



型钢高强高性能混凝土结构 基本性能与设计

郑山锁 李 磊 著



科学出版社

型钢高强高性能混凝土结构 基本性能与设计

郑山锁 李 磊 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

型钢高强高性能混凝土组合结构是一种优越的新型抗震结构体系。本书全面、系统地介绍了这种结构的基本性能、计算理论与设计方法,包括:高强高性能混凝土材料性能、钢-混凝土界面粘结滑移特性及粘结滑移本构关系,框架梁、柱、节点的破坏过程与机理及其承载力和变形的计算理论与方法,框架结构考虑损伤退化的滞回模型及动力弹塑性时程分析方法。

本书注重于材料、构件和结构试验现象与规律的阐述、受力机理的解释以及设计计算理论与方法的叙述,可供从事土木工程专业的研究、设计和施工人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

型钢高强高性能混凝土结构基本性能与设计/郑山锁,李磊著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-032421-4

I. ①型… II. ①郑…②李… III. ①型钢混凝土:高强混凝土-钢筋混凝土结构-结构设计 IV. ①TU375.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 193903 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郑金红
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

涿州印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:417 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

型钢混凝土组合结构是钢-混凝土组合结构的主要结构形式之一,可充分发挥钢材与混凝土各自的优势,具有强度高、刚度大、抗震性能好等优点,已被广泛应用于高层、超高层建筑及大跨、重载结构中。将高强高性能混凝土用于型钢混凝土组合结构中,可进一步缩小构件截面尺寸,提高结构构件的承载能力、刚度和耐久性。另一方面,由于高强高性能混凝土脆性的影响,型钢高强高性能混凝土结构构件的受力机理与普通型钢混凝土构件有所不同。目前,国内外对普通型钢混凝土结构的研究较为深入,结构构件的性能已被较为全面的掌握,并形成了较为系统成熟的计算理论与设计方法,但关于型钢高强高性能混凝土结构构件乃至框架结构的研究仍然偏少,有必要对其进行系统深入的研究。

型钢与混凝土之间粘结滑移问题的解决是型钢混凝土结构在强度、刚度、变形、裂缝宽度计算以及有限元分析方面取得成熟理论的关键。作者自 2000 年 10 月~2003 年 2 月在西安交通大学工程力学博士后流动站工作期间,对型钢混凝土结构的粘结滑移问题进行了较为系统的研究,2001 年 3 月申请获得国家博士后科学基金项目“型钢混凝土粘结滑移本构模型及破坏准则的研究与应用(中博基 20015)”。基于国家博士后科学基金项目的完成,作者在 2003~2006 年期间申请获得国家自然科学基金项目“型钢高强高性能混凝土结构的基本性能和设计计算理论研究(50378080)”、国家自然科学基金国际合作项目“型钢混凝土组合结构的优化设计方法研究(50510205098)”和陕西省教育厅专项科研项目“适用于型钢混凝土组合结构的高强高性能混凝土配合比多目标优化设计(06JK263)”。截至 2010 年 12 月,课题组基于大量试验与理论分析,主要从提高耐久性及与型钢之间粘结强度的角度出发,研制出了今后在 SRC 结构工程中将会大量应用的 C60~C100 高强高性能混凝土,并系统地研究了材料的各种力学性能(包括硬化水泥砂浆与粗骨料之间界面效应)、耐久性能及其本构关系,获得国家发明专利 5 项:“一种用于型钢混凝土组合结构的混凝土”、“用于型钢混凝土组合结构的 C60~C100 混凝土”(编号:ZL 200610041959.5,ZL 200710199116.2,ZL 200710199123.2,ZL 200710199119.6,ZL200710199124.7)。

进行了 44 根不同混凝土强度等级、配箍率、保护层厚度和锚固长度的型钢高强高性能混凝土试件拉拔、推出、推拉反复及短柱轴压加载试验,对型钢与混凝土之间粘结应力及内部滑移的分布规律进行了量测,同时,采用声发射技术和 CT 技术对粘结破坏过程中的内裂缝形成和发展进行追踪,并运用损伤力学、断

裂力学、复合微动磨损理论、剥层理论、塑性极限理论和神经网络法等,从物理化学、力学和数学等多方位综合分析了型钢普通与高强高性能混凝土结构的粘结滑移机理和主要影响因素以及沿锚固长度粘结应力和滑移量的分布规律,提出了型钢(普通与高强高性能)混凝土结构粘结滑移统一强度理论,包括粘结强度、滑移量、粘结破坏荷载的计算方法,粘结破坏强度准则,粘结滑移 t - S 本构模型,粘结滑移单元等。

进行了 45 榀不同剪跨比、混凝土强度、配钢率、配箍率等设计参数的型钢混凝土梁、柱、节点、框架模型(其中后三者考虑轴压比变化)拟静力和拟动力试验(其中梁试件 17 榀、柱试件 20 榀、节点试件 5 榀、两跨三层平面框架试件 3 榀)。通过试验研究与理论分析,考察了不同构件乃至框架结构在单调和反复荷载作用下的受力特点、破坏形态、变形特征、延性性能,提出了考虑粘结滑移影响的型钢高强高性能混凝土梁、柱、节点乃至框架结构的强度、刚度/变形、延性、裂缝宽度的实用计算理论和设计方法。

先后在国际重要学术期刊、国内核心期刊及国际重要学术会议上发表相关学术论文 80 余篇,其中,50 余篇被 EI(光盘版)和 SCI 收录;获陕西省、西安市自然科学优秀学术论文一等奖 4 项、二等奖 2 项,中国土木工程学会优秀论文奖 2 项。研究成果获 2009 年度西安市科学技术进步二等奖、2011 年度陕西省科学技术进步二等奖。

本书是作者对以上研究成果的提炼、归纳和总结,并命名为《型钢高强高性能混凝土结构基本性能与设计》,旨在向读者比较全面、系统地介绍这一优越的新型抗震结构体系,以期适应从事土木工程结构研究、设计、施工和教学工作的同仁的需要,并进一步促进这种结构的推广应用。全书分为上、中、下三篇。上篇为材料篇,共三章,其中包括了高强高性能混凝土材料性能、钢-混凝土界面粘结滑移机理、界面粘结滑移参数计算方法以及粘结滑移本构关系等内容。中篇为构件篇,共六章,其中包括了型钢高强高性能混凝土框架梁、柱、节点的试验研究和理论研究成果。在试验研究部分,重点阐述了构件的试验现象与规律;在理论研究部分,重点解释了构件的受力机理,并在此基础上建立了构件的简化计算模型与方法。下篇为结构篇,共两章,其中包括了型钢高强高性能混凝土框架结构的拟静力试验和拟动力试验结果,框架结构考虑损伤退化的滞回模型及动力弹塑性时程分析方法。本书在内容的编排上,既注重全书的系统性,又考虑到每一章节的相对独立性,以便于读者学习。

本书由郑山锁和李磊共同撰写,胡义、陶清林和王斌分别撰写了第 4、5、6 章的部分内容,全书最后由郑山锁整理统稿。博士研究生邓国专、曾磊、车顺利、张亮等参加了本书相关内容的试验与研究工作,本书的主要研究工作得到了国家博士后科学基金(中博基 20015)、国家自然科学基金(50378080、50510205098、90815005、

501108376、50978218)、教育部高等院校博士点专项科研基金(20106120110003)、陕西省教育厅专项科研项目(06JK263)等的资助,在此一并表示衷心致谢。作者也感谢西安建筑科技大学结构与抗震教育部及陕西省重点实验室张兴虎、刘煦、龚安礼、赵建德、李婉等老师在试验工作中提供的大量帮助。

由于作者学识水平所限,加之研究工作本身带有探索性质,书中难免存在不足之处,恳请读者指正。

郑山锁
西安建筑科技大学
2011. 10

目 录

前言

上篇 材 料 篇

1 适用于型钢混凝土结构的高强高性能混凝土研究	3
1.1 概述	3
1.2 技术途径	3
1.2.1 性能要求	3
1.2.2 混凝土破坏机理分析	6
1.2.3 混凝土细观结构分析	7
1.2.4 混凝土高强高性能化技术途径	10
1.3 配合比设计及试验	12
1.3.1 微细观结构及相关作用分析	12
1.3.2 原材料	13
1.3.3 配合比设计方法	14
1.3.4 配合比试验	17
1.4 基于粘结滑移理论的配合比优化	17
1.4.1 型钢混凝土结构粘结滑移基本理论	17
1.4.2 数学模型	18
1.4.3 算例	21
1.5 力学性能	22
1.5.1 破坏特征	22
1.5.2 抗压强度尺寸系数	24
1.5.3 棱柱体强度及应力-应变曲线	24
1.5.4 抗拉强度	26
1.5.5 HSHPC 多轴受压的应力状态	27
1.5.6 非约束 HSHPC 单轴受压应力-应变关系	28
1.5.7 约束 HSHPC 单轴受压应力-应变关系	30
1.6 耐久性能	31
1.6.1 混凝土耐久性概述	31

1.6.2	抗渗性能	31
1.6.3	抗氯离子侵蚀性能	33
1.6.4	抗冻融性能	37
	参考文献	38
2	型钢与混凝土界面粘结滑移试验与分析	40
2.1	引言	40
2.2	试验概况	41
2.2.1	试件设计与制作	42
2.2.2	试验加载方案	44
2.2.3	试验测试方案	45
2.3	试验结果及分析	47
2.3.1	试件破坏形态与过程	47
2.3.2	试件加载端的 P - S 曲线	48
2.3.3	平均粘结应力与滑移的 τ - S 曲线	51
2.4	粘结滑移机理分析	54
2.5	粘结强度分析	58
2.5.1	概述	58
2.5.2	粘结强度的正交回归分析	59
2.5.3	影响粘结强度的主要因素分析	62
2.5.4	极限粘结滑移回归分析	64
2.5.5	型钢与混凝土在反复荷载作用下的粘结性能	66
2.6	型钢与高强高性能混凝土的粘结性能	67
2.6.1	粘结滑移试验结果	67
2.6.2	粘结滑移机理分析	71
2.6.3	粘结滑移特征量计算	77
2.7	工程应用	79
2.7.1	临界保护层厚度	79
2.7.2	最小配箍率	80
2.7.3	型钢锚固可靠度分析与锚固长度设计	81
2.8	型钢表面粘结滑移分布规律	87
2.8.1	型钢表面应变分布	87
2.8.2	型钢表面粘结应力分布	87
2.8.3	型钢与混凝土间的粘结滑移分布	88

2.8.4	粘结应变分布指数特征值的确定	88
2.8.5	粘结滑移分布指数特征值的确定	88
2.9	型钢混凝土粘结滑移本构关系	89
2.9.1	单向荷载作用下粘结滑移本构关系	89
2.9.2	推拉反复荷载作用下粘结滑移本构关系	92
2.9.3	型钢与高强高性能混凝土粘结滑移本构关系	93
2.10	型钢混凝土粘结滑移破坏准则	94
	参考文献	95
3	SRHPC 简支梁粘结滑移本构关系	96
3.1	试验概况	96
3.2	试验结果	97
3.2.1	试件破坏形态与过程	97
3.2.2	$P-S$ 曲线	98
3.2.3	型钢表面应变分布	98
3.2.4	型钢表面粘结应力分布	99
3.2.5	型钢与混凝土界面相对滑移分布	99
3.2.6	粘结软化	100
3.3	粘结强度影响因素分析	101
3.3.1	混凝土强度	101
3.3.2	混凝土保护层厚度	101
3.3.3	横向配箍率	101
3.3.4	混凝土应力状态	102
3.3.5	粘结强度的计算	102
3.4	粘结滑移本构关系	102
3.5	粘结滑移机理	104
3.5.1	界面层的形成及主要特征	104
3.5.2	高强高性能混凝土对界面的强化机理	105
3.5.3	型钢高强高性能混凝土界面粘结滑移机理	107
3.6	简化的粘结滑移分析模型	108
3.7	型钢与混凝土界面剪力传递机理	111
3.7.1	界面基本模型的建立	111
3.7.2	理论推导	113
3.7.3	粘结应力分布及裂缝开展	117

3.7.4 粘结锚固承载力最大值	119
3.7.5 有效锚固长度	119
参考文献	120

中篇 构件篇

4 SRHPC 简支梁受力机理及承载能力分析	123
4.1 试验概况	123
4.1.1 试件设计与制作	124
4.1.2 加载方案与测试内容	125
4.1.3 试件截面应变	126
4.1.4 荷载-挠度曲线	131
4.2 SRHPC 梁抗剪性能试验研究	131
4.2.1 试验结果及分析	132
4.2.2 影响抗剪承载力的主要因素	134
4.2.3 抗剪设计方法的比较	136
4.2.4 抗剪承载力建议计算公式与试验验证	138
4.2.5 结论	140
4.3 SRHPC 梁抗弯性能试验研究	140
4.3.1 试验结果及分析	141
4.3.2 型钢与混凝土界面间的剪切计算	143
4.3.3 影响抗弯承载力的主要因素	147
4.3.4 正截面抗弯承载力计算公式与试验验证	149
4.4 SRHPC 梁的刚度与变形计算	157
4.4.1 现有的刚度计算方法	157
4.4.2 变形特点及影响因素分析	157
4.4.3 抗弯刚度计算	159
4.5 SRHPC 梁的裂缝宽度计算	161
4.5.1 裂缝特征	161
4.5.2 抗裂度验算	162
4.5.3 裂缝宽度计算公式	162
参考文献	166
5 SRHPC 柱偏心受压试验研究	168
5.1 试件设计与制作	168

5.1.1	试件设计	168
5.1.2	材料性能	168
5.2	试验加载与测试方案	169
5.2.1	试验加载方案	169
5.2.2	试验测试方案	170
5.3	试验结果与分析	170
5.3.1	受力过程与破坏形态	170
5.3.2	承载力	173
5.3.3	挠度	174
5.3.4	型钢和钢筋应变	176
5.3.5	混凝土应变	178
5.4	偏心受压柱正截面承载力计算	180
5.4.1	修正平截面假定分析	180
5.4.2	型钢应力分析	183
5.4.3	承载力计算模型	184
5.4.4	计算结果	189
	参考文献	189
6	SRHPC 框架柱抗震性能试验研究	190
6.1	引言	190
6.2	试件设计参数	190
6.3	试件设计与制作	192
6.3.1	试件设计	192
6.3.2	材料性能试验	193
6.4	试验加载与测试方案	193
6.4.1	试验加载装置	193
6.4.2	试验加载制度	194
6.4.3	试验测试内容及方法	195
6.4.4	数据采集	196
6.5	试验结果及分析	196
6.5.1	试验过程及破坏特征	196
6.5.2	荷载-位移滞回曲线	201
6.5.3	骨架曲线	205
6.5.4	耗能能力	210

6.5.5	强度衰减	213
6.5.6	延性	216
6.6	小结	219
	参考文献	220
7	水平地震作用下 SRHPC 框架柱的受力机理及承载能力分析	221
7.1	概述	221
7.2	水平承载力试验研究	221
7.2.1	承载力试验结果	221
7.2.2	混凝土和型钢应变分布	222
7.2.3	承载力影响因素	226
7.3	试件受力机理分析	228
7.3.1	弯曲破坏受力机理	229
7.3.2	剪切粘结破坏受力机理	230
7.3.3	剪切斜压破坏受力机理	232
7.4	试件承载力计算模型	235
7.4.1	轴向力分配	235
7.4.2	弯曲破坏承载力	239
7.4.3	剪切粘结破坏承载力	240
7.4.4	剪切斜压破坏承载力	243
7.4.5	承载力实用计算方法	246
	参考文献	248
8	SRHPC 框架节点抗震性能试验研究	249
8.1	试验概况	249
8.1.1	试件设计	249
8.1.2	试验装置、材料特性及测试方案	250
8.2	试验结果与分析	253
8.2.1	试验过程及破坏特征	253
8.2.2	滞回曲线	257
8.2.3	骨架曲线	258
8.3	节点受力机理分析	260
8.3.1	屈服点和破坏点的确定	260
8.3.2	节点变形分析	260
8.3.3	节点应变分析	263

8.3.4 延性及耗能性能	268
参考文献	271
9 SRHPC 框架节点受力机理及承载力分析	272
9.1 节点受力分析及总水平剪力计算	272
9.1.1 节点域受力分析	272
9.1.2 总水平剪力的计算	273
9.1.3 节点各部分承担的水平剪力	274
9.2 节点抗剪计算理论	276
9.2.1 受力机理	276
9.2.2 节点各部分抗剪计算模式	279
9.2.3 高强高性能混凝土强度折减系数	281
9.3 影响因素分析	283
9.3.1 混凝土强度	283
9.3.2 轴压力	284
9.4 节点抗裂机理与承载力计算	285
9.4.1 试验结果	285
9.4.2 抗裂承载力的计算理论与公式	286
9.5 节点抗剪机理与承载能力计算	287
9.5.1 型钢的抗剪承载力	288
9.5.2 箍筋的抗剪承载力	288
9.5.3 核心区混凝土的抗剪承载力	289
9.5.4 SRHPC 框架节点抗剪承载力	290
9.5.5 梁柱应力传递	290
参考文献	291

下 篇 结 构 篇

10 SRHPC 框架结构拟静力试验研究	295
10.1 试件设计	295
10.2 试验方案设计	297
10.2.1 试验目的	297
10.2.2 加载方案	298
10.2.3 测试方案	300
10.3 材性试验	300

10.3.1	钢材力学性能	300
10.3.2	混凝土力学性能	303
10.4	试验过程描述	303
10.4.1	破坏过程与特征	303
10.4.2	滞回曲线与骨架曲线	305
10.5	试验结果分析	306
10.5.1	抗震承载能力	306
10.5.2	变形能力	308
10.5.3	延性系数	309
10.5.4	刚度变化	309
10.5.5	耗能能力	310
10.6	考虑循环退化效应的 SRHPC 框架的滞回模型	312
10.6.1	骨架曲线	313
10.6.2	滞回模型与规则	314
	参考文献	316
11	SRHPC 框架拟动力试验与弹塑性时程分析	318
11.1	试验模型概况	318
11.2	地震波的选择	319
11.3	加载方案	319
11.4	试验结果及分析	320
11.4.1	裂缝发展与塑性铰形成	320
11.4.2	结构反应分析	322
11.4.3	层间变形能力	324
11.4.4	耗能分布	325
11.5	动力特性	326
11.5.1	试验数据分析	326
11.5.2	动力特性参数识别	328
11.6	SRHPC 框架结构的弹塑性时程分析	329
11.6.1	结构分析模型	329
11.6.2	计算结果与分析	330
	参考文献	331

上篇 材料篇

1 适用于型钢混凝土结构的高强高性能混凝土研究

1.1 概 述

高强高性能混凝土是继高强混凝土之后的一项新技术产品,它是在高强混凝土研究与应用达到较高水平的基础上发展起来的,高强高性能混凝土具有强度高、耐久性好、工作性能优异等优良性能。高强高性能混凝土技术的发展与高质量水泥、矿物掺合料、高效减水剂等核心技术的开发研究是分不开的^[1~3]。国内外有关高强高性能混凝土的研究应用与发展很快,100MPa、150MPa 乃至更高强度的高强高性能混凝土已在工程中得到了应用。高强高性能混凝土之所以成为当前研究发展的重点和备受关注的焦点,还与世界对混凝土耐久性的迫切需求以及人类日益关心的可持续发展有关。

型钢高强高性能混凝土结构是新型高技术混凝土在型钢混凝土结构中的应用,充分利用了高强高性能混凝土优异的力学性能和耐久性能,相比普通混凝土显著改进了型钢与混凝土的协同工作性能。本章研究将为型钢高强高性能混凝土结构设计计算理论研究提供所用混凝土材料的基本性能指标,研究成果将为高强高性能混凝土在型钢混凝土结构中的广泛应用奠定必要的基础。

本章研究了今后型钢混凝土结构工程中将会大量应用的 C60~C100 高强高性能混凝土。主要研究内容包括:

- (1) 高强高性能混凝土的高强化、高性能化途径与机理。
- (2) 原材料的选择及高强高性能混凝土配合比。
- (3) 混凝土拌和物性能。
- (4) 高强高性能混凝土力学性能及耐久性能。

1.2 技术途径

1.2.1 性能要求

本章主要从提高结构耐久性及型钢与混凝土之间粘结性能的角度研制适用于型钢混凝土结构的高强高性能混凝土,以使在型钢混凝土结构设计中,构件表面尽可能地不加设或少设置剪切连接件,充分利用所研制混凝土与型钢之间良好的粘