



自定心抗震结构体系 —理论、试验、模拟与应用

Self-Centering Seismic-Resistant Structural Systems:
Theory, Experiment, Simulation and Application

郭彤 宋良龙 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

自定心抗震结构体系

——理论、试验、模拟与应用

郭 彤 宋良龙 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

传统的抗震设计基于延性设计理念,结构通过自身的延性变形吸收地震能量,以避免结构倒塌,但残余变形较大,给震后修复带来困难,且直接和间接损失严重。通过后张无黏结预应力及附加耗能元件,以实现震后自动复位和主体结构无损的自定心抗震结构是近年来出现的新型结构体系,代表了土木工程结构未来的重要发展方向之一。本书是一部较为全面系统地介绍自定心抗震结构体系研究以及工程应用的专著,内容包括:自定心混凝土框架梁柱节点的理论研究、试验研究和数值模拟;自定心混凝土框架的抗震设计方法、振动台试验、长期性能试验和抗震性能评估;自定心混凝土墙的理论研究、试验研究、数值模拟、抗震设计方法、地震易损性研究和工程应用;自定心混凝土桥墩的理论研究、试验研究、数值模拟和地震易损性研究。

本书适用于结构设计人员及高等院校土木工程专业教师、研究生。

图书在版编目(CIP)数据

自定心抗震结构体系:理论、试验、模拟与应用/郭彤,宋良龙编著. — 北京:科学出版社,2018.12

ISBN 978-7-03-059299-6

I. ①自… II. ①郭… ②宋… III. ①抗震结构-结构设计-研究 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 251016 号

责任编辑:李涪汁 邢 华/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

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>

北京画中画印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年12月第一次印刷 印张:25 1/2

字数:606 000

定价:179.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自定心抗震结构(self-centering earthquake-resistant structure)是将现代预应力技术和耗能减震技术应用到传统建筑和桥梁结构中的一种新型结构体系,主要包括自定心框架、剪力墙和桥墩等典型结构形式。传统的抗震结构体系基于延性设计理念,通过结构自身的塑性变形来吸收地震能量,避免结构在地震中倒塌,从而保护生命和财产的安全。然而,在这一指导思想下设计出来的结构往往在地震后存在较大的结构损伤和残余变形,给震后修复带来困难,并造成巨大的直接和间接经济损失。自定心抗震结构通过后张无黏结预应力及附加耗能元件,可以有效控制结构在地震中的“最大变形”和减少结构的震后“残余变形”,实现震后自动复位和主体结构无损的目的。不管从设计理念还是具体的构造措施,自定心抗震结构和传统基于延性抗震设计理念的结构均有较大不同。自定心抗震结构的经济性主要体现在震后修复方面,从全寿命周期成本的角度来考虑,这一类结构是具有发展潜力的新型结构形式,是土木工程结构未来的重要发展方向之一。

本书由以下内容构成:第一篇(第1~11章)为自定心混凝土框架结构,对梁柱节点的力学行为进行了理论分析,推导了梁端轴力、剪力、弯矩以及节点张开后转动刚度的表达式,建立了节点梁端弯矩-相对转角关系和侧向力-侧向位移关系的理论分析模型;提出了梁柱节点的改进构造形式,对梁柱节点和整体框架的抗震性能进行了试验和数值模拟研究;建立了自定心混凝土框架基于性能的抗震设计方法,基于弹塑性分析方法和概率分析方法对自定心混凝土框架的抗震性能进行了评估;进行了自定心混凝土框架的长期性能试验,并研究了自定心混凝土框架的时变抗震性能。第二篇(第12~20章)为自定心混凝土墙结构,针对墙体倾覆弯矩-墙顶侧移角和倾覆弯矩-墙底转角关系,推导了结构在各受力阶段的变形、位移和抗侧刚度等计算公式;对自定心混凝土抗震墙进行了低周反复加载试验和数值模拟研究;建立了自定心混凝土墙的抗震设计方法,对自定心混凝土抗震墙进行了地震易损性分析和生命周期成本分析;介绍了采用自定心混凝土抗震墙加固框架结构的工程应用,并对加固前后结构的抗震性能进行了评估。第三篇(第21~25章)为自定心混凝土桥墩结构,针对桥墩的顶点侧向力-侧向位移关系,分别基于精细模型和简化模型,推导了结构在各受力阶段的变形、位移和抗侧刚度的计算公式;对自定心混凝土桥墩在循环荷载下的抗震性能进行了试验和数值模拟研究;基于地震易损性分析方法,对自定心混凝土桥墩的抗震性能进行了评估。

本书的研究内容得到国家自然科学基金(项目编号:51078075、51378107、51678147和51708172)、国家重点研发计划子课题(项目编号:2016YFC0701400)和江苏省自然科学基金(项目编号:BK20170890)等科研项目的资助,在此表示衷心的感谢。作者的研究

生张国栋、曹志亮、顾羽、徐振宽、卢硕、王磊和郝要文在试验和理论分析中做了大量工作，研究生施欣和王际帅参与了文稿格式编排工作。本书在撰写的过程中引用了大量的参考文献，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免存在不足之处，同时部分内容有一定的探索性质，敬请广大读者批评指正。

作 者

2018年6月

目 录

前言

第一篇 自定心混凝土框架

第 1 章 绪论——自定心框架	3
1.1 研究背景和意义	3
1.2 国内外相关领域的研究发展和现状	4
1.2.1 无黏结预应力混凝土框架	4
1.2.2 自定心钢抗弯框架	10
参考文献	13
第 2 章 自定心混凝土框架梁柱节点的理论研究	16
2.1 节点基本构造及工作机理	16
2.2 节点梁端弯矩-相对转角关系	17
2.3 梁端轴力、剪力与弯矩的表达式	18
2.3.1 节点隔离体	18
2.3.2 摩擦耗能件的力-变形关系	19
2.3.3 节点张开后的抗弯刚度	20
2.4 节点梁端弯矩-相对转角关系分析模型	22
2.4.1 消压弯矩	22
2.4.2 临界张开弯矩	23
2.4.3 节点张开	23
2.4.4 节点卸载	24
2.4.5 节点闭合	24
2.5 相对能量耗散率	24
2.6 本章小结	24
参考文献	25
第 3 章 自定心混凝土框架梁柱节点的低周反复加载试验(I)	26
3.1 试验概况	26
3.1.1 试件设计	26
3.1.2 材性参数	27
3.1.3 加载方式与测点布置	28
3.1.4 试验参数	29
3.2 试验结果与分析	30

3.2.1	破坏模式	30
3.2.2	滞回曲线	31
3.2.3	钢绞线预应力对节点性能的影响	35
3.2.4	摩擦力对节点滞回耗能的影响	35
3.2.5	钢绞线力与梁柱相对转角的关系	35
3.2.6	预压装配式节点的受力特点	37
3.2.7	传统整体浇筑式梁柱节点的滞回特性	39
3.2.8	钢套的应力分布	40
3.2.9	无螺旋箍构件的滞回特性	41
3.3	理论分析和试验结果的比较	41
3.4	本章小结	43
	参考文献	44
第4章	自定心混凝土框架梁柱节点的低周反复加载试验(II)	45
4.1	节点基本构造	45
4.2	试验概况	45
4.2.1	试件设计	45
4.2.2	加载方式与测点布置	48
4.2.3	材料属性参数	49
4.2.4	试验参数	50
4.3	试验结果与分析	50
4.4	本章小结	53
	参考文献	54
第5章	自定心混凝土框架梁柱节点的数值模拟	55
5.1	节点的数值分析模型	55
5.1.1	梁柱构件的模拟	56
5.1.2	节点张开与闭合的模拟	59
5.1.3	节点核心区的模拟	59
5.1.4	耗能单元的模拟	61
5.1.5	预应力及其他荷载的模拟	61
5.1.6	预应力钢绞线拉断的模拟	62
5.2	试验验证	62
5.3	本章小结	64
	参考文献	65
第6章	自定心混凝土框架的低周反复加载试验	66
6.1	试验概况	66
6.1.1	试件设计	66
6.1.2	加载方式与测点布置	70
6.1.3	材料属性参数	72

6.1.4 试验参数	73
6.2 试验结果与分析	74
6.2.1 现浇框架与柱底固结自定心框架	74
6.2.2 单跨全预应力自定心框架	79
6.2.3 双跨全预应力自定心框架	88
6.3 本章小结	91
参考文献	93
第7章 自定心混凝土框架基于性能的抗震设计方法	94
7.1 结构的性能水准和极限状态	94
7.2 地震动作用水准	94
7.3 设计目标	95
7.4 性能化设计步骤	97
7.5 原型结构设计	100
7.6 地震波选取	101
7.7 设计方法验证	103
7.8 本章小结	106
参考文献	107
第8章 自定心混凝土框架的振动台试验	108
8.1 模型概况	108
8.1.1 相似比确定	108
8.1.2 模型设计	109
8.1.3 模型构件浇筑	113
8.1.4 构件安装	113
8.2 材料参数	118
8.2.1 混凝土	118
8.2.2 钢材	119
8.3 测试系统	119
8.3.1 加速度传感器	119
8.3.2 位移传感器	120
8.3.3 应变片	121
8.3.4 锚索测力计	121
8.4 加载方案	122
8.4.1 地震波选取	122
8.4.2 试验方案	122
8.5 试验结果分析	125
8.5.1 振动台保真度分析	125
8.5.2 试验现象分析	126
8.5.3 结构整体响应分析	128

8.5.4 滞回性能	133
8.5.5 结构局部响应分析	133
8.6 本章小结	140
参考文献	141
第9章 自定心混凝土框架的抗震性能评估	142
9.1 框架分析模型	142
9.1.1 原型结构	142
9.1.2 数值模型	143
9.2 非线性静力分析	144
9.3 非线性动力时程分析	146
9.3.1 结构整体响应	146
9.3.2 结构局部响应	152
9.4 本章小结	155
参考文献	156
第10章 自定心混凝土框架的抗震风险评估	157
10.1 基于概率的抗震性能评估理论	157
10.1.1 结构易损性	157
10.1.2 地震危险性	158
10.1.3 结构抗震风险	158
10.2 增量动力分析	159
10.3 结构响应的概率分析	160
10.4 结构易损性分析	161
10.5 结构抗震风险分析	162
10.6 本章小结	162
参考文献	163
第11章 自定心混凝土框架的长期性能研究	164
11.1 自定心混凝土框架的长期性能试验	164
11.1.1 试验概况	164
11.1.2 试验结果与分析	169
11.2 自定心混凝土框架长期性能的数值模拟	174
11.2.1 混凝土徐变收缩模型	174
11.2.2 应力松弛模型	175
11.2.3 预应力混凝土简支梁长期性能试验的数值模拟	176
11.2.4 自定心框架长期性能试验的数值模拟	177
11.3 自定心混凝土框架的时变抗震性能评估	181
11.3.1 自定心混凝土框架设计	181
11.3.2 自定心混凝土框架长期性能	182
11.3.3 地震动选取	183

11.3.4 时变抗震性能评估	184
11.4 本章小结	185
参考文献	186

第二篇 自定心混凝土墙

第 12 章 绪论——自定心墙	189
12.1 研究背景和意义	189
12.2 国内外相关领域的研究发展和现状	191
12.2.1 传统钢筋混凝土剪力墙及其改进	191
12.2.2 无黏结预应力混凝土墙	191
参考文献	197
第 13 章 自定心混凝土墙的理论研究	200
13.1 结构的基本构造及工作机理	200
13.2 理论分析中的前提假设	202
13.3 循环荷载下的弯矩-转角关系	202
13.4 摩擦耗能件的力-变形关系	203
13.5 结构的临界和极限状态	204
13.6 各阶段的受力分析模型	205
13.6.1 墙底的消压弯矩	205
13.6.2 墙底张开临界状态	207
13.6.3 墙底间隙张开(第一根钢绞线尚未屈服)	209
13.6.4 卸载阶段(包括墙底闭合临界状态)	214
13.6.5 混凝土墙内第一根钢绞线屈服的临界状态	215
13.7 本章小结	215
参考文献	216
第 14 章 自定心混凝土墙的低周反复加载试验(I)	217
14.1 试验概况	217
14.2 试件设计	218
14.2.1 钢筋混凝土墙板	218
14.2.2 摩擦耗能件	219
14.2.3 钢套	219
14.2.4 混凝土墙体面外支撑系统	220
14.3 材性参数	221
14.4 测点布置	221
14.5 试验参数及加载制度	222
14.5.1 试验参数	222
14.5.2 加载制度	224

14.6	试验结果与分析	224
14.6.1	拼装顺序对于结构力学行为的影响	224
14.6.2	墙体自身弹性刚度对于结构抗侧刚度的影响	225
14.6.3	摩擦力对于结构耗能的影响	226
14.6.4	预应力对于结构自定心能力及抗侧刚度的影响	227
14.6.5	试验中滞回曲线与理论模型的差别	228
14.6.6	钢绞线中预应力与墙顶侧移角及墙底转角之间的关系	229
14.6.7	侧向荷载作用下的墙体变形	231
14.6.8	钢套边缘应力分布	232
14.6.9	试验过程中结构的损伤情况	234
14.7	理论分析和试验结果的比较	235
14.8	本章小结	237
	参考文献	237
第 15 章	自定心混凝土墙的低周反复加载试验(II)	238
15.1	试验概况	238
15.2	试件设计	239
15.2.1	预制混凝土墙面板	239
15.2.2	摩擦耗能件	239
15.2.3	墙底钢套	239
15.3	材料参数	241
15.4	测点布置、试验参数及加载制度	242
15.4.1	测点布置	242
15.4.2	试验参数	243
15.4.3	加载制度	244
15.5	试验结果与分析	245
15.5.1	摩擦力对自定心混凝土墙结构耗能的影响	245
15.5.2	预应力对自定心结构抗倾覆能力及残余变形的影响	246
15.5.3	预应力与墙底转角的关系	248
15.5.4	墙底钢套边缘的应变分布	249
15.5.5	侧向荷载下自定心混凝土墙的变形	250
15.5.6	自定心混凝土墙的整体变形	250
15.5.7	自定心混凝土墙的损伤情况	253
15.6	本章小结	254
	参考文献	254
第 16 章	自定心混凝土墙的数值模拟	255
16.1	自定心混凝土墙的数值分析模型	255
16.1.1	混凝土墙体的模拟	256
16.1.2	两侧钢柱的模拟	257

16.1.3 耗能元件(摩擦耗能件)的模拟	257
16.1.4 预应力的模拟	258
16.1.5 预应力钢绞线拉断的模拟	258
16.1.6 试验中各种误差的模拟	258
16.2 试验验证	260
16.3 本章小结	261
参考文献	262
第 17 章 自定心混凝土墙的抗震设计方法	263
17.1 结构的基本构造及其工作原理	263
17.2 设计中的前提假设	264
17.3 自定心抗震墙基于性能的抗震设计	265
17.3.1 设计目标	265
17.3.2 设计步骤	266
17.4 有限元模拟	274
17.4.1 模型概况	274
17.4.2 模型验证	275
17.5 设计实例	275
17.6 非线性动力时程分析	277
17.6.1 地震动记录选取	277
17.6.2 结果分析	277
17.7 本章小结	280
参考文献	280
第 18 章 自定心混凝土墙的地震易损性研究	282
18.1 结构地震易损性分析的基本原理	282
18.2 算例分析	283
18.2.1 工程概况	283
18.2.2 自定心混凝土墙的设计参数	285
18.2.3 有限元数值模型	286
18.3 地震易损性分析	286
18.3.1 地震动记录	286
18.3.2 结构地震易损性分析	288
18.4 本章小结	291
参考文献	292
第 19 章 自定心混凝土墙的生命周期成本研究	293
19.1 建设项目的生命周期成本	293
19.1.1 生命周期的含义	293
19.1.2 生命周期的阶段划分	294
19.1.3 生命周期成本的分类	294

19.2	生命周期成本分析的基本原理	295
19.2.1	生命周期成本分析的必要性	295
19.2.2	基于性能的地震工程方法论	296
19.2.3	基于地震易损性的生命周期成本	297
19.3	基于概率的生命周期成本计算模型	297
19.3.1	地震作用下的生命周期成本	297
19.3.2	极限状态超越概率	298
19.4	算例分析	298
19.4.1	建设工程项目概况	298
19.4.2	生命周期成本的参数确定	299
19.4.3	两种方案的生命周期成本计算分析	301
19.5	本章小结	304
	参考文献	305
第 20 章	自定心混凝土墙的工程应用	306
20.1	宿迁某学校综合楼连廊改造工程	306
20.1.1	工程简介	306
20.1.2	自定心抗震墙	307
20.1.3	摩擦耗能件	308
20.2	连廊加固后动力特性测试	308
20.2.1	测试仪器及设备	308
20.2.2	测试结果	309
20.3	连廊加固前后的数值模型	310
20.4	连廊加固前后的动力时程分析对比	311
20.4.1	地震动记录选取	311
20.4.2	结果对比	312
20.5	连廊加固前后的地震易损性分析对比	317
20.6	本章小结	323
	参考文献	323

第三篇 自定心混凝土桥墩

第 21 章	绪论——自定心桥墩	327
21.1	研究背景和意义	327
21.2	国内外相关领域的研究发展和现状	328
21.2.1	摇摆式桥墩	328
21.2.2	柱底固结预应力桥墩	329
21.2.3	干接缝预应力混凝土桥墩	330
	参考文献	335

第 22 章 自定心混凝土桥墩的理论研究	339
22.1 桥墩基本构造和工作机理	339
22.2 理论分析中采用的假设	341
22.3 循环荷载下桥墩力-位移关系	341
22.4 结构的临界状态	342
22.5 各阶段受力分析模型(精细模型)	343
22.5.1 初始状态加载至消压状态(0 点→1 点)	343
22.5.2 消压后加载至初始卸载点(1 点→2 点)	344
22.5.3 极限位移点(3 点)的确定	347
22.5.4 卸载至拼接面闭合(2 点→4 点)	347
22.5.5 拼接面闭合至完全卸载(4 点→5 点)	347
22.5.6 循环加载计算流程	348
22.6 各阶段受力分析模型(简化模型)	348
22.6.1 初始状态加载至消压状态(0 点→1 点)	348
22.6.2 消压后加载至初始卸载点(1 点→2 点)	349
22.6.3 卸载至拼接面闭合(2 点→4 点)	349
22.6.4 拼接面闭合至完全卸载(4 点→5 点)	350
22.6.5 循环加载计算流程	350
22.7 混凝土应力应变曲线	350
22.8 耗能件轴力	351
22.8.1 符号定义(k_{TEN} 、 k_{COM} 、 σ_y)	352
22.8.2 $F_{j-1} > 0$, $\delta d_j > 0$	353
22.8.3 $F_{j-1} > 0$, $\delta d_j < 0$	354
22.8.4 $F_{j-1} < 0$, $\delta d_j > 0$	354
22.8.5 $F_{j-1} < 0$, $\delta d_j < 0$	354
22.9 拼接面张开后桥墩的侧向刚度	355
22.9.1 割线刚度	355
22.9.2 切线刚度	357
22.10 本章小结	357
参考文献	357
第 23 章 自定心混凝土桥墩的低周反复加载试验	359
23.1 试验概况	359
23.2 试件制作	360
23.2.1 钢筋混凝土墩柱	360
23.2.2 耗能件	361
23.3 材性参数	362
23.4 测点布置	363
23.5 试验参数及加载制度	364

23.5.1	试验参数	364
23.5.2	加载制度	365
23.6	试验结果与分析	365
23.6.1	初始预应力大小对结构的影响	365
23.6.2	耗能件构造对试验结果的影响	366
23.6.3	预应力筋刚度对结构的影响	367
23.6.4	GFRP 套筒对结构的影响	368
23.6.5	RC 试件的试验结果	369
23.6.6	BFRP 筋的力与桥墩位移的关系	369
23.6.7	柱底接触长度和底部转角的关系	370
23.6.8	GFRP 套筒边缘应力分布	371
23.7	理论分析和试验结果比较	372
23.8	本章小结	374
	参考文献	375
第 24 章	自定心混凝土桥墩的数值模拟	376
24.1	自定心混凝土桥墩的数值分析模型	376
24.1.1	混凝土墩柱的模拟	377
24.1.2	耗能件(铝棒)模拟	380
24.1.3	预应力的模拟	381
24.1.4	试验中的误差模拟	382
24.2	与试验结果对比	382
24.3	本章小结	385
	参考文献	386
第 25 章	自定心混凝土桥墩的地震易损性研究	387
25.1	结构易损性	387
25.2	桥墩数值模型	388
25.3	抗震能力分析	389
25.4	增量动力分析	390
25.5	本章小结	393
	参考文献	393

第一篇 自定心混凝土框架

