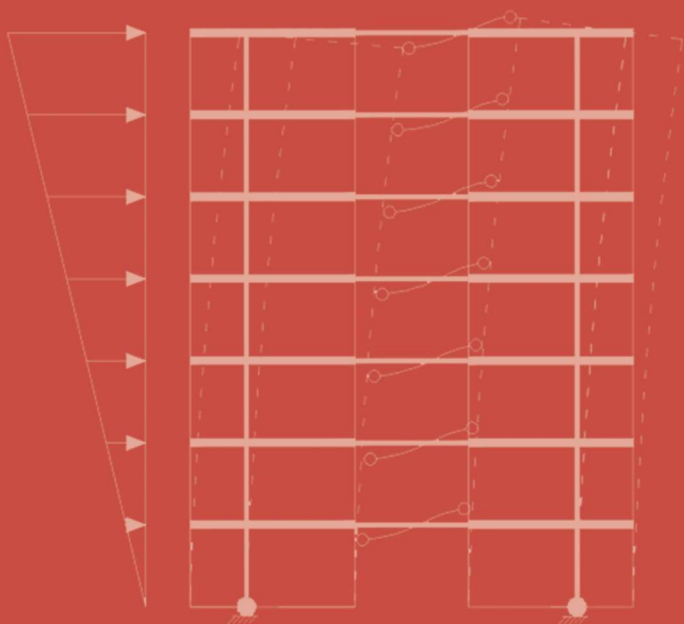


本书受国家自然科学基金项目(51408328、51278402)、宁夏自然科学基金项目(NZ14041)、宁夏十二五科技支撑项目(2012ZYS264)资助

R/FRC联肢剪力墙结构 抗震性能与设计方法研究

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE AND DESIGN
METHOD OF R/FRC COUPLED SHEAR WALLS

车佳玲 著



黄河出版传媒集团
阳光出版社

本书受国家自然科学基金项目(51408328、51278402)、宁夏自然科学基金项目(NZ14041)、宁夏十二五科技支撑项目(2012ZYS264)资助

R/FRC联肢剪力墙结构 抗震性能与设计方法研究

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE AND DESIGN
METHOD OF R/FRC COUPLED SHEAR WALLS

车佳玲 著



黄河出版传媒集团
阳光出版社

图书在版编目(CIP)数据

R/FRC 联肢剪力墙结构抗震性能与设计方法研究 /车佳玲
著. -- 银川: 阳光出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5525-1666-1

I. ①R… II. ①车… III. ①剪力墙结构-抗震结构-结构
性能-研究②剪力墙结构-防震设计-方法研究

IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 313268 号

R/FRC 联肢剪力墙结构抗震性能与设计方法研究

车佳玲 著

责任编辑 屠学农

封面设计 郭俊

责任印制 岳建宁

黄河出版传媒集团 出版发行
阳光出版社

地 址 宁夏银川市北京东路 139 号出版大厦(750001)

网 址 <http://www.yrpubm.com>

网上书店 <http://www.hh-book.com>

电子信箱 yangguang@yrpubm.com

邮购电话 0951-5014274

经 销 全国新华书店

印刷装订 宁夏凤鸣彩印广告有限公司

印刷委托书号 (宁)0016595

开 本 880mm×1230mm 1/32

印 张 7.75

字 数 180 千

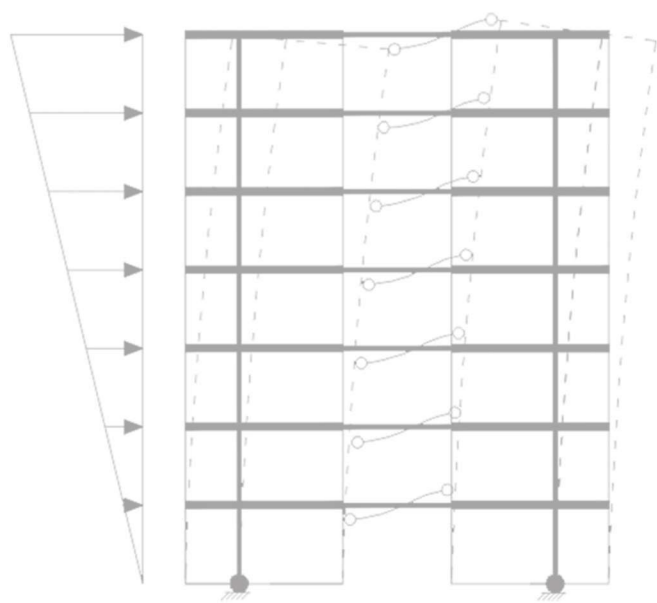
版 次 2014 年 12 月第 1 版

印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5525-1666-1/T·15

定 价 36.00 元

版权所有 翻印必究



【前言】

地震是人类所面临的最严重的自然灾害之一,提高建筑物的抗震能力,是增强震区抗震防灾能力、减小地震损失的关键因素。剪力墙在建筑的框架中的用途已很早被人们所认识。当墙体处于建筑中的有利位置时,它能形成一种有效抵抗水平力的结构体系,同时又起到墙体的其他功能作用。通常高度达 20 层或 20 层以下的建筑,可以选择性的采用剪力墙形式,但是对于 30 层以上的建筑,从经济和对结构侧向位移的控制上看,则必须采用剪力墙。为了满足建筑功能的要求,剪力墙有时需要开有一列或多列洞口。当洞口较大时,剪力墙截面的整体性被破坏,这时剪力墙成为由一系列连梁约束的墙肢所组成的联肢剪力墙。在强震作用下,经过合理设计的联肢剪力墙符合在整个结构高度上连梁陆续屈服耗散地震能量,最后墙肢在基础顶面处形成塑性铰而达到承载能力极限状态的最佳屈服机制,满足多道抗震防线的原则。本书在对纤维增强混凝土

(FRC)对角斜筋连梁抗震性能研究的基础上,探讨了联肢剪力墙基于性能的设计方法,供广大技术人员、科研人员和研究生参考。

本书内容基于国家自然科学基金项目“R/ECC 联肢剪力墙结构基于最优屈服机制的抗震性能设计理论与方法”(51408328)、国家自然科学基金项目“基于损伤机制控制的 R/ECC 结构抗震性能设计理论与方法研究”(51278402)、宁夏自然科学基金项目“高性能生态建筑材料研究及其在连梁中的应用”(NZ14041)、宁夏“十二五”科技支撑项目(2012ZYS264)等研究成果。全书共 7 章。第 1 章阐述了本书主要研究内容及相关研究现状。第 2 章通过 4 个跨高比不大于 1.5 的 FRC 小跨高比对角斜筋连梁(以下简称 R/FRC 连梁试件)和 1 个对比试件(以下简称 R/C 连梁试件)的拟静力试验研究,分析了新型连梁 FRC 对角斜筋连梁的抗震性能和破坏特点。第 3 章对 FRC 小跨高比对角斜筋连梁进行参数分析。分别分析 FRC 抗压强度、跨高比、连梁截面宽度、对角斜筋配筋率、箍筋配筋率、纵向受力筋配筋率、水平分布筋配筋率及连梁梁端埋入长度等参数对 FRC 对角斜筋小跨高比连梁抗震性能的影响。第 4 章提出了 FRC 对角斜筋小跨高比连梁斜截面受剪承载力计算公式和预制连梁的埋入长度计算公式。第 5 章论述了 FRC 对角斜筋连梁联肢剪力墙耦联率取值范围。第 6 章论述了

联肢剪力墙 pushover 分析方法。第 7 章论述了 FRC 小跨高比对角斜筋连梁联肢剪力墙性能控制和设计方法。

本书涉及的研究成果是在梁兴文教授指导下,与邓明科教授、研究生史金田、孙云飞、马瑞刚、党争共同完成的。资深教授童岳生先生审阅了本书的初稿,并提出了宝贵意见。在此,对所有为此书付出努力和辛劳的人表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2014 年 11 月

第1章 绪论 / 001

1.1 问题的提出 / 001

1.2 纤维增强混凝土(FRC)的提出及应用现状 / 002

1.2.1 纤维增强混凝土(FRC)的提出 / 002

1.2.2 纤维增强混凝土(FRC)在混凝土结构中的应用 / 004

1.2.3 FRC 基本力学性能研究 / 005

1.2.4 纤维增强混凝土在土木工程中的应用 / 006

1.3 联肢剪力墙研究现状 / 007

1.3.1 小跨高比连梁研究现状 / 007

1.3.2 悬臂剪力墙结构研究现状 / 015

1.3.3 联肢剪力墙结构整体性能研究现状 / 021

1.4 基于性能的抗震设计理论 / 024

1.4.1 基于性能抗震设计理论的提出与基本内容 / 024

1.4.2 基于性能的抗震设计方法 / 027

1.5 本书的主要研究内容 / 028

1.5.1 FRC 对角斜筋小跨高比连梁抗震性能试验研究 / 028

1.5.2 FRC 对角斜筋小跨高比连梁参数分析 / 029

1.5.3 FRC 对角斜筋小跨高比连梁受力状态模拟、受剪承载



力简化计算公式及梁端埋入长度计算方法 / 029

1.5.4 FRC 连梁联肢剪力墙耦联率合理取值范围及抗震性能控制方法研究 / 029

1.5.5 联肢剪力墙结构基于屈服机制控制的性能设计方法研究 / 029

参考文献 / 030

第 2 章 FRC 对角斜筋连梁抗震性能试验研究 / 047

2.1 FRC 对角斜筋小跨高比连梁的提出 / 047

2.2 试验概况 / 048

2.2.1 试验目的 / 048

2.2.2 试件设计 / 049

2.2.3 设计参数 / 053

2.2.4 材料性能 / 054

2.2.5 试验加载装置及加载方式 / 055

2.2.6 试验测试内容 / 058

2.3 试验过程及破坏特征分析 / 060

2.3.1 加载破坏过程 / 062

2.3.2 破坏特征分析 / 069

2.4 试验结果分析 / 071

2.4.1 滞回曲线 / 071

2.4.2 骨架曲线 / 073

2.4.3 剪压比 / 076

2.4.4 延性 / 077

2.4.5 刚度退化 / 078

2.4.6 耗能能力 / 079

2.4.7 钢筋应变 / 080

2.4.8	跨高比的影响	/ 086
2.4.9	立方体抗压强度(不同配合比)的影响	/ 087
2.4.10	箍筋与对角斜筋的配筋强度比的影响	/ 087
2.4.11	剪压比的影响	/ 089
2.4.12	强屈比的影响	/ 089
2.5	小结	/ 089
	参考文献	/ 091
第 3 章	FRC 对角斜筋小跨高比连梁有限元模拟及参数分析	/ 093
3.1	引言	/ 093
3.2	单元及本构模型的选取	/ 096
3.2.1	单元的选取	/ 096
3.2.2	混凝土屈服条件	/ 098
3.2.3	损伤及刚度退化	/ 099
3.2.4	损伤变量及损伤演化方程	/ 100
3.2.5	普通混凝土损伤塑性模型的建立	/ 101
3.2.6	FRC 损伤塑性模型的建立	/ 102
3.2.7	ABAQUS 中混凝土损伤塑性模型的输入	/ 107
3.2.8	钢筋本构关系	/ 113
3.3	FRC 对角斜筋小跨高比连梁有限元模拟	/ 113
3.4	FRC 对角连梁小跨高比参数分析	/ 115
3.4.1	FRC 抗压强度对 R/FRC 连梁抗震性能的影响	/ 115
3.4.2	跨高比对 R/FRC 连梁抗震性能的影响	/ 116
3.4.3	连梁截面宽度对 R/FRC 连梁抗震性能的影响	/ 116
3.4.4	对角斜筋配筋率对 R/FRC 连梁抗震性能的影响	/ 117
3.4.5	配箍率对 R/FRC 连梁抗震性能的影响	/ 117
3.4.6	纵向受力筋对 R/FRC 连梁抗震性能的影响	/ 119



3.4.7 水平分布筋对 R/FRC 连梁抗震性能的影响 / 120

3.4.8 连梁梁端埋入长度对连梁抗震性能的影响 / 120

参考文献 / 121

第 4 章 FRC 对角斜筋小跨高比连梁受力性能及受剪承载力分析

/ 125

4.1 引言 / 125

4.2 FRC 对角斜筋连梁受力特征及其受剪承载力分析方法讨论

/ 126

4.2.1 跨高比 $l_n/h \leq 1.5$ 的 FRC 对角斜筋连梁受力特征 / 126

4.2.2 小跨高比连梁受剪承载力分析方法讨论 / 128

4.2.3 拉—压杆模型在 FRC 对角斜筋小跨高比连梁中的应用

/ 132

4.3 基于拉—压杆模型的 FRC 对角斜筋连梁受力状态模拟 / 135

4.3.1 基本假定 / 135

4.3.2 非线性力—位移理论模型的建立 / 136

4.3.3 材料的本构关系 / 138

4.3.4 非线性力—位移理论模型计算步骤 / 138

4.3.5 非线性力—位移理论模型验证 / 139

4.3.6 跨高比 $l_n/h \leq 1.5$ 的 FRC 对角斜筋连梁受剪承载力

简化计算公式 / 144

4.4 FRC 对角斜筋小跨高比连梁的软化拉—压杆模型 / 146

4.4.1 平衡方程 / 149

4.4.2 本构方程 / 154

4.4.3 协调方程 / 156

4.4.4 求解方法 / 156

4.4.5 算例分析 / 157

4.5	FRC 对角斜筋连梁梁端埋入长度计算	/ 162
4.5.1	求解思路	/ 162
4.5.2	连梁梁端埋入长度计算	/ 162
4.5.3	试验验证	/ 167
	参考文献	/ 168
第 5 章	联肢剪力墙抗震性能控制方法	/ 172
5.1	引言	/ 172
5.2	FRC 对角斜筋连梁联肢剪力墙的耦联率	/ 174
5.2.1	耦联率 CR 的下限	/ 176
5.2.2	耦联率 CR 的上限	/ 179
5.2.3	耦联率 CR 的合理取值范围	/ 179
5.3	联肢剪力墙抗震性能控制方法	/ 180
5.3.1	连梁截面尺寸控制	/ 180
5.3.2	基底剪力的确定	/ 184
5.3.3	连梁梁端截面箍筋数量的确定	/ 187
5.3.4	联肢剪力墙性能控制方法实施步骤	/ 188
5.3.5	各参数对连梁箍筋数量的影响	/ 190
5.4	算例及其分析	/ 191
5.4.1	算例	/ 191
5.4.2	有限元验证	/ 195
	参考文献	/ 196
第 6 章	联肢剪力墙静力弹塑性分析	/ 198
6.1	静力弹塑性分析方法	/ 198
6.1.1	Pushover 分析方法的基本思路	/ 198
6.1.2	建立 Pushover 曲线	/ 199
6.1.3	模拟构件屈服和屈服后行为	/ 201



6.1.4	Pushover 分析注意事项	/ 203
6.2	联肢剪力墙的推覆分析	/ 204
6.2.1	联肢剪力墙尺寸的选择	/ 204
6.2.2	在 SAP2000 中建立联肢墙模型	/ 205
6.2.3	对联肢墙分析模型的优化	/ 206
6.2.4	非线性剪力墙分层壳的设置	/ 207
6.3	推覆结果分析	/ 209
	参考文献	/ 214
第 7 章	联肢剪力墙基于屈服机制控制的性能设计方法	/ 215
7.1	基于屈服机制控制的性能设计方法	/ 215
7.2	联肢剪力墙结构基于屈服机制控制的性能设计方法	/ 216
7.2.1	计算简图和屈服机制	/ 216
7.2.2	能量平衡方程和修正系数	/ 218
7.2.3	设计基底剪力	/ 222
7.2.4	侧向力分布	/ 224
7.2.5	构件截面设计	/ 225
7.3	联肢剪力墙结构基于屈服机制控制的性能设计步骤	/ 229
7.4	算例及其分析	/ 231
7.4.1	工程概况	/ 231
7.4.2	设计过程	/ 231
7.4.3	有限元验证	/ 233
7.4.4	与小震弹性设计结果的比较	/ 235
	参考文献	/ 236

第1章 绪 论

1.1 问题的提出

地震是人类所面临的最严重的自然灾害之一，提高建筑物的抗震能力，是增强地震区抗震防灾能力、减小地震造成损失的关键因素。剪力墙是一种广泛应用于高层建筑的抗侧力构件，其抗震性能对整个结构的抗震性能影响显著。为了满足建筑功能要求，剪力墙需要开一系列门、窗洞口，具有良好延性及耗能能力的最有效洞口布置方式是墙上开洞位置按照规则与合理的方式布置，如图 1.1 所示。图中，墙肢由连梁相互耦联在一起，称为联肢剪力墙。研究表明^[1]，在强震作用下，与普通剪力墙仅依赖剪力墙底部塑性铰区耗能不同，经过合理设计的联肢剪力墙符合在整个结构高度上连梁陆续屈服耗散地震能量，最后墙肢在基础顶面处形成塑性铰而达到承载能力极限状态的最佳屈服机制，满足多道抗震防线的原则，如图 1.2 所示。

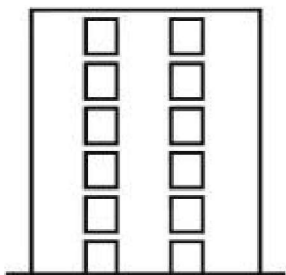


图 1.1 联肢剪力墙示意图

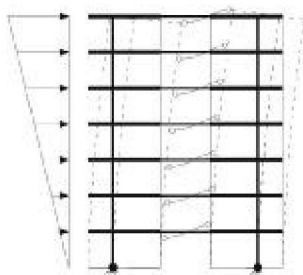


图 1.2 联肢剪力墙最佳屈服机制



然而,根据建筑需求及结构刚度要求,联肢剪力墙多采用小跨高比连梁。小跨高比连梁属于反弯点在跨中的反对称弯曲深梁,名义剪压比较大,而目前各国抗震设计规范关于小跨高比连梁设计的规定尚不能满意解决其延性不足的问题,难以避免其在强震作用下过早发生剪切破坏,无法发挥其作为抗震第一道防线的作用。因此,研究既具有良好抗震性能又便于施工的小跨高比连梁是近年来各国学者关注的重要问题之一。本课题组利用纤维增强混凝土(FRC)的高延性、良好的能量耗散能力等优点,将其代替普通混凝土作为对角斜筋小跨高比连梁基体材料,并通过试验验证了FRC 对角斜筋小跨高比连梁优越的延性及耗能能力。

为了使联肢剪力墙在地震作用下达到其最佳屈服机制,除了连梁需要具有足够的延性及耗能能力外,必须对联肢剪力墙进行合理设计。震害及试验研究表明^[2],由于对联肢剪力墙设计不合理,联肢剪力墙在强震作用下通常由于连梁对墙肢的耦联作用过小,连梁没有充分发挥第一道防线的作用,墙肢最终发生整体斜截面剪切破坏或正截面压弯破坏;或连梁对墙肢耦联作用过大,导致连梁过强,形成强连梁、弱墙肢的不利破坏模式,墙肢破坏而连梁未破坏,没有充分发挥联肢墙体系的多道抗震防线的抗侧力性能。因此,本课题组在对 FRC 对角斜筋小跨高比连梁抗震性能研究的基础上,对 FRC 连梁联肢剪力墙进行了较为系统的研究,提出了在强震作用下保证 FRC 连梁联肢剪力墙达到其最佳屈服机制的抗震性能控制方法及设计方法,该方法亦可用于普通配筋混凝土连梁联肢剪力墙结构中。

1.2 纤维增强混凝土(FRC)的提出及应用现状

1.2.1 纤维增强混凝土(FRC)的提出

在混凝土中掺入纤维是提高材料韧性、抗冲击能力及断裂性

能的有效途径。自 20 世纪 40 年代纤维混凝土发明以来,各种不同纤维增强复合材料在世界范围内得到了越来越广泛的应用^[3]。20 世纪 90 年代初美国密歇根大学的 Victor. C. Li^[4]基于细观力学和断裂力学原理,提出在拉伸和剪切荷载下呈现出高延性、具有应变硬化和多裂缝开展特征的工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites,简称 ECC)。ECC 是一种在水泥基体中加入了随机分布短纤维的水泥基复合材料,纤维类型包括钢钎维、碳纤维、聚合物纤维等,其低纤维掺量和高性能使得其成为备受瞩目的一种新型材料。ECC 的主要特征是在受拉时呈现稳态开裂和产生多条细密裂缝,无论在拉伸还是弯曲荷载作用下都表现出明显的应变硬化特征,耗能能力优越^[5],如图 1.3 所示。

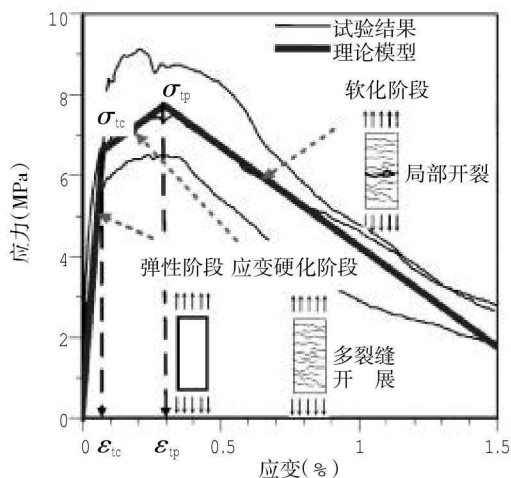


图 1.3 典型 FRC 受拉应力-应变曲线关系

目前,ECC 已被较多地应用于土木工程结构中。由于其中粉煤灰掺量、纤维类型、纤维掺量等不同导致的极限拉应变、最大裂缝宽度等不同,且为了便于其在土木工程中的推广应用,各研究团队利用地方材料研制了 ECC 并对其重新命名。如 Naaman 等^[6]将其

称为 HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Concrete); 徐世烺团队^[7]将其称为超高韧性水泥基复合材料 (Ultra High Toughness Cementitious Composite, 简称 UHTCC); 本课题组将其称为纤维增强混凝土 (Fiber Reinforced Concrete, 简称 FRC)。为了避免混淆, 且 FRC 具有 ECC 拉伸应变硬化、裂缝宽度小、高延性等特点, 本书将 ECC、HPFRCC 等统称为 FRC。

1.2.2 纤维增强混凝土 (FRC) 在混凝土结构中的应用

由于 FRC 具有良好的抗剪强度、耗能能力及与钢筋的变形协调能力, 国内外学者提出将 FRC 应用于混凝土结构的关键部位中, 并展开了一系列研究。Parra-Montesinos 等^[8]将 FRC (PE 纤维, 体积掺量 1.5%) 用于梁柱节点, 研究结果表明, FRC 可以提高梁柱节点的延性及耗能能力, 减少箍筋配筋率。Kim 等^[9]将 FRC (PE 纤维, 体积掺量 1.5%; 钢纤维, 体积掺量 2%) 用于低矮剪力墙中, 研究结果表明, FRC 可以提高低矮剪力墙的延性及耗能能力; Olsen 等^[10]将 FRC (钢纤维, 体积掺量 1.5%) 用于钢框架填充板中, 研究结果表明, FRC 填充板提高了钢框架的延性、滞回性能、耗能能力及损伤容限。本课题组将 FRC (PVA 纤维, 体积掺量 2%) 用于剪力墙底部加强部位及钢筋混凝土柱中^[11~12]。研究结果表明, 虽然试验中用于剪力墙及钢筋混凝土柱的 FRC 极限拉伸应变仅为 1%, 未达到 3%, 但对其抗震性能的改善已十分明显。其中, 剪力墙底部加强部位平均开裂位移提高 40%, 平均屈服位移提高 21%, 平均峰值荷载提高 8.5%, 破坏时受压区 FRC 出现大量细密裂缝, FRC 保护层没有剥落, 具有很好的损伤容限, 可减小强震后的修复费用; 塑性铰区采用 FRC 的钢筋混凝土柱的位移延性系数为 3.5~5.8, 而同条件钢筋混凝土柱的位移延性系数仅为 2.0, 同时, 塑性铰区采用 FRC 的钢筋混凝土柱具有很好的损伤容限, 而钢筋混凝土柱发生突然的剪