

*Performance-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Structure*

# 基于性能的钢筋混凝土结构抗震

——理论研究、试验研究、设计方法研究与工程应用

韩小雷 季 静 著



张 小 雷

中国建筑工业出版社

本书受国家自然科学基金，亚热带建筑科学国家重点实验室基金，广东省自然科学基金，广州市科技计划项目基金资助

# 基于性能的钢筋混凝土结构抗震

——理论研究、试验研究、设计方法研究  
与工程应用

韩小雷 季 静 著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于性能的钢筋混凝土结构抗震——理论研究、试验研究、设计方法研究与工程应用/韩小雷, 季静著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 2

ISBN 978-7-112-23158-4

I. ①基… II. ①韩… ②季… III. ①钢筋混凝土结构-抗震-研究 IV. ①TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 005380 号

本书从理论研究、试验研究、设计方法研究和工程应用四个角度, 对基于性能的钢筋混凝土结构抗震展开全面研究。主要内容包括基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计方法、构件变形限值的理论研究、基于试验结果的构件变形限值统计分析研究、典型构件的拟静力试验研究、RC 构件变形限值的验证与修正、强震作用下结构弹塑性分析、地震波的选取方法、设计方法在各类典型结构中的应用、结构变形限值研究、工程实例、结构构件破坏形态预测。

本书可供土木工程专业师生以及从事建筑结构抗震设计的工程人员参考。

责任编辑: 徐晓飞 辛海丽

责任校对: 王雪竹

## 基于性能的钢筋混凝土结构抗震

——理论研究、试验研究、设计方法研究与工程应用

韩小雷 季 静 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 39 字数: 948 千字

2019 年 5 月第一版 2019 年 5 月第一次印刷

定价: 138.00 元

ISBN 978-7-112-23158-4

(33240)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

本书经历了近 30 年的研究过程，前 15 年在黑暗中摸索，走了很多弯路，同时也积累了一些经验教训，近 15 年逐渐形成了基于性能的钢筋混凝土结构抗震理论体系。通过仔细的计算分析、大量的试验研究和复杂的工程应用，同时参考了国内外许多专家学者的理论研究和试验结果，在关键技术上取得了突破（地震波选取、纤维模型修正、基于构件的结构弹塑性分析和构件变形指标限值确定等）。在构件层次建立了精细的基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计方法；开发了具有自主知识产权的结构设计软件；通过 1000 多个典型结构的算例分析和 35 个超限高层建筑结构抗震设计的工程应用，证明了本理论体系、设计方法和分析软件的正确性和可行性；编制了广东省标准《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程》。目前，省内外许多复杂高层建筑结构抗震设计参考了本研究成果。

现行规范的小震设计包含了小震承载力设计+抗大震构造措施，实际上是一个包含抗大震内容的设计，但对大震作用未能进行量化分析。基于性能的抗震设计思想，实际上是在现行规范小震承载力设计+抗大震构造措施的基础上，补充了中、大震作用下的拟弹性分析和弹塑性分析，对延性破坏构件进行变形验算，对脆性破坏构件进行承载力复核，确保结构在大震作用下的安全性。

在研究和应用过程中，许多专家学者给予了宝贵的意见和建议。容柏生院士从哲学的高度为我们指明了方向，魏琏教授从技术的角度给予了我们无私的帮助，坚定了我们克服困难的信心和决心，方小丹设计大师从工程的角度让我们看到自己的不足，促使我们不断努力，陈星设计大师的建议让我们将关键技术进一步完善，等等。

本书共分十一章，从理论研究、试验研究、设计方法研究和工程应用四个角度，对基于性能的钢筋混凝土结构抗震展开全面研究。

第 1 章在研究的基础上提炼出基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计方法。

第 2 章从有限元法的角度，提出钢筋混凝土梁、柱、一字形剪力墙、T 形剪力墙、L 形剪力墙、工字形剪力墙的破坏形态划分准则和变形指标限值。

第 3 章通过所收集到的国内外钢筋混凝土梁、柱、剪力墙构件抗震试验结果，统计、回归出钢筋混凝土梁、柱、剪力墙的破坏形态划分准则和变形指标限值。

第 4 章在第 2、3 章研究成果的基础上，针对影响构件破坏形态和变形指标限值的参数，设计了 9 个梁试件、12 个柱试件、20 个一字形剪力墙试件、12 个 T 形剪力墙试件、12 个 L 形剪力墙试件和 20 个工字形剪力墙试件，进行拟静力试验，得到了各试件的破坏形态和变形指标限值，直观地建立了钢筋混凝土梁、柱、剪力墙构件变形大小—构件承载能力—构件损坏程度的对应关系。

第 5 章通过第 4 章的试验结果，验证第 2、3 章的研究成果，并对第 2、3 章研究成果进行了修正，提出工程应用可接受的构件破坏形态划分准则和变形指标限值。

第6章提出改进的钢筋及混凝土材料本构模型、修正的构件宏观纤维模型，论述钢筋混凝土结构弹塑性分析基本原理；采用纤维模型对构件试验结果进行计算模拟；通过钢筋混凝土框架结构、剪力墙结构以及框-剪力墙结构足尺模型的振动台试验结果，验证了所提出的修正纤维模型材料本构及其参数取值的合理性。

第7章通过美国、日本、欧洲等国强震观测台网收集了23万余条地震记录，进行统计分析，提出了与中国规范接轨的不同场地条件的6~10s地震影响系数曲线，完善了中国规范的地震反应谱。考虑中国规范对罕遇地震作用下特征周期增加0.05s的要求，对阻尼比为0.05特征周期为0.25s、0.3s、0.35s、0.4s、0.45s、0.5s、0.6s、0.7s、0.8s和0.95s的各类场地，选出与规范反应谱在统计意义上相符的强震记录，组成弹塑性时程分析的地震波库。

第8章根据中国现行规范设计了一批典型的钢筋混凝土结构，包括27个框架结构、27个剪力墙结构、27个框-剪力墙结构、31个框支剪力墙结构以及18个框-筒结构，采用第一章的设计方法对上述结构模型进行了性能化复核，展示了基于性能的抗震设计方法的可操作性和适用性。

第9章通过对比日本、美国、欧洲、澳洲、中国台湾、中国香港以及中国大陆现行规范在风荷载作用下结构变形控制准则，提出适用于我国规范体系的风荷载作用下结构刚度控制准则；通过对比美国与中国规范在地震作用下结构变形控制准则，提出适用于我国规范体系的地震作用下结构刚度控制准则。

第10章通过八个实际工程应用案例，包括国内的6度、7度（7.5度）、8度（8.5度）设防区和国外的工程，展示本研究提出的基于性能的结构抗震设计方法的适用性和特色。

第11章对框架结构和剪力墙结构构件破坏形态进行预测。

我们在2013年出版了关于结构抗震的第一本学术专著《基于性能的超限高层建筑结构抗震设计》，经过五年多的深入研究，完善了基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计，本书是上述专著的姊妹篇，同时本书也是广东省标准《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程》的编制背景材料。

鉴于钢筋混凝土结构弹塑性力学性能的复杂性，且作者水平有限，本书的研究和应用不可避免存在不足之处。欢迎该领域的专家、学者、工程师及广大研究人员批评指正，欢迎来电（Tel: 020-87114206）、来信（Email: xlhan@scut.edu.cn）交流讨论。希望你们参与和讨论，能够帮助我们进一步完善研究和应用，促进我国基于性能的结构抗震不断向前发展。

参加第2章编写的还有戚永乐博士、王鹭亚硕士、杨万硕士、李伟琛硕士，参加第3章编写的还有崔济东博士，参加第4章编写的还有孙典龙硕士、龚涣钧硕士、陆怀坤硕士、韦艳丽硕士、林乐斌硕士、潘洲池硕士、谢舜光硕士，参加第5章编写的还有崔济东博士、林乐斌硕士、潘洲池硕士，参加第6章编写的还有林金樾硕士、欧秋望硕士、黄狄昉博士生、邱焱坤硕士生，参加第7章编写的还有尤涛硕士，参加第8章编写的还有刘婉筠硕士、罗煜硕士、谢灿东硕士、肖新瑜硕士，参加第9章编写的还有程炜硕士、杨光硕士，参加第10章编写的还有贺锐波高级工程师、彭樵斌高级工程师、李建乐硕士、林哲

硕士、何伟球硕士、黄世怡高级工程师，参加第 11 章编写的还有黎梓健硕士。

本书的理论研究和工程应用是我和我的团队（华南理工大学高层建筑结构研究所）所有老师和研究生共同努力的结果。在此特别感谢郑宜硕士、陈学伟博士、黄超博士、戴金华博士、林生逸硕士、沈雪龙硕士、杨程硕士、陈彬彬博士生、王响博士、刘寒硕士、曹源硕士、周新显博士、乔升访博士、王素裹博士、劳晓春博士、万海涛博士等，是他们的聪明才智和创新性研究，将整个团队的研究工作和工程应用不断向前推进，同时感谢张一璐硕士生对本书的编辑做了大量的工作。

韩小雷 季 静

2018 年 9 月于华南理工大学高层建筑结构研究所

# 目 录

第 1 章 基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计方法 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 抗震性能目标及抗震性能水准 .....	1
1.3 设计方法 .....	3
1.4 变形指标限值 .....	4
1.5 地震波的选取 .....	7
第 2 章 构件变形限值的理论研究 .....	8
2.1 概述 .....	8
2.2 RC 梁变形指标限值的理论研究 .....	13
2.3 RC 柱变形指标限值的理论研究 .....	14
2.4 一字形 RC 剪力墙变形指标限值的理论研究 .....	17
2.5 L 形 RC 剪力墙变形指标限值的理论研究 .....	19
2.6 T 形 RC 剪力墙变形指标限值的理论研究 .....	27
2.7 工字形 RC 剪力墙变形指标限值的理论研究 .....	33
第 3 章 基于试验结果的构件变形限值统计分析研究 .....	44
3.1 概述 .....	44
3.2 RC 梁、柱及剪力墙试验数据整理 .....	44
3.3 RC 梁、柱及剪力墙的破坏形态划分方法 .....	50
3.4 RC 梁、柱及剪力墙变形性能指标限值的定义 .....	53
3.5 RC 梁、柱及剪力墙关键性能点变形限值的回归分析 .....	54
3.6 RC 梁、柱及剪力墙位移角指标限值表及其易损性验证 .....	58
第 4 章 典型构件的拟静力试验研究 .....	72
4.1 概况 .....	72
4.2 梁构件变形限值的试验研究 .....	86
4.3 柱构件变形限值的试验研究 .....	100
4.4 一字形剪力墙构件变形限值的试验研究 .....	117
4.5 T 形剪力墙构件变形限值的试验研究 .....	144
4.6 L 形剪力墙构件变形限值的试验研究 .....	167
4.7 工字形剪力墙构件变形限值的试验研究 .....	192
第 5 章 RC 构件变形限值的验证与修正 .....	223
5.1 概述 .....	223
5.2 RC 构件变形限值的验证 .....	223

5.3	RC 构件变形限值的修正 .....	226
<b>第 6 章</b>	<b>强震作用下结构弹塑性分析 .....</b>	<b>229</b>
6.1	概述 .....	229
6.2	钢筋、混凝土材料本构 .....	229
6.3	钢筋混凝土结构弹塑性分析 .....	235
6.4	钢筋混凝土构件宏观纤维模型 .....	235
6.5	梁、柱、剪力墙构件计算模拟 .....	237
6.6	框架结构 .....	250
6.7	剪力墙结构 .....	263
6.8	足尺框架-剪力墙结构振动台试验模拟分析 .....	270
<b>第 7 章</b>	<b>地震波的选取方法 .....</b>	<b>280</b>
7.1	概述 .....	280
7.2	结构周期 $0 < T < 6s$ .....	280
7.3	结构周期 $6s < T < 10s$ .....	302
<b>第 8 章</b>	<b>设计方法在各类典型结构中的应用 .....</b>	<b>311</b>
8.1	概述 .....	311
8.2	设计方法在框架结构中的应用 .....	311
8.3	设计方法在剪力墙结构中的应用 .....	329
8.4	设计方法在框-剪结构中的应用 .....	344
8.5	设计方法在框支剪力墙结构中的应用 .....	358
8.6	设计方法在框-筒结构中的应用 .....	366
<b>第 9 章</b>	<b>结构变形限值研究 .....</b>	<b>381</b>
9.1	概述 .....	381
9.2	风荷载作用下结构变形控制 .....	381
9.3	小震作用下结构变形控制 .....	403
<b>第 10 章</b>	<b>工程实例 .....</b>	<b>440</b>
10.1	概述 .....	440
10.2	横琴信德大厦 .....	440
10.3	中山皇爵广场 .....	458
10.4	印尼雅加达某工程 .....	480
10.5	保利·大江郡 E 地块项目 .....	499
10.6	保利宁湖-云顶假日 .....	519
10.7	海口某高层住宅 .....	532
10.8	某厚板转换结构抗震安全性复核 .....	555
10.9	南沙建滔广场 .....	575
<b>第 11 章</b>	<b>结构构件破坏形态预测 .....</b>	<b>598</b>
11.1	框架结构构件破坏形态 .....	598
11.2	剪力墙结构构件破坏形态 .....	607



# 第 1 章 基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计方法

## 1.1 概 述

基于性能的结构抗震设计方法 (Performance-Based Seismic Design of Structure) 可以根据不同重现期 (小震、中震、大震) 的地震作用, 对结构、构件或材料的性能 (内力、应力、位移、变形、应变等) 进行弹性或弹塑性定量细化分析, 从而可以预测结构、构件或材料在地震作用下的受力情况损坏程度。通过定量分析强震中结构和构件变形的的方法代替目前规范中通过构造措施定性预测结构延性的方法, 真正实现基于构件层次的强震定量设计, 从而可以准确预测结构抗倒塌安全性及抗倒塌概率, 是钢筋混凝土结构抗震设计的发展方向。

该设计方法主要分为以下步骤:

1. 根据建筑物的重要性或使用要求, 从宏观的角度设定建筑结构的抗震性能目标, 通常从高到低分为 A、B、C、D 四个等级;
2. 根据抗震性能目标确定不同重现期地震作用下的抗震性能水准, 抗震性能水准从高到低可分为 1、2、3、4、5 五个等级;
3. 根据抗震性能水准确定结构构件的承载力需求和变形需求;
4. 通过小震设计和构件构造, 确定结构构件截面和配筋;
5. 通过中震、大震作用下定量、细化的结构弹性或弹塑性分析, 复核构件承载力和变形能力。

我国目前抗震规范采用“三水准、两阶段”的设计方法, 该方法对建筑物的重要性、结构高度、结构体系以及结构规则性有具体的限制条件, 对于以下不符合规范适用范围的建筑结构, 应采用基于性能的抗震设计方法进行结构抗震设计。

- (1) 甲类建筑、超限高层建筑、大跨建筑以及特别不规则建筑的结构抗震设计;
- (2) 除以上四类建筑外, 乙类建筑关键部位和薄弱部位的结构抗震设计;
- (3) 业主为实现特殊造型或满足震后特殊功能要求的建筑, 其整体结构抗震设计或关键部位、薄弱部位结构抗震设计。

## 1.2 抗震性能目标及抗震性能水准

抗震性能目标从高到低可分为 A、B、C、D 四个等级, A 级需要较高的承载力, 延性需求较低; D 级需要较高的延性, 承载力需求较低。性能目标 D 是抗震设计的最低要求。

通常可以根据建筑物的重要性和使用功能确定抗震性能目标：

A 级，甲类建筑或业主要求地震时和地震后使用功能不能中断的建筑。

B 级，乙类建筑或业主要求地震后使用功能必须短期内恢复的建筑。

C 级，丙类建筑或延性较好的乙类建筑。

D 级，丁类建筑或延性较好的丙类建筑。

不同设防烈度、不同场地土类别上的两栋相同建筑，在罕遇地震作用下的最低性能水准需求应该是相同的。

与抗震性能目标对应的抗震性能水准如表 1-2-1 所示。

最低抗震性能水准

表 1-2-1

性能目标 性能水准 地震水准	A	B	C	D
	多遇地震	1	1	1
设防烈度地震	1	2	3	4
预估的罕遇地震	2	3	4	5

抗震性能水准与结构、构件震后损坏程度的关系如表 1-2-2 所示。

各性能水准结构、构件预期的震后性能状况

表 1-2-2

结构抗震性能水准	宏观损坏程度	损坏部位			继续使用的可能性
		关键构件	普通竖向构件和重要水平构件	耗能构件	
1	完好、无损坏	无损坏	无损坏	无损坏	不需修理即可继续使用
2	基本完好、轻微损坏	无损坏	无损坏	轻微损坏	稍加修理即可继续使用
3	轻度损坏	轻微损坏	轻微损坏	轻度损坏、部分中度损坏	一般修理后可继续使用
4	中度损坏	轻度损坏	部分中度损坏	中度损坏、部分严重损坏	修复或加固后可继续使用
5	比较严重损坏	中度损坏	部分比较严重损坏	比较严重损坏、部分严重损坏	需排除大修

关键构件、普通竖向构件、重要水平构件以及耗能构件应根据工程结构受力特点并结合设计经验进行划分。

结构构件的承载力和延性可以互补，罕遇地震所对应的抗震性能水准应与抗震等级所对应的构造措施对应，抗震性能水准 2 不应低于抗震等级四级，抗震性能水准 3 不宜低于抗震等级三级，抗震性能水准 4 不宜低于抗震等级二级，抗震性能水准 5 不宜低于抗震等级一级。

基于性能的抗震设计方法可以采用两水准（多遇地震、罕遇地震）、两阶段（多遇地震弹性承载力设计、罕遇地震弹塑性承载力、变形复核）的方法进行结构抗震设计。

对于续建、改建、扩建建筑的新建结构设计应符合《基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计规程》（以下简称为《性能抗规》）；对于续建、改建和扩建建筑的已建结构，当按原设计规范满足小震承载力需求，同时满足大震变形复核要求时，可不进行抗震构造加固。

## 1.3 设计方法

基于性能的抗震设计方法包括小震弹性设计和中、大震弹塑性复核两部分，对应各抗震性能水准，构件承载力和变形能力的要求如表 1-3-1 所示。

构件设计方法

表 1-3-1

性能水准 \ 构件		关键构件	普通竖向构件和重要水平构件	耗能构件
1	正截面	弹性设计	弹性设计	弹性设计
	斜截面	弹性设计	弹性设计	弹性设计
2	正截面	弹性设计	弹性设计	不屈服设计
	斜截面	弹性设计	弹性设计	不屈服设计
3	正截面	不屈服设计 或变形校核 (L2、Z2、SW2)	不屈服设计 或变形校核 (L3、Z3、SW3)	极限设计 或变形校核 (L5)
	斜截面	弹性设计	不屈服设计	极限设计
4	正截面	变形校核 (L3、Z3、SW3)	变形校核 (L4、Z4、SW4)	变形校核 (L6)
	斜截面	不屈服设计	极限设计	最小截面设计
5	正截面	变形校核 (L3、Z3、SW3)	变形校核 (L5、Z5、SW5)	变形校核 (L6)
	斜截面	不屈服设计	最小截面设计	最小截面设计

对性能水准 1、2、3 采用弹性方法计算时，构件采用承载力进行设计；对性能水准 3、4、5 采用弹塑性方法计算时，延性破坏构件采用构件变形限值复核构件破坏程度，脆性破坏构件采用承载力复核构件性能。

1. 多遇地震作用下弹性设计时，计算公式应符合式 (1-3-1) 的规定：

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} + \psi_w \gamma_w S_{wk} \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (1-3-1)$$

式中  $R_d$ 、 $\gamma_{RE}$ ——分别为构件承载力设计值和承载力抗震调整系数；

$S_{GE}$ ——重力荷载代表值的效应， $\gamma_G$ 、 $\gamma_{Eh}$ 、 $\gamma_{Ev}$ 、 $\gamma_w$  分别为重力荷载、水平地震作用、竖向地震作用和风荷载分项系数；

$S_{Ehk}$ ——水平地震作用效应标准值，尚应乘以相应的增大系数、调整系数；

$S_{Evk}$ ——竖向地震作用效应标准值，尚应乘以相应的增大系数、调整系数；

$S_{wk}$ ——风荷载效应标准值；

$\psi_w$ ——风荷载组合值系数，应取 0.2。

2. 设防烈度地震或预估的罕遇地震作用下弹性设计时，计算公式应符合式 (1-3-2) 的规定：

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk}^* + \gamma_{Ev} S_{Evk}^* \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (1-3-2)$$

式中  $S_{Ehk}^*$ ——水平地震作用效应标准值，不考虑与抗震等级有关的增大系数；

$S_{Evk}^*$ ——竖向地震作用效应标准值，不考虑与抗震等级有关的增大系数。

3. 设防烈度地震或预估的罕遇地震作用下不屈服设计时，计算公式应符合式 (1-3-3) 的规定，水平长悬臂结构和大跨度结构中的关键构件正截面承载力尚应符合式 (1-3-4) 的规定：

$$S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4S_{Evk}^* \leq R_k \quad (1-3-3)$$

$$S_{GE} + 0.4S_{Ehk}^* + S_{Evk}^* \leq R_k \quad (1-3-4)$$

式中  $R_k$ ——构件承载力标准值，按材料强度标准值计算。

4. 设防烈度地震或预估的罕遇地震作用下极限设计时，计算公式应符合式 (1-3-5) 的规定，水平长悬臂结构和大跨度结构中的关键构件正截面承载力尚应符合式 (1-3-6) 的规定：

$$S_{GE} + S_{Ehk}^* + 0.4S_{Evk}^* \leq R_u \quad (1-3-5)$$

$$S_{GE} + 0.4S_{Ehk}^* + S_{Evk}^* \leq R_u \quad (1-3-6)$$

式中  $R_u$ ——构件承载力极限值，计算时材料强度可取高于标准值的平均值。

5. 设防烈度地震或预估的罕遇地震作用下最小截面设计，钢筋混凝土竖向构件的受剪截面应符合式 (1-3-7) 的规定，钢-混凝土组合剪力墙的受剪截面应符合式 (1-3-8) 的规定。

$$V_{GE} + V_{Ek}^* \leq 0.15f_{ck}bh_0 \quad (1-3-7)$$

$$(V_{GE} + V_{Ek}^*) - (0.25f_{ak}A_a + 0.5f_{spk}A_{sp}) \leq 0.15f_{ck}bh_0 \quad (1-3-8)$$

式中  $V_{GE}$ ——重力荷载作用下的构件剪力 (N)；

$V_{Ek}^*$ ——地震作用标准值的构件剪力 (N)，不需要考虑与抗震等级有关的增大系数；

$f_{ck}$ ——混凝土轴心抗拉强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)；

$f_{ak}$ ——剪力墙端部暗柱中型钢的强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)；

$A_a$ ——剪力墙端部暗柱中型钢的截面面积 (mm<sup>2</sup>)；

$f_{spk}$ ——剪力墙墙内钢板的强度标准值 (N/mm<sup>2</sup>)；

$A_{sp}$ ——剪力墙墙内钢板的横截面面积 (mm<sup>2</sup>)。

6. 构件变形校核时，验算公式应符合式 (1-3-9) 的规定：

$$\delta \leq [\delta] \quad (1-3-9)$$

式中  $\delta$ ——构件在 1~6 不同性能水准下的变形需求；

$[\delta]$ ——与构件允许破坏程度对应的构件变形限值。

## 1.4 变形指标限值

变形指标限值是评判结构、构件和材料性能状态的重要指标，从宏观到微观可以分为结构变形指标限值（层间位移角、结构顶点位移角）、构件变形指标限值（构件弹塑性转角）和材料变形指标限值（材料应变）。

### 1. 材料应变限值

弯曲破坏和弯剪破坏的构件，不同损坏程度对应的应变限值不应超过表 1-4-1 的规定。

不同损坏程度的材料应变限值

表 1-4-1

材料	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中等损坏	比较严重损坏	严重损坏
混凝土压应变	0.002	0.004	0.0064	$\epsilon_{cu}$ 且 $<0.020$	$1.5\epsilon_{cu}$	$1.8\epsilon_{cu}$
钢筋拉应变	$f_y/E_s$	0.015	0.030	$0.6\epsilon_{su}$ 且 $<0.05$	$0.9\epsilon_{su}$ 且 $<0.080$	0.100
钢材应变	$f_y/E_s$	0.010	0.015	0.025	0.040	0.060

## 2. 构件的变形限值

钢筋混凝土结构的构件可以分为梁、柱、剪力墙三种。

梁构件的变形限值见表 1-4-2。

钢筋混凝土梁的塑性转角限值

表 1-4-2

构件参数		性能水准					
		无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
弯控							
$m$	$\rho_v$						
$\leq 0.2$	$\geq 0.012$	0.004	0.016	0.024	0.031	0.039	0.044
$\geq 0.8$	$\geq 0.012$	0.004	0.018	0.029	0.039	0.049	0.054
$\leq 0.2$	$\leq 0.001$	0.004	0.010	0.011	0.013	0.014	0.017
$\geq 0.8$	$\leq 0.001$	0.004	0.012	0.016	0.020	0.024	0.029
弯剪控							
$m$	$\rho_{sv}$						
$\leq 0.5$	$\geq 0.008$	0.004	0.009	0.014	0.019	0.024	0.026
$\geq 2.5$	$\geq 0.008$	0.004	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016
$\leq 0.5$	$\leq 0.0005$	0.004	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016
$\geq 2.5$	$\leq 0.0005$	0.004	0.005	0.007	0.008	0.009	0.012

注：1. 表中可以采用线性插值方法得到相应的位移角限值；

2. 当构件具有多种可能的破坏形态时，则采用表中所列的较小值。

柱构件的变形限值见表 1-4-3。

钢筋混凝土柱的塑性转角限值

表 1-4-3

构件参数		性能水准					
		无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
弯控							
$\bar{n}$	$\rho_v$						
$\leq 0.1$	$\geq 0.021$	0.004	0.018	0.027	0.037	0.046	0.056
$= 0.6$	$\geq 0.021$	0.004	0.013	0.018	0.022	0.027	0.030
$\leq 0.1$	$\leq 0.001$	0.004	0.015	0.022	0.029	0.036	0.042
$= 0.6$	$\leq 0.001$	0.004	0.009	0.011	0.012	0.013	0.014

续表

构件参数		性能水准					
		无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
弯剪控							
$-\bar{n}$	$m$						
$\leq 0.1$	$\leq 0.6$	0.003	0.013	0.020	0.026	0.033	0.040
$= 0.6$	$\leq 0.6$	0.003	0.009	0.011	0.014	0.016	0.018
$\leq 0.1$	$\geq 1.0$	0.003	0.011	0.016	0.021	0.026	0.028
$= 0.6$	$\geq 1.0$	0.003	0.008	0.009	0.011	0.012	0.014

- 注：1. 表中可以采用线性插值方法得到相应的位移角限值；  
 2. 当构件具有多种可能的破坏形态时，则采用表中所列的较小值；  
 3. 轴压力系数 $\bar{n}$ 大于0.6时，RC柱位移角限值为表中 $\bar{n}$ 等于0.6的数值乘以 $2.5(1-\bar{n})$ 。

剪力墙构件的变形限值见表 1-4-4 采用。

钢筋混凝土剪力墙的位移角限值

表 1-4-4

构件参数		性能水准					
		无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
弯控							
$-\bar{n}$	$\rho_v$						
$\leq 0.1$	$\geq 0.025$	0.003	0.011	0.016	0.022	0.025	0.028
$= 0.4$	$\geq 0.025$	0.003	0.010	0.013	0.017	0.020	0.022
$\leq 0.1$	$\leq 0.004$	0.003	0.008	0.010	0.011	0.013	0.015
$= 0.4$	$\leq 0.004$	0.003	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011
弯剪控							
$-\bar{n}$	$m$						
$\leq 0.1$	$\leq 0.5$	0.003	0.010	0.013	0.017	0.020	0.021
$= 0.3$	$\leq 0.5$	0.003	0.008	0.011	0.013	0.015	0.016
$\leq 0.1$	$= 2.0$	0.003	0.008	0.010	0.011	0.013	0.015
$= 0.3$	$= 2.0$	0.003	0.007	0.008	0.010	0.011	0.013

- 注：1. 表中可以采用线性插值方法得到相应的位移角限值；  
 2. 当构件具有多种可能的破坏形态时，则采用表中所列的较小值；  
 3. 弯控轴压力系数 $\bar{n}$ 大于0.4时，RC剪力墙位移角限值为表中 $\bar{n}$ 等于0.4的数值乘以 $1.7(1-\bar{n})$ ，弯剪控轴压力系数 $\bar{n}$ 大于0.3时，RC剪力墙位移角限值为表中 $\bar{n}$ 等于0.3的数值乘以 $1.4(1-\bar{n})$ 。

### 3. 结构变形限值

多遇地震作用下楼层层间位移角最大值不宜大于1/500，计算中以楼层最大的水平位移差计算，不扣除整体弯曲变形。计算地震作用下的层间位移时不考虑偶然偏心的影响。

罕遇地震作用下楼层最大有害层间位移角限值应符合表 1-4-5 的要求。

有害层间位移角限值

表 1-4-5

框架	1/50
框架—剪力墙、框架—核心筒、板—柱—剪力墙、筒中筒、剪力墙、带加强层的巨型框架—核心筒	1/250
部分框支剪力墙结构的转换层	1/350

## 1.5 地震波的选择

规范反应谱是规范对结构抗震安全性的要求，所选地震波的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符。

本书第7章通过对美国和日本强震记录地震波库的地震波进行统计回归，结合中国规范反应谱的取值，针对不同场地条件，建立了与中国规范反应谱一致的地震波库，进行结构弹性和弹塑性地震反应计算时可直接选用。

弹性时程分析时，每条时程曲线计算得到的结构底部剪力与振型分解反应谱法计算得到的底部剪力误差不应大于15%，不少于七条时程曲线计算得到的结构底部剪力平均值与振型分解反应谱法计算得到的底部剪力误差不应大于10%。

当输入地震加速度时程少于7条时，取地震作用效应最大值；当输入地震加速度时程不少于7条时，可取地震作用效应平均值；当输入地震加速度时程不少于14条，且来自同一次地震动的地震加速度时程不超过2条时，可排除1条（或2条同一次地震的不同场地加速度时程）地震作用效应特别大的结果，同时排除1条（或2条）地震作用效应最小的结果，取剩余地震作用效应平均值。

# 第 2 章 构件变形限值的理论研究

## 2.1 概 述

钢筋混凝土结构由钢筋混凝土构件组成，钢筋混凝土构件由钢筋和混凝土两种材料组成，材料特性（屈服强度、强度最大值、极限强度、屈服应变、极限应变等）决定了构件性能（承载力、延性、损坏程度等）。因此，可以通过钢筋混凝土弹塑性理论和计算力学原理建立构件的承载能力、变形能力、损坏程度与材料应变的对应关系，同时可以建立构件变形与构件损坏程度的对应关系，从而通过地震作用下的构件弹塑性变形预测构件的损坏程度和结构抗倒塌能力，这是基于性能的钢筋混凝土结构抗震设计的关键技术。

本章从理论研究的角度提出确定钢筋混凝土构件（梁、柱、“一”字剪力墙、“T”形剪力墙、“L”形剪力墙和工字形剪力墙）变形指标限值的方法。首先，阐述基于有限元模拟的研究方法，说明有限元分析模型的参数选取；接着，基于材料应变确定划分构件不同性能水准变形限值的原则。在此基础上，提出 6 种钢筋混凝土基本构件破坏形态的划分方法以及变形指标限值的确定方法。

### 2.1.1 钢筋混凝土构件有限元分析方法

理论研究采用有限元模拟的方法，其优点在于能较为准确地捕捉到构件受力、变形、破坏的主要特征点，反映构件的真实状况；同时，数值模拟能涵盖大量具有不同参数的试件，并且不需要高昂的时间和经济成本。本系列理论研究采用通用有限元软件 ABAQUS，对各不同类型、不同参数的构件进行非线性有限元分析，得到每一个构件的破坏形态和变形指标限值；通过统计分析，提出每一类构件破坏形态的划分标准和变形指标限值的确定方法，为钢筋混凝土结构基于性能的抗震设计提供技术参考。

构件的模型采用细观有限元模拟方法，即构件混凝土部分采用细观立体单元，构件的钢筋部分采用桁架单元，两者的连接采用自由度耦合的方法，在 ABAQUS 中通过 embedded 约束实现。混凝土材料本构采用损伤塑性本构（Concrete Damaged Plasticity），能较好地描述混凝土在进入高度非线性后的行为；钢筋采用二折线模型，考虑了钢筋屈服后的强化。由于计算中加载方式为单调加载，材料滞回准则对加载的计算结果基本没有影响。混凝土塑性损伤本构模型的关键参数取值见表 2-1-1。

材料参数取值

表 2-1-1

参 数	取 值	参 数	取 值
Dilation Angle (膨胀角)	38°	K(影响屈服面形状的系数)	2/3
Eccentricity (偏心率)	0.1	Viscosity Parameter(黏性系数)	0.0001~0.0005
$f_{t0}/f_{c0}$ (双轴强度与单轴强度比)	1.16		



在以上参数中,混凝土膨胀角的取值并未有统一的定论,大部分学者取值在 $36^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间<sup>[1]</sup>。Jankowiak<sup>[2]</sup>等通过对材料试验数据的最优化拟合,认为取 $38^{\circ}$ 是最合理的。其他参数大部分是半实验半经验的取值,此处选取的数值均为最常用的。

加载方式采用单调推覆加载,首先在构件正上方以力加载的方式施加一轴力(梁除外),然后以位移加载的方式进行水平推覆加载,水平加载过程中轴力保持不变。采用单调加载的主要原因是其能较为可靠地反映构件的峰值承载能力以及变形能力,虽然相对于往复加载两者会有所偏差,但差别并不大;再者,为了进行大量的数值模拟,实现往复加载需要的计算成本非常巨大,因此,此处采用单调加载的方式进行。往复加载对构件变形性能的影响通过材料低周往复疲劳的应变限值折减得以间接考虑。

## 2.1.2 性能水准划分准则

构件性能水准指在给定地震地面运动下构件应该具有的承载能力或变形能力,最终将破坏程度与修复的费用相关联,实现对结构安全和经济损失的评价和控制。我国《抗规》<sup>[3]</sup>附录M中给出了实现抗震性能设计目标的参考方法,其中将性能目标(性能要求)分为4等,根据对破坏状态的描述将性能水准分为6级,分别为:完好、基本完好、轻微损坏、轻中等破坏、中等破坏和不严重破坏。其中,根据《抗规》<sup>[3]</sup>的描述,对于不严重破坏水准承载能力下降少于10%。但试验证明水平承载能力的下降并不意味着结构的倒塌,对于延性较好的构件,水平承载能力在峰值后下降速度缓慢,对应的变形能力是可以利用的;美国ASCE 41-13<sup>[4]</sup>中将弯曲控制的RC剪力墙防止倒塌性能点CP定义在图2-1-1中的E点,而E点水平承载能力 $c$ 为等效屈服水平承载能力的0.20~0.75倍,具体值与构件参数有关。结合试验和美国规范,本研究将规范中的第6个性能水准不严重破坏划分为比较严重破坏和严重破坏,得到RC构件共7个性能水准以及6个划分性能水准的变形指标限值,见图2-1-2。

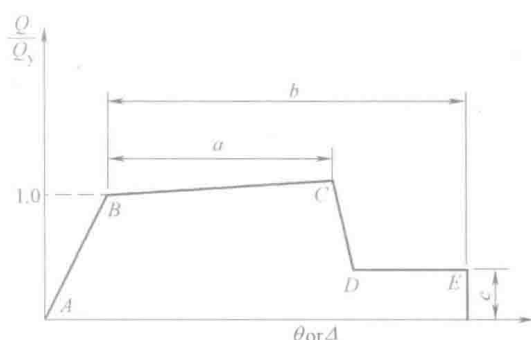


图 2-1-1 ASCE 41-13 弯曲控制剪力墙等效骨架曲线



图 2-1-2 7 个性能水准和 6 个性能水准限值